UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA ELÉTRICA - TELECOMUNICAÇÕES

Luan Martins Corrêa

Análise comparativa da cobertura e da qualidade de enlace das redes móveis 4G LTE e 5G NR no campus da UFJF em Juiz de Fora: estudo de caso

Juiz de Fora
2026

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Corrêa, Luan.

Análise comparativa da cobertura e da qualidade de enlace das redes móveis 4G LTE e 5G NR no campus da UFJF em Juiz de Fora: estudo de caso / Luan Martins Corrêa. – 2026.

46 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Moisés Vidal Ribeiro

Coorientador: Dr. Luís Guilherme da Silva Costa

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Engenharia Elétrica - Telecomunicações, 2026.

1. Redes móveis. 2. Quarta geração. 3. Quinta geração. 4. Análise de cobertura. 5. Análise da qualidade de enlace. I. Ribeiro, Moisés Vidal, orient. II. Costa, Luís Guilherme da Silva , coorient. III. Título.

Luan Martins Corrêa

Análise comparativa da cobertura e da qualidade de enlace das redes móveis 4G LTE e 5G NR no campus da UFJF em Juiz de Fora: estudo de caso

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, Habilitação Telecomunicações, como requisito para aprovação na disciplina ENE064 - Trabalho de Conclusão de Curso

Orientador: Prof. Dr. Moisés Vidal Ribeiro

Coorientador: Dr. Luís Guilherme da Silva Costa

Juiz de Fora

2026

Luan Martins Corrêa

Análise comparativa da cobertura e da qualidade de enlace das redes móveis 4G LTE e 5G NR no campus da UFJF em Juiz de Fora: estudo de caso

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, Habilitação Telecomunicações, como requisito para aprovação na disciplina ENE064 - Trabalho de Conclusão de Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Moisés Vidal Ribeiro - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Luís Guilherme da Silva Costa - Coorientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Mateus de Lima Filomeno
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Ulysses Roberto Chaves Vitor
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família, em especial aos meus pais, Angelita e Marcelo, pelo apoio emocional e financeiro incondicional ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Agradeço também à minha namorada, Maísa, pelo incentivo constante nos momentos mais desafiadores deste processo, e pelo carinho e companheirismo que tornaram essa jornada mais leve.

Agradeço aos pesquisadores e profissionais listados na bibliografia deste trabalho. Sem o amplo esforço acadêmico e profissional consultados ao decorrer deste trabalho, o mesmo teria sido impossível.

Nesse mesmo espírito, expresso meus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Moisés, meu orientador, não apenas pela orientação neste trabalho, mas também pelo convite para integrar o Laboratórios de Comunicações como bolsista. Essa oportunidade foi fundamental para aprofundar meus conhecimentos em telecomunicações e impulsionar meu crescimento acadêmico e profissional. Agradeço especialmente pela confiança depositada em mim e pelas orientações constantes que nortearam tanto este trabalho quanto meu desenvolvimento pessoal. Sou igualmente grato ao Dr. Luís Guilherme, meu coorientador, cuja disponibilidade e expertise foram inestimáveis para a realização deste trabalho. Seus conhecimentos técnicos e sugestões metodológicas contribuíram significativamente para a qualidade deste trabalho de conclusão de curso. Agradeço também aos professores membros da banca, Prof. Dr. Mateus e Prof. Dr. Ulysses.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora e ao LCOM pela excelente infraestrutura e pelo ambiente colaborativo que a equipe proporcionou durante a execução deste projeto. Minha gratidão estende-se a todos os professores do curso de engenharia elétrica, cujos ensinamentos forneceram a base essencial para este trabalho. Também reconheço o importante papel de todos os funcionários da instituição, cuja dedicação contribui para o funcionamento eficiente da universidade.

"Gatsby acreditava na luz verde, no futuro que ano a ano recua diante de nós. Ele nos escapou então, mas não importa, amanhã correremos mais rápido, estenderemos nossos braços mais longe."

— F. Scott Fitzgerald, *O Grande Gatsby*, 1925

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se um estudo de caso da cobertura e da qualidade do enlace rádio das redes móveis de quarta geração (do inglês, *Fourth-Generation Long-Term Evolution* - 4G LTE) e de quinta geração (do inglês, *Fifth-Generation New Radio* - 5G NR) no campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), na cidade de Juiz de Fora, considerando ambientes internos e externos. A avaliação foi realizada por meio de uma campanha de medições com scanner de redes móveis, permitindo a identificação de operadoras, bandas de frequência, portadoras e métricas da camada física associadas às tecnologias avaliadas. Os dados coletados foram analisados por meio de funções de distribuição cumulativa empíricas, aplicadas aos valores de potência recebida do sinal de referência e relação sinal-interferência-mais-ruído (do inglês, *signal-to-interference-plus-noise ratio*), além da eficiência espectral estimada a partir dos valores medidos de SINR. Os resultados mostram que os ambientes internos apresentam degradação significativa da cobertura e da qualidade do enlace, especialmente devido às perdas por penetração em edificações, obstruções internas, propagação multipercurso e presença de sinais interferentes. Em redes móveis 4G LTE, observou-se forte dependência do desempenho em relação à banda de frequência e à operadora, com algumas bandas apresentando valores de eficiência espectral abaixo dos critérios de referência adotados. Em redes móveis 5G NR, a operação na banda $n78$ apresentou um desempenho melhorado no ambiente externo, mas permaneceu limitado no ambiente interno. De modo geral, os resultados evidenciam que a cobertura e a qualidade do enlace rádio no campus da UFJF, apresentam comportamento heterogêneo, caracterizado por melhor desempenho em ambientes externos e por limitações mais acentuadas em ambientes internos.

Palavras-chave: redes móveis, quarta geração, quinta geração, análise de cobertura, análise da qualidade de enlace.

ABSTRACT

This work presents a case study on the analysis of the coverage and radio link quality of Fourth-Generation Long-Term Evolution (4G LTE) and Fifth-Generation New Radio (5G NR) mobile networks on the campus of the Federal University of Juiz de Fora, in the city of Juiz de Fora, considering indoor and outdoor environments. The evaluation was conducted through a measurement campaign using a mobile network scanner, enabling identification of operators, frequency bands, carriers, and physical-layer metrics associated with the evaluated technologies. The collected data were analyzed using empirical cumulative distribution functions, applied to the values of the reference signal received power (RSRP), and signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) metrics, in addition to the spectral efficiency estimated from the measured SINR values. The results show that indoor environments exhibit significant degradation in coverage and link quality, particularly due to building penetration losses, indoor obstructions, multipath propagation, and interfering signals. In 4G LTE mobile networks, a strong dependence of performance on the frequency band and operator was observed, with some bands presenting spectral efficiency values below the adopted reference criteria. In 5G NR mobile networks, operation in the $n78$ band showed remarkable performance outdoors but remained more limited indoors. Overall, the results show that coverage and radio link quality on the UFJF campus exhibit heterogeneous behavior, with better performance outdoors and more pronounced limitations indoors.

Keywords: coverage analysis, fourth generation, fifth generation, link quality analysis, mobile networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapeamento do CRS na grade de recursos do LTE. 18
Figura 2 – Estrutura do SSB para o 5G NR. 19
Figura 3 – Configuração do sistema de medição: antena GPS/GNSS, scanner TSMA-6B, antena receptora e laptop com software de controle. 24
Figura 4 – Mapa do trajeto das medições externas no campus da UFJF. 25
Figura 5 – Inventário de canais LTE e NR das operadoras no campus da UFJF. . 27
Figura 6 – ECDFs dos valores medidos de RSRP (dBm) do 4G LTE para todas as operadoras. 30
Figura 7 – ECDFs dos valores medidos de SINR (dB) do 4G LTE para todas as operadoras. 31
Figura 8 – ECDFs dos valores medidos de SS-RSRP (dBm) e SINR (dB) do 5G NR para todas as operadoras. 34
Figura 9 – ECDFs dos valores de eficiência espectral estimada (bps/Hz), calculada com base no SINR (dB), para o 4G LTE em ambiente interno. 36
Figura 10 – ECDFs dos valores de eficiência espectral estimada (bps/Hz), calculada com base no SINR (dB), para o 4G LTE em ambiente externo. 37
Figura 11 – ECDFs dos valores de eficiência espectral estimada (bps/Hz), calculada com base no SINR (dB), para o 5G NR. 38
Figura 12 – Gráficos de dispersão entre RSRP e SINR para redes LTE, considerando as operadoras CLARO, TIM e VIVO nos cenários interno e externo. . . . 40
Figura 13 – Gráficos de dispersão entre SS-RSRP e SINR para redes 5G NR nos cenários interno e externo. 41
Figura 14 – Plantas baixas arquitetônicas do Edifício Itamar Franco 46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Bandas E-UTRA: especificações e aplicações. 16
Tabela 2 – Classificação dos valores medidos de RSRP e SINR. 28
Tabela 3 – Quinto percentil da eficiência espectral estimada para medições internas em LTE. 37
Tabela 4 – Quinto percentil da eficiência espectral estimada para medições externas em LTE. 38
Tabela 5 – Quinto percentil da eficiência espectral estimada em NR. 39

LISTA DE ABREVIATURAS

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ACI	interferência de canal adjacente (do inglês, *Adjacent Channel Interference*)
CRS	sinal de referência específico de célula (do inglês, *Cell-specific Reference Signal*)
ECDF	função de distribuição cumulativa empírica (do inglês, *Empirical Cumulative Distribution Function*)
eNB	estação rádio base evoluída (do inglês, *Evolved Node B*)
ERB	estação rádio base
E-UTRA	acesso via rádio terrestre universal evoluído (do inglês, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access*)
gNB	estação rádio base de nova geração (do inglês, *Next Generation Node B*)
GNSS	sistema de navegação global por satélite (do inglês, *Global Navigation Satellite System*)
GPS	sistema de posicionamento global (do inglês, *Global Positioning System*)
HSPA	acesso de pacote de alta velocidade (do inglês, *High Speed Packet Access*)
IoT	Internet das Coisas (do inglês, *Internet of Things*)
IP	protocolo de internet (do inglês, *Internet Protocol*)
ITU	União Internacional de Telecomunicações (do inglês, *International Telecommunication Union*)
KPI	indicador-chave de desempenho (do inglês, *Key Performance Indicator*)
LTE	evolução de longo prazo (do inglês, *Long Term Evolution*)
MCS	esquema de modulação e codificação (do inglês, *Modulation and Coding Scheme*)
MIB	bloco de informação mestre (do inglês, *Master Information Block*)
NR	novo rádio (do inglês, *New Radio*)
OFDM	multiplexação por divisão ortogonal de frequência (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)
OFDMA	acesso múltiplo por divisão ortogonal de frequência (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*)
PBCH	canal físico de radiodifusão (do inglês, *Physical Broadcast Channel*)
PCI	identidade física de célula (do inglês, *Physical Cell Identity*)
PSS	sinal de sincronismo primário (do inglês, *Primary Synchronization Signal*)
RE	elemento de recurso (do inglês, *Resource Element*)
RF	rádio frequência (do inglês, *Radio Frequency*)

RSRP	potência do sinal recebido de referência (do inglês, *Reference Signal*)
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UMTS	sistema universal de telecomunicações móveis (do inglês, *Universal Mobile Telecommunications System*)
Wi-Fi	conexão sem fio padrão IEEE 802.11 (do inglês, *Wireless Fidelity*)

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO 12
1.1 OBJETIVOS 13
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 13
2 FUNDAMENTOS DA AVALIAÇÃO DE REDES MÓVEIS . 15
2.1 REDES DE COMUNICAÇÃO MÓVEL 15
2.2 SINAIS DE REFEÊNCIA EM REDES MÓVEIS 17
2.2.1 Sinais de referência 4G LTE 17
2.2.2 Sinais de referência 5G NR 18
2.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO EM REDES MÓVEIS 20
3 CAMPANHA DE MEDIÇÃO 23
3.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO 23
3.2 DESCRIÇÃO DA CAMPANHA 24
3.2.1 Ambiente Interno — Edifício Engenheiro Itamar Franco 24
3.2.2 Ambiente Externo — Campus da UFJF 25
4 RESULTADOS NUMÉRICOS 26
4.1 INVENTÁRIO DE CANAIS 26
4.2 ANÁLISE POR ECDFs 27
4.2.1 Análise Estatística de Cobertura e Qualidade de Enlace LTE . 28
4.2.1.1 Desempenho de Cobertura de Enlace 28
4.2.1.2 Desempenho da Qualidade de Enlace 30
4.2.2 Análise Estatística de Cobertura e Qualidade de Enlace NR . . 32
4.2.2.1 Desempenho de Cobertura de Enlace 32
4.2.2.2 Desempenho de Qualidade de Enlace 33
4.2.3 Eficiência Espectral 34
4.2.3.1 Eficiência Espectral do LTE 35
4.2.3.2 Eficiência Espectral do NR 36
4.3 GRÁFICOS DE DISPERSÃO ENTRE SINR E POTÊNCIA RECEBIDA 39
5 CONCLUSÕES 43
REFERÊNCIAS 45
A Anexo A - Plantas baixas arquitetônicas do Edifício Itamar Franco. 46

1 INTRODUÇÃO

As redes móveis de quarta geração (4G) e quinta geração (5G) constituem parte essencial da infraestrutura contemporânea de comunicações, pois viabilizam a conectividade entre pessoas, sistemas, máquinas e dispositivos no contexto da Internet das Coisas (do inglês, *Internet of Things*) (IoT) e da Indústria 4.0. A tecnologia evolução de longo prazo (do inglês, *Long Term Evolution*) (LTE) associada às redes 4G [1], e a tecnologia novo rádio (do inglês, *New Radio*) (NR) associada às redes 5G [2] continuam em expansão e coexistem nas redes comerciais, o que exige planejamento, monitoramento e adaptações contínuas das infraestruturas de acesso por rádio.

