



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO (UFERSA)
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO (PROGRAD)
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS (DECEN)
CURSO BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

ELVIS FERNANDES DE LIMA PINTO

PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE RÁDIO NO DESEMPENHO DA TECNOLOGIA 5G

PAU DOS FERROS

2026

ELVIS FERNANDES DE LIMA PINTO

PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE RÁDIO NO DESEMPENHO DA TECNOLOGIA 5G

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Sharon Dantas da Cunha, 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.

L732p Lima Pinto, Elvis Fernandes de.
Propagação de ondas de rádio no desempenho da
tecnologia 5G / Elvis Fernandes de Lima Pinto. -
2026.
49 f. : il.

Orientador: Sharon Dantas da Cunha.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2026.

1. 5G. 2. Sub-6 GHz. 3. Ondas milimétricas. 4.
Massive MIMO. 5. Beamforming. I. Cunha, Sharon
Dantas da, orient. II. 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.

ELVIS FERNANDES DE LIMA PINTO

**PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE RÁDIO NO DESEMPENHO DA
TECNOLOGIA 5G**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 23 / junho / 2026

BANCA EXAMINADORA

Sharon Dantas da Cunha, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Wesley de Oliveira Santos, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Adelson Menezes Lima, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

RESUMO

A tecnologia 5G representa uma evolução significativa das redes móveis ao utilizar diferentes faixas de frequência para atender requisitos de cobertura, capacidade, confiabilidade e baixa latência. Nesse contexto, a propagação das ondas de rádio desempenha papel fundamental no desempenho da comunicação sem fio, influenciando diretamente a qualidade do sinal e a eficiência da rede. Este trabalho teve como objetivo analisar os impactos da propagação das ondas de rádio nas faixas Sub-6 GHz e mmWave no desempenho das redes 5G, por meio de uma pesquisa bibliográfica de natureza qualitativa, com abordagem descritiva e analítica. A pesquisa concentrou-se nos principais fenômenos físicos da propagação, incluindo reflexão, difração, espalhamento, atenuação e multipercurso, bem como nos seus efeitos sobre a cobertura, a capacidade de transmissão e a estabilidade do sinal. Os resultados evidenciaram que as frequências Sub-6 GHz apresentam maior alcance e melhor capacidade de penetração em obstáculos, favorecendo aplicações que demandam ampla cobertura e estabilidade de conexão. Por outro lado, as frequências mmWave possibilitam taxas de transmissão significativamente mais elevadas, porém apresentam maior sensibilidade à atenuação e ao bloqueio por obstáculos. A análise também demonstrou que tecnologias como *beamforming*, *Massive MIMO*, *small cells* e mecanismos avançados de gerenciamento de mobilidade são fundamentais para mitigar as limitações impostas pela propagação e viabilizar aplicações críticas do 5G, como Internet das Coisas (IoT), *Fixed Wireless Access* (FWA) e *Ultra-Reliable Low-Latency Communications* (URLLC). Conclui-se que o desempenho das redes 5G está diretamente associado à compreensão dos fenômenos de propagação e à utilização adequada das diferentes faixas de frequência e tecnologias de mitigação, permitindo alcançar um equilíbrio entre cobertura, capacidade e confiabilidade.

Palavras-chave: 5G; sub-6 GHz; ondas milimétricas; massive MIMO; beamforming.

ABSTRACT

The 5G technology represents a significant evolution of mobile networks by using different frequency bands to meet requirements of coverage, capacity, reliability, and low latency. In this context, radio wave propagation plays a fundamental role in the performance of wireless communication, directly influencing signal quality and network efficiency. This study aimed to analyze the impacts of radio wave propagation in the Sub-6 GHz and mmWave bands on the performance of 5G networks, through a bibliographic research with a qualitative, descriptive, and analytical approach. The research focused on the main physical propagation phenomena, including reflection, diffraction, scattering, attenuation, and multipath, as well as their effects on coverage, transmission capacity, and signal stability. The results showed that Sub-6 GHz frequencies present greater range and better obstacle penetration capability, favoring applications that require wide coverage and stable connectivity. On the other hand, mmWave frequencies enable significantly higher data transmission rates, but are more sensitive to attenuation and obstruction by obstacles. The analysis also demonstrated that technologies such as beamforming, Massive MIMO, small cells, and advanced mobility management mechanisms are essential to mitigate propagation limitations and enable critical 5G applications, such as Internet of Things (IoT), Fixed Wireless Access (FWA), and Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC). It is concluded that the performance of 5G networks is directly associated with the understanding of propagation phenomena and the proper use of different frequency bands and mitigation technologies, allowing a balance between coverage, capacity, and reliability.

Keywords: 5G; sub-6 GHz; millimeter waves; massive MIMO; beamforming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Funcionamento da técnica de <i>beamforming</i> em redes 5G.....	22
Figura 2	–	Principais fenômenos de propagação das ondas de rádio em ambientes urbanos.....	33
Figura 3	–	Comparação entre a transmissão convencional e a técnica de <i>beamforming</i> em redes 5G.....	38
Figura 4	–	Funcionamento do <i>Massive MIMO</i> em redes 5G.....	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	– Principais fenômenos de propagação das ondas de rádio.....	18
Quadro 2	– Principais materiais utilizados na pesquisa	28
Quadro 3	– Relatórios técnicos utilizados na pesquisa	29
Quadro 4	– Materiais complementares utilizados na fundamentação teórica da pesquisa.	30
Quadro 5	– Organização temática das referências bibliográficas.....	31
Quadro 6	– Comparação técnica entre as faixas Sub-6 GHz e mmWave no contexto das redes 5G.....	34

LISTA DE SIGLAS

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ERB	Estação Rádio-Base
FWA	Acesso Fixo Sem Fio (<i>Fixed Wireless Access</i>)
GHz	Gigahertz
IoT	Internet das Coisas (Internet of Things)
LTE	Evolução de Longo Prazo (<i>Long Term Evolution</i>)
MIMO	Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (<i>Multiple Input Multiple Output</i>)
mmWave	Ondas Milimétricas (<i>Millimeter Wave</i>)
QoS	Qualidade de Serviço (<i>Quality of Service</i>)
URLLC	Comunicações Ultraconfiáveis de Baixa Latência (<i>Ultra-Reliable Low-Latency Communications</i>)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivo	13
1.2 Objetivos Específicos	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 A Propagação de Ondas de Rádio e suas Implicações no 5G	14
2.1.1. Evolução das tecnologias móveis	14
2.1.2. Faixas de frequência utilizadas no 5G.....	16
2.1.3. Conceito de propagação de ondas de rádio	17
2.1.4. Principais fenômenos físicos da propagação das ondas de rádio.....	19
2.1.5. Tecnologias utilizadas para mitigar os efeitos da perda de sinal no 5G.....	21
2.2. Comparação entre Sub-6 GHz e mmWave: Desafios, Comportamentos e Aplicações no Brasil	24
2.3. Impactos da propagação no desempenho de aplicações críticas no 5G	25
3 METODOLOGIA	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1 Análise temática e técnica do conteúdo	31
4.2 Fenômenos físicos que afetam a propagação das ondas de rádio no 5G	31
4.3 Comparação entre as faixas Sub-6 GHz e mmWave.....	34
4.4 Desafios da cobertura e qualidade de sinal em diferentes ambientes	36
4.5 Tecnologias utilizadas para mitigação dos efeitos da propagação	38
4.5.1 <i>Beamforming</i>	38
4.5.2 <i>Massive MIMO</i>	39
4.5.3 <i>Small Cells</i>	41
4.5.4 <i>Handover</i> e gerenciamento de mobilidade.....	42
4.6 Impactos da propagação nas aplicações críticas do 5G	43
4.7 Síntese dos resultados encontrados	45
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

As ondas de rádio, embora invisíveis aos olhos, estão por toda parte: cruzam céus, atravessam paredes e conectam dispositivos em questão de milissegundos. Constituem o fio invisível que sustenta o ecossistema digital do século XXI. Desde o final do século XIX, essas ondas tornaram-se pilares da comunicação sem fio e, mesmo diante do avanço da fibra óptica e dos sistemas via satélite, continuam a desempenhar papel central nas redes móveis modernas, adaptando-se continuamente às novas exigências tecnológicas (Escola Electra, 2011; Ferreira Filho 2025). Com a chegada do 5G, esse protagonismo se intensifica: a quinta geração de redes móveis promete maiores velocidades, latência reduzida e conectividade massiva, viabilizando a expansão da Internet das Coisas (IoT), o suporte a aplicações críticas em tempo real e novos modelos de negócio digitais. Conforme destaca Resende (2023), o 5G representa uma evolução que vai além do simples aumento de velocidade, caracterizando-se como um novo paradigma de comunicação, no qual dispositivos se conectam de forma autônoma e inteligente, com mínima intervenção humana.

Entretanto, para que esse potencial se concretize plenamente, torna-se imprescindível compreender os desafios físicos associados à propagação das ondas de rádio, especialmente nas faixas de frequência empregadas pelo 5G, como faixa do espectro de rádio abaixo de 6 GHz (Sub-6 GHz) e as ondas milimétricas (mmWave). Embora essas faixas ofereçam elevada capacidade de transmissão de dados, apresentam limitações significativas, como perdas por obstrução, baixa penetração em obstáculos e alta sensibilidade a condições ambientais e atmosféricas. Nesse sentido, Silva (2016) ressalta que o estudo dos modelos de canal, particularmente na faixa de ondas milimétricas, é fundamental para compreender o comportamento do sinal em ambientes urbanos, internos e externos, bem como seus impactos diretos no desempenho da rede.

As diferenças entre as faixas Sub-6 GHz e mmWave tornam-se ainda mais evidentes quando analisadas sob a perspectiva da propagação. Enquanto as frequências Sub-6 GHz apresentam maior alcance e melhor capacidade de penetração em obstáculos, favorecendo uma cobertura mais ampla e estável, as ondas milimétricas, apesar de oferecerem maior largura de banda, sofrem intensa atenuação e exigem, na maioria dos casos, linha de visada direta (LoS – *Line of Sight*) para manter a integridade do enlace. O conceito de LoS refere-se à existência de uma trajetória retilínea, desimpedida e livre de obstáculos físicos entre as antenas transmissora e receptora. Silva (2016) destaca que a faixa mmWave possui severas

limitações de alcance e elevada vulnerabilidade em ambientes indoor, comprometendo a estabilidade da conexão em aplicações críticas. Em contrapartida, conforme Assis (2022), as faixas Sub-6 GHz proporcionam maior estabilidade de propagação, ainda que com menor capacidade espectral.

Diante desses desafios, técnicas avançadas como *beamforming*, MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), massivo MIMO e o uso intensivo de *small cells* emergem como soluções fundamentais para mitigar os efeitos adversos da propagação. Essas tecnologias possibilitam o direcionamento inteligente do sinal, o aproveitamento da diversidade espacial e o aumento da densidade de cobertura, contribuindo para maior eficiência espectral e confiabilidade da comunicação, mesmo em ambientes com elevada concentração de dispositivos e obstáculos físicos. Contudo, estudos recentes indicam que, apesar de promissoras, essas soluções ainda enfrentam desafios relacionados à complexidade de implementação e à necessidade de condições específicas de operação, especialmente nas faixas de alta frequência (Matias *et al.*, 2022).

No contexto brasileiro, a análise da propagação das ondas de rádio no 5G adquire relevância estratégica. A expansão dessa tecnologia é vista como um vetor para a inclusão digital, o fortalecimento da indústria e a modernização da infraestrutura de comunicação. Relatórios como o da XP Investimentos (2022) indicam que o 5G, especialmente quando associado a soluções de *Fixed Wireless Access* (FWA), possui potencial para ampliar a conectividade em regiões onde o acesso à internet por fibra óptica ainda é limitado. O documento da Futurecom (2023) reforça esse panorama ao destacar o papel do 5G na transformação digital de setores como agricultura, educação e indústria. Por outro lado, o Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor – IDEC (*s.d.*) alerta que a adoção plena da tecnologia depende não apenas de investimentos em infraestrutura, mas também de políticas públicas que considerem as desigualdades regionais e regulatórias do país.

Apesar da relevância do tema, ainda são limitados os estudos que abordam de forma integrada os impactos da propagação das ondas de rádio nas faixas Sub-6 GHz e mmWave e suas implicações práticas no desempenho das redes 5G. Muitos estudos concentram-se em simulações ou ambientes controlados, desconsiderando as limitações encontradas em cenários reais de implantação. Essa lacuna evidencia a necessidade de uma investigação técnica sistemática que relacione os fenômenos físicos da propagação aos desafios enfrentados pelas redes móveis de quinta geração em diferentes contextos (Silva, 2016; Resende, 2023).

1.1 Objetivo

Analisar, por meio de revisão bibliográfica e análise técnica, os impactos da propagação das ondas de rádio nas faixas Sub-6 GHz e mmWave sobre o desempenho das redes 5G.

