

Modelagem e Análise das Redes 6G: Propagação em Altas Frequências e Estratégias de Mitigação de Perdas

Klissia de Paula Costa da Silva

Universidade Federal do Pará – UFPA – Castanhal/PA – Brasil

klissia.silva@castanhal.ufpa.br

Abstract

Research on the sixth generation (6G) of cellular mobile networks reveals a trajectory marked by innovation and collaboration, arising from the need to overcome perceived limitations in 5G. Significant milestones in the development of 6G reflect the convergence of emerging technologies, the exploration of ultra-high frequencies and global collaboration. The involvement of companies and standards bodies highlights the interdependence of the 6G ecosystem, while ambitious latency and data rate targets highlight a revolution in mobile network capabilities. The search for advanced modulation schemes, careful consideration of transmission references and the implementation of concepts such as MIMO, beamforming and artificial intelligence highlight the complexity and promising transformation in the mobile communications landscape. In short, 6G research not only anticipates a technological evolution, but outlines the fundamental redefinition of connectivity and interaction in the digital society of the future.

Resumo

A pesquisa sobre a sexta geração (6G) das redes móveis celulares revela uma trajetória marcada por inovação e colaboração, surgindo da necessidade de superar limitações percebidas no 5G. Os marcos significativos no desenvolvimento do 6G refletem a convergência de tecnologias emergentes, a exploração de frequências ultra elevadas e a colaboração global. O envolvimento de empresas e entidades de padronização destaca a interdependência do ecossistema 6G, enquanto as metas ambiciosas de latência e taxas de dados evidenciam uma revolução nas capacidades das redes móveis. A busca por esquemas de modulação avançados, a consideração cuidadosa das referências de transmissão e a implementação de conceitos como MIMO, beamforming e inteligência artificial ressaltam a complexidade e a promissora transformação no cenário das comunicações móveis. Este artigo realizou simulações computacionais para analisar o comportamento de redes 6G em diferentes frequências (100 GHz, 300 GHz, 400 GHz e 1 THz), utilizando o Modelo de Perda de Caminho (Lei de Friis) e a Capacidade de Shannon. Os resultados demonstram os desafios e oportunidades associados à implementação do 6G, destacando a alta perda de sinal em frequências terahertz e o potencial para taxas de transmissão na ordem de terabits por segundo. Em suma, a pesquisa sobre o 6G não apenas antecipa uma evolução tecnológica, mas delineaia a redefinição fundamental da conectividade e interação na sociedade digital do futuro.

1. Introdução

O incessante avanço tecnológico tem moldado significativamente a maneira como nos comunicamos e interagimos, e as redes móveis celulares desempenham um papel central nessa transformação. Desde a primeira geração (1G) até a quinta geração (5G), o universo da tecnologia tem testemunhado uma evolução notável que vem impulsionando a conectividade global a patamares nunca antes imaginados. Nesse contexto, surge a necessidade de explorar e compreender a próxima fronteira: a sexta geração (6G) das redes móveis celulares.

A pesquisa sobre o 6G não se configura apenas como uma continuação natural das gerações anteriores, mas sim como uma incursão em direção a novas fronteiras de possibilidades. A justificativa para esse empreendimento reside na demanda crescente por uma conectividade ultra rápida, confiável e de baixa latência, que atenda não apenas às necessidades atuais, mas também antecipa os desafios futuros da sociedade digital.

Este artigo tem como objetivo geral explorar as perspectivas e desafios das redes móveis 6G, com foco em suas características técnicas, aplicações emergentes e impacto na sociedade digital. Para isso, foram adotados procedimentos metodológicos que incluem uma revisão bibliográfica abrangente, com base em textos de instituições especializadas em comunicações móveis, e simulações computacionais utilizando o Modelo de Perda de Caminho (Lei de Friis) e a Capacidade de Shannon. Essas simulações permitiram analisar o comportamento de redes 6G em diferentes frequências (100 GHz, 300 GHz, 400 GHz e 1 THz), fornecendo insights valiosos sobre os desafios e oportunidades associados à implementação dessa tecnologia.