Campi universitários constituem ambientes de uso intensivo de conectividade sem fio. A comunidade acadêmica utiliza redes móveis para comunicação pessoal e institucional, acesso a plataformas educacionais, serviços em nuvem, autenticação em sistemas acadêmicos, chamadas de voz e vídeo, aplicações de pesquisa, atividades administrativas e, em alguns casos, suporte a dispositivos conectados associados à IoT. Embora redes sem fio como o Wi-Fi, baseadas no padrão IEEE 802.11, estejam presentes em muitos espaços universitários, as redes móveis comerciais continuam relevantes por oferecerem ampla mobilidade, continuidade de acesso em áreas externas e conectividade complementar em locais onde a infraestrutura local é insuficiente, indisponível ou congestionada.

A qualidade das redes móveis em universidades, entretanto, pode variar significativamente ao longo do espaço físico. Campi universitários normalmente combinam áreas abertas, vias internas, áreas arborizadas, desníveis do terreno, estacionamentos e edificações com diferentes materiais construtivos. Além disso, prédios acadêmicos, salas de aula, laboratórios, corredores e auditórios podem causar perdas adicionais devido à penetração, ao bloqueio, à reflexão, à difração e à propagação por múltiplos percursos. Como consequência, um usuário pode experimentar boa cobertura em áreas externas e, ao mesmo tempo, degradação acentuada do sinal em ambientes internos ou em regiões de sombra causadas por obstáculos naturais e artificiais.

Essa variabilidade espacial afeta diretamente a experiência da comunidade universitária. Baixos níveis de potência recebida podem dificultar o acesso à rede ou reduzir a estabilidade da conexão, enquanto condições de interferência podem degradar a qualidade do enlace mesmo quando o sinal recebido apresenta intensidade aparentemente adequada. Assim, a simples presença de cobertura nominal no campus não garante um desempenho satisfatório aos usuários. Torna-se necessário compreender, de forma mais detalhada, como a potência recebida, a qualidade do enlace e as condições de interferência se comportam em diferentes ambientes de medição.

Em estudos anteriores como [3], foram realizadas medições de campo em grandes centros urbanos e ao longo de rodovias, permitindo a caracterização das redes móveis em

cenários de larga escala, porém sem contemplar ambientes universitários. Em [4], ambientes universitários são analisados. Entretanto, o estudo não produz uma comparação entre diferentes gerações e diferentes ambientes.

Nesse contexto, o campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) na cidade de Juiz de Fora representa um cenário relevante para estudo. A presença de múltiplas operadoras, a diversidade de edificações, a variação topográfica e a coexistência de ambientes internos e externos tornam o campus representativo dos desafios enfrentados na implantação e na operação de redes móveis em espaços universitários. A caracterização desse ambiente permite identificar regiões com limitações de cobertura ou de qualidade de enlace, além de fornecer subsídios técnicos para compreender o desempenho das redes móveis comerciais em ambientes acadêmicos.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de caso sobre a cobertura e a qualidade do enlace rádio das redes móveis 4G LTE e 5G NR das operadoras disponíveis no campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), na cidade de Juiz de Fora. Para isso, foi realizada uma campanha de medições em campo, em ambientes internos e externos, utilizando um scanner de redes móveis [5] capaz de identificar portadoras, bandas de frequência e calcular métricas de desempenho associadas às tecnologias avaliadas.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar uma campanha de medições no campus da UFJF, em ambientes internos e externos, utilizando um scanner de redes móveis para identificar operadoras, portadoras, bandas de frequência e indicadores de desempenho associados às redes 4G LTE e 5G NR;
- Coletar, organizar, filtrar e analisar estatisticamente os valores de potência recebida do sinal de referência (do inglês, *Reference Signal Received Power*) (RSRP) e relação sinal-interferência-mais-ruído (do inglês, *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) (SINR) por meio de funções de distribuição cumulativa empíricas, permitindo a comparação entre operadoras, bandas e ambientes de medição;
- Estimar a eficiência espectral a partir dos valores medidos de SINR e comparar os resultados com valores de referência definidos em recomendações técnicas, identificando condições de operação limitadas pela cobertura e/ou pela interferência.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 2**: apresentam-se os fundamentos das redes móveis 4G e 5G, incluindo conceitos relacionados aos sinais de referência utilizados na interface rádio. São discutidas as métricas RSRP e SINR, descrevendo sua obtenção a partir dos sinais de referência e sua aplicação na avaliação da cobertura e da qualidade do enlace rádio em campanhas de medição.

- **Capítulo 3**: descreve-se a metodologia da campanha de medições realizada no campus da UFJF. São apresentados os cenários de medição em ambientes internos e externos, os trajetos percorridos, os pontos específicos de coleta, os equipamentos de varredura utilizados, a configuração dos instrumentos, o arranjo experimental adotado e os procedimentos de aquisição de dados em tempo real.

- **Capítulo 4**: apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos na campanha de medições. Inicialmente, são descritos os procedimentos de organização, filtragem e tratamento dos dados coletados. Em seguida, a análise é realizada com base nas funções de distribuição cumulativa empíricas (do inglês, *Empirical Cumulative Distribution Functions*)s (ECDFss) dos valores de RSRP e SINR, considerando diferentes operadoras, bandas de frequência e ambientes de medição. Além disso, a eficiência espectral estimada é comparada a valores mínimos de referência adotados com base em recomendações técnicas. Também são analisados gráficos de SINR em função do RSRP, com o objetivo de investigar a relação entre a cobertura e a qualidade do enlace em cada ambiente avaliado.

- **Capítulo 5**: apresentam-se as conclusões finais do trabalho, destacando os principais resultados obtidos.

2 FUNDAMENTOS DA AVALIAÇÃO DE REDES MÓVEIS

Neste capítulo apresentam-se os fundamentos técnicos utilizados na avaliação da cobertura e da qualidade do enlace rádio em redes móveis 4G LTE e 5G NR. A análise concentra-se nos sinais de referência empregados por essas tecnologias, pois tais sinais permitem estimar métricas de camada física associadas à potência recebida, à interferência, ao ruído e à qualidade do enlace. Nesse contexto, são discutidos os conceitos de RSRP, potência recebida do sinal de referência de sincronização (do inglês, *Synchronization Signal Reference Signal Received Power*) (SS-RSRP) e SINR, bem como sua aplicação em campanhas de medição em ambientes internos e externos.

A organização do capítulo é a seguinte: na Seção 2.1 apresentam-se uma visão geral das redes móveis 4G LTE e 5G NR, destacando suas principais características técnicas e as bandas de frequência observadas neste trabalho. Na Seção 2.3 descrevem-se as métricas utilizadas para avaliar a cobertura e a qualidade do enlace, com ênfase nos sinais de referência empregados em 4G LTE e 5G NR.

2.1 REDES DE COMUNICAÇÃO MÓVEL

As redes móveis evoluíram ao longo das últimas décadas por meio de sucessivas gerações tecnológicas, com avanços em capacidade, eficiência espectral, latência e flexibilidade de implantação. O LTE, denominado 4G, surgiu como evolução das redes móveis 3G (Sistema Universal de Telecomunicações Móveis (do inglês, *Universal Mobile Telecommunications System*) (UMTS)/Acesso de Pacotes em Alta Velocidade (do inglês, *High Speed Packet Access*) (HSPA)), introduzindo uma arquitetura baseada em comutação por pacotes de Protocolo de Internet (do inglês, *Internet Protocol*) (IP), com núcleo de rede simplificado e suporte a taxas de transmissão mais altas e a baixa latência. Posteriormente, o NR, associado às redes 5G NR, avançou ao introduzir uma arquitetura mais flexível, com suporte ao fatiamento de rede, à separação entre os planos de controle e de usuário e à virtualização de funções de rede.

A operação da tecnologia 4G LTE ocorre em múltiplas bandas de frequência, definidas com base em critérios de cobertura, capacidade e disponibilidade espectral. Essas bandas podem suportar larguras de canal de até 20 MHz e empregam acesso múltiplo por divisão ortogonal de frequência (do inglês, *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) (OFDMA) no enlace de descida e Acesso múltiplo por divisão de frequência com portadora única (do inglês, *Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access*) (SC-FDMA) no enlace de subida, o que permite maior eficiência na alocação dos recursos de rádio. O 4G LTE permanece em operação em diversas redes móveis e constitui uma infraestrutura relevante para a coexistência e a evolução gradual em direção às redes 5G NR.

No Brasil, as redes 4G LTE são implantadas em diferentes bandas de frequência, de-

finidas conforme critérios de disponibilidade espectral, cobertura, capacidade e estratégia de operação das prestadoras de serviços móveis. Entre as bandas acesso Rádio Terrestre Universal Evoluído (do inglês, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access*) (E-UTRA) utilizadas pelas operadoras nacionais, destacam-se as Bandas 1, 3, 5, 7, 28 e 40, cujas faixas de operação são apresentadas na Tabela 1. Na Tabela 1 listam-se as faixas de frequência associadas aos enlaces de subida e de descida, bem como a aplicação típica de cada banda no contexto das redes móveis.

Tabela 1 – Bandas E-UTRA: especificações e aplicações.

Banda E-UTRA	**Uplink (MHz)**	**Downlink (MHz)**	**Aplicações**
1	$1920 - 1980$ (60)	$2110 - 2170$ (60)	Utilizada para serviços de cobertura celular em áreas urbanas e rurais.
3	$1710 - 1785$ (75)	$1805 - 1880$ (75)	Utilizada para maior capacidade de tráfego na rede.
5	$824 - 849$(25)	$869 - 894$ (25)	Utilizada para maior penetração de sinal devido à melhor propagação em frequências mais baixas.
7	$2500 - 2570$ (70)	$2620 - 2690$ (70)	Utilizada para capacidade de alta velocidade em ambientes urbanos densos onde há alta demanda de dados.
28	$703 - 748$ (45)	$758 - 803$ (45)	Utilizada para cobertura de longa distância e penetração em ambientes internos.
40	$2300 - 2400$ (100)	$2300 - 2400$ (100)(TDD)	Utilizada para auxiliar na oferta de capacidade em áreas urbanas.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A tecnologia 5G NR foi desenvolvida para aumentar a capacidade de tráfego, reduzir a latência e melhorar a eficiência espectral em relação às gerações anteriores. A interface rádio apresenta maior flexibilidade do que a do 4G LTE, permitindo diferentes larguras de banda, espaçamentos entre subportadoras e durações de símbolo, o que possibilita a adaptação da transmissão a distintas faixas de frequência e a diferentes cenários de implantação. Em bandas como a $n78$, o 5G NR opera tipicamente em modo duplexação por divisão de tempo (do inglês, *Time Division Duplex*) (TDD), no qual os enlaces de descida e de subida utilizam a mesma faixa de frequência em intervalos de tempo distintos. Além disso, emprega técnicas avançadas de múltiplas antenas e de formação de feixes do ingles, *beamforming*, nas quais a energia irradiada é direcionada espacialmente de acordo com as condições do canal de rádio.

2.2 SINAIS DE REFEÊNCIA EM REDES MÓVEIS

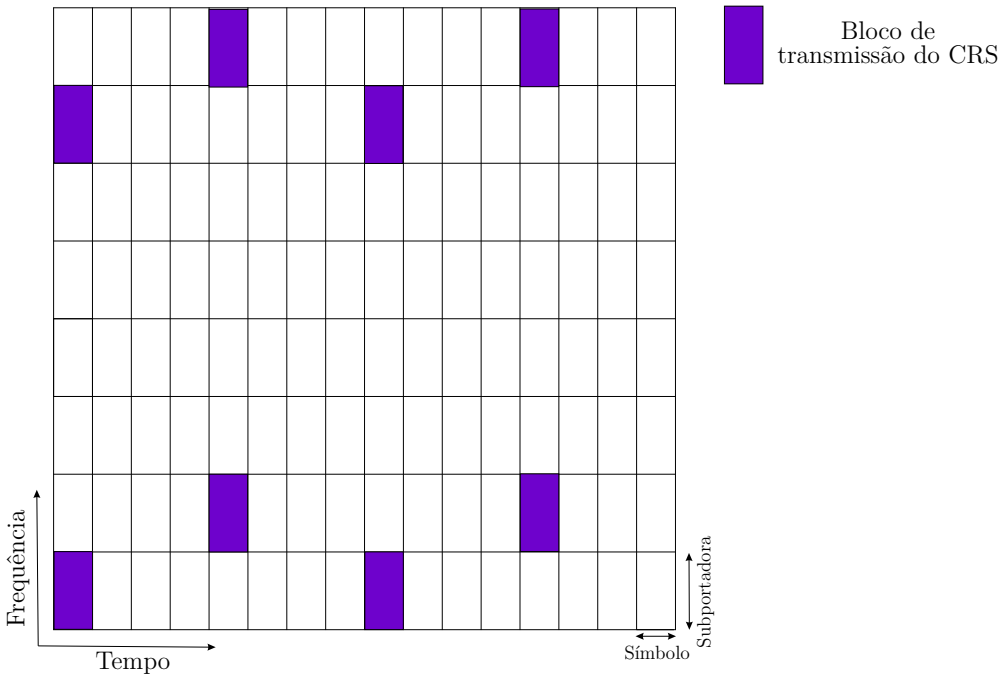
2.2.1 Sinais de referência 4G LTE

Nas redes 4G LTE, o enlace de descida emprega OFDMA como esquema de acesso múltiplo, permitindo que diferentes subconjuntos de subportadoras sejam dinamicamente alocados aos usuários. As medições de cobertura são realizadas a partir do sinal de referência específico de célula (do inglês, *Cell-specific Reference Signal*) (CRS), transmitido pela estação rádio base de quarta geração (do inglês, *evolved NodeB*) (eNB) em posições conhecidas da grade de recursos. Esse sinal permite que o equipamento do usuário estime o canal de propagação e calcule métricas de potência, como o RSRP.