1.2 Objetivos Específicos

- Examinar os principais fenômenos físicos da propagação das ondas de rádio que influenciam o desempenho das frequências utilizadas nas redes 5G;
- Comparar as faixas de frequência Sub-6 GHz e mmWave, destacando diferenças no alcance, na capacidade de penetração em obstáculos, na sensibilidade às condições ambientais, e na capacidade de transmissão de dados;
- Analisar as principais tecnologias empregadas para mitigar os efeitos adversos da propagação das ondas de rádio: *Beamforming*, *Massive MIMO*, *Small cells*, *Mecanismos de handover*, *Fixed Wireless Access* (FWA);
- Relacionar os fenômenos de propagação e as tecnologias de mitigação ao desempenho das aplicações críticas do 5G: Internet das Coisas (IoT), *Fixed Wireless Access* (FWA), *Ultra-Reliable Low-Latency Communications* (URLLC)
- Evidenciar a importância da escolha adequada das faixas de frequência e do planejamento da infraestrutura para atender às exigências de cobertura, capacidade, confiabilidade e baixa latência

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A Propagação de Ondas de Rádio e suas Implicações no 5G

A Comunicação sem fio baseia-se na transmissão de informações por meio de ondas eletromagnéticas que se propagam entre dispositivos transmissores e receptores. Durante esse percurso, o sinal está sujeito à influência de diversos elementos presentes no ambiente, como edificações, relevo, vegetação e condições atmosféricas, fatores que podem alterar suas características e impactar a qualidade da comunicação (Escola Electra, 2011; Ferreira Filho, 2025).

O avanço das redes móveis ampliou a importância dos estudos relacionados à propagação dos sinais, especialmente com a introdução do 5G. Diferentemente das gerações anteriores, essa tecnologia opera em múltiplas faixas de frequência e foi projetada para atender requisitos mais rigorosos de velocidade de transmissão, capacidade de conexão, confiabilidade e baixa latência (Mota *et al.*, 2018;). Como consequência, a compreensão dos mecanismos de propagação tornou-se um aspecto fundamental para o planejamento e a operação das redes de quinta geração.

Diante desse cenário, os principais fundamentos teóricos relacionados à evolução das redes móveis, às faixas de frequência empregadas pelo 5G e aos fenômenos físicos que influenciam a propagação dos sinais de rádio. Esses conceitos fornecem a base necessária para a compreensão dos desafios técnicos associados ao desenvolvimento e à implementação das redes 5G (Resende, 2023).

2.1.1. Evolução das tecnologias móveis

O desenvolvimento das tecnologias de comunicação móvel ocorreu de forma progressiva ao longo das últimas décadas, acompanhando o crescimento da demanda por conectividade, mobilidade e transmissão de dados. Inicialmente voltadas para serviços de voz, as redes móveis evoluíram para suportar aplicações cada vez mais complexas, incorporando melhorias em capacidade, eficiência espectral, velocidade de transmissão e qualidade dos serviços oferecidos aos usuários. Segundo Mota (2018), cada nova geração foi desenvolvida para superar limitações técnicas da anterior e atender às necessidades emergentes da sociedade digital.

A primeira geração das redes móveis (1G), introduzida na década de 1980, utilizava sistemas analógicos destinados exclusivamente à comunicação de voz. Apesar de representar um importante avanço para a época, apresentava limitações relacionadas à capacidade da rede, à qualidade das chamadas e à segurança das comunicações. De acordo com a Universidade Federal do Rio de Janeiro (2025), a ausência de mecanismos de criptografia e a baixa eficiência no uso do espectro de radiofrequência constituíam alguns dos principais desafios desta geração.

Com os avanços da eletrônica digital e dos sistemas de telecomunicações, surgiu a segunda geração (2G), responsável por introduzir a digitalização das comunicações móveis. Essa mudança permitiu maior eficiência na utilização do espectro, melhor qualidade das chamadas e o surgimento de novos serviços, como o envio de mensagens de texto (SMS). Além disso, os sistemas digitais apresentaram maior resistência a interferências quando comparados às tecnologias analógicas anteriormente empregadas (Mota *et al.*, 2018).

A terceira geração (3G) foi desenvolvida com o objetivo de ampliar a capacidade de transmissão de dados nas redes móveis. O aumento das taxas de comunicação possibilitou o acesso à internet por dispositivos móveis e favoreceu a expansão de aplicações multimídia, como navegação web, videoconferências e transmissão de conteúdo digital. Conforme destacado pelo Brasil Escola (2024), essa geração representou um importante marco para a popularização dos serviços de dados móveis.

Posteriormente, a quarta geração (4G), baseada principalmente na tecnologia LTE (Long Term Evolution), elevou significativamente o desempenho das comunicações móveis. O aumento da eficiência espectral e das velocidades de transmissão possibilitou a consolidação de serviços como streaming de vídeo em alta definição, computação em nuvem e aplicações que demandam grande volume de tráfego de dados. Segundo Mota *et al.* (2018), essa evolução foi acompanhada pela adoção de técnicas mais avançadas de comunicação, incluindo sistemas de múltiplas antenas (MIMO), que contribuíram para melhorar a capacidade da rede e a experiência dos usuários.

O crescimento contínuo do tráfego de dados e o surgimento de novas demandas tecnológicas impulsionaram o desenvolvimento da quinta geração das redes móveis (5G). Diferentemente das gerações anteriores, essa tecnologia foi concebida para atender simultaneamente requisitos de alta velocidade, baixa latência, elevada confiabilidade e conectividade massiva entre dispositivos. Aplicações associadas à Internet das Coisas (IoT),

idades inteligentes, automação industrial e veículos conectados figuram entre os principais cenários que motivaram sua criação (Santos *et al.*, 2020; Resende, 2023).

Além das mudanças observadas na arquitetura e nos protocolos de comunicação, o desenvolvimento do 5G também ampliou a utilização do espectro de radiofrequência disponível para as comunicações móveis. Conforme apresentado pela Escola Electra (2011), a crescente demanda por capacidade de transmissão exige o aproveitamento de diferentes faixas de frequência, permitindo a oferta de serviços cada vez mais avançados e diversificados.

Independentemente da geração tecnológica empregada, a comunicação móvel continua fundamentada na transmissão de informações por meio de ondas eletromagnéticas propagadas entre antenas transmissoras e receptoras. As características dessa propagação influenciam diretamente o desempenho das redes sem fio, tornando seu estudo particularmente relevante no contexto do 5G. Dessa forma, torna-se necessário compreender as faixas de frequência utilizadas por essa tecnologia e os fenômenos físicos associados à propagação dos sinais de rádio, temas abordados nas próximas seções.

2.1.2. Faixas de frequência utilizadas no 5G

O desenvolvimento das redes de quinta geração (5G) trouxe mudanças significativas na utilização do espectro de radiofrequência em comparação às gerações anteriores. Para atender às demandas por maior capacidade de transmissão de dados, menor latência e suporte a um grande número de dispositivos conectados, essa tecnologia passou a explorar diferentes porções do espectro eletromagnético, incluindo frequências abaixo de 6 GHz e bandas mais elevadas conhecidas como ondas milimétricas (Silva, 2016).

De maneira geral, as frequências empregadas pelo 5G podem ser agrupadas em duas categorias principais: as faixas Sub-6 GHz e as faixas de ondas milimétricas (mmWave). Conforme destaca Assis (2022), cada uma dessas bandas apresenta características próprias de propagação, alcance e capacidade de transmissão, influenciando a forma como os serviços são disponibilizados aos usuários.

As faixas Sub-6 GHz compreendem frequências inferiores a 6 GHz e estão entre as mais utilizadas nas implementações iniciais do 5G. Essas bandas apresentam características de propagação semelhantes às observadas em tecnologias móveis anteriores, possibilitando ampla cobertura e comunicação em diferentes ambientes. Além disso, o maior comprimento de onda favorece a interação do sinal com obstáculos presentes no meio de propagação,

aspecto importante para a cobertura de áreas urbanas e suburbanas (Assis, 2022; Ferreira Filho, 2020).

Por sua vez, as ondas milimétricas correspondem a frequências mais elevadas, geralmente acima de 24 GHz. Segundo Silva (2016), essas bandas disponibilizam larguras de banda significativamente maiores, permitindo o transporte de grandes volumes de informação e viabilizando aplicações que demandam elevadas taxas de transmissão de dados. Em razão do reduzido comprimento de onda, as frequências mmWave apresentam comportamento de propagação distinto daquele observado nas bandas tradicionais utilizadas pelas redes móveis.

As características físicas dessas frequências influenciam diretamente a forma como o sinal se propaga no ambiente. Conforme descrito por Resende (2023), fatores como obstáculos físicos, condições atmosféricas e características do meio podem interferir na transmissão das ondas de rádio, exigindo o emprego de técnicas específicas para otimizar o desempenho da comunicação. Nesse contexto, recursos como *beamforming* e sistemas de múltiplas antenas tornaram-se elementos importantes na arquitetura das redes 5G.

A utilização de diferentes faixas do espectro constitui uma das principais características das redes 5G, permitindo que a tecnologia atenda requisitos distintos de cobertura, capacidade e desempenho. Conforme discutem Silva (2016) e Resende (2023), as particularidades de cada banda de frequência influenciam diretamente o comportamento dos sinais durante a propagação, tornando necessária a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos na transmissão das ondas de rádio. Dessa forma, o estudo desses fenômenos torna-se fundamental para analisar os desafios e as limitações associados ao funcionamento das redes de quinta geração.

2.1.3. Conceito de propagação de ondas de rádio

A propagação de ondas de rádio constitui um dos fundamentos dos sistemas de comunicação sem fio. Esse processo ocorre quando uma onda eletromagnética é transmitida por uma antena e se desloca através do meio de propagação até alcançar um receptor. Durante esse percurso, o sinal pode interagir com diferentes elementos do ambiente, como edificações, vegetação, relevo e condições atmosféricas, sofrendo alterações que influenciam seu comportamento (Escola Electra, 2011; Ferreira Filho, 2020).

As ondas de rádio fazem parte do espectro eletromagnético e são amplamente empregadas em aplicações de telecomunicações, incluindo radiodifusão, telefonia móvel, televisão e transmissão de dados. Segundo Ferreira Filho (2025), essas ondas podem se

propagar tanto no vácuo quanto em meios materiais, transportando energia e informação entre dispositivos transmissores e receptores. Nos sistemas de comunicação sem fio, a transmissão ocorre por meio da conversão de sinais elétricos em ondas eletromagnéticas por uma antena transmissora, que posteriormente são captadas e processadas por uma antena receptora (Mota *et al.*, 2018). Durante o percurso entre a antena transmissora e a antena receptora, as ondas de rádio interagem com os elementos presentes no ambiente, podendo sofrer alterações que afetam o comportamento do sinal transmitido. Os principais fenômenos físicos que influenciam a propagação das ondas de rádio estão presentes no Quadro 1. Esses fenômenos afetam diretamente a qualidade e o alcance dos sinais transmitidos, podendo provocar alterações na intensidade, na direção e na estabilidade da comunicação sem fio (Ferreira Filho, 2025; Escola Electra, 2011).

Quadro 1- Principais fenômenos de propagação das ondas de rádio.

Fenômeno	Característica principal	Efeito na comunicação
Reflexão	O sinal incide sobre superfícies de grandes dimensões	Altera a direção de propagação e pode gerar múltiplos percursos
Difração	O sinal contorna obstáculos presentes no ambiente	Permite comunicação mesmo sem visada direta
Espalhamento	Ocorre em superfícies irregulares ou objetos pequenos	Dispersa a energia do sinal em várias direções
Atenuação	Redução gradual da potência durante a propagação	Diminui o alcance e a intensidade do sinal recebido

Fonte: Adaptado de Ferreira Filho (2025) e Escola Electra (2011).

A partir dos fenômenos descritos no Quadro 1, observa-se que, além desses fenômenos, destaca-se a propagação por múltiplos caminhos (multipath propagation), situação em que o sinal chega ao receptor por diferentes trajetórias devido à ocorrência simultânea de reflexões, difrações e espalhamentos. Conforme descrevem Mota *et al.* (2018), esse comportamento pode provocar variações na intensidade do sinal recebido, fenômeno conhecido como fading, capaz de afetar a qualidade da comunicação em sistemas sem fio.

A compreensão dos mecanismos envolvidos na propagação das ondas de rádio é essencial para o estudo das redes móveis modernas. As características do meio de propagação influenciam diretamente o desempenho dos sistemas de comunicação e tornam-se particularmente relevantes em tecnologias que utilizam diferentes faixas do espectro de radiofrequência, como ocorre nas redes 5G.

2.1.4. Principais fenômenos físicos da propagação das ondas de rádio

A propagação das ondas de rádio em sistemas de comunicação sem fio é influenciada por diversos fenômenos físicos que ocorrem quando as ondas eletromagnéticas interagem com o ambiente. Durante o percurso entre a antena transmissora e a antena receptora, o sinal pode sofrer alterações provocadas pela presença de obstáculos, superfícies refletoras e irregularidades do meio de propagação. Essas interações modificam a trajetória, a intensidade e as características do sinal recebido, influenciando diretamente o desempenho dos sistemas de telecomunicações. Conforme destaca Silva (2016), os canais de comunicação sem fio apresentam comportamento altamente dependente das condições do ambiente, tornando comuns fenômenos como reflexão, difração, espalhamento, atenuação e propagação por múltiplos caminhos.