Além de traçar o processo inicial de criação da tecnologia 6G, destacando os marcos e avanços que culminaram em sua concepção, este trabalho busca investigar o papel das empresas e entidades de padronização que moldam a trajetória do 6G, identificando colaborações estratégicas e a dinâmica global desse ecossistema. Por fim, o artigo delinea as características técnicas fundamentais do 6G, desde taxas de dados até conceitos avançados como múltiplas antenas (MIMO), beamforming e inteligência artificial, contribuindo para uma compreensão mais profunda das implicações e potencialidades dessa nova geração de redes móveis.

Ao mergulhar nessas questões, esperamos não apenas antecipar os rumos que a conectividade móvel pode tomar nas próximas décadas, mas também oferecer subsídios

para o desenvolvimento de soluções tecnológicas que viabilizem a implementação do 6G de forma eficiente e sustentável.

2. Processo Inicial de Criação da Tecnologia 6G

A jornada rumo à concepção da sexta geração (6G) das redes móveis celulares se inicia em um intrincado contexto de pesquisa e inovação. O levantamento histórico revela que as sementes do 6G foram semeadas durante o desenvolvimento do 5G, quando os pesquisadores começaram a vislumbrar as limitações inerentes e as demandas emergentes que impulsionariam a necessidade de uma nova geração (ZHOU et al., 2020).

Um marco crucial nesse percurso foi o reconhecimento da crescente importância da integração de tecnologias emergentes, como inteligência artificial, realidade aumentada e internet das coisas, no âmbito das comunicações móveis. Estudos fundamentais, como o de Yazar e Arslan (2020), apontam para a convergência dessas tecnologias como catalisadores para o desenvolvimento da próxima geração.

À medida que o 6G começou a tomar forma, avanços significativos foram registrados em diversas áreas-chave. A pesquisa em espectro de frequências além das tradicionalmente utilizadas para comunicações móveis ganhou destaque, com propostas para incorporar frequências *terahertz* (THz) e acima. A obra seminal de Zhang et al. (2020) delinea a importância dessas frequências ultra elevadas para alcançar taxas de transmissão excepcionais no 6G.

Outro marco notável reside na abordagem centrada no usuário, buscando não apenas velocidades de download impressionantes, mas também experiências de usuário mais imersivas e interativas. A pesquisa de Liu et al. (2021) destaca a importância de considerar não apenas a eficiência espectral, mas também métricas que refletem a qualidade percebida pelos usuários.

O desenvolvimento inicial do 6G também foi influenciado por iniciativas globais, com países como China, Estados Unidos e Japão liderando esforços de pesquisa e investimentos substanciais. A colaboração internacional, evidenciada por acordos de pesquisa e intercâmbio de conhecimento, desempenhou um papel crucial na formação dos alicerces do 6G.

Ao compreender o processo inicial de criação da tecnologia 6G, podemos vislumbrar a complexidade e a interdisciplinaridade que permeiam esse campo inovador. A convergência de ideias, bem como a busca por novas fronteiras tecnológicas e a colaboração global, emergem como pilares essenciais na construção do futuro das redes móveis celulares.

3. Envolvimento de Empresas e Entidades de Padronização

A concretização da tecnologia 6G não é apenas um feito da pesquisa acadêmica; ela é moldada e impulsionada pela ativa participação de empresas líderes e entidades de padronização. Este capítulo propõe lançar luz sobre os bastidores desse ecossistema dinâmico (YAZAR et al., 2020).

O desenvolvimento do 6G é marcado por uma colaboração íntima entre gigantes da indústria de telecomunicações, tecnologia e pesquisa. Empresas como *Huawei*, *Samsung*, *Nokia* e *Qualcomm* têm desempenhado papéis proeminentes, investindo significativamente em pesquisa e desenvolvimento para impulsionar a evolução das redes móveis. A visão estratégica dessas empresas, muitas vezes refletida em documentos estratégicos e anúncios públicos, molda a direção do 6G (ROUT et al., 2020).

Organizações internacionais de padronização, como o Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE) e a União Internacional de Telecomunicações (ITU), desempenham um papel crucial na definição dos padrões que guiarão a implementação global do 6G. Documentos de especificação técnica produzidos por essas entidades são fontes indispensáveis para compreender as normas e diretrizes que orientarão o desenvolvimento do 6G (TARIQ et al., 2021).