O CRS é mapeado em elementos de recurso (do inglês, *Resource Elements*) (REs) específicos da grade de recursos do LTE. Para cada porta de antena, os elementos de referência aparecem em posições periódicas, espaçadas no domínio da frequência e em símbolos multiplexação por divisão ortogonal de frequência (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) (OFDM) predefinidos no domínio do tempo, conforme ilustrado na Figura 1. Esse mapeamento garante que o receptor tenha acesso a um sinal conhecido ao longo da largura de banda da portadora, sem necessidade de ocupar todos os REs disponíveis com sinais de referência.

A identificação inicial da célula em 4G LTE não é realizada pelo CRS, mas pelos símbolos de sincronização sincronismo primário (do inglês, *Primary Synchronization Signal*) (PSS) e sincronismo secundário (do inglês, *Secondary Synchronization Signal*) (SSS). A partir desses sinais, o receptor obtém a temporização inicial e determina a identidade de célula física (do inglês, *Physical Cell Identity*) (PCI). Uma vez conhecida a PCI, o receptor identifica a sequência e as posições do CRS correspondentes à célula servidora, utilizando esse sinal para refinar a estimação do canal, compensar erros de fase e de frequência e auxiliar a demodulação coerente dos canais físicos.

Figura 1 – Mapeamento do CRS na grade de recursos do LTE.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

2.2.2 Sinais de referência 5G NR

Em redes 5G NR, a avaliação inicial de cobertura e sincronização baseia-se no bloco de sincronismo (do inglês, *Synchronization Signal Block*) (SSB), transmitido periodicamente pela estação rádio base de quinta geração (do inglês, *next-generation NodeB*) (gNB) em janelas denominadas *SSB bursts*. Diferentemente do LTE, que utiliza sinais de referência específicos de célula distribuídos continuamente na grade de recursos, o 5G NR adota transmissões de sincronização mais esparsas e configuráveis. Essa estrutura reduz transmissões permanentes, diminui o consumo de recursos de rádio e favorece a operação com formação de feixes, especialmente em frequências mais altas.

O SSB desempenha funções essenciais na rede 5G NR: permite a detecção inicial da célula, a aquisição de sincronismo temporal e em frequência, a leitura de informações básicas do sistema e a realização de medições associadas aos feixes de transmissão. No domínio da frequência, cada SSB ocupa 240 subportadoras contíguas. Sua largura de banda ocupada é, portanto, $240\Delta f$, em que Δf representa o espaçamento entre as subportadoras. No 5G NR, esse espaçamento é configurável e definido pela numerologia da transmissão, representada pelo parâmetro μ, de acordo com a relação $\Delta f = 2^{\mu} \times 15$ kHz. Assim, $\mu = 0$ corresponde a 15 kHz, $\mu = 1$ corresponde a 30 kHz e $\mu = 2$ corresponde a 60 kHz. No domínio do tempo, o SSB ocupa quatro símbolos OFDM consecutivos.

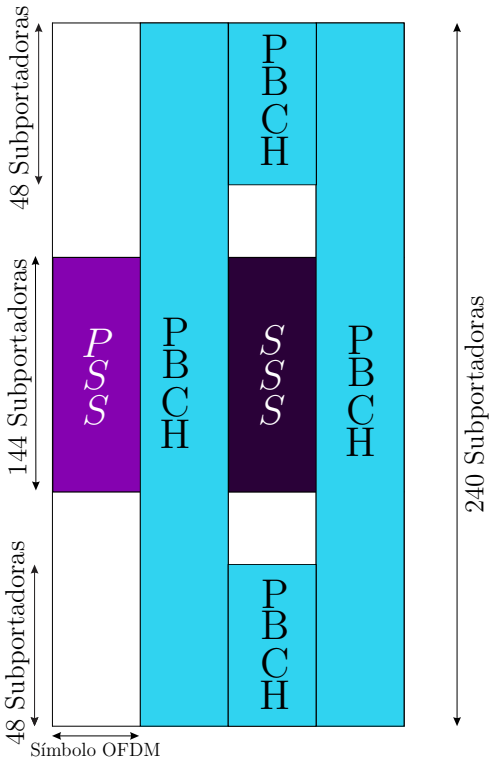
O SSB é formado pelos sinais PSS, SSS e canal físico de broadcast (do inglês, *Physical Broadcast Channel*) (PBCH). O PSS, transmitido no primeiro símbolo do bloco, permite a detecção inicial da célula e fornece o parâmetro $N_{\mathrm{ID}}^{(2)} \in \{0, 1, 2\}$. O SSS, trans-

mitido no terceiro símbolo do bloco, permite recuperar o parâmetro $N_{\mathrm{ID}}^{(1)} \in \{0, 1, \ldots, 335\}$ e refinar a sincronização. A combinação desses dois parâmetros determina a PCI da célula, a qual é expressa por

$$N_{\mathrm{ID}}^{\mathrm{cell}} = 3\, N_{\mathrm{ID}}^{(1)} + N_{\mathrm{ID}}^{(2)}, \tag{2.1}$$

resultando em 1008 identidades físicas de célula possíveis no 5G NR, o triplo das 504 identidades disponíveis no 4G LTE. O PBCH ocupa os demais recursos do SSB, isto é, o segundo e o quarto símbolos do bloco em toda a sua largura, além das subportadoras adjacentes ao SSS no terceiro símbolo, além de transportary o bloco mestre de informações (do inglês, *Master Information Block*) (MIB). O MIB contém informações essenciais para o acesso inicial, como parte do número do quadro de rádio, parâmetros associados à configuração inicial de controle e informações necessárias para localizar o bloco de informações do sistema tipo 1 (do inglês, *System Information Block Type 1*) (SIB1). Dessa forma, após a decodificação do PBCH, o equipamento do usuário pode prosseguir com o acesso à célula.

Figura 2 – Estrutura do SSB para o 5G NR.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O processo de acesso inicial ocorre em etapas. Primeiro, o receptor varre a faixa de frequência e correlaciona o sinal recebido com as possíveis sequências de PSS, obtendo uma estimativa inicial de tempo e de frequência. Em seguida, o SSS transmitido no mesmo SSB é processado para completar a determinação da PCI. Depois disso, o receptor decodifica o PBCH para obter o MIB e localizar os recursos necessários à leitura das informações

de sistema. Por fim, quando múltiplos SSBs são transmitidos em diferentes direções de feixe, o índice do SSB detectado fornece informações sobre o feixe recebido em melhores condições naquele instante. Esse procedimento permite que o equipamento se sincronize com a rede e obtenha os parâmetros básicos necessários para acessar a célula.

2.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO EM REDES MÓVEIS

A organização das redes 4G LTE e 5G NR emprega sinais de referência e de sincronização para permitir a seleção de célula, a estimação do canal e a avaliação da interface rádio. Neste trabalho, os principais indicadores usados para avaliar a cobertura e a qualidade do enlace são a RSRP ou SS-RSRP e a SINR. Enquanto o RSRP descreve a intensidade do sinal de referência recebido e, portanto, está diretamente associado à cobertura, a SINR mede a qualidade efetiva do enlace ao considerar simultaneamente o sinal desejado, a interferência e o ruído.

Em redes 4G LTE, o RSRP é definido como a média linear das potências recebidas nos REs que transportam o CRS. Cada REs corresponde à interseção entre uma subportadora e um símbolo OFDM na grade de recursos. Formalmente, o RSRP pode ser expresso por

$$P_{\mathrm{RSRP}} \triangleq \frac{1}{N_{\mathrm{RS}}} \sum_{k=1}^{N_{\mathrm{RS}}} P_{\mathrm{RS}}[k] \quad [\mathrm{W}], \tag{2.2}$$

em que N_{RS} é o número de elementos de recurso utilizados na medição e $P_{\mathrm{RS}}[k]$ é a potência recebida, em escala linear, no k-ésimo elemento de recurso de referência.

Quando se utiliza um balanço de enlace, a potência recebida costuma ser expressa em escala logarítmica. Nesse caso, para cada REs de referência, pode-se escrever

$$P_{\mathrm{RS}}[k] \approx \mathrm{EIRP}_{\mathrm{RS}} - \mathrm{PL}(d, f) - L_{\mathrm{O2I}} + G_{\mathrm{Rx}} - L_{\mathrm{Rx}}, \tag{2.3}$$

em que $\mathrm{EIRP}_{\mathrm{RS}}$ é a potência isotrópica efetivamente irradiada associada a cada elemento de recurso do sinal de referência, $\mathrm{PL}(d, f)$ é a perda de percurso em função da distância d e da frequência f, L_{O2I} é a perda de penetração exterior–interior, quando aplicável, e G_{Rx} e L_{Rx} representam, respectivamente, o ganho e as perdas associados ao receptor. A Equação (2.3) deve ser interpretada em escala logarítmica, isto é, com potências em dBm e ganhos ou perdas em dB. Para calcular a média definida na Equação (2.2), entretanto, as potências devem estar em escala linear. Após a obtenção de P_{RSRP} em watts, sua conversão para dBm é dada por

$$\mathrm{RSRP}_{\mathrm{dBm}} = 10 \log_{10}\!\left(\frac{P_{\mathrm{RSRP}}}{1\ \mathrm{mW}}\right). \tag{2.4}$$

Por estar associado a elementos de recurso que transportam sinais de referência, o RSRP é menos dependente do tráfego instantâneo do que medidas de potência em banda larga, como o indicador de intensidade do sinal recebido (do inglês, *Received Signal*

Strength Indicator) (RSSI). Assim, o RSRP reflete predominantemente efeitos de propagação em larga escala, como perda de percurso, sombreamento e atenuação por penetração em ambientes internos. Por esse motivo, ele é amplamente utilizado como indicador de cobertura.

Embora o RSRP caracterize a intensidade do sinal de referência recebido, ele não descreve, isoladamente, a qualidade do enlace, pois não considera o efeito conjunto de interferência e ruído. Para esse fim, emprega-se a SINR, definido em escala linear como

$$\gamma_{\mathrm{SINR}} \triangleq \frac{P_{\mathrm{RSRP}}}{P_I + P_N}, \tag{2.5}$$

em que P_I é a potência agregada de interferência co-canal proveniente de células vizinhas e P_N é a potência de ruído na largura de banda considerada. Essa expressão representa a interpretação física da métrica: o desempenho do enlace depende da razão entre a potência útil recebida e as componentes que degradam a recepção.

Em medições passivas, a separação direta entre sinal útil, interferência e ruído depende do processamento interno do equipamento de medição. Quando as potências estão normalizadas para a mesma base de medição, isto é, para o mesmo conjunto de recursos tempo–frequência e para a mesma largura de banda efetiva, uma forma operacionalmente conveniente de interpretar o denominador é por meio do RSSI, grandeza que engloba o sinal desejado, as interferências e o ruído. Nesse caso, pode-se escrever, de forma aproximada,

$$\gamma_{\mathrm{SINR}} \approx \frac{P_{\mathrm{RSRP}}}{P_{\mathrm{RSSI}} - P_{\mathrm{RSRP}}}, \tag{2.6}$$

em que P_{RSSI} e P_{RSRP} devem estar expressos em escala linear. Essa relação deve ser usada com cautela, pois o RSSI representa uma potência agregada em uma largura de banda, enquanto o RSRP é uma média sobre elementos de referência. Portanto, a subtração só é fisicamente consistente quando as grandezas estão adequadamente normalizadas pelo equipamento ou pelo procedimento de processamento dos dados. No presente trabalho, os valores de SINR analisados são aqueles reportados pelo scanner. As equações acima são usadas apenas para interpretar fisicamente a métrica e não substituem o procedimento interno de estimação do equipamento.

Quando os valores de RSRP e RSSI estão disponíveis em escala dBm, a razão deve ser calculada após a conversão das potências para escala linear. Assim, uma forma equivalente para obter a SINR em dB é

$$\mathrm{SINR}_{\mathrm{dB}} = 10\log_{10}\left(\frac{10^{\mathrm{RSRP}_{\mathrm{dBm}}/10}}{10^{\mathrm{RSSI}_{\mathrm{dBm}}/10} - 10^{\mathrm{RSRP}_{\mathrm{dBm}}/10}}\right). \tag{2.7}$$

Na prática, scanners de redes móveis podem estimar o SINR a partir de procedimentos internos de demodulação e de processamento dos sinais de referência. Assim, as Equações (2.5) e (2.6) devem ser entendidas como formulações físicas e operacionais

da métrica, enquanto os valores efetivamente analisados neste trabalho são os reportados pelo equipamento de medição.

A SINR afeta diretamente a eficiência com que o enlace rádio transmite dados, pois influencia a escolha do esquema de modulação e codificação (do inglês, *Modulation and Coding Scheme*) (MCS) e, consequentemente, a taxa de dados suportada. Neste trabalho, a SINR medido é utilizado para estimar a eficiência espectral η, que representa a taxa de transmissão por unidade de largura de banda, em bits por segundo por hertz (bps/Hz). Essa estimativa é usada como indicador complementar de desempenho, não como medida direta da vazão do usuário.