Entre os fenômenos mais relevantes destaca-se a reflexão, que ocorre quando uma onda eletromagnética incide sobre uma superfície cujas dimensões são significativamente maiores que seu comprimento de onda. Nessa situação, parte da energia do sinal é refletida, alterando sua direção de propagação. Esse fenômeno é frequentemente observado em ambientes urbanos devido à presença de edifícios, fachadas, estruturas metálicas e outras superfícies capazes de refletir as ondas de rádio. Segundo Ferreira Filho (2025), a reflexão pode contribuir para a formação de múltiplas trajetórias de propagação, fazendo com que diferentes cópias do mesmo sinal alcancem o receptor em instantes distintos. Como consequência, podem ocorrer interferências construtivas ou destrutivas que afetam a qualidade da comunicação, conforme observado por Resende (2023).

Outro fenômeno importante é a difração, caracterizada pela capacidade das ondas de rádio de contornar obstáculos presentes em seu percurso. Esse comportamento permite que o sinal alcance regiões que não possuem linha de visada direta entre transmissor e receptor, contribuindo para a continuidade da comunicação mesmo em ambientes com barreiras físicas. Conforme descrito pela Escola Electra (2011), a difração ocorre com frequência em cenários urbanos e montanhosos, nos quais edificações, morros e outras estruturas podem bloquear parcialmente o caminho direto do sinal. Silva (2016) ressalta que esse fenômeno desempenha papel fundamental na ampliação da área de cobertura das redes móveis, permitindo que dispositivos permaneçam conectados mesmo em condições desfavoráveis de propagação.

O espalhamento ocorre quando as ondas eletromagnéticas encontram objetos de dimensões comparáveis ou inferiores ao seu comprimento de onda, ou ainda superfícies com elevado grau de irregularidade. Nessas condições, a energia do sinal é dispersa em diversas

direções, reduzindo a concentração da potência transmitida em uma única trajetória. Elementos como árvores, postes, placas metálicas, mobiliário urbano e vegetação costumam favorecer a ocorrência desse fenômeno. Silva (2016) e Resende (2023) destacam que o espalhamento contribui para a variabilidade do canal de comunicação e pode provocar flutuações na intensidade do sinal recebido, especialmente em ambientes externos densamente ocupados.

Além das alterações provocadas pela interação com obstáculos, as ondas de rádio também sofrem atenuação, fenômeno associado à redução gradual da potência do sinal ao longo da propagação. A perda de energia ocorre naturalmente à medida que a distância entre transmissor e receptor aumenta, mas também pode ser intensificada pela presença de barreiras físicas, absorção atmosférica e características do próprio meio de propagação. Conforme descrito pela Escola Electra (2011), a diminuição da intensidade do sinal constitui uma das principais limitações dos sistemas sem fio, pois influencia diretamente a cobertura e a qualidade da comunicação. Em frequências mais elevadas do espectro eletromagnético, os efeitos da atenuação tornam-se ainda mais expressivos devido ao menor comprimento de onda, o que reduz o alcance do sinal e aumenta a dependência de mecanismos de compensação (Silva, 2016).

A atuação conjunta desses fenômenos frequentemente resulta na chamada propagação por múltiplos caminhos (multipath propagation). Nessa situação, o sinal transmitido percorre diferentes trajetórias antes de alcançar o receptor, devido à ocorrência simultânea de reflexões, difrações e espalhamentos ao longo do percurso. Como consequência, múltiplas versões do mesmo sinal chegam ao destino com diferentes níveis de potência e pequenos atrasos temporais. Segundo Silva (2016), esse comportamento é particularmente comum em ambientes urbanos, onde a elevada quantidade de obstáculos favorece a formação de trajetórias alternativas de propagação. Resende (2023) observa que o multipercurso pode provocar interferências, distorções e variações na intensidade do sinal recebido.

Uma das consequências diretas da propagação por múltiplos caminhos é o desvanecimento (*fading*), fenômeno caracterizado por oscilações na potência do sinal ao longo do tempo ou do espaço, o qual pode comprometer a estabilidade e a confiabilidade da transmissão sem fio (Resende, 2023). Em termos conceituais, a intensidade com que o desvanecimento e os demais fenômenos físicos afetam o canal de rádio é intrinsecamente dependente da frequência de operação utilizada e das características geométricas do cenário de implantação (Silva, 2016; Escola Electra, 2011). Dessa forma, a compreensão desses

fundamentos teóricos e matemáticos de propagação é indispensável para subsidiar a análise aplicada do desempenho de redes de conectividade em diferentes faixas espectrais, conforme será detalhado nas seções subsequentes.

2.1.5. Tecnologias utilizadas para mitigar os efeitos da perda de sinal no 5G

Os desafios relacionados à propagação das ondas de rádio, especialmente nas frequências mais elevadas utilizadas no 5G, impulsionaram o desenvolvimento de soluções capazes de reduzir perdas de sinal e melhorar o desempenho da comunicação sem fio. Como discutido anteriormente, fenômenos como atenuação, bloqueio por obstáculos e multipercurso podem comprometer a cobertura e a qualidade da transmissão, tornando necessária a adoção de técnicas que aumentem a eficiência do uso do espectro e a robustez da rede. Nesse contexto, destacam-se tecnologias como *beamforming*, *Massive MIMO*, *small cells* e mecanismos avançados de gerenciamento de mobilidade, que atuam de forma complementar para viabilizar os requisitos de desempenho exigidos pelas redes de quinta geração (Silva, 2016; Resende, 2023).

O *beamforming* é uma técnica de transmissão que permite direcionar o sinal de rádio de forma mais precisa em direção ao usuário. Diferentemente dos sistemas convencionais, nos quais a energia é irradiada de maneira mais ampla, essa tecnologia concentra a transmissão em feixes direcionais, aumentando a intensidade do sinal na região desejada. Conforme destaca Assis (2022), o *beamforming* utiliza múltiplos elementos de antena com controle de fase e amplitude para formar feixes capazes de acompanhar dinamicamente a posição do usuário.

Essa característica torna-se particularmente importante nas frequências mmWave, que apresentam maior sensibilidade à atenuação e aos obstáculos presentes no ambiente. Ao concentrar a energia do sinal em direções específicas, o *beamforming* contribui para ampliar o alcance efetivo da comunicação e melhorar a qualidade do enlace, reduzindo parte das limitações impostas pela propagação em altas frequências.

A diferença entre a forma de transmissão utilizada nas redes 4G e as técnicas empregadas no 5G pode ser observada na Figura 1. Enquanto os sistemas convencionais irradiam o sinal de maneira ampla para atender simultaneamente todos os usuários presentes na área de cobertura, as redes 5G utilizam tecnologias como o *Massive MIMO* e o *beamforming* para direcionar feixes de rádio específicos a cada dispositivo. Essa abordagem reduz perdas de propagação, melhora a qualidade do sinal recebido e aumenta a eficiência espectral, sendo especialmente importante nas frequências mais elevadas utilizadas pelo 5G.

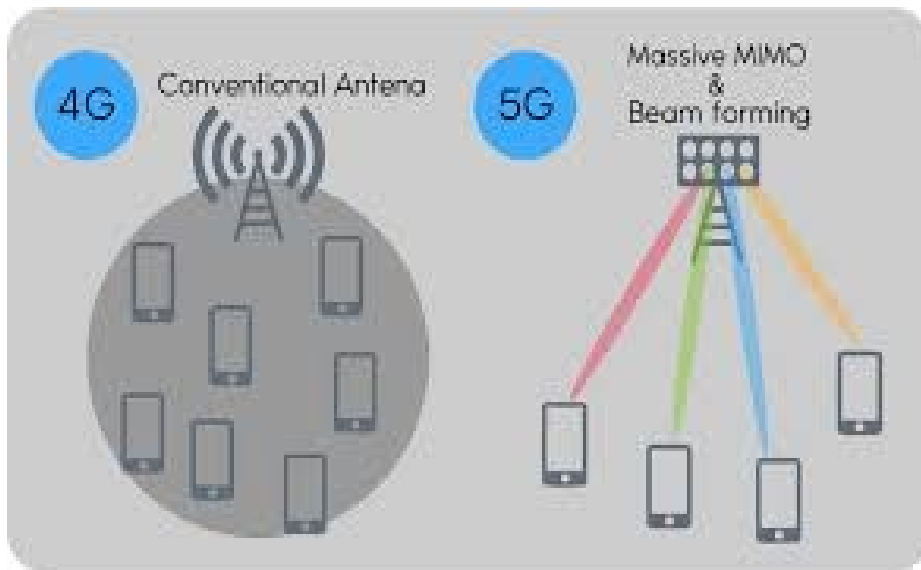


Figura 1 – Funcionamento da técnica de *beamforming* em redes 5G

Fonte: Adaptado de JAPIAS (2020)

Conforme ilustrado na Figura 1, a utilização conjunta de *Massive MIMO* e *beamforming* permite que a estação rádio base forme múltiplos feixes direcionados aos dispositivos conectados, concentrando a energia do sinal apenas onde ela é necessária. Essa estratégia reduz interferências, melhora a intensidade do sinal recebido e aumenta a eficiência espectral da rede, tornando-se especialmente importante nas frequências mais elevadas utilizadas pelo 5G, nas quais os efeitos da atenuação e da obstrução são mais pronunciados (Assis, 2022; Resende, 2023).

Outra tecnologia fundamental para o 5G é o *Massive MIMO* (*Massive Multiple Input Multiple Output*), evolução dos sistemas MIMO já empregados em gerações anteriores de redes móveis. Essa técnica consiste na utilização de um grande número de antenas na estação rádio-base para transmitir e receber múltiplos fluxos de dados simultaneamente. Segundo Matias (2022), essa abordagem permite aumentar significativamente a eficiência espectral e a capacidade da rede, atendendo a um número maior de usuários sem a necessidade de ampliação proporcional da largura de banda disponível.

Além do aumento da capacidade, o *Massive MIMO* contribui para melhorar a confiabilidade da comunicação em ambientes sujeitos ao multipercurso. A utilização de múltiplas antenas permite explorar diferentes trajetórias do sinal, reduzindo os efeitos negativos provocados pelas variações do canal de propagação e aumentando a robustez da transmissão (Rosa; Silva, 2023).

A implantação de *small cells* representa outra estratégia amplamente utilizada para enfrentar os desafios de cobertura das redes 5G. Essas estruturas correspondem a estações rádio-base de menor porte distribuídas em maior densidade ao longo da área de cobertura. De acordo com Resende (2023), a redução da distância entre transmissor e receptor contribui para diminuir as perdas de propagação e melhorar os níveis de sinal recebidos pelos usuários.

Além de favorecer a cobertura, as *small cells* também aumentam a capacidade da rede ao distribuir melhor o tráfego entre diferentes pontos de acesso. Essa característica é especialmente importante em ambientes urbanos com elevada concentração de usuários e grande demanda por serviços de comunicação móvel.

Entre as soluções complementares utilizadas nas redes 5G destaca-se ainda o network slicing, tecnologia que permite criar diferentes segmentos virtuais de rede adaptados às necessidades específicas de cada aplicação. Conforme Liao (2023), essa abordagem possibilita fornecer diferentes níveis de qualidade de serviço, garantindo que aplicações críticas recebam os recursos necessários para seu funcionamento adequado.

Também merecem destaque as antenas dual-band, capazes de operar simultaneamente em diferentes faixas de frequência. Segundo Rosa e Silva (2023), essa característica amplia a flexibilidade das redes 5G ao permitir a utilização conjunta das vantagens oferecidas pelas bandas Sub-6 GHz e pelas frequências mmWave, conciliando cobertura e capacidade de transmissão.

O *handover* corresponde ao mecanismo responsável pela transferência automática da conexão entre diferentes estações rádio-base durante o deslocamento do usuário. Esse processo garante a continuidade da comunicação mesmo quando o dispositivo atravessa áreas de cobertura distintas. De acordo com Rota (2023), o gerenciamento eficiente da mobilidade é indispensável para evitar interrupções de serviço e preservar a qualidade da experiência do usuário.

A importância do *handover* torna-se ainda mais evidente em redes densificadas, onde a presença de um grande número de *small cells* aumenta a frequência das transições entre células. Nessas condições, mecanismos de mobilidade eficientes são essenciais para garantir que a conexão permaneça estável durante todo o deslocamento do usuário.

A adoção dessas tecnologias demonstra que a evolução das redes 5G está associada não apenas à utilização de novas faixas de frequência, mas também ao desenvolvimento de soluções capazes de compensar as limitações impostas pelo meio de propagação. *Beamforming*, *Massive MIMO*, *small cells* e mecanismos de gerenciamento de mobilidade

atuam de forma integrada para ampliar a cobertura, aumentar a capacidade da rede e melhorar a qualidade da comunicação, constituindo elementos fundamentais para o funcionamento das redes móveis de quinta geração.