A relação entre a eficiência espectral e a SINR é aproximada por uma forma modificada da expressão de Shannon:

$$\eta = \alpha \log_2(1 + \gamma_{\text{SINR}}), \quad \text{bps/Hz} \tag{2.8}$$

em que α é o fator de eficiência de implementação, adotado como $\alpha = 0{,}7$ neste trabalho para representar perdas práticas associadas ao *overhead* de sinalização, ao prefixo cíclico, aos sinais de referência, à codificação e às limitações de implementação. Considera também o mapeamento entre SINR e a eficiência espectral empregado nas metodologias de avaliação de sistemas Telecomunicações Móveis Internacionais (do inglês, *International Mobile Telecommunications*) (IMT) [6]. Analisando a equação (2.8) nota-se que a eficiência espectral cresce de forma logarítmica com a SINR. O valor estimado de η é então comparado com limiares técnicos adotados como referência para os cenários avaliados.

Os REs que transportam o CRS são utilizados como base para as medições de desempenho. O RSRP por ser obtido pela média linear da potência recebida desses elementos de referência, representa predominantemente a cobertura da célula. Já o SINR mede a razão entre a potência do sinal útil e a potência combinada de interferência e de ruído. Dessa forma, enquanto o RSRP indica a intensidade do sinal recebido, o SINR caracteriza a qualidade efetiva do enlace.

A cobertura em redes 5G NR é avaliada por meio do SS-RSRP. Essa métrica é análoga ao RSRP do 4G LTE, mas está associada aos sinais de sincronização do SSB, principalmente aos REs utilizados pelo SSS. Como indicador de cobertura, o SS-RSRP reflete efeitos de propagação em larga escala. Em medições baseadas em scanner, o SS-RSRP pode ser reportado por célula e por SSB, permitindo avaliar diferenças entre feixes.

A qualidade do enlace em 5G NR é também avaliada por meio do SINR, definido como a razão entre a potência do sinal útil e a potência combinada de interferência e ruído. Em redes 5G NR, essa métrica é influenciada não apenas pela potência recebida, mas também pela direção dos feixes, pela separação entre células vizinhas, pela configuração TDD e pelas condições locais de propagação. O SINR afeta diretamente a seleção do MCS e, consequentemente, a eficiência espectral e a taxa de dados alcançável.

3 CAMPANHA DE MEDIÇÃO

Neste capítulo descreve-se a campanha de medição conduzida para avaliar a cobertura e a qualidade do enlace rádio das redes móveis disponíveis no campus da UFJF, em Juiz de Fora, Minas Gerais. O campus apresenta um ambiente de propagação heterogêneo, com terreno irregular, vegetação, edificações de diferentes dimensões, estruturas metálicas, áreas abertas e ambientes internos com corredores e salas de aula. Esses elementos favorecem fenômenos como reflexão, difração, espalhamento, bloqueio e propagação por múltiplos percursos, tornando o cenário adequado à avaliação experimental de redes móveis comerciais.

O capítulo está organizado da seguinte forma. A Seção 3.1 descrevem-se os equipamentos, os softwares e a configuração do sistema de medição utilizado. A Seção 3.2 apresentam-se os ambientes avaliados, incluindo o Edifício Engenheiro Itamar Franco e o percurso externo realizado no campus da UFJF.

3.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição utilizado na campanha é ilustrado na Figura 3 e é composto pelos seguintes elementos:

- **Antena GPS/GNSS:** antena responsável pela aquisição das coordenadas geográficas do receptor durante as medições em ambiente externo, conectada ao scanner de rede móvel.
- **Antena receptora BMLPV 5000 PCTEL/Maxrad Multiband** 600–6000 **MHz:** antena multibanda responsável pela recepção dos sinais das operadoras avaliadas, conectada ao scanner por meio de cabo de radiofrequência (do inglês, *Radio Frequency*) (RF). Sua faixa de operação abrange as principais bandas utilizadas nas redes 4G LTE e 5G NR analisadas neste trabalho.
- **Scanner de rede móvel Rohde & Schwarz TSMA-6B [5]:** equipamento responsável pela detecção, demodulação e medição dos sinais de referência das redes móveis. O scanner realiza medições passivas na camada física, identificando células, portadoras, bandas de frequência e métricas como RSRP, SS-RSRP e SINR.
- **Laptop com software ROMES [7]:** estação de controle utilizada para configurar a campanha, monitorar as medições em tempo real e registrar os dados coletados pelo scanner. Em ambientes internos, nos quais o sinal do sistema de posicionamento global (do inglês, *Global Positioning System*) (GPS) não está disponível, o software permite associar as amostras a uma planta do edifício com base no trajeto percorrido pelo operador.

Após a coleta, os dados foram exportados e pós-processados no software SmartAnalytics, da Rohde & Schwarz [8]. Essa ferramenta foi utilizada para filtrar as amostras, organizar os dados por tecnologia, operadora e ambiente de medição, e extrair as estatísticas utilizadas na análise dos indicadores-chave de desempenho (do inglês, *Key Performance Indicators*) (KPIs).

Figura 3 – Configuração do sistema de medição: antena GPS/GNSS, scanner TSMA-6B, antena receptora e laptop com software de controle.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.2 DESCRIÇÃO DA CAMPANHA

A campanha de medição foi conduzida em dois ambientes distintos: um interno, no Edifício Engenheiro Itamar Franco, e outro externo, ao longo de um percurso contínuo no campus da UFJF. As subseções a seguir descrevem as características de cada ambiente e os procedimentos adotados.

3.2.1 Ambiente Interno — Edifício Engenheiro Itamar Franco

As medições em ambiente interno foram realizadas no Edifício Engenheiro Itamar Franco, utilizado por cursos da área de Engenharia da UFJF. O edifício possui três pavimentos, com plantas arquitetônicas semelhantes, e foi selecionado por apresentar elevado fluxo de usuários e diversidade de ambientes internos, incluindo salas de aula, corredores, áreas de circulação e espaços de apoio. Esses ambientes representam condições típicas de propagação *indoor*, com a presença de paredes, lajes, portas, mobiliário e corredores, que podem produzir atenuação, reflexão e multipercurso. As plantas arquitetônicas dos pavimentos considerados na campanha são apresentadas no Anexo A.

Durante as medições internas, o sinal GPS não estava disponível. Para associar as amostras à posição espacial, a planta do edifício foi carregada no software ROMES, e o operador registrou o caminho percorrido sobre a planta durante a coleta. Esse procedimento permitiu relacionar as amostras medidas aos pontos do trajeto interno. Ao

Figura 4 – Mapa do trajeto das medições externas no campus da UFJF.



Fonte: Software R&S ROMES.

todo, foram coletadas 14.149 amostras de 4G LTE e 623 amostras de 5G NR nos três pavimentos, em uma campanha com duração aproximada de 45 minutos.

3.2.2 Ambiente Externo — Campus da UFJF

As medições em ambiente externo foram realizadas ao longo de um percurso contínuo no campus da UFJF, cuja rota é ilustrada na Figura 4.

O campus ocupa aproximadamente 1,3 km^2 e apresenta terreno irregular, com variação de altitude entre 880 e 960 m. A presença de vegetação, edificações, vias pavimentadas, áreas abertas e regiões próximas a um lago contribui para a formação de um ambiente de propagação variado. O lago pode atuar como superfície refletora em determinadas geometrias de transmissão, enquanto a vegetação e as edificações podem introduzir perdas adicionais, espalhamento, difração e bloqueio parcial do sinal.

A campanha externa foi realizada durante o recesso acadêmico. Nesse período, espera-se um menor número de usuários ativos no campus, o que pode reduzir a variabilidade do tráfego instantâneo e da alocação dinâmica de recursos. Essa condição não elimina interferências intercelulares nem altera diretamente a definição de RSRP, mas pode favorecer maior repetibilidade das medições de qualidade de enlace. Neste trabalho, uma amostra corresponde a um registro válido reportado pelo scanner para uma dada tecnologia, operadora e portadora, após os procedimentos de filtragem e organização no pós-processamento. Ao todo, foram coletadas 25.598 amostras de 4G LTE e 2.130 amostras de 5G NR ao longo de aproximadamente 9,5 km de percurso contínuo.

4 RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo discutem-se os resultados obtidos na campanha de medições. A análise avalia o desempenho das operadoras em termos de cobertura, qualidade do enlace rádio e eficiência espectral estimada, considerando separadamente os cenários interno e externo no campus da UFJF. Os dados foram organizados por tecnologia, operadora, banda de frequência e ambiente de medição, e posteriormente analisados por meio de distribuições empíricas, percentis e gráficos de dispersão.

O capítulo está organizado em três seções principais: na Seção 4.1 apresentam-se o inventário de canais detectados pelo scanner, com a identificação das bandas, portadoras e larguras de banda observadas; na Seção 4.2 apresentam-se a análise estatística de RSRP, SS-RSRP, SINR e eficiência espectral estimada; por fim, a Seção 4.3 discute os gráficos de dispersão entre potência recebida e SINR, utilizados para distinguir limitações por cobertura de limitações por interferência.

4.1 INVENTÁRIO DE CANAIS

Na Figura 5 apresenta-se o inventário de canais 4G LTE e 5G NR detectados durante a campanha de medições no campus da UFJF. O diagrama representa a ocupação espectral observada pelo scanner, permitindo identificar as operadoras presentes, as bandas de frequência utilizadas e as larguras de banda associadas às portadoras detectadas.

Foram identificadas portadoras das operadoras VIVO, TIM e CLARO, com operação em redes 4G LTE nas bandas E-UTRA 1, 3, 5, 7, 28 e 40, além de portadoras 5G NR na banda $n78$. A distribuição espectral observada evidencia o uso de múltiplas faixas de frequência pelas operadoras, refletindo diferentes estratégias de implantação voltadas à cobertura, à capacidade e à disponibilidade de espectro.

Na faixa associada à Banda $n78$, o inventário indica portadoras próximas atribuídas às operadoras CLARO e VIVO. A proximidade entre portadoras pode aumentar a suscetibilidade à interferência de canal adjacente (do inglês, *Adjacent Channel Interference*) (ACI), dependendo da seletividade dos filtros, da potência relativa entre os sinais e das condições de recepção. Entretanto, a aparente sobreposição indicada pelo processamento do scanner, na faixa aproximada de 3,365 GHz a 3,395 GHz, deve ser interpretada com cautela. Esse resultado pode refletir tanto a proximidade real entre alocações adjacentes quanto incertezas no procedimento de detecção automática de canais e no pós-processamento do software de medição. Assim, o diagrama é utilizado como inventário espectral da campanha e não como comprovação direta de interferência entre operadoras.

Figura 5 – Inventário de canais LTE e NR das operadoras no campus da UFJF.



Fonte: SmartAnalytics R&S.

4.2 ANÁLISE POR ECDFs

Uma forma adequada de caracterizar estatisticamente o desempenho de enlaces em redes móveis é por meio das ECDFss. Diferentemente de métricas escalares, como a média aritmética, a função de distribuição cumulativa empírica (do inglês, *Empirical Cumulative Distribution Function*) (ECDF) descreve toda a distribuição das amostras e permite observar a variabilidade espacial dos sinais medidos ao longo do percurso. Essa representação facilita a identificação de regiões com cobertura insuficiente, degradação de qualidade e comportamento crítico nas caudas da distribuição [9]. Por meio dos percentis extraídos da ECDF, é possível avaliar tanto o desempenho típico da rede quanto as condições observadas nas amostras mais desfavoráveis.

Seja $\{x_i\}_{i=1}^{N_\mathrm{a}}$ o conjunto de N_a amostras válidas de uma métrica de desempenho, tal como RSRP ou SINR, após os procedimentos de filtragem e organização dos dados. A função de distribuição cumulativa empírica associada à variável aleatória X pode ser escrita como

$$\hat{F}_X(x) = \frac{1}{N_\mathrm{a}} \sum_{i=1}^{N_\mathrm{a}} \mathbf{1}\{x_i \leq x\}, \tag{4.1}$$

em que $\mathbf{1}\{x_i \leq x\}$ é a função indicadora do evento $x_i \leq x$. Essa função assume o valor 1 quando a amostra x_i é menor ou igual ao limiar x, e 0 caso contrário. Portanto, a soma $\sum_{i=1}^{N_\mathrm{a}} \mathbf{1}\{x_i \leq x\}$ contabiliza o número de amostras que não excedem x, enquanto o fator $1/N_\mathrm{a}$ normaliza esse valor pelo número total de amostras. Assim, $\hat{F}_X(x)$ representa a fração acumulada de amostras com valores menores ou iguais a x.

Os percentis P_5, P_{50} e P_{95} fornecem uma caracterização estatística representativa da distribuição dos KPIs medidos. A mediana P_{50} representa o valor central da distribuição e é utilizada como indicador do desempenho típico observado no conjunto de amostras. O percentil P_5 caracteriza a região de baixos percentis da distribuição, indicando que apenas 5% das amostras apresentam valores abaixo desse limiar. Assim, esse percentil é particularmente relevante para avaliar as condições mais desfavoráveis de cobertura ou de qualidade do enlace, tipicamente associadas às regiões de borda de célula. O percentil P_{95}, por sua vez, caracteriza a região de altos percentis da distribuição, indicando o valor abaixo do qual se encontram 95% das amostras e fornecendo uma referência para as melhores condições observadas durante a campanha de medição.

Os valores medidos de RSRP e SINR para os sistemas 4G LTE e 5G NR foram analisados por meio de ECDFs, com avaliações separadas para os ambientes interno e externo. Na Tabela 2, adaptada de [10], apresenta os limiares de RSRP e SINR adotados para classificar a condição do enlace de rádio nas categorias Fraco, Moderado, Bom e Excelente. Esses limiares são utilizados ao longo deste capítulo em conjunto com os percentis extraídos das ECDFs, permitindo qualificar tanto a condição típica (mediana) quanto as condições mais desfavoráveis (percentis baixos) de cada operadora e banda. É importante destacar que esses limiares baseiam-se em dados de fabricantes de equipamentos e na experiência prática de engenheiros de redes, não constituindo valores normativos absolutos, uma vez que a qualidade do enlace celular é influenciada por outros fatores.

Tabela 2 – Classificação dos valores medidos de RSRP e SINR.

Condição	**RSRP/SS-RSRP (dBm)**	**SINR (dB)**
Excelente	> -80	> 20
Bom	-80 a -90	13 a 20
Moderado	-90 a -100	0 a 13
Fraco	≤ -100	≤ 0

Fonte: Adaptado de [10].

4.2.1 Análise Estatística de Cobertura e Qualidade de Enlace LTE

Nesta subseção apresenta-se a análise estatística dos KPIs de cobertura e qualidade de enlace 4G LTE por meio das ECDFs dos valores medidos de RSRP e SINR, respectivamente. As análises são realizadas separadamente para os ambientes interno e externo, permitindo quantificar o impacto das condições de propagação no desempenho de cada operadora em cada banda de frequência.

4.2.1.1 Desempenho de Cobertura de Enlace

O desempenho da tecnologia 4G LTE com relação a cobertura 4G LTE é analisado por meio das ECDFs dos valores medidos de RSRP, apresentadas na Figura 6. No ambi-

ente interno, na Figura 6(a), observa-se forte dispersão entre as operadoras e as bandas. Esse comportamento é esperado em ambientes fechados, nos quais paredes, lajes, corredores e mobiliário introduzem perdas por penetração, sombreamento e multipercurso.

Nas bandas de menor frequência, Bandas 28 e 5, usualmente empregadas para ampliar a cobertura e melhorar a penetração em ambientes internos, a VIVO apresenta o melhor desempenho relativo. Para essa operadora, a mediana é aproximadamente $P_{50} \approx -98{,}5$ dBm, enquanto o quinto percentil é $P_5 \approx -108{,}8$ dBm. De acordo com a classificação da Tabela 2, a mediana situa-se na faixa "Moderado", próxima ao limite com a condição "Fraco", e a região de baixos percentis permanece na condição "Fraco". No ambiente externo, a VIVO mantém comportamento semelhante nessas bandas, com $P_{50} \approx -98{,}0$ dBm e $P_5 \approx -109{,}0$ dBm, indicando ganho pouco expressivo em relação ao ambiente interno.

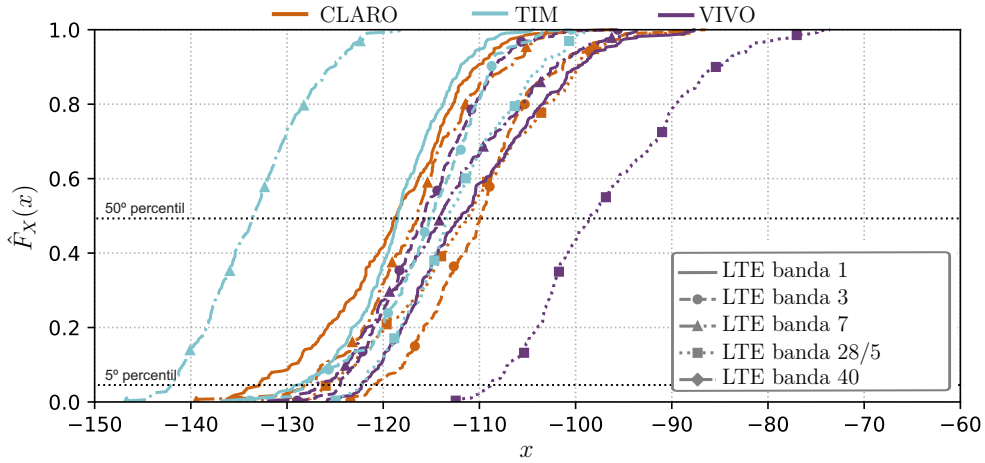
A TIM apresenta os menores níveis de cobertura nas bandas de menor frequência. No ambiente interno, registra $P_{50} \approx -115{,}3$ dBm e $P_5 \approx -120{,}8$ dBm; em ambiente externo, registra $P_{50} \approx -109{,}5$ dBm e $P_5 \approx -119{,}0$ dBm. Em ambos os cenários, a mediana permanece na condição "Fraco". A CLARO apresenta desempenho intermediário, com $P_{50} \approx -111{,}6$ dBm e $P_5 \approx -125{,}0$ dBm em ambiente interno, melhorando para $P_{50} \approx -99{,}2$ dBm e $P_5 \approx -114{,}3$ dBm em ambiente externo.

Nas bandas de maior frequência, Bandas 1, 3, 7 e 40, os níveis de RSRP tendem a ser inferiores no ambiente interno, em razão da maior atenuação por penetração e da menor robustez de propagação dessas faixas em relação às bandas sub-GHz. A Banda 40 foi detectada apenas em ambiente externo, o que pode estar associado à cobertura local dessa portadora, à configuração da rede ou à maior atenuação no interior do edifício.

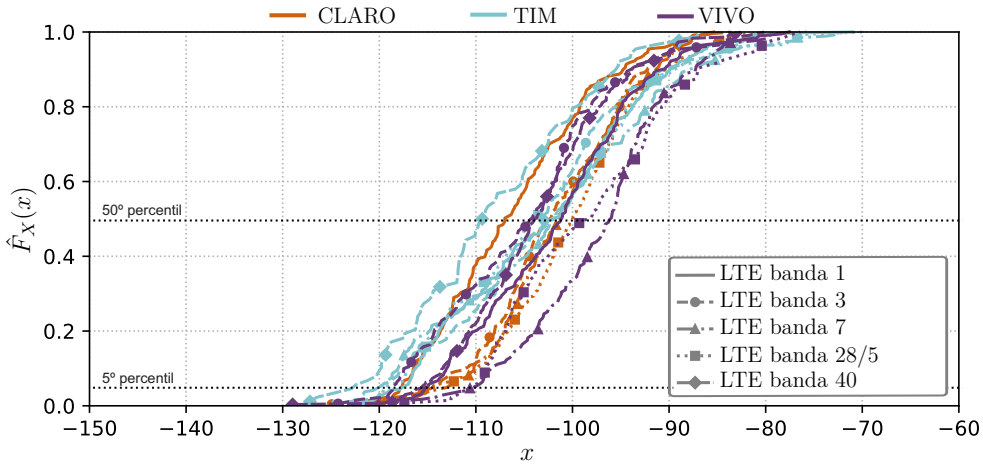
Em ambiente interno, a VIVO apresenta medianas entre aproximadamente -112 e -116 dBm nas bandas de maior frequência, com melhor resultado relativo na Banda 1. No ambiente externo, há melhora significativa, especialmente na Banda 7, que atinge $P_{50} \approx -95{,}0$ dBm. A CLARO apresenta desempenho intermediário, com medianas internas entre $P_{50} \approx -110{,}0$ e $-118{,}6$ dBm e medianas externas entre $P_{50} \approx -100{,}0$ e $-116{,}0$ dBm. A TIM apresenta o pior desempenho nessas bandas, com destaque para a Banda 7 no ambiente interno, na qual $P_{50} \approx -135{,}3$ dBm e $P_5 \approx -145{,}0$ dBm, indicando cobertura extremamente degradada nessa condição. No ambiente externo, essa mesma banda melhora para $P_{50} \approx -107{,}0$ dBm, mas ainda permanece na faixa "Fraco".

De forma geral, os resultados de RSRP indicam que o ambiente interno é mais severo para todas as operadoras, especialmente nas bandas de maior frequência. Também se observa que a simples presença de uma banda de menor frequência não garante, por si só, boa cobertura em todos os pontos, pois o resultado depende do planejamento da célula, da orientação das antenas, da distância até a estação rádio-base e das condições locais de propagação.

Figura 6 – ECDFs dos valores medidos de RSRP (dBm) do 4G LTE para todas as operadoras.



(a) Ambiente Interno.



(b) Ambiente Externo.

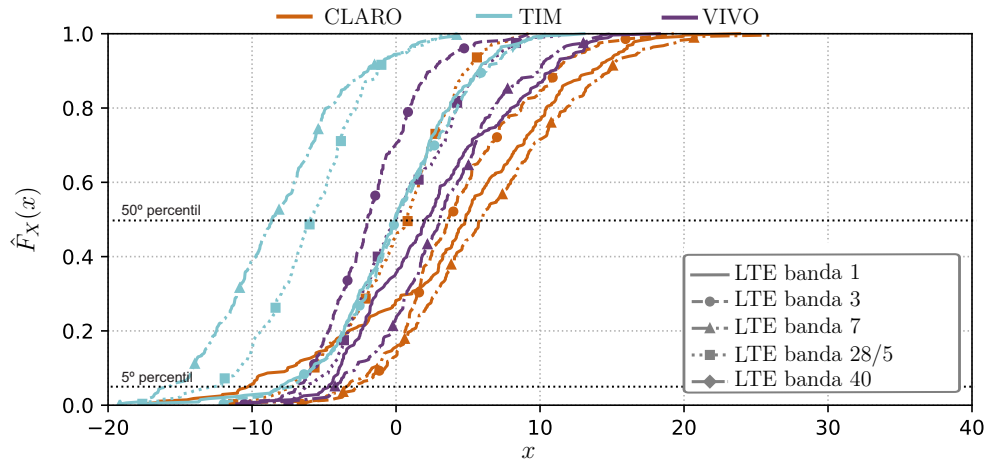
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.2.1.2 Desempenho da Qualidade de Enlace

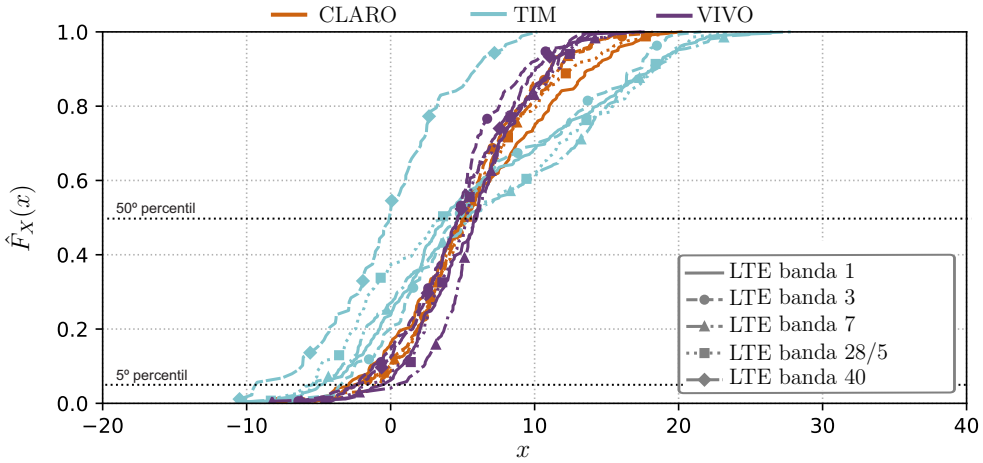
A qualidade do enlace 4G LTE foi avaliada com base nas ECDFs dos valores medidos de SINR, conforme apresentado na Figura 7. Diferentemente do RSRP, que caracteriza predominantemente a potência do sinal de referência recebida, o SINR incorpora o efeito combinado da interferência e do ruído. Dessa forma, essa métrica permite identificar condições em que o enlace pode estar limitado por interferência, mesmo quando os níveis de potência recebida são adequados.

Em ambiente interno, observa-se na Figura 7(a), uma separação pronunciada entre as curvas das operadoras e das bandas avaliadas. Esse comportamento indica maior variabilidade na qualidade do enlace em ambientes fechados, nos quais o multipercurso, a atenuação por penetração, as obstruções internas e a recepção de sinais de células vizinhas podem reduzir o SINR.

Figura 7 – ECDFs dos valores medidos de SINR (dB) do 4G LTE para todas as operadoras.



(a) Ambiente Interno.



(b) Ambiente Externo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A CLARO apresenta os maiores valores medianos de SINR em parte das bandas avaliadas no ambiente interno, especialmente nas Bandas 1, 3 e 7. Pela análise da Figura 7(a), os valores de P_{50} situam-se entre 3,5 dB e 6 dB, enquanto P_5 permanece abaixo de 0 dB. Assim, a condição típica enquadra-se na faixa “Moderado”, mas a região de baixos percentis ainda apresenta amostras em condição “Fraco”. Nas Bandas 28 e 5, a mediana da CLARO fica próxima de 1 dB, mostrando que bandas de menor frequência podem melhorar a cobertura sem necessariamente melhorar a qualidade do enlace.

A VIVO apresenta desempenho intermediário no ambiente interno, com medianas geralmente entre 0 dB e 3 dB, dependendo da banda considerada. Esses valores ainda caracterizam condição “Moderado”, porém próxima do limite inferior dessa classificação. A região de baixos percentis permanece, em geral, abaixo de 0 dB, indicando que parte das amostras apresenta qualidade de enlace insuficiente.

A TIM apresenta os menores valores de SINR no ambiente interno. Algumas ban-

das exibem medianas próximas ou inferiores a 0 dB e percentis inferiores substancialmente negativos, evidenciando condições de enlace fortemente degradadas. Esse comportamento pode ser explicado por baixa dominância da célula servidora, interferência de canal adjacente ou combinação de ambos os efeitos. O resultado reforça que valores elevados de RSRP não garantem, necessariamente, boa qualidade de enlace, pois a SINR depende da relação entre o sinal desejado, as interferências e o ruído.