2.2. Comparação entre Sub-6 GHz e mmWave: Desafios, Comportamentos e Aplicações no Brasil

As redes 5G utilizam diferentes faixas de frequência para atender às exigências de cobertura, capacidade e desempenho impostas pelas aplicações modernas. Entre as principais bandas empregadas destacam-se as frequências Sub-6 GHz e as ondas milimétricas (mmWave), que apresentam características distintas de propagação e comportamento eletromagnético. Essas diferenças influenciam diretamente o alcance do sinal, a capacidade de transmissão de dados e a interação das ondas com o ambiente físico (Silva, 2016).

As frequências Sub-6 GHz correspondem às bandas inferiores a 6 GHz e constituem uma das principais bases para a implementação das redes 5G. Devido ao maior comprimento de onda, essas frequências apresentam menor atenuação durante a propagação e maior capacidade de penetração em obstáculos, como edificações, paredes e vegetação. Essas características favorecem a cobertura de áreas mais extensas e contribuem para uma comunicação mais estável em diferentes cenários de utilização (Assis, 2022).

Além disso, frequências mais baixas tendem a apresentar melhor desempenho em situações onde não existe linha de visada direta entre transmissor e receptor. Isso ocorre porque comprimentos de onda maiores favorecem fenômenos como a difração, permitindo que parte da energia do sinal contorne obstáculos presentes no ambiente. Em razão dessas características, as faixas Sub-6 GHz são amplamente utilizadas para fornecer cobertura contínua e ampliar o alcance das redes móveis (Ferreira Filho, 2025).

Por outro lado, as ondas milimétricas operam em frequências significativamente mais elevadas, geralmente acima de 24 GHz. Essas bandas disponibilizam maiores larguras de banda, possibilitando taxas de transmissão superiores às observadas nas frequências mais baixas. Segundo Silva (2016), a disponibilidade de uma maior quantidade de espectro torna as frequências mmWave particularmente atrativas para aplicações que demandam elevada capacidade de comunicação e grande volume de tráfego de dados.

Entretanto, o aumento da frequência também está associado a limitações relacionadas à propagação do sinal. As ondas milimétricas apresentam maior suscetibilidade à atenuação, ao bloqueio por obstáculos e aos efeitos provocados pelas condições ambientais. Como consequência, o alcance dessas frequências tende a ser menor quando comparado ao das

bandas Sub-6 GHz, exigindo soluções específicas para manter níveis adequados de cobertura e desempenho (Resende, 2023).

No contexto brasileiro, a implantação das redes 5G ocorre por meio da utilização de diferentes faixas do espectro de radiofrequência. Conforme estabelecido pela Anatel (2023), destacam-se as bandas de 700 MHz, 3,5 GHz e 26 GHz, que apresentam características complementares em termos de cobertura e capacidade. A faixa de 700 MHz oferece excelente alcance e ampla cobertura territorial, enquanto a faixa de 3,5 GHz constitui atualmente a principal banda utilizada na implementação do 5G no país. Já a faixa de 26 GHz representa uma das principais aplicações das ondas milimétricas em cenários que demandam maior capacidade de transmissão.

Dessa forma, observa-se que as faixas Sub-6 GHz e mmWave apresentam características distintas, mas complementares, dentro da arquitetura das redes 5G. Enquanto as frequências mais baixas favorecem a cobertura e a estabilidade da comunicação, as frequências mais elevadas ampliam a capacidade de transmissão e a disponibilidade de largura de banda. Essas diferenças decorrem diretamente das propriedades físicas da propagação das ondas eletromagnéticas e constituem um dos principais fatores considerados no planejamento e na operação das redes móveis de quinta geração (Silva, 2016; Assis, 2022; Resende, 2023).

2.3. Impactos da propagação no desempenho de aplicações críticas no 5G

O desempenho das aplicações suportadas pelas redes 5G está diretamente relacionado às características de propagação das ondas de rádio utilizadas na comunicação sem fio. Diferentes aplicações apresentam requisitos específicos de cobertura, capacidade, latência e confiabilidade, fazendo com que os efeitos do meio de propagação influenciem de maneira distinta cada cenário de utilização (Resende, 2023).

A utilização de múltiplas faixas de frequência permite que as redes 5G atendam demandas variadas. Enquanto frequências mais baixas favorecem maior alcance e estabilidade de conexão, frequências mais elevadas disponibilizam maior largura de banda e capacidade de transmissão. Como consequência, a escolha da faixa de operação deve considerar não apenas os requisitos da aplicação, mas também as limitações impostas pelos fenômenos físicos de propagação, como atenuação, bloqueio por obstáculos e multipercurso (Silva, 2016; Assis, 2022).

Entre as principais categorias de aplicação associadas ao 5G destacam-se a Internet das Coisas (IoT), o acesso fixo sem fio (*Fixed Wireless Access* – FWA) e as comunicações ultra

confiáveis de baixa latência (*Ultra-Reliable Low-Latency Communications* – URLLC). Cada uma dessas aplicações apresenta exigências específicas em relação à cobertura, capacidade e qualidade do enlace de comunicação, tornando a propagação das ondas de rádio um fator determinante para o desempenho dos serviços oferecidos (Anatel, 2023; Ericsson, 2023).

3 METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa bibliográfica, de natureza qualitativa, com abordagem descritiva e analítica, desenvolvida a partir da revisão de literatura científica e técnica relacionada à propagação das ondas de rádio e ao desempenho das redes 5G.

A escolha dessa abordagem justifica-se pela necessidade de reunir, analisar e interpretar conhecimentos já consolidados na literatura especializada, permitindo uma visão abrangente sobre os desafios de propagação presentes nas redes 5G e as soluções tecnológicas empregadas para mitigá-los. Dessa forma, a pesquisa buscou integrar contribuições provenientes de trabalhos acadêmicos, documentos técnicos e relatórios institucionais relacionados ao tema.

Para atingir os objetivos propostos, o desenvolvimento do estudo foi organizado em três etapas principais: levantamento bibliográfico e técnico, análise temática do conteúdo e contextualização das discussões com aplicações práticas do setor de telecomunicações.

A primeira etapa da pesquisa consistiu no levantamento e na seleção de materiais científicos e técnicos relacionados à propagação das ondas de rádio e ao desempenho das redes 5G. Para isso, foram realizadas buscas em bases de dados acadêmicas e repositórios especializados, incluindo Google Scholar, IEEE Xplore, Scopus e repositórios institucionais de universidades brasileiras. Complementarmente, foram consultados documentos técnicos e relatórios publicados por organizações e empresas do setor de telecomunicações, como Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), Ericsson, Futurecom, Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor (IDEC) e XP Investimentos.

A busca bibliográfica foi conduzida por meio de palavras-chave em português e inglês relacionadas ao tema da pesquisa, dentre as quais destacam-se: “5G”, “propagação de ondas de rádio”, “radio wave propagation”, “Sub-6 GHz”, “mmWave”, “ondas milimétricas”, “beamforming”, “Massive MIMO”, “small cells”, “handover”, “Internet das Coisas (IoT)”, “Fixed Wireless Access (FWA)” e “Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC)”.

A seleção dos materiais considerou critérios de relevância, atualidade e aderência aos objetivos do estudo. Foram priorizados trabalhos que abordassem diretamente os fenômenos físicos da propagação das ondas eletromagnéticas, as características das faixas de frequência utilizadas no 5G, as tecnologias empregadas para mitigação dos efeitos da propagação e os impactos dessas características sobre aplicações críticas da tecnologia. Dessa forma, a revisão bibliográfica foi composta por artigos científicos, trabalhos de conclusão de curso,

dissertações, relatórios técnicos e documentos institucionais considerados relevantes para a compreensão do tema.

Entre os materiais selecionados para fundamentar a pesquisa destacam-se os estudos de Silva (2016), Assis (2022), Resende (2023), Matias (2022), Rosa e Silva (2023) e Liao (2023), além dos relatórios técnicos publicados pela Anatel (2023), Ericsson (2023), Futurecom (2023) e XP Investimentos (2022). A escolha dessas referências ocorreu em função da relação direta com os objetivos da pesquisa, abrangendo aspectos de propagação das ondas de rádio, características das frequências utilizadas no 5G, tecnologias de mitigação e aplicações críticas da rede. Os trabalhos escolhidos estão no quadro 2.

Quadro 2 - Principais materiais utilizados na pesquisa

Referência	Tipo de documento	Tema principal
Silva (2016)	TCC	Modelos de propagação e ondas milimétricas para o 5G
Assis (2022)	Dissertação	Antenas MIMO Sub-6 GHz aplicadas ao 5G
Resende (2023)	TCC	Comportamento de redes 5G e LTE em diferentes frequências
Matias (2022)	TCC	Redes de antenas e tecnologias para aplicações 5G
Rosa e Silva (2023)	Artigo científico	Antenas MIMO dual-band para sistemas 5G
Liao (2023)	TCC	Network Slicing e QoS em redes 5G
ANATEL (2023)	Documento institucional	Implantação e cenário do 5G no Brasil
Ericsson (2023)	Relatório técnico	Tendências, aplicações e evolução das redes 5G
Futurecom (2023)	Relatório técnico	Infraestrutura e conectividade no contexto do 5G
XP Investimentos (2022)	Relatório técnico	Aplicações do 5G e potencial do FWA

Fonte: Autoria própria (2026).

Além dos trabalhos acadêmicos, a pesquisa também utilizou relatórios técnicos e documentos institucionais produzidos por órgãos reguladores, empresas e entidades do setor de telecomunicações. Esses materiais contribuíram para a contextualização do cenário de implantação do 5G no Brasil, bem como para a análise de aplicações, desafios de infraestrutura e perspectivas de evolução da tecnologia. Os trabalhos escolhidos estão no quadro 3.

Quadro 3 - Relatórios técnicos e documentos institucionais utilizados na pesquisa

Instituição	Documento	Ano	Finalidade na pesquisa	Link
Anatel	5G no Brasil	2023	Informações sobre implantação, faixas de frequência e cenário regulatório brasileiro	5G no Brasil
Ericsson	Ericsson Mobility Report	2023	Dados sobre evolução do tráfego móvel, aplicações e tendências do 5G	Ericsson Mobility Report
Futurecom	F5G – O Brasil Conectado	2023	Discussão sobre infraestrutura de conectividade e desafios da expansão do 5G	O Brasil Conectado
XP Investimentos	Telecom Brasil: 5G Insights – Capítulo 2: A Oportunidade no FWA/5G	2022	Análise do potencial do <i>Fixed Wireless Access</i> (FWA) e perspectivas do mercado 5G	A Oportunidade no FWA/5G
IDEC	A tecnologia 5G e o acesso à internet no Brasil	[s.d.]	Discussão sobre conectividade, acesso à internet e desafios da implementação do 5G	A tecnologia 5G e o acesso à internet no Brasil

Fonte: Autoria própria (2026).

Além das referências selecionadas para compor a base principal da revisão bibliográfica, foram consultados materiais complementares destinados a ampliar a compreensão dos conceitos fundamentais relacionados às telecomunicações, às ondas eletromagnéticas e à evolução das redes móveis. Esses documentos forneceram subsídios teóricos e contextuais que auxiliaram na construção do referencial teórico da pesquisa. O Quadro 4 apresenta as fontes complementares utilizadas.

Quadro 4 – Materiais complementares utilizados na fundamentação teórica da pesquisa

(Continua)

Autor / Fonte	Tipo de Documento	Contribuição para a Pesquisa
Escola Electra (2011)	Apostila técnica	Apresentação dos conceitos básicos de telecomunicações, sistemas de comunicação e propagação de sinais.
Ferreira Filho (2025)	Trabalho acadêmico	Estudo dos princípios e aplicações das ondas eletromagnéticas em sistemas de comunicação.
Mota et al. (2018)	Artigo científico	Análise da evolução histórica dos sistemas de telefonia móvel e das gerações de redes celulares.
Oliveira et al. (2022)	Artigo científico	Fundamentação sobre antenas de microfita, metamateriais e aplicações em telecomunicações.
Rota (2023)	Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)	Discussão sobre interoperabilidade e integração de redes associadas à tecnologia 5G.

Quadro 4 – Materiais complementares utilizados na fundamentação teórica da pesquisa
(Conclusão)

Silva, G. H. D. (2022)	Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)	Abordagem sobre classificação de tráfego, qualidade de serviço (QoS) e arquitetura do núcleo da rede 5G.
Santos <i>et al.</i> (2024)	Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)	Revisão bibliográfica sobre impactos, aplicações e percepções relacionadas à tecnologia 5G.
Brasil Escola (2026)	Conteúdo educacional online	Informações sobre a evolução das redes móveis e sua relação com cidades inteligentes.
UFRJ (2026)	Trabalho acadêmico	Contextualização histórica da evolução das redes de computadores e das telecomunicações.
JAPIAS (2020)	Conteúdo técnico especializado	Descrição das tecnologias habilitadoras, infraestrutura e perspectivas globais do 5G.

Fonte: Autoria própria (2026).

Ao final do processo de seleção, foram utilizadas 21 referências, incluindo artigos científicos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações, relatórios técnicos, documentos institucionais e materiais técnicos especializados relacionados à tecnologia 5G e à propagação das ondas de rádio. A escolha dessas referências baseou-se na relevância para os objetivos da pesquisa e na contribuição para a compreensão dos fenômenos de propagação das ondas de rádio, das características das frequências Sub-6 GHz e mmWave e das tecnologias empregadas nas redes 5G.