No ambiente externo, na Figura 7(b), observa-se um deslocamento geral das curvas para valores mais elevados de SINR, indicando melhora da qualidade do enlace em relação ao ambiente interno. As medianas das operadoras e bandas avaliadas concentram-se, em grande parte, entre 5 dB e 7 dB, caracterizando uma condição típica "Moderado". Em algumas bandas, especialmente para a TIM, a região de altos percentis atinge valores próximos ao limite entre as classificações "Bom" e "Excelente", indicando que uma pequena fração das amostras apresentam estas condições.

Apesar da melhora no ambiente externo, a região de baixos percentis ainda apresenta valores próximos ou inferiores a 0 dB em algumas bandas. Isso indica que a qualidade do enlace permanece espacialmente não uniforme ao longo do percurso. Podem estar associadas a bordas de célula, interferência co-canal e/ou de canal adjacente, transições entre setores e condições locais de propagação

De forma geral, os resultados indicam que a qualidade do enlace 4G LTE é mais degradada em ambiente interno. No ambiente externo, há melhora significativa nas medianas de SINR, mas a presença de baixos percentis próximos ou inferiores a 0 dB indica que parte do percurso ainda apresenta limitação por interferência ou por baixa dominância da célula servidora.

4.2.2 Análise Estatística de Cobertura e Qualidade de Enlace NR

De forma análoga à análise realizada para as redes 4G LTE, a cobertura e a qualidade do enlace em redes 5G NR foram avaliadas por meio das ECDFs dos valores medidos de SS-RSRP e SINR na banda $n78$, conforme apresentado na Figura 8. Essa banda opera na faixa intermediária, próxima de 3,5 GHz, oferecendo maior largura de banda e maior potencial de aumento de capacidade, mas com maiores perdas de propagação e menor penetração em edificações quando comparada a bandas de frequência mais baixas.

4.2.2.1 Desempenho de Cobertura de Enlace

As ECDFs dos valores medidos de SS-RSRP são apresentadas na Figura 8(a). No ambiente interno, observa-se deslocamento das curvas para valores mais baixos de potência recebida, indicando degradação significativa da cobertura 5G NR no interior da edificação. Esse comportamento é compatível com a maior atenuação da banda $n78$ em

ambientes internos, além dos efeitos de obstrução, de multipercurso e de orientação dos feixes de transmissão.

Nas ambientes internos, a CLARO apresenta o melhor desempenho relativo de cobertura, com $P_{50} \approx -110$ dBm. A TIM e a VIVO apresentam medianas inferiores, com $P_{50} \approx -113$ dBm e $P_{50} \approx -116$ dBm, respectivamente. A região de baixos percentis permanece degradada para todas as operadoras, com P_5 aproximadamente entre -130 dBm e -120 dBm, indicando que uma parcela relevante das amostras se encontra em condição de cobertura fraca.

No ambiente externo, as curvas deslocam-se para valores menos negativos de SS-RSRP, evidenciando uma melhora substancial da cobertura em relação ao ambiente interno. A CLARO apresenta a melhor condição relativa, com mediana entre -85 dBm e -90 dBm, enquanto TIM e VIVO apresentam medianas próximas, entre -90 dBm e -95 dBm. De modo geral, os resultados mostram que a cobertura 5G NR na banda $n78$ é fortemente degradada em ambiente interno, mas melhora de forma expressiva em ambiente externo.

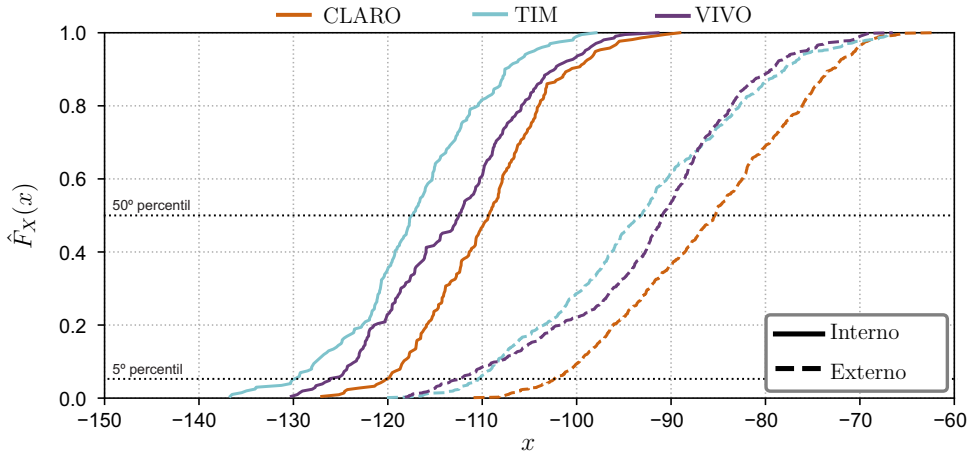
4.2.2.2 Desempenho de Qualidade de Enlace

As ECDFs dos valores medidos de SINR são apresentadas na Figura 8(b). No ambiente interno, as três operadoras apresentam medianas relativamente próximas, concentradas entre 3 dB e 6 dB, o que caracteriza uma condição típica "Moderado". Entretanto, a região de baixos percentis permanece próxima ou abaixo de 0 dB em parte das medições, indicando degradações locais associadas a interferência, obstruções internas, multipercurso, variações de feixe e baixa dominância da célula servidora.

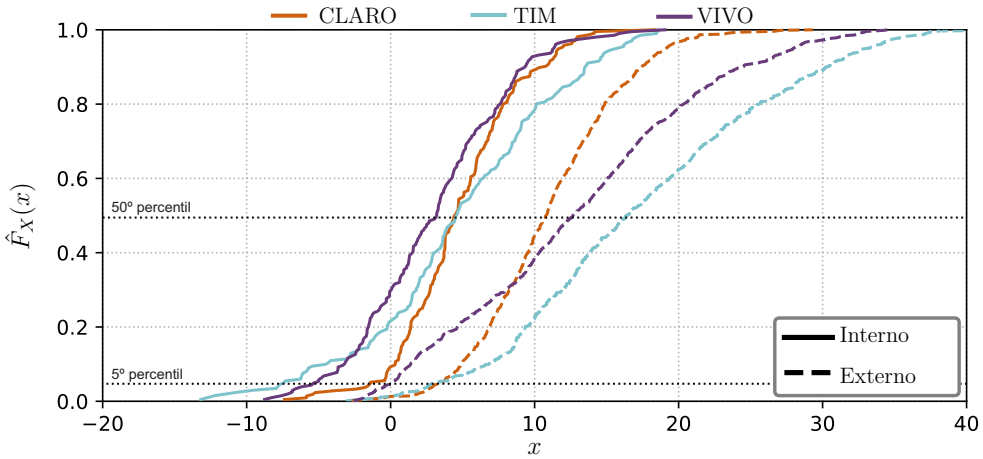
No ambiente externo, observa-se um deslocamento significativo das curvas para valores mais elevados de SINR. A TIM apresenta o melhor desempenho relativo, com mediana entre 15 dB e 17 dB e percentis elevados acima de 25 dB. A VIVO apresenta desempenho intermediário, com mediana entre 12 dB e 14 dB, enquanto a CLARO apresenta mediana inferior, entre 10 dB e 12 dB, apesar de apresentar os maiores níveis de SS-RSRP em ambiente externo.

A comparação entre SS-RSRP e SINR mostra que maior potência recebida não implica, necessariamente, melhor qualidade de enlace. No ambiente externo, a CLARO apresenta melhor cobertura relativa, mas não o melhor SINR. Isso sugere que o sinal recebido, embora mais intenso, pode não estar suficientemente acima das componentes interferentes provenientes de células, setores ou feixes adjacentes. Por outro lado, a TIM apresenta menores valores de SS-RSRP em comparação com a CLARO, porém, melhor SINR, indicando condição mais favorável na relação entre sinal desejado, interferência e ruído. Assim, os resultados reforçam a necessidade de analisar conjuntamente SS-RSRP e SINR: a primeira métrica caracteriza a cobertura, enquanto a segunda descreve a qua-

Figura 8 – ECDFs dos valores medidos de SS-RSRP (dBm) e SINR (dB) do 5G NR para todas as operadoras.



(a) SS-RSRP.



(b) SINR.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

lidade efetiva do enlace rádio.

4.2.3 Eficiência Espectral

Nesta seção, a eficiência espectral estimada é analisada por meio das ECDFs, considerando separadamente as tecnologias 4G LTE e 5G NR. Essa métrica foi calculada a partir dos valores medidos de SINR, conforme a Equação (2.8), e utilizada como indicador complementar da qualidade do enlace rádio. Como a eficiência espectral depende diretamente da relação sinal-interferência-ruído, sua análise permite avaliar o impacto das condições de propagação e interferência sobre a capacidade potencial de transmissão por unidade de largura de banda.

Ressalta-se que essa comparação tem caráter indicativo, pois os valores de eficiência espectral foram estimados a partir da SINR medida em campo. Portanto, os resultados

não constituem uma avaliação formal de conformidade com os requisitos IMT, que dependem de condições de simulação, tráfego, antenas, largura de banda e modelos de canal especificados pela ITU.

4.2.3.1 Eficiência Espectral do LTE

A avaliação da eficiência espectral em redes 4G LTE foi realizada com base no quinto percentil, P_5. Esse percentil caracteriza o desempenho das amostras em condições mais desfavoráveis, geralmente associadas a regiões de borda de célula, baixa qualidade de enlace ou maior interferência. Os resultados são comparados com valores de referência associados a cenários de avaliação do IMT-Advanced, conforme o relatório ITU-R M.2134 [11].

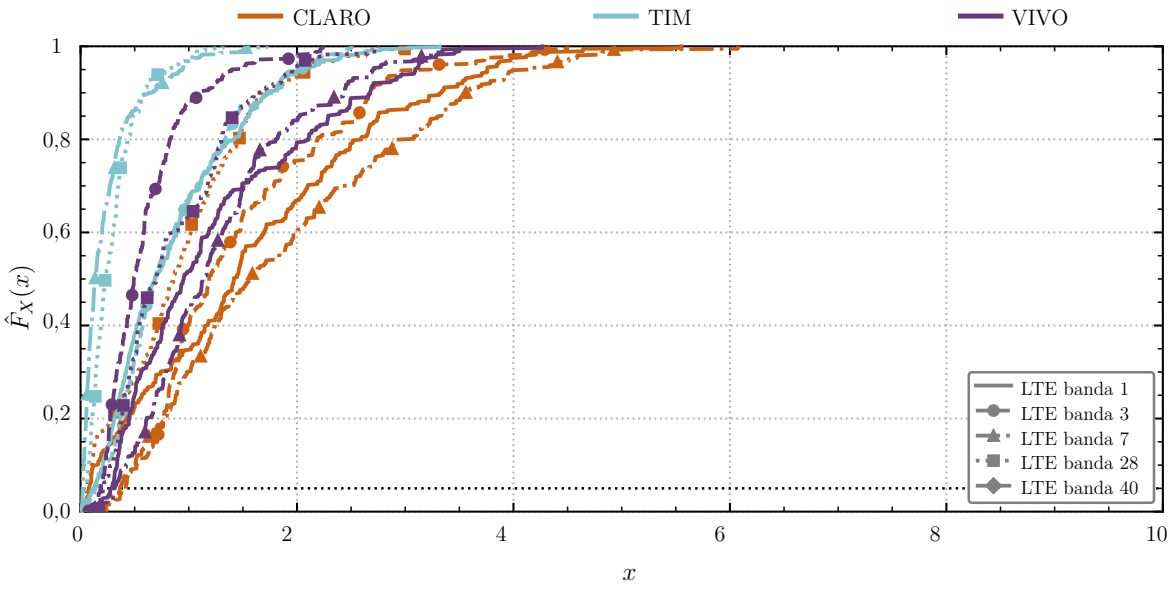
Para o ambiente interno, adotou-se como referência o valor de 0,1 bps/Hz no enlace de descida, associado ao ambiente *Indoor*. Esse valor foi adotado por corresponder ao limiar de borda de célula definido, servindo como referência de pior cenário. Como não é possível determinar, a partir da campanha de medição, a localização exata da borda de célula, essa escolha garante uma análise conservadora frente ao requisito mais restritivo da norma. Na Figura 9 apresentam-se as ECDFss da eficiência espectral estimada para as operadoras avaliadas. Observa-se elevada dispersão entre as curvas, indicando variações significativas na qualidade do enlace entre operadoras e bandas de frequência.

Os valores de P_5 apresentados na Tabela 3 mostram que as Bandas 1 e 28 da CLARO e as Bandas 7 e 28 da TIM estão abaixo do valor de referência adotado para o ambiente interno. Em contrapartida, a VIVO apresenta valores superiores ao limiar em todas as bandas avaliadas. Esse resultado indica que, em ambientes internos, a degradação da eficiência espectral ocorre principalmente na região de baixos percentis, o que se reflete em pontos de medição com menor SINR e, consequentemente, menor capacidade espectral estimada.

A Figura 10 apresenta as ECDFs da eficiência espectral estimada em ambiente externo de redes 4G LTE. Os valores apresentados na Tabela 4 mostram que a maioria das bandas avaliadas supera o valor de referência de 0,06 bps/Hz adotado para o enlace de descida no ambiente *Base Coverage Urban*. Este valor foi adotado de mesma forma que no ambiente interno por corresponder ao limiar de borda de célula definido, servindo como referência de pior cenário. As exceções são as portadoras da Banda 40 das operadoras TIM e VIVO, com $P_5 = 0{,}0199$ bps/Hz e $P_5 = 0{,}0462$ bps/Hz, respectivamente. Esses resultados indicam que, embora o ambiente externo apresente melhora geral em relação ao interno, a Banda 40 permanece limitada na região dos baixos percentis.

Algumas bandas superam o valor de referência por uma pequena margem, como a Banda 1 da CLARO, com $P_5 = 0{,}0626$ bps/Hz, a Banda 28 da CLARO, com $P_5 = 0{,}0713$ bps/Hz, e a Banda 7 da TIM, com $P_5 = 0{,}0697$ bps/Hz. Por outro lado, a

Figura 9 – ECDFs dos valores de eficiência espectral estimada (bps/Hz), calculada com base no SINR (dB), para o 4G LTE em ambiente interno.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

VIVO apresenta os maiores valores de quinto percentil em grande parte das bandas, com destaque para a Banda 7, que atinge $P_5 = 0{,}9080$ bps/Hz. Esse resultado reflete condições mais favoráveis de SINR ao longo do percurso externo.

A degradação observada na Banda 40 pode estar associada a baixos valores de SINR nessa faixa, influenciados por interferência, configuração TDD, alocação temporal de recursos, planejamento celular ou condições locais de propagação. A CLARO não apresenta medições nessa banda, o que indica que essa portadora não foi detectada durante a campanha.

4.2.3.2 Eficiência Espectral do NR

A avaliação da eficiência espectral estimada em redes 5G NR foi realizada com base em valores de referência do relatório ITU-R M.2410-0 [12], que estabelece os requisitos mínimos de desempenho para os sistemas IMT-2020. De forma análoga à análise realizada para o 4G LTE, utiliza-se o quinto percentil da eficiência espectral, P_5, para caracterizar as condições mais desfavoráveis do conjunto de amostras. Para o ambiente interno, adotou-se como referência o valor de 0,3 bps/Hz no enlace de descida, correspondente ao ambiente *Indoor Hotspot*. Para o ambiente externo, adotou-se o valor de 0,225 bps/Hz, associado ao ambiente *Dense Urban – eMBB*.

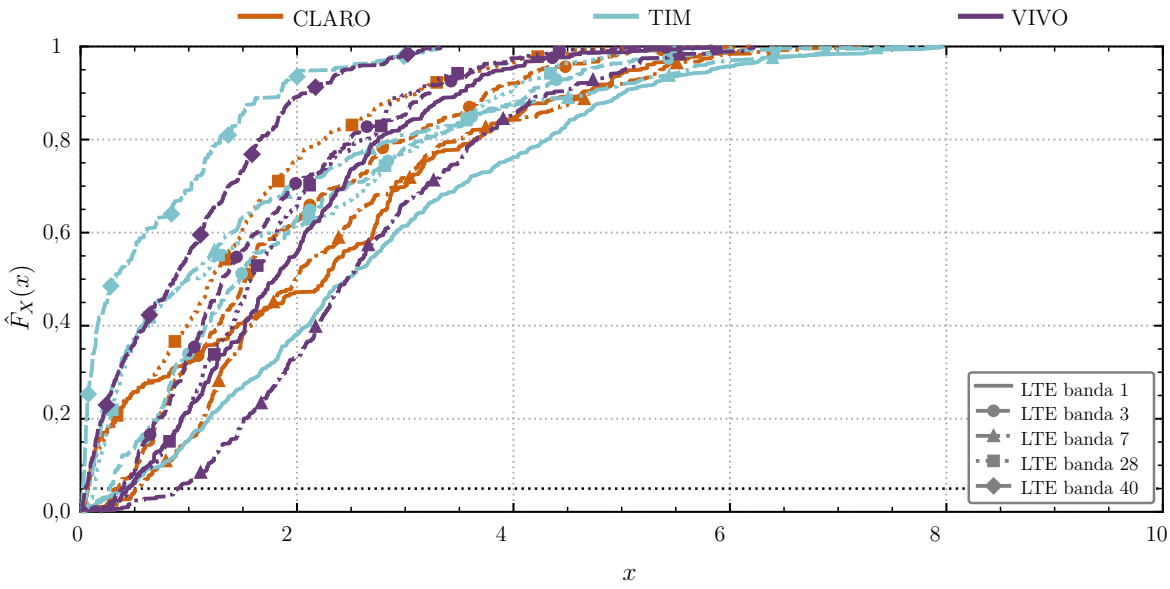
Na Figura 11 apresentam-se as ECDFss da eficiência espectral estimada a partir dos valores medidos de SINR. As curvas referentes ao ambiente externo estão deslocadas

Tabela 3 – Quinto percentil da eficiência espectral estimada para medições internas em LTE.

Operadora	**Banda**	P_5 **[bps/Hz]**
CLARO	LTE Banda 1	0,0802
	LTE Banda 3	0,4157
	LTE Banda 7	0,3644
	LTE Banda 28	0,0618
TIM	LTE Banda 1	0,1289
	LTE Banda 3	0,1372
	LTE Banda 7	0,0200
	LTE Banda 28	0,0460
VIVO	LTE Banda 1	0,2912
	LTE Banda 3	0,1837
	LTE Banda 7	0,3103
	LTE Banda 28	0,2122

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 10 – ECDFs dos valores de eficiência espectral estimada (bps/Hz), calculada com base no SINR (dB), para o 4G LTE em ambiente externo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

para valores mais elevados em relação às do ambiente interno, indicando uma melhoria na eficiência espectral estimada. Esse comportamento é coerente com a redução das perdas por penetração em edificações e com melhores condições de propagação fora delas.

Os valores do quinto percentil apresentados na Tabela 5 mostram que, em ambiente interno, apenas a CLARO supera o valor de referência de 0,3 bps/Hz, com $P_5 =$ 0,6230 bps/Hz. A TIM e a VIVO apresentam valores inferiores, com $P_5 = 0{,}1714$ bps/Hz

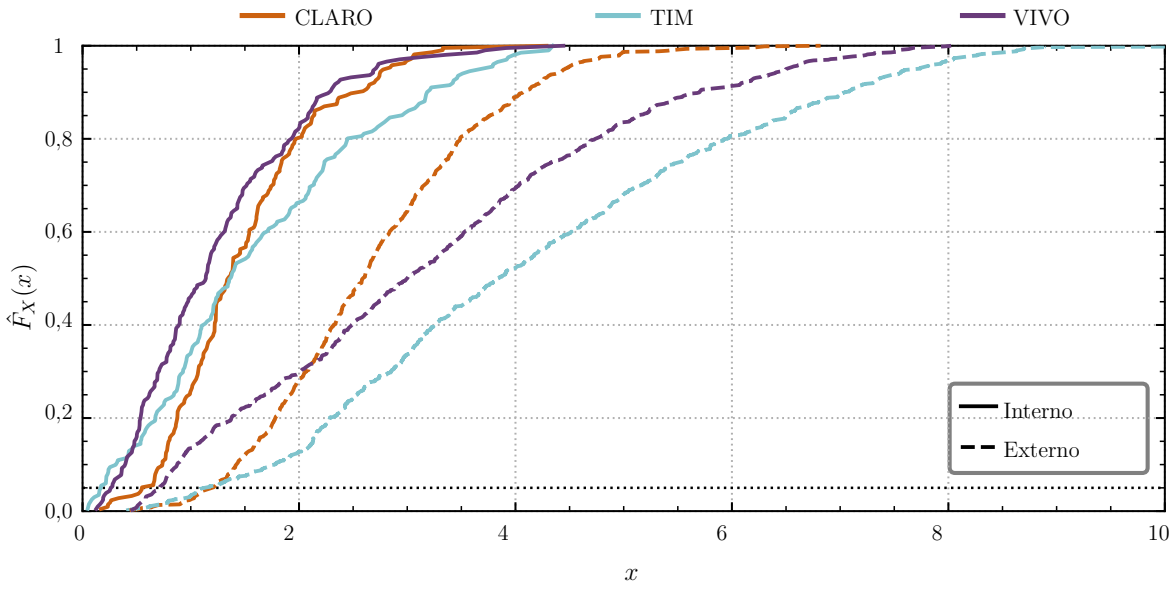
Tabela 4 – Quinto percentil da eficiência espectral estimada para medições externas em LTE.

Operadora	**Banda**	P_5 **[bps/Hz]**
CLARO	LTE Banda 1	0,0626
	LTE Banda 3	0,3485
	LTE Banda 7	0,5325
	LTE Banda 28	0,0713
TIM	LTE Banda 1	0,4192
	LTE Banda 3	0,2692
	LTE Banda 7	0,0697
	LTE Banda 28	0,1349
	LTE Banda 40	0,0199
VIVO	LTE Banda 1	0,4292
	LTE Banda 3	0,3920
	LTE Banda 7	0,9080
	LTE Banda 28	0,4531
	LTE Banda 40	0,0462

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

e $P_5 = 0{,}2771$ bps/Hz, respectivamente. Esse resultado indica que, embora parte das amostras internas apresente eficiência espectral moderada, a região de baixos percentis permanece limitada para essas duas operadoras.

Figura 11 – ECDFs dos valores de eficiência espectral estimada (bps/Hz), calculada com base no SINR (dB), para o 5G NR.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No ambiente externo, todas as operadoras superam o valor de referência de

0,225 bps/Hz. A CLARO apresenta o maior quinto percentil, com $P_5 = 1{,}2132$ bps/Hz, seguida pela TIM, com $P_5 = 1{,}1597$ bps/Hz, e pela VIVO, com $P_5 = 0{,}7132$ bps/Hz. Esses valores indicam que, em ambiente externo, mesmo as amostras associadas às condições mais desfavoráveis apresentam eficiência espectral estimada superior ao critério técnico adotado.

Tabela 5 – Quinto percentil da eficiência espectral estimada em NR.

Operadora	**Cenário**	P_5 **[bps/Hz]**
CLARO	Interno	0,6230
TIM	Interno	0,1714
VIVO	Interno	0,2771
CLARO	Externo	1,2132
TIM	Externo	1,1597
VIVO	Externo	0,7132

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados da Tabela 5 mostram que TIM e VIVO, nas medições internas, não alcançaram o valor adotado como referência técnica. No ambiente externo, todas as operadoras apresentaram desempenho superior ao valor de referência considerado.

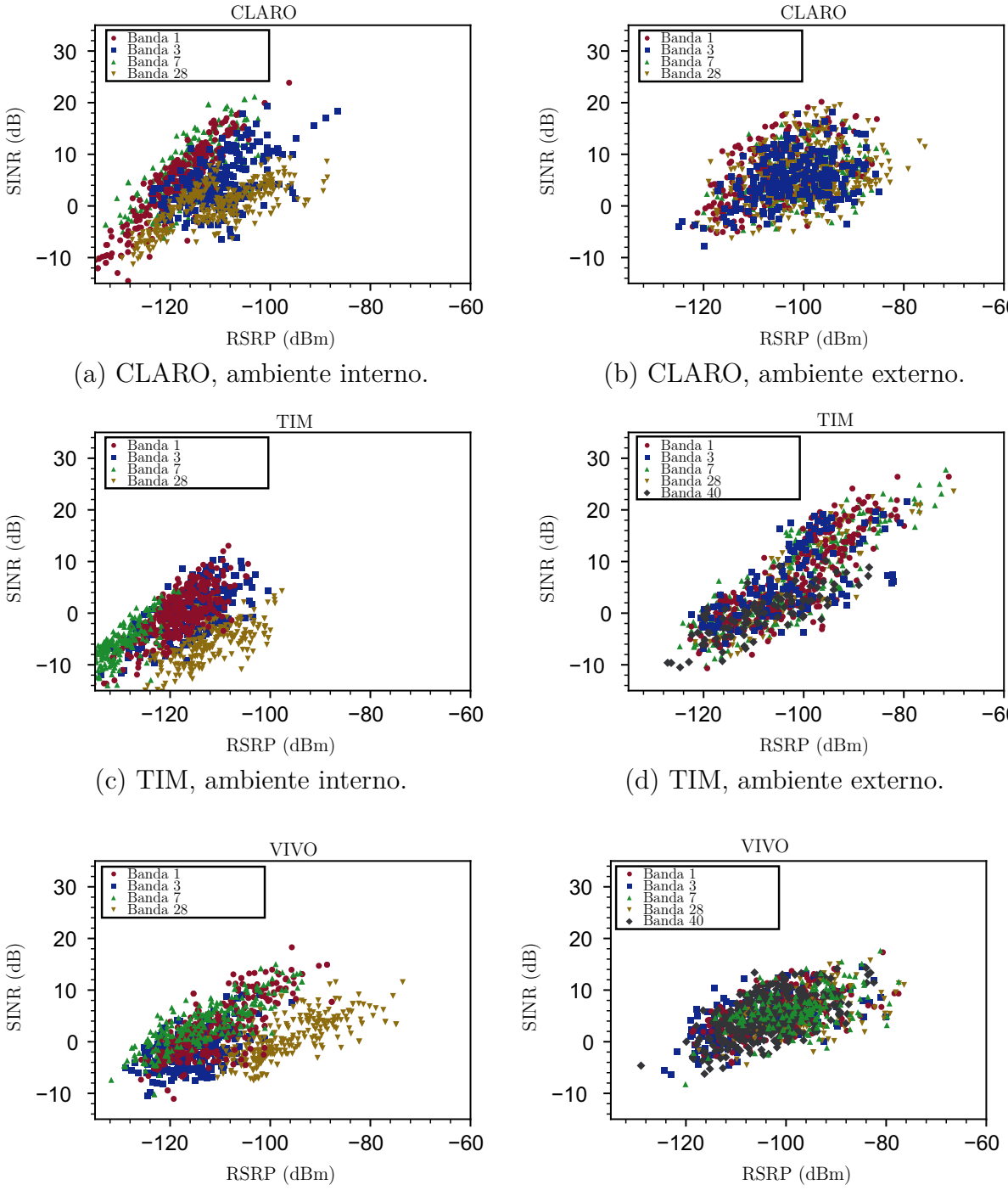
4.3 GRÁFICOS DE DISPERSÃO ENTRE SINR E POTÊNCIA RECEBIDA

Nesta seção analisa-se conjuntamente as métricas de potência recebida e de qualidade do enlace por meio de gráficos de dispersão. Essa representação permite distinguir condições limitadas por cobertura, associadas a baixos valores de RSRP ou SS-RSRP, de condições limitadas por interferência, nas quais o SINR permanece reduzido mesmo para níveis relativamente elevados de potência recebida. Do ponto de vista do planejamento de rede, essa distinção é importante porque cada limitação demanda ações corretivas apropriadas. Por exemplo, problemas de cobertura são tipicamente mitigados com ajustes de potência, novas células ou repetidores, enquanto problemas de interferência exigem coordenação entre células, ajustes de inclinação de antena ou replanejamento de frequências.