Para a elaboração de figuras ilustrativas utilizadas neste trabalho, foi empregada a ferramenta de inteligência artificial generativa Gemini com o objetivo de auxiliar na representação visual de conceitos técnicos e facilitar a compreensão dos fenômenos estudados. As imagens geradas foram revisadas e adaptadas pelo autor, garantindo sua adequação ao contexto da pesquisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise temática e técnica do conteúdo

Considerando a diversidade dos temas abordados pelas referências selecionadas, os trabalhos foram organizados em categorias temáticas relacionadas aos objetivos da pesquisa. Essa organização possibilitou uma análise mais sistemática da literatura e orientou a discussão dos conteúdos apresentados ao longo do trabalho. O Quadro 5 apresenta o agrupamento temático das referências utilizadas na pesquisa.

Quadro 5 – Organização temática das referências bibliográficas

Categoria temática	Referências
Comportamento das ondas de rádio nas faixas Sub-6 GHz e mmWave	1, 2, 14, 15, 18, 19
Fenômenos físicos da propagação (reflexão, difração, espalhamento, atenuação e multipercurso)	1, 2, 13, 14, 18
Desafios de cobertura, alcance e qualidade de sinal	1, 2, 5, 8, 9, 14, 16, 20
Tecnologias de mitigação em redes 5G (<i>beamforming</i> , <i>Massive MIMO</i> , <i>small cells</i> e mobilidade)	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 17
Impactos da propagação em aplicações críticas (IoT, FWA e URLLC)	3, 4, 10, 12, 21

Fonte: Autoria própria (2026).

Após a seleção do material bibliográfico, foi realizada uma análise temática e técnica dos conteúdos, com base nas categorias definidas no Quadro 5. Esse procedimento consistiu na organização das informações de acordo com sua contribuição para os objetivos da pesquisa, permitindo a comparação entre diferentes abordagens presentes na literatura.

A partir dessa organização, foram elaboradas sínteses comparativas e discussões fundamentadas na literatura especializada, permitindo identificar convergências entre os estudos analisados e compreender como os diferentes fenômenos de propagação afetam o desempenho das redes 5G.

4.2 Fenômenos físicos que afetam a propagação das ondas de rádio no 5G

A análise da literatura demonstra que os fenômenos físicos de propagação exercem influência direta sobre o desempenho das redes 5G, afetando parâmetros como cobertura, potência recebida, estabilidade do sinal e capacidade de transmissão de dados. Entre os principais fenômenos identificados destacam-se a reflexão, difração, espalhamento, atenuação

e a propagação por múltiplos caminhos (*multipath*), os quais se manifestam de forma mais intensa à medida que a frequência de operação aumenta (Silva, 2016; Resende, 2023).

A reflexão ocorre quando as ondas eletromagnéticas atingem superfícies de grandes dimensões em relação ao seu comprimento de onda, como edifícios, fachadas metálicas e estruturas urbanas. Conforme discutido por Ferreira Filho (2025), esse fenômeno altera a trajetória original do sinal e contribui para a formação de múltiplos caminhos de propagação. Embora a reflexão possa ampliar a possibilidade de recepção do sinal em locais sem linha direta de visada, também pode provocar interferências construtivas e destrutivas, resultando em oscilações na intensidade do sinal recebido.

A difração, por sua vez, permite que as ondas contornem obstáculos físicos presentes no ambiente de propagação. Segundo a Escola Electra (2011), esse fenômeno é particularmente importante para a cobertura de áreas onde não existe visada direta entre transmissor e receptor. Entretanto, a literatura evidencia que a capacidade de difração diminui à medida que a frequência aumenta. Dessa forma, sinais operando em frequências mais elevadas, como as ondas milimétricas utilizadas no 5G, apresentam menor capacidade de contornar obstáculos quando comparados às frequências Sub-6 GHz (Silva, 2016).

O espalhamento ocorre quando as ondas eletromagnéticas interagem com objetos de pequenas dimensões ou superfícies irregulares, como postes, placas de sinalização, vegetação e mobiliário urbano. De acordo com Resende (2023), esse fenômeno dispersa a energia do sinal em múltiplas direções, reduzindo a potência efetivamente recebida pelo usuário. Em ambientes urbanos densos, o espalhamento contribui significativamente para a degradação da qualidade do sinal e para o aumento da variabilidade do canal de comunicação.

Entre os fenômenos analisados, a atenuação destaca-se como um dos fatores mais relevantes para o desempenho das redes 5G. A literatura mostra que a potência do sinal diminui progressivamente com o aumento da distância entre transmissor e receptor, sendo esse efeito intensificado em frequências mais elevadas (Escola Electra, 2011). Silva (2016) demonstra que as perdas de propagação nas faixas mmWave são significativamente superiores às observadas nas frequências Sub-6 GHz, o que reduz o alcance do sinal e aumenta a necessidade de estações rádio base distribuídas em menores distâncias.

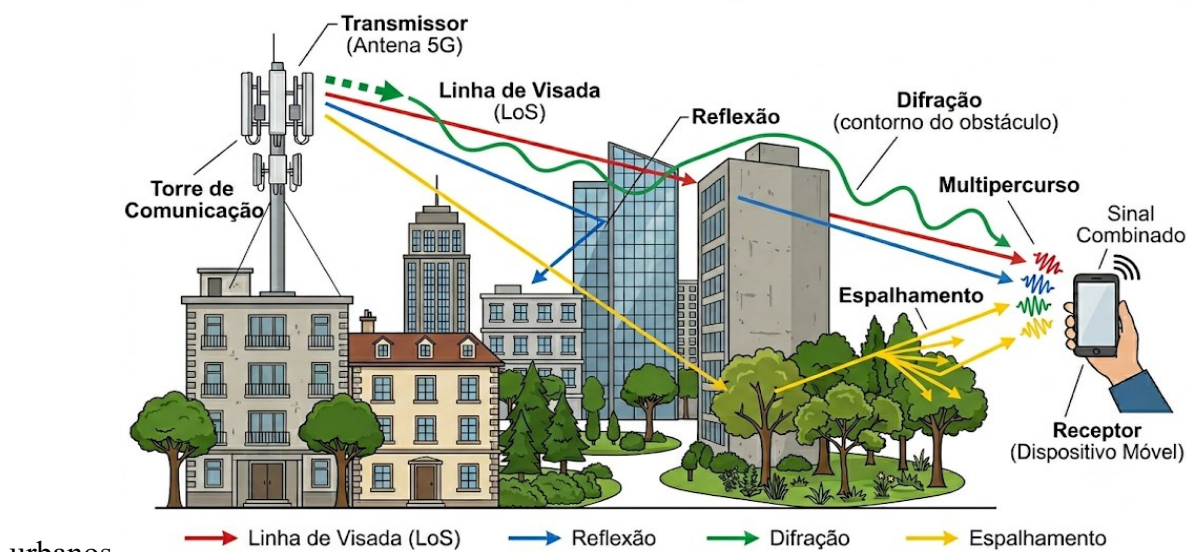
Outro aspecto amplamente discutido é a propagação por múltiplos caminhos, também denominada *multipath propagation*. Esse fenômeno ocorre quando o mesmo sinal chega ao receptor por diferentes trajetórias, devido à combinação de reflexões, difrações e espalhamentos ao longo do percurso. Conforme observado por Resende (2023), a recepção

simultânea dessas múltiplas componentes pode provocar atrasos, interferências e flutuações na intensidade do sinal, fenômeno conhecido como fading. Esse comportamento é especialmente relevante em ambientes urbanos, onde a elevada quantidade de obstáculos favorece a formação de trajetórias alternativas para o sinal.

A análise comparativa dos estudos revela que os efeitos da propagação se tornam progressivamente mais severos com o aumento da frequência de operação. Enquanto as faixas Sub-6 GHz apresentam melhor capacidade de difração, menor atenuação e maior robustez diante de obstáculos físicos, as frequências mmWave demonstram maior sensibilidade às condições do ambiente, sofrendo perdas mais acentuadas devido à obstrução e à absorção do sinal (Silva, 2016; Resende, 2023).

A Figura 2 apresenta os principais fenômenos que afetam a propagação das ondas de rádio em sistemas de comunicação sem fio. Observa-se que a presença de obstáculos no ambiente pode alterar significativamente a trajetória do sinal por meio dos processos de reflexão, difração e espalhamento, além de provocar a propagação por múltiplos caminhos (*multipath*). Conforme Silva (2016), esses fenômenos influenciam diretamente a potência recebida e a qualidade do sinal, tornando-se mais críticos à medida que a frequência de operação aumenta, especialmente nas bandas de ondas milimétricas (*mmWave*) utilizadas pelo 5G. De acordo com Resende (2023), a elevada atenuação observada nessas frequências reduz o alcance da comunicação e aumenta a sensibilidade do sinal à presença de obstáculos físicos e às condições do ambiente de propagação.

Figura 2 – Principais fenômenos de propagação das ondas de rádio em ambientes



Fonte: Adaptado de Silva (2016), Ferreira Filho (2025), Escola Electra (2011) e Resende (2023).

Dessa forma, a literatura analisada demonstra que a relação entre frequência e perda de propagação constitui um dos principais desafios para a implementação das redes 5G. Verifica-se que frequências mais elevadas tendem a apresentar maiores perdas de percurso e menor capacidade de contornar ou atravessar obstáculos quando comparadas às frequências mais baixas. Esse comportamento evidencia a necessidade da adoção de tecnologias complementares, como *beamforming*, sistemas MIMO e *small cells*, capazes de amenizar os efeitos da propagação e melhorar a cobertura e a confiabilidade da rede.

4.3 Comparação entre as faixas Sub-6 GHz e mmWave

As redes 5G utilizam diferentes faixas de frequência para atender às demandas de cobertura, capacidade e desempenho. Entre as principais bandas empregadas destacam-se as frequências Sub-6 GHz e as ondas milimétricas (mmWave), que apresentam características distintas de propagação. O quadro 6 apresenta uma comparação dos principais aspectos identificados na literatura.

Quadro 6 – Comparação técnica entre as faixas Sub-6 GHz e mmWave no contexto das redes 5G

Parâmetro	Sub-6 GHz	mmWave
Alcance de cobertura	Elevado (macro células)	Reduzido (micro e <i>small cells</i>)
Penetração em obstáculos	Alta (boa difração e penetração)	Baixa (alta suscetibilidade a bloqueio)
Sensibilidade à obstrução	Moderada	Elevada
Atenuação (path loss)	Menor	Elevada
Largura de banda disponível	Limitada a moderada	Muito elevada
Capacidade de transmissão	Moderada	Muito alta
Requisitos de infraestrutura	Menor densidade de ERBs	Alta densificação (<i>small cells</i>)
Dependência de linha de visada (LoS)	Baixa	Alta
Aplicações típicas	IoT, cobertura ampla, mobilidade	URLLC, FWA, realidade aumentada
Uso estratégico no Brasil	Cobertura nacional (ex: 700 MHz)	Hotspots urbanos de alta capacidade

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Silva (2016), Assis (2022), Resende (2023) e ANATEL (2023).

Observa-se, no quadro 6, que as faixas Sub-6 GHz e mmWave apresentam características complementares. Enquanto as frequências Sub-6 GHz oferecem maior alcance e melhor capacidade de penetração em obstáculos, as ondas milimétricas se destacam pela elevada largura de banda e maior capacidade de transmissão de dados.

As frequências Sub-6 GHz apresentam maior alcance e melhor capacidade de penetração em obstáculos, como paredes, edificações e vegetação. Segundo Assis (2022), essas características tornam essa faixa adequada para a cobertura de grandes áreas e para aplicações que exigem estabilidade de conexão, especialmente em ambientes urbanos e suburbanos. Além disso, a menor atenuação do sinal contribui para uma comunicação mais robusta, reduzindo a necessidade de grande densidade de estações rádio-base. Por outro lado, as frequências mmWave destacam-se pela elevada largura de banda disponível, possibilitando taxas de transmissão significativamente superiores às observadas nas faixas Sub-6 GHz. De acordo com Silva (2016), essas frequências permitem alcançar velocidades de comunicação compatíveis com os requisitos mais avançados do 5G, sendo especialmente indicadas para aplicações que demandam grande capacidade de dados e baixa latência.

Entretanto, a utilização das ondas milimétricas apresenta limitações importantes relacionadas à propagação. Conforme observado por Silva (2016) e Resende (2023), os sinais mmWave sofrem maiores perdas de percurso, elevada sensibilidade à presença de obstáculos e forte influência das condições ambientais, fatores que reduzem significativamente seu alcance. Em muitos cenários, a manutenção de uma linha de visada direta (LoS) entre transmissor e receptor torna-se essencial para garantir níveis adequados de desempenho.

A análise dos estudos evidencia que existe uma relação de compromisso entre cobertura e capacidade de transmissão. Enquanto as frequências Sub-6 GHz oferecem maior cobertura e estabilidade de sinal, as frequências mmWave proporcionam maior capacidade espectral e velocidades mais elevadas. Dessa forma, a implantação eficiente das redes 5G depende da utilização complementar dessas faixas, combinando a ampla cobertura proporcionada pelo Sub-6 GHz com a elevada capacidade oferecida pelas ondas milimétricas.

Os resultados encontrados na literatura indicam que não existe uma faixa de frequência universalmente superior. A escolha entre Sub-6 GHz e mmWave depende dos requisitos de cada aplicação, das características do ambiente de propagação e dos objetivos da rede. Nesse contexto, a integração entre diferentes bandas de frequência constitui uma das principais estratégias adotadas para atender simultaneamente às demandas de cobertura, confiabilidade e capacidade das redes móveis de quinta geração. Entretanto, mesmo com a utilização

combinada dessas faixas, diversos desafios relacionados à cobertura e à qualidade do sinal ainda são observados em ambientes reais de propagação, tema discutido na próxima seção.

4.4 Desafios da cobertura e qualidade de sinal em diferentes ambientes

A análise da literatura demonstra que o desempenho das redes 5G não depende apenas da faixa de frequência utilizada, mas também das características do ambiente de propagação. Obstáculos físicos, condições atmosféricas e características geográficas podem afetar significativamente a cobertura e a qualidade do sinal, tornando o planejamento da rede um fator essencial para garantir desempenho adequado em diferentes cenários.

Em ambientes urbanos, a presença de edifícios, estruturas metálicas e outras construções favorece a ocorrência de fenômenos como reflexão, difração e propagação por múltiplos caminhos. Segundo Silva (2016), esses efeitos tornam o comportamento do canal de comunicação mais complexo, podendo provocar variações na intensidade do sinal recebido e aumentar a ocorrência de desvanecimento (fading). Além disso, em frequências mmWave, o bloqueio por edificações pode interromper completamente a comunicação quando não existe linha de visada direta entre transmissor e receptor.

Outro fator relevante é a presença de vegetação. Árvores e áreas arborizadas podem absorver parte da energia das ondas eletromagnéticas, reduzindo a potência do sinal recebido. De acordo com Resende (2023), esse efeito torna-se mais significativo em frequências elevadas, nas quais a interação das ondas com folhas, galhos e troncos provoca perdas adicionais de propagação. Como consequência, regiões com grande cobertura vegetal podem apresentar degradação da qualidade do sinal, especialmente em sistemas que utilizam ondas milimétricas.

As condições atmosféricas também exercem influência sobre o desempenho das redes 5G. Fenômenos como chuva, neblina e elevada umidade podem aumentar a atenuação do sinal durante a propagação. Conforme observado por Silva (2016), os efeitos atmosféricos tendem a ser mais perceptíveis em frequências mais altas, contribuindo para a redução do alcance e da estabilidade da comunicação. Dessa forma, fatores climáticos devem ser considerados durante o planejamento de redes que operam em bandas mmWave.

Em ambientes internos (indoor), os desafios de propagação estão relacionados principalmente à presença de paredes, portas, divisórias e lajes. Esses elementos dificultam a penetração do sinal e podem provocar perdas significativas de potência entre os ambientes. Segundo Resende (2023), as frequências Sub-6 GHz apresentam melhor desempenho em

cenários indoor devido à maior capacidade de penetração em obstáculos, enquanto os sinais mmWave sofrem degradação mais acentuada ao atravessar estruturas físicas.

A comparação entre ambientes urbanos e rurais evidencia que os desafios de propagação ocorrem de formas distintas. Em áreas urbanas, a elevada concentração de edificações favorece fenômenos como reflexão, bloqueio e multipercurso, tornando o comportamento do canal mais imprevisível. Já em áreas rurais, embora existam menos obstáculos físicos, as grandes distâncias entre usuários e estações rádio-base aumentam as perdas de propagação e podem comprometer os níveis de sinal recebidos. Dessa forma, o planejamento das redes 5G deve considerar as particularidades de cada cenário para garantir cobertura e desempenho adequados.

Diante dessas limitações, a literatura aponta a necessidade de densificação da infraestrutura de rede como uma das principais estratégias para garantir cobertura e qualidade de serviço. Relatórios da XP Investimentos (2022) e da Futurecom (2023) destacam que a implantação de um maior número de estações rádio-base e *small cells* reduz a distância entre transmissor e receptor, minimizando os efeitos da atenuação e aumentando a disponibilidade do sinal em áreas de alta demanda.

No contexto brasileiro, esses desafios tornam-se ainda mais relevantes devido à grande diversidade geográfica e às diferenças de infraestrutura existentes entre as regiões do país. Enquanto grandes centros urbanos demandam redes com elevada capacidade de transmissão para atender à alta densidade de usuários, áreas rurais e localidades mais afastadas necessitam de soluções que priorizem cobertura e alcance. Nesse cenário, a utilização combinada de diferentes faixas de frequência e a expansão gradual da infraestrutura de rede são apontadas como estratégias fundamentais para a consolidação do 5G no território nacional.

A análise da literatura evidencia que a propagação das ondas de rádio está fortemente condicionada às características do ambiente em que ocorre a comunicação. Elementos como edificações, vegetação e condições climáticas podem comprometer significativamente a cobertura e a qualidade do sinal, especialmente nas bandas mmWave, que apresentam maior sensibilidade à atenuação e ao bloqueio por obstáculos (Silva, 2016; Resende, 2023). Além disso, estudos apontam que a disponibilidade e a confiabilidade do serviço dependem diretamente das condições de propagação encontradas em cada cenário de implantação, tornando o planejamento da infraestrutura um fator essencial para o desempenho das redes 5G (XP investimentos, 2022; Futurecom, 2023).

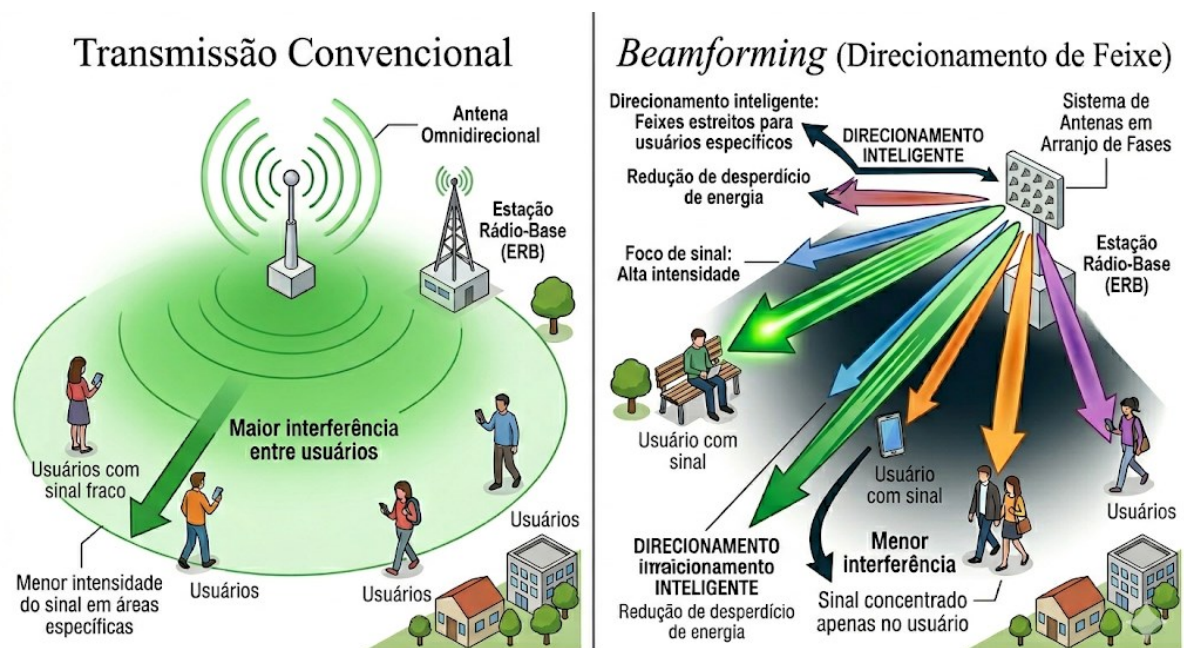
4.5 Tecnologias utilizadas para mitigação dos efeitos da propagação

4.5.1 *Beamforming*

Entre as tecnologias desenvolvidas para amenizar os efeitos da propagação nas redes 5G, o *beamforming* destaca-se como uma das soluções mais importantes, especialmente para aplicações que utilizam frequências elevadas. Essa técnica consiste no direcionamento inteligente da energia irradiada pelas antenas em direção ao usuário ou dispositivo receptor, concentrando o sinal em uma região específica do espaço em vez de transmiti-lo uniformemente em todas as direções.

A Figura 3 apresenta uma comparação entre a transmissão convencional e a técnica de *beamforming*. Observa-se que, na transmissão convencional, o sinal é irradiado em diversas direções, resultando em menor eficiência energética e maior possibilidade de interferências. Em contraste, o *beamforming* permite concentrar a energia do sinal em direções específicas, aumentando a intensidade recebida pelo usuário e reduzindo perdas associadas à propagação. Segundo Assis (2022), essa técnica é especialmente importante para as frequências mmWave, nas quais a elevada atenuação exige mecanismos capazes de direcionar o sinal de forma mais eficiente.

Figura 3 – Comparação entre a transmissão convencional e a técnica de *beamforming* em redes 5G.



Fonte: Adaptado de Assis (2022), Matias (2022), Rosa e Silva (2023) e Silva (2016).

O funcionamento do *beamforming* baseia-se no controle da fase e da amplitude dos sinais transmitidos por múltiplos elementos de antena. Por meio desse controle, torna-se possível formar feixes direcionais capazes de acompanhar a posição do usuário e concentrar a potência do sinal na direção desejada. Segundo Assis (2022), essa característica permite melhorar significativamente a eficiência da comunicação sem fio, aumentando a intensidade do sinal recebido e reduzindo perdas durante a propagação.

Entre os principais benefícios do *beamforming* destacam-se o aumento da cobertura efetiva, a melhoria da relação sinal-ruído e a redução das interferências causadas por transmissões em direções indesejadas. Além disso, a concentração da energia transmitida contribui para o uso mais eficiente do espectro de radiofrequência, favorecendo o atendimento simultâneo de um maior número de usuários. Conforme observado por Matias (2022), o direcionamento dos feixes possibilita ganhos significativos de desempenho em cenários com elevada densidade de dispositivos conectados.

A aplicação do *beamforming* torna-se particularmente relevante nas frequências mmWave utilizadas pelo 5G. De acordo com Silva (2016), essas frequências apresentam elevadas perdas de propagação e maior sensibilidade à presença de obstáculos, fatores que reduzem o alcance da comunicação. Nesse contexto, o *beamforming* atua como uma estratégia fundamental para compensar parte dessas perdas, concentrando a potência transmitida e aumentando a probabilidade de manutenção de enlaces confiáveis.

O *beamforming* destaca-se como uma das tecnologias mais importantes para a viabilização das redes 5G, especialmente nas frequências mais elevadas. Ao concentrar a energia do sinal na direção dos usuários, essa técnica reduz perdas de propagação, melhora a eficiência da transmissão e contribui para ampliar a qualidade da comunicação sem fio (Assis, 2022; Matias, 2022). Sua aplicação torna-se particularmente relevante em sistemas mmWave, nos quais as limitações de alcance e a elevada sensibilidade a obstáculos exigem mecanismos capazes de otimizar a cobertura e a confiabilidade da rede (Rosa; Silva, 2023).

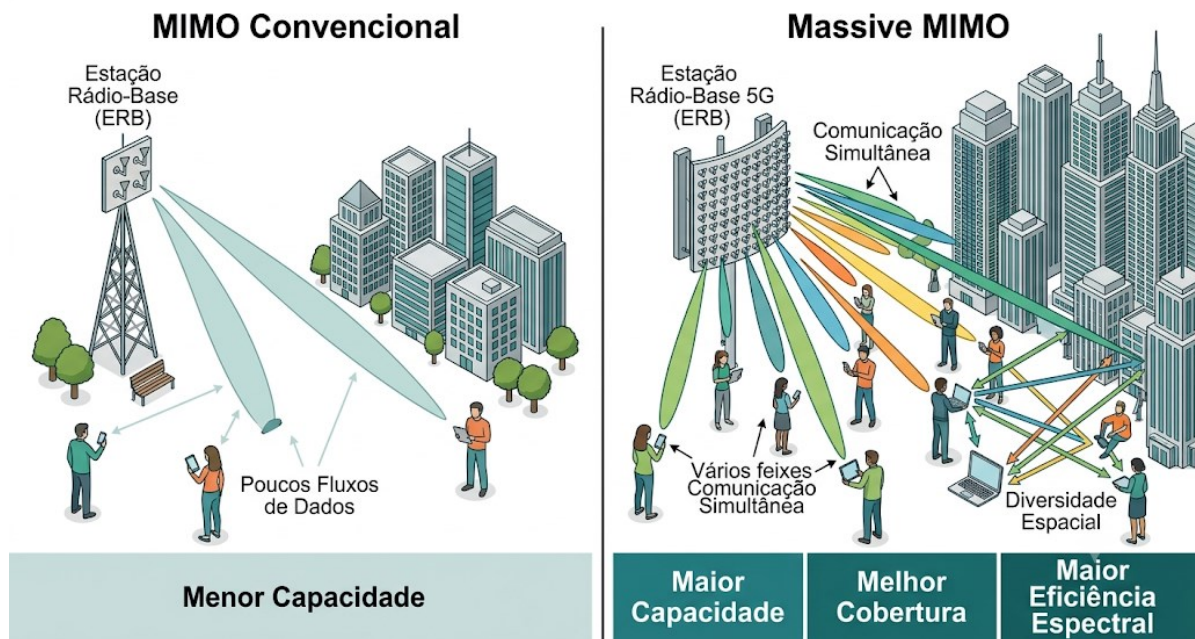
4.5.2 Massive MIMO

O *Massive MIMO* (*Massive Multiple Input Multiple Output*) consiste em uma evolução da tecnologia MIMO convencional, baseada na utilização de um grande número de antenas na estação rádio-base para transmitir e receber múltiplos fluxos de dados simultaneamente. Essa técnica permite explorar a diversidade espacial do ambiente de propagação, aumentando a

eficiência espectral da rede e melhorando o desempenho da comunicação sem fio (Assis, 2022).