A Figura 12 apresenta os gráficos de dispersão entre RSRP e SINR para as redes 4G LTE, considerando as operadoras CLARO, TIM e VIVO nos cenários interno e externo. Observa-se que o ambiente interno apresenta maior espalhamento dos pontos e concentração em valores mais baixos de RSRP e SINR, associados às perdas por penetração em edificações, obstruções internas, propagação multipercurso e possível recepção de sinais interferentes em níveis comparáveis ao sinal desejado.

Para a CLARO, nas Figuras 12a e 12b, observa-se elevada dispersão entre RSRP e SINR, sobretudo em ambiente externo. Mesmo com valores relativamente altos de RSRP, o SINR permanece bastante espalhado, indicando que a limitação não está associada apenas à cobertura, mas também a interferência, sobreposição de setores ou variações

Figura 12 – Gráficos de dispersão entre RSRP e SINR para redes LTE, considerando as operadoras CLARO, TIM e VIVO nos cenários interno e externo.



(a) CLARO, ambiente interno.

(b) CLARO, ambiente externo.

(c) TIM, ambiente interno.

(d) TIM, ambiente externo.

(e) VIVO, ambiente interno.

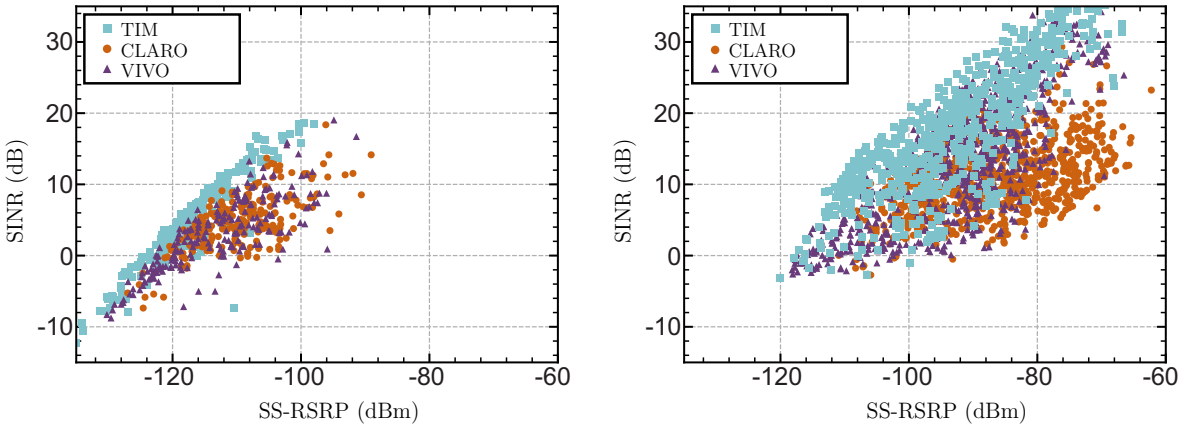
(f) VIVO, ambiente externo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

locais de propagação. Já em relação à TIM, nas Figuras 12c e 12d, a relação entre RSRP e SINR é mais clara, especialmente em ambiente externo. O crescimento mais consistente da SINR com o aumento do RSRP sugere menor influência relativa da interferência. No ambiente interno, ainda há concentração de amostras com baixos valores em ambas as métricas, o que indica limitação de cobertura. Em relação à VIVO, nas Figuras 12e e 12f, observa-se um comportamento intermediário, com menor dispersão do que a da CLARO, mas com relação menos definida do que a da TIM. No ambiente interno, valores moderados ou baixos de SINR, mesmo com RSRP elevado, sugerem interferência. No ambiente externo, a Banda 7 apresenta o comportamento mais favorável, com crescimento mais consistente da SINR.

Na Figura 13 apresentam-se os gráficos de dispersão entre SS-RSRP e SINR para as redes 5G NR. No ambiente interno, na Figura 13a, observa-se uma tendência aproximadamente crescente entre as duas métricas, porém com valores concentrados em faixas reduzidas de SS-RSRP e SINR. A maior parte das amostras permanece abaixo de aproximadamente −100 dBm de SS-RSRP e com SINR predominantemente abaixo de 15 dB, o que evidencia a limitação da cobertura 5G NR em ambiente interno, compatível com a maior perda de penetração da banda $n78$.

Figura 13 – Gráficos de dispersão entre SS-RSRP e SINR para redes 5G NR nos cenários interno e externo.



(a) ambiente interno – 5G NR. (b) ambiente externo – 5G NR.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No ambiente externo de 5G NR (Figura 13b), os pontos deslocam-se para valores maiores de SS-RSRP e SINR. A TIM apresenta os maiores valores de SINR na maior parte das amostras, mesmo sem os maiores níveis de SS-RSRP, indicando melhor separação entre sinal desejado e interferência. A CLARO, apesar do SS-RSRP elevado, tem SINR inferior ao da TIM em parte significativa da distribuição, mostrando que maior potência recebida não implica melhor qualidade de enlace. A VIVO apresenta comportamento intermediário, concentrado em valores moderados de ambas as métricas.

A comparação entre os gráficos das Figuras 12 e 13 mostra que, em ambas as tecnologias 4G e 5G, a análise isolada da potência recebida é insuficiente para caracterizar o desempenho do enlace. De fato, RSRP/SS-RSRP elevado com SINR moderada ou baixa indica limitação por interferência, enquanto baixa potência recebida com baixo SINR indica limitação por cobertura. Assim, a avaliação conjunta de RSRP/SS-RSRP e de SINR é essencial para distinguir esses dois tipos de limitação.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se um estudo de caso de análise comparativa da cobertura e da qualidade do enlace rádio das redes 4G LTE e 5G NR no campus da UFJF, na cidade de Juiz de Fora, considerando medições em ambientes internos e externos. A campanha foi realizada com um scanner de redes móveis, a partir do qual foram obtidos indicadores de camada física, como RSRP, SS-RSRP e SINR. Os dados coletados foram avaliados por meio de ECDFs, percentis estatísticos, eficiência espectral estimada e gráficos de dispersão entre a potência recebida e a qualidade do enlace.

Os resultados das redes 4G LTE mostraram forte dependência do desempenho em relação à operadora, à faixa de frequência e ao ambiente de medição. Em ambientes internos, observou-se degradação significativa dos níveis de RSRP e SINR, principalmente nas bandas de maior frequência, devido a perdas por penetração em edificações, obstruções internas e propagação por múltiplos percursos. As bandas localizadas nas baixas frequências apresentaram melhor cobertura relativa em alguns casos, mas nem sempre resultaram em melhor SINR.

Para as redes 5G NR, os resultados indicaram que a operação na banda $n78$ é fortemente afetada pelo ambiente de propagação. No ambiente interno, os valores de SS-RSRP permaneceram reduzidos para todas as operadoras, indicando uma limitação de cobertura associada à maior perda de penetração na faixa de frequências de 3,3 a 3,8 GHz. No ambiente externo, houve melhora expressiva em SS-RSRP, SINR e na eficiência espectral estimada. Ainda assim, a comparação entre a potência recebida e a qualidade do enlace mostrou que níveis mais altos de sinal não implicam, necessariamente, maior SINR.

A análise de gráficos de dispersão confirmou a importância de avaliar conjuntamente RSRP e SS-RSRP com SINR. Baixos valores simultâneos de potência recebida e SINR indicam uma limitação predominantemente associada à cobertura. Por outro lado, valores elevados de potência recebida, acompanhados de SINR moderado ou baixo, indicam limitação por interferência ou baixa dominância da célula servidora. Essa distinção é relevante para o planejamento de rede, pois o simples aumento da potência recebida pode não resolver problemas causados por interferência ou sobreposição entre células, setores ou feixes.

Nas comparações de eficiência espectral estimada, algumas bandas das redes 4G LTE apresentaram o quinto percentil abaixo dos valores de referência adotados, especialmente no ambiente interno e na Banda 40 no ambiente externo. Em NR, as medições internas de TIM e VIVO ficaram abaixo do valor de referência adotado para o ambiente *Indoor*, enquanto todas as operadoras superaram o valor de referência adotado no ambiente externo. Esses resultados devem ser interpretados como uma comparação indicativa,

pois a eficiência espectral foi estimada a partir do SINR medido e não corresponde a uma avaliação formal de conformidade IMT.

De modo geral, os resultados mostram que o campus da UFJF na cidade de Juiz de Fora apresenta comportamento heterogêneo quanto à cobertura e à qualidade do enlace, com desempenho mais favorável em ambientes externos e limitações mais acentuadas em ambientes internos. Como trabalhos futuros, a ampliação da campanha de medição para outros edifícios e períodos de maior ocupação, além de incluir medições com terminais conectados para avaliar vazão, latência, estabilidade das conexões, mobilidade e experiência de usuário, é o encaminhamento natural do presente trabalho. Estes trabalhos futuros devem considerar informações sobre a localização das estações rádio-base e os parâmetros de planejamento, como azimute, inclinação de antena, potência de transmissão e configuração de bandas, a fim de relacionar os resultados medidos às características reais das redes 4G LTE e 5G NR também deverão ser considerados.

REFERÊNCIAS

1 A. e. B. E. Krasniqi, F. e Maraj, "Performance analysis of mobile 4G/LTE networks," Castória, Grécia, 2018, pp. 1–5.

2 E. Parkvall, Stefan e Dahlman, A. Furuskär, and M. Frenne, "NR: The new 5G radio access technology," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 1, Dez. 2017.

3 W. e. Z. Z.-L. e. G. M. Rochman, Muhammad Iqbal e Ye, "A comprehensive real-world evaluation of 5G improvements over 4G in low- and mid-bands," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, Jun. 2025.

4 G. R. Souza, Resende, and S. T. M. Gonçalves, "Analysis of Wi-Fi and 5G network performance in indoor scenarios: a study at CEFET-MG," *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, Nov. 2025.

5 *R&S® TSMA6B: Autonomous Mobile Network Scanner – Drive and walk testing with maximum flexibility*, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Nov. 2025, brochura do produto, Versão 07.00, Documento Nº 3609-5622-12.

6 ITU-R, "Recommendation ITU-R M.2412-0: Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020," International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector (ITU-R), Recomendação M.2412-0, Out. 2017.

7 Rohde & Schwarz, *ROMES Drive Test Software: Mobile Coverage and QoS Measurements in Mobile Networks*, 33rd ed., Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Munique, Alemanha, Jan. 2026, brochura do produto, PD 5214.2062.12.

8 *SmartAnalytics: Powerful QoE-centric insights into your mobile network performance*, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Set. 2023, brochura do produto, Versão 03.00, Documento Nº 5216.0480.12.

9 L. Wasserman, *All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference*. Nova Iorque, NI, EUA: Springer, dez. 2004, ch. 7, pp. 97–99.

10 Rangeful, *What is RSSI, SINR, RSRP, RSRQ? How Does this Affect Signal Quality?*, 2024, acesso em: maio 2026. [Online]. Available: https://rangeful.com/what-is-rssi-sinr-rsrp-rsrq-how-does-this-affect-signal-quality/

11 ITU-R, "Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s)," International Telecommunication Union, Report ITU-R M.2134, 2008.

12 ITU-R, "Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)," International Telecommunication Union, Report ITU-R M.2410-0, Nov. 2017.

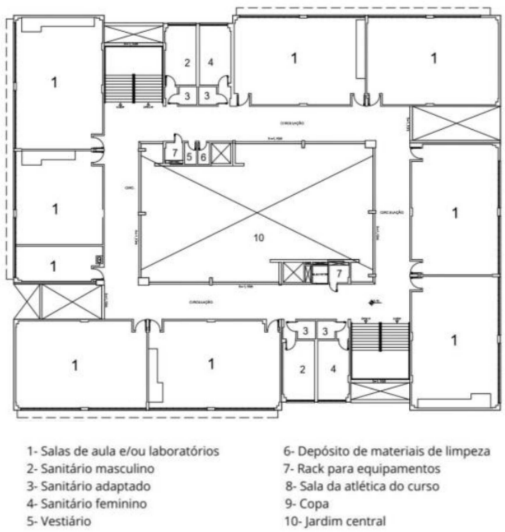
13 A. R. RESTORI, H. SIERRA, F. BRAIDA, and M. RAPOSO, "Análise da acessibilidade no Edifício Engenheiro Itamar Franco da UFJF: uma proposta de intervenção," in *Anais do X Encontro Nacional de Ergonomia do Ambiente Construído e XI Seminário Brasileiro de Acessibilidade Integral*. Maceió, AL, Brasil: Editora Blucher, Set. 2024, pp. 1–12.

A Anexo A - Plantas baixas arquitetônicas do Edifício Itamar Franco.



(a) 1º andar

Fonte: Retirado de [13]



(b) 2º andar

Fonte: Retirado de [13]



(c) 3º andar

Fonte: Retirado de [13]

Figura 14 – Plantas baixas arquitetônicas do Edifício Itamar Franco