A Figura 4 ilustra a diferença entre um sistema MIMO convencional e um sistema *Massive MIMO*. Observa-se que o aumento do número de antenas permite a formação de múltiplos feixes simultâneos, possibilitando que diversos usuários sejam atendidos ao mesmo tempo sem comprometer significativamente a qualidade do sinal.

Figura 4 – Funcionamento do *Massive MIMO* em redes 5G.



Fonte Adaptado de Assis (2022), Matias (2022) e Rosa e Silva (2023).

A principal vantagem do *Massive MIMO* está na exploração da diversidade espacial. Segundo Assis (2022), a utilização de múltiplas antenas permite aproveitar diferentes trajetórias de propagação do sinal, reduzindo os efeitos causados pelo multipercurso e melhorando a confiabilidade da comunicação. Dessa forma, o sistema consegue manter níveis mais elevados de qualidade do sinal mesmo em ambientes com elevada densidade de usuários.

Além disso, o *Massive MIMO* contribui diretamente para o aumento da capacidade das redes 5G. De acordo com Matias (2022), a transmissão simultânea para vários dispositivos possibilita um uso mais eficiente do espectro de radiofrequência, permitindo atender a uma quantidade maior de usuários sem comprometer significativamente o desempenho da rede.

Outro benefício importante refere-se à melhoria da cobertura. Conforme destacado por Rosa e Silva (2023), a combinação do *Massive MIMO* com técnicas de processamento avançado dos sinais permite ampliar a área de cobertura e aumentar a intensidade do sinal

recebido pelos usuários. Esse aspecto torna-se especialmente relevante em ambientes urbanos densos, onde obstáculos físicos e elevadas demandas de tráfego podem comprometer a qualidade da comunicação.

A utilização do *Massive MIMO* representa uma mudança significativa na forma como os recursos de rádio são explorados nas redes móveis de quinta geração. O emprego de um grande número de antenas permite aumentar a capacidade da rede, melhorar a cobertura e utilizar o espectro de maneira mais eficiente, atendendo simultaneamente a um maior número de usuários (ASSIS, 2022). Quando combinado com técnicas de *beamforming*, o *Massive MIMO* torna-se ainda mais eficaz na mitigação dos efeitos da propagação, contribuindo para superar limitações de alcance e qualidade do sinal, especialmente em cenários de alta demanda por conectividade (Matias, 2022; Rosa; Silva, 2023).

4.5.3 *Small Cells*

Outra solução amplamente utilizada para amenizar os efeitos da propagação nas redes 5G é a implementação de *Small Cells*. Essas estruturas consistem em estações rádio-base de pequeno porte instaladas próximas aos usuários, com o objetivo de complementar a cobertura fornecida pelas estações convencionais e aumentar a capacidade da rede.

A utilização de *Small Cells* está diretamente relacionada ao processo de densificação da infraestrutura de comunicação. Segundo Futurecom (2023), a crescente demanda por conectividade e o uso de frequências mais elevadas exigem uma maior quantidade de pontos de acesso distribuídos pelo ambiente, reduzindo a distância entre transmissores e receptores. Essa estratégia torna-se especialmente importante nas faixas mmWave, nas quais as perdas de propagação são significativamente maiores.

Além da melhoria da cobertura, as *Small Cells* contribuem para o aumento da capacidade da rede. Conforme destacado por XP Investimentos (2022), a distribuição de pequenos pontos de acesso reduz o congestionamento das estações principais e possibilita o atendimento simultâneo de um maior número de usuários, favorecendo aplicações que demandam elevadas taxas de transmissão de dados.

A adoção de *Small Cells* surge como uma resposta às limitações de cobertura impostas pelas frequências mais elevadas utilizadas no 5G. Ao aproximar os pontos de transmissão dos usuários, essa tecnologia reduz perdas associadas à distância e favorece a manutenção de níveis adequados de potência e qualidade do sinal (Xp Investimentos, 2022; Futurecom, 2023). Nesse contexto, a densificação da rede deixa de ser apenas uma alternativa de

expansão da infraestrutura e passa a representar um elemento essencial para o funcionamento eficiente das redes móveis de quinta geração.

4.5.4 Handover e gerenciamento de mobilidade

As redes 5G foram desenvolvidas para oferecer conectividade contínua mesmo em cenários de elevada mobilidade. Para isso, utilizam mecanismos de *handover*, responsáveis por transferir automaticamente a conexão de um dispositivo entre diferentes células ou estações rádio-base, sem interrupção perceptível do serviço. Esse processo é fundamental para garantir a continuidade da comunicação durante o deslocamento dos usuários (Rota, 2023).

A importância do *handover* torna-se ainda maior em redes densificadas, caracterizadas pela utilização de *Small Cells* e por áreas de cobertura menores. Nesses ambientes, os dispositivos podem atravessar diversas células em um curto intervalo de tempo, exigindo transições rápidas e eficientes para evitar falhas de comunicação e degradação da qualidade do serviço (Liao, 2023).

Além de assegurar a continuidade da conexão, o gerenciamento de mobilidade permite que a rede distribua os usuários de forma mais eficiente entre as células disponíveis. Esse gerenciamento contribui para o balanceamento de carga, reduzindo congestionamentos e melhorando o aproveitamento dos recursos de comunicação. Segundo Silva (2022), os mecanismos implementados no núcleo da rede 5G proporcionam maior flexibilidade na alocação de recursos e no atendimento de diferentes requisitos de serviço.

Nas frequências mmWave, o gerenciamento de mobilidade assume papel ainda mais relevante. Devido ao menor alcance e à maior sensibilidade a obstáculos físicos, pequenas mudanças na posição do usuário podem provocar variações significativas na qualidade do sinal. Dessa forma, a execução rápida e eficiente dos procedimentos de *handover* torna-se essencial para manter a estabilidade da conexão e garantir o desempenho adequado de aplicações que exigem baixa latência e elevada confiabilidade (Rota, 2023).

A eficiência das redes 5G não depende apenas da capacidade de transmissão ou da cobertura oferecida pelas estações rádio-base, mas também da capacidade de manter conexões estáveis durante a movimentação dos usuários. Nesse contexto, os mecanismos de *handover* e gerenciamento de mobilidade desempenham papel estratégico para assegurar a continuidade do serviço, especialmente em ambientes densificados e em sistemas que operam com frequências de menor alcance, como as bandas mmWave (Liao, 2023; Rota, 2023; Silva, 2022).

4.6 Impactos da propagação nas aplicações críticas do 5G

As redes 5G foram concebidas para atender diferentes categorias de aplicações, cada uma com requisitos específicos de cobertura, capacidade, latência e confiabilidade. Diferentemente das gerações anteriores de redes móveis, o 5G busca suportar simultaneamente um grande número de dispositivos conectados, serviços de banda larga de alta velocidade e aplicações críticas que exigem respostas em tempo real. Nesse contexto, os fenômenos de propagação das ondas de rádio exercem influência direta sobre o desempenho dessas aplicações, uma vez que fatores como atenuação, bloqueio por obstáculos e variações do ambiente podem comprometer a qualidade da comunicação e a experiência dos usuários (Resende, 2023; Anatel, 2023).

A Internet das Coisas (IoT) corresponde ao conjunto de dispositivos capazes de coletar, transmitir e compartilhar informações por meio de redes de comunicação. Sensores, medidores inteligentes, equipamentos industriais e dispositivos utilizados em cidades inteligentes constituem exemplos de aplicações que dependem da conectividade proporcionada pelas redes 5G. Segundo Resende (2023), a expansão do número de dispositivos conectados é um dos principais fatores que impulsionam o desenvolvimento dessa tecnologia, exigindo soluções capazes de suportar comunicações em larga escala.

Entre os principais requisitos das aplicações de IoT destaca-se a necessidade de ampla cobertura geográfica, permitindo que dispositivos permaneçam conectados mesmo em locais afastados ou com grande quantidade de obstáculos. Nesse contexto, as frequências Sub-6 GHz apresentam vantagens significativas devido ao seu maior alcance e melhor capacidade de penetração em edificações, vegetação e outras barreiras físicas. De acordo com Assis (2022), essas características favorecem a manutenção da conectividade e contribuem para uma comunicação mais estável quando comparada às frequências mais elevadas.

A literatura analisada demonstra que os fenômenos de propagação influenciam diretamente o desempenho das aplicações de IoT. Perdas excessivas de sinal, bloqueios por obstáculos e limitações de cobertura podem comprometer a transmissão de dados e reduzir a confiabilidade dos dispositivos conectados. Dessa forma, observa-se que as faixas Sub-6 GHz desempenham papel estratégico para aplicações que priorizam cobertura e estabilidade de comunicação, tornando-se uma das principais alternativas para suportar o crescimento do ecossistema de Internet das Coisas nas redes 5G (Resende, 2023; Assis, 2022; Anatel, 2023).

O *Fixed Wireless Access* (FWA) consiste em uma solução de acesso à internet baseada em comunicação sem fio, na qual a conexão entre o usuário e a rede é realizada por meio de

enlaces de rádio em vez de cabos físicos. Com a expansão do 5G, essa tecnologia passou a ser considerada uma alternativa viável à fibra óptica, especialmente em regiões onde a implantação de infraestrutura cabeada apresenta elevados custos ou dificuldades técnicas. Segundo a XP Investimentos (2022), o FWA representa uma das principais oportunidades de aplicação do 5G, ampliando o acesso à banda larga em áreas com baixa disponibilidade de serviços de conectividade.

O desempenho dessa modalidade de acesso está diretamente relacionado à qualidade do enlace de rádio estabelecido entre a estação base e o usuário. Fatores como distância, presença de edificações, vegetação e condições atmosféricas podem provocar atenuação e degradação do sinal, reduzindo a capacidade de transmissão e a estabilidade da conexão. Conforme observado por Resende (2023), os fenômenos de propagação tornam-se particularmente relevantes em sistemas que operam em frequências mais elevadas, nas quais os efeitos de bloqueio e perda de percurso são mais pronunciados.

Nesse contexto, a literatura destaca que o FWA possui grande potencial para promover a expansão da conectividade, principalmente em localidades onde a infraestrutura de fibra óptica ainda não está disponível. O documento F5G – O Brasil Conectado (Futurecom, 2023) aponta que a combinação entre redes 5G e soluções de acesso fixo sem fio pode contribuir significativamente para a inclusão digital e para a ampliação da cobertura de serviços de banda larga. Entretanto, para garantir níveis adequados de desempenho, torna-se necessária a adoção de estratégias de mitigação dos efeitos da propagação, como *beamforming*, *Massive MIMO* e densificação da rede, permitindo maior confiabilidade e qualidade na comunicação sem fio.

A categoria *Ultra-Reliable Low-Latency Communications* (URLLC) foi desenvolvida para atender aplicações que exigem comunicação extremamente confiável e com tempos de resposta muito reduzidos. Entre os principais exemplos destacam-se sistemas de automação industrial, veículos conectados, procedimentos médicos remotos, redes elétricas inteligentes e outras aplicações associadas à Indústria 4.0. Segundo a Anatel (2023), essas aplicações representam uma das principais inovações proporcionadas pelo 5G, possibilitando a execução de tarefas críticas que dependem de comunicação praticamente instantânea.

Para atender aos requisitos de URLLC, a rede deve oferecer níveis elevados de confiabilidade e latências da ordem de poucos milissegundos. Nesse contexto, os fenômenos de propagação das ondas de rádio assumem papel fundamental, uma vez que perdas de sinal, bloqueios por obstáculos, interferências e variações do canal podem comprometer a

estabilidade da comunicação. De acordo com Resende (2023), a degradação do enlace causada por condições desfavoráveis de propagação pode afetar diretamente o desempenho de aplicações críticas, tornando necessária a adoção de mecanismos capazes de minimizar esses impactos.

Diante desses desafios, a literatura destaca a importância de tecnologias que aumentem a robustez e a confiabilidade da rede. Relatórios da Ericsson (2023) apontam que soluções como *beamforming*, *Massive MIMO* e a densificação da infraestrutura por meio de *small cells* contribuem para melhorar a qualidade do enlace e reduzir falhas de comunicação. Dessa forma, observa-se que a estabilidade do sinal constitui um fator determinante para o sucesso das aplicações URLLC, tornando a mitigação dos efeitos da propagação um requisito essencial para que os serviços críticos do 5G alcancem os níveis de desempenho esperados.

4.7 Síntese dos resultados encontrados

Os estudos revisados mostram que a propagação das ondas de rádio permanece como um elemento central no planejamento e na operação das redes 5G. Embora a quinta geração móvel represente um avanço significativo em termos de velocidade, capacidade e conectividade, seu desempenho continua condicionado aos fenômenos físicos que afetam a transmissão do sinal. Dessa forma, compreender os mecanismos de propagação torna-se fundamental para avaliar as potencialidades e limitações das diferentes faixas de frequência empregadas pela tecnologia.

A comparação entre as faixas Sub-6 GHz e mmWave evidenciou diferenças importantes em relação ao alcance, à penetração em obstáculos e à capacidade de transmissão. Enquanto as frequências Sub-6 GHz apresentam maior cobertura e melhor desempenho em ambientes com obstáculos, as ondas milimétricas oferecem elevadas taxas de transmissão e maior disponibilidade espectral, porém com limitações relacionadas à atenuação e à necessidade de condições mais favoráveis de propagação (Silva, 2016; Assis, 2022; Resende, 2023).

Os estudos analisados também demonstraram que a simples disponibilização de novas faixas de frequência não é suficiente para garantir o desempenho esperado das redes 5G. A viabilização dessa tecnologia depende da utilização de soluções capazes de compensar as limitações impostas pelo meio de propagação. Nesse sentido, técnicas como *beamforming*, *Massive MIMO*, *small cells* e mecanismos avançados de gerenciamento de mobilidade

desempenham papel fundamental na melhoria da cobertura, da capacidade e da confiabilidade dos enlaces sem fio (Matias, 2022; Rosa; Silva, 2023; Rota, 2023).

Além disso, verificou-se que os impactos da propagação refletem diretamente no funcionamento das principais aplicações associadas ao 5G. Aplicações de Internet das Coisas dependem de ampla cobertura e estabilidade de comunicação; soluções *de Fixed Wireless Access* necessitam de enlaces com qualidade suficiente para fornecer acesso à banda larga; e serviços classificados como URLLC exigem elevados níveis de confiabilidade e baixíssima latência. Dessa forma, a eficiência dessas aplicações está diretamente relacionada à combinação adequada entre faixa de frequência, ambiente de propagação e tecnologias de mitigação.

De modo geral, os resultados encontrados confirmam que o sucesso das redes 5G está associado não apenas ao avanço tecnológico dos equipamentos e à ampliação do espectro disponível, mas também à compreensão dos fenômenos de propagação que afetam a comunicação sem fio. Assim, o planejamento adequado da infraestrutura e a adoção de técnicas de mitigação tornam-se elementos essenciais para garantir cobertura, capacidade e qualidade de serviço nos diferentes cenários de aplicação do 5G.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente demanda por conectividade, velocidade de transmissão e integração entre dispositivos têm impulsionado a evolução das redes móveis, tornando o 5G uma das principais tecnologias de comunicação da atualidade. Nesse contexto, este trabalho buscou analisar como os fenômenos de propagação das ondas de rádio influenciam o desempenho das redes 5G, com foco nas faixas de frequência Sub-6 GHz e mmWave. Por meio de uma revisão técnica e científica da literatura, foi possível compreender as características dessas faixas, os desafios impostos pelo ambiente de propagação e as soluções tecnológicas empregadas para viabilizar o funcionamento eficiente das redes de quinta geração.

A análise realizada evidenciou que os fenômenos de propagação das ondas de rádio exercem influência direta sobre o desempenho das redes 5G, afetando parâmetros como cobertura, qualidade do sinal, capacidade de transmissão e confiabilidade da comunicação. Verificou-se que as frequências Sub-6 GHz apresentam melhor alcance e maior capacidade de penetração em obstáculos, favorecendo a cobertura de áreas amplas e a estabilidade da conexão. Em contrapartida, as frequências mmWave destacam-se pela elevada largura de banda e pelas altas taxas de transmissão de dados, características fundamentais para aplicações que demandam grande capacidade de comunicação. Contudo, os estudos analisados demonstraram que essas frequências mais elevadas são mais suscetíveis aos efeitos da atenuação, do bloqueio por obstáculos e das perdas de propagação, fatores que podem limitar seu desempenho em determinadas condições de operação (Silva, 2016; Assis, 2022; Resende, 2023).

Outro aspecto evidenciado pela revisão foi a importância das tecnologias desenvolvidas para amenizar as limitações impostas pela propagação das ondas de rádio. Soluções como *beamforming*, *Massive MIMO*, *small cells* e mecanismos avançados de *handover* desempenham papel fundamental na melhoria da cobertura, da capacidade e da confiabilidade das redes 5G. A literatura demonstra que essas tecnologias permitem reduzir os impactos causados pela atenuação, pelos bloqueios do sinal e pelas variações do canal de comunicação, tornando viável a utilização de frequências mais elevadas e contribuindo para que os requisitos de desempenho da quinta geração móvel possam ser efetivamente alcançados (Matias, 2022; Rosa; Silva, 2023; Liao, 2023; Rota, 2023).

Os resultados também demonstraram que os efeitos da propagação das ondas de rádio influenciam diretamente o desempenho das principais aplicações suportadas pelas redes 5G.

Aplicações de Internet das Coisas (IoT), por exemplo, dependem de ampla cobertura e conectividade estável para garantir a comunicação entre um grande número de dispositivos distribuídos em diferentes ambientes. Já as soluções de *Fixed Wireless Access* (FWA) exigem enlaces de rádio com qualidade suficiente para fornecer acesso à internet de forma competitiva em relação às redes cabeadas. Por sua vez, aplicações classificadas como *Ultra-Reliable Low-Latency Communications* (URLLC) demandam níveis extremamente elevados de confiabilidade e baixíssima latência, tornando-se mais sensíveis às degradações causadas por fenômenos como atenuação, bloqueio do sinal e variações do canal. Dessa forma, verificou-se que o atendimento aos requisitos dessas aplicações depende da combinação adequada entre faixa de frequência, ambiente de propagação e tecnologias de mitigação empregadas pela rede (Resende, 2023; XP Investimentos, 2022; Futurecom, 2023; Ericsson, 2023).

Conclui-se que o desempenho das redes 5G está diretamente relacionado à forma como os fenômenos de propagação das ondas de rádio são compreendidos e considerados no planejamento da infraestrutura de comunicação. Embora a disponibilidade de novas faixas de frequência amplie significativamente a capacidade das redes móveis, os desafios associados à atenuação, ao bloqueio por obstáculos e às características do ambiente de propagação permanecem como fatores determinantes para a qualidade do serviço oferecido. Nesse cenário, a utilização de técnicas de amenização e a integração entre diferentes faixas de frequência mostram-se fundamentais para atender às exigências de cobertura, capacidade e confiabilidade impostas pelas aplicações modernas. Assim, este estudo contribui para ampliar a compreensão dos desafios e das oportunidades relacionados à implantação do 5G, servindo como base para futuras pesquisas e para o desenvolvimento de redes cada vez mais eficientes, robustas e adequadas às demandas da sociedade conectada.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. ANATEL. **5G no Brasil**. Brasília, DF, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/5g>. Acesso em: 1 maio 2026.

ASSIS, Katiane Estevam G. de. **Antena MIMO na frequência Sub-6 GHz aplicada à tecnologia 5G**. 2022. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/8931>. Acesso em: 11 jul. 2025.

BRASIL ESCOLA. **Evolução das redes móveis e cidades inteligentes**. Disponível em: <https://monografias.brasilescola.uol.com.br/computacao/evolucao-das-redes-moveis-e-cidades-inteligentes.html>. Acesso em: 2 mar. 2026..

ESCOLA ELECTRA. **Telecomunicações I – Parte 1. Apostila técnica**. 2011. Disponível em: https://www.escolaelectra.com.br/apostilas/novas/Telecomunica%C3%A7%C3%B5es%201PARTE1_16_2_2011.pdf. Acesso em: 10 mar. 2026.

ERICSSON. Ericsson Mobility Report. Estocolmo, 2023. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report>. Acesso em: 01 maio 2026.

FERREIRA FILHO, Ubiratan Nascimento. **Aplicação das ondas eletromagnéticas em rádio FM e a importância da propagação dessas ondas nos meios de telecomunicação**. Trabalho acadêmico. Universidade Federal do Pará, Belém, 2025. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br/server/api/core/bitstreams/b17ad864-c5d6-4f16-994d-46f4d36c3532/content>. Acesso em: 2 mar. 2026.

FUTURECOM. **F5G – O Brasil Conectado**. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://telesintese.com.br/wp-content/uploads/2023/03/F5G-O-BRASIL-CONECTADO.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE DEFESA DO CONSUMIDOR (IDEC). **A tecnologia 5G e o acesso à internet no Brasil**. São Paulo, [s.d.]. Disponível em: https://idec.org.br/arquivos/pesquisas-acesso-internet/idec_pesquisa-acesso-internet_tecnologia-5g-e-o-acesso-a-internet-brasil.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.

JAPIAS. **The technology that enables 5G**. (2020) . Disponível em: https://contest.japias.jp/tqj23/230354T/technologies_en.html. Acesso em: 12 mar. 2026..

LIAO, Douglas. **Implementação de QoS em rede 5G através do Network Slicing**. 2023. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/248721>. Acesso em: 9 jul. 2025.

MATIAS, Carlos Augusto. **Rede de antenas impressas faixa larga com diagrama de irradiação reconfigurável para aplicações em 5G**. 2022. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) – Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2022. Disponível em:

<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/36577>. Acesso em: 10 jul. 2025.

MOTA, Vitor L. G. et al. Evolução da tecnologia de telefonia móvel e estudo de um sistema móvel 5G. **Engevista**, Niterói, v. 20, n. 4, p. 527-541, 2018. Disponível em:

<https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/27028/16398>. Acesso em: 2 mar. 2026.

OLIVEIRA, Hevlla K. M. de et al. **Antena de microfita para WLAN com metamaterial do tipo CSRR**. Encontros Universitários da UFERSA – ECOP, Mossoró, v. 15, n. 1, p. 1–5, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/ecop/article/view/11170>. Acesso em: 11 jul. 2025.

RESENDE, Getúlio Martins. **Estudo do comportamento de redes 5G e LTE em diferentes localidades e frequências**. 2023. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/37515>. Acesso em: 15 jun. 2025.

ROSA, Gabriel P.; SILVA, Fernanda R. da. **Antena MIMO dual-band de microfita para aplicação em wireless 5G**. Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica – RTIC, Itajubá, v. 3, n. 2, p. 209–214, dez. 2023. Disponível em:

<https://periodicos.unifei.edu.br/index.php/rtic/article/view/194>. Acesso em: 8 jul. 2025..

Acesso em: 8 jul. 2025.

ROTA, Lucas Kienen. **Avaliação e validação da interoperabilidade das redes Non-3GPP com as redes 5G fim a fim**. 2023. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/248729>. Acesso em: 5 jul. 2025.

SANTOS, J. M. et al. **Percepções sobre os impactos do 5G na saúde humana: um estudo baseado em revisão bibliográfica e pesquisa de opinião**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2024. Disponível em: <https://bdta.ufra.edu.br/jspui/bitstream/123456789/4137/1/PERCEP%C3%87%C3%95ES%20SOBRE%20OS%20IMPACTOS%20DO%205G%20NA%20SA%C3%9ADE%20HUMANA%20UM%20ESTUDO%20BASEADO%20EM%20REVIS%C3%83O%20BIBLIOGR%C3%81FICA%20E%20PESQUISA%20DE%20OPINI%C3%83O.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2026.

SILVA, Laryssa Dayse Vilar e. **Estudo de modelos de canal de comunicação sem fio na faixa de ondas milimétricas para tecnologias 5G**. 2016. 138 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Redes de Comunicação) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em:

https://www.google.com/url?q=https://bdm.unb.br/bitstream/10483/15080/1/2016_LaryssaDayseVilareSilva.pdf&sa=D&source=docs&ust=1783209681418380&usg=AOvVawlaVIyYp0IgcS14T3szZ-r8. Acesso em: 15 jun. 2025.

SILVA, Gabriel Henrique Dias da. **Classificação de tráfego por classes de serviço no núcleo 5G**. 2022. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/237577>. Acesso em: 5 jul. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (UFRJ). **Evolução das redes móveis. Material didático da disciplina Redes de Computadores**. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2025-1/trabalhos/Grupo_01/evolucao.html. Acesso em: 3 mar. 2026.

XP INVESTIMENTOS. **Telecom Brasil: 5G Insights** – Capítulo 2: A Oportunidade no FWA/5G. São Paulo, 31 ago. 2022. Disponível em: <https://conteudos.xpi.com.br/acoes/relatorios/telecom-brasil-5g-insights-capitulo-2-a-oportunidade-no-fwa-5g/>. Acesso em: 15 jun. 2025.