O trabalho colaborativo entre academia, indústria e entidades de padronização é exemplificado pelo modelo de parceria entre a ITU e o *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), que desempenha um papel fundamental na padronização das tecnologias móveis (LIU et al., 2021).

Ao mergulhar nas interações entre empresas e entidades de padronização, podemos desvendar as forças motrizes por trás do desenvolvimento do 6G. A interconexão entre interesses comerciais, inovação tecnológica e normatização global emerge como um elemento crucial na construção do panorama futuro das redes móveis celulares de sexta geração.

4. Taxas de Dados e Latência no 6G

A principal contribuição da revolução 6G reside na capacidade de proporcionar taxas de dados excepcionais e latências ultra baixas, redefinindo os padrões de conectividade. Este capítulo busca desvelar as características técnicas que fundamentam esse aspecto crucial da sexta geração.

Um dos pilares do 6G é a promessa de taxas de dados que transcendem os limites da capacidade do 5G. A literatura, representada por estudos como o de Liu et al. (2021), fornece insights sobre as tecnologias propostas para alcançar taxas de transmissão da ordem de *terabits* por segundo. A exploração de técnicas como modulação avançada, o uso de frequências de ondas milimétricas e *terahertz*, bem como o emprego eficiente do espectro, são tópicos fundamentais nesse contexto.

Além disso, a latência ultrabaixa é uma pedra angular do 6G, prometendo revolucionar aplicações críticas em tempo real, como realidade aumentada e comunicações veiculares. Estudos como o de Nawas et al (2019) delineiam os limites teóricos e práticos da latência no 6G, considerando fatores como processamento de borda, redes neurais e técnicas de otimização de transmissão.

Tabela 1 – Dados comparativos sobre as tecnologias 4G, 5G e 6G

Característica	4G	5G	6G
Ano de Introdução	Início da década de 2010	Início da década de 2020	Previsão para a década de 2030
Taxa de Dados Máxima	Até 1 Gbps	Até 20 Gbps	Até 1 Tbps (1.000 Gbps)
Latência	30-50 ms (ou menos)	1 ms (ou menos)	0,1 ms ou menor
Frequências	Abaixo de 6 GHz	Abaixo de 100 GHz	Entre 100 GHz e 3.000 GHz (THz)
Dispositivos Conectados	Mais de 1 milhão	Mais de 1 milhão	Trilhões
Cobertura	Áreas urbanas e suburbanas	Global, incluindo áreas rurais	Global, com integração via satélites e drones
Uso de Espectro	Espectro licenciado	Espectro licenciado	Uso dinâmico e adaptativo de espectro, incluindo terahertz e bandas não convencionais
Tecnologias-chave	LTE Advanced, MIMO, OFDM	NR (New Radio), network slicing, edge computing.	Redes sensíveis, IA, integração de realidade estendida

Fonte: Projeto 6G Brasil, adaptado pelo autor, 2024.

Comparativamente, a análise das diferenças entre as latências do 5G e do 6G, destacando os avanços tecnológicos que permitirão alcançar tempos de resposta imperceptíveis, é um ponto crucial a ser abordado. Conforme a Tabela 1, podemos observar que as informações fornecidas destacam claramente a evolução significativa nas capacidades do 6G em comparação com o 5G. Em primeiro lugar, observa-se que a redução na latência de 5ms para 1ms no 6G representa uma melhoria substancial. Essa diminuição é crucial para aplicações em tempo real, como realidade aumentada,

cirurgias remotas e automação industrial, onde até milissegundos podem impactar significativamente o desempenho e a segurança.

Por sua vez, a taxa de dados de pico no 6G, atingindo 1 terabit por segundo, é uma demonstração da busca pela próxima fronteira de transmissão de dados ultra rápidos. Essa magnitude de melhoria impulsiona a transmissão de grandes volumes de dados em tempo real, possibilitando experiências imersivas e aplicações avançadas de Internet das Coisas (IoT) que demandam altíssima largura de banda. Já a capacidade de download do 6G, alcançando até 1 milhão de Mbps (ou 1 Tbps), reflete a escalabilidade exponencial em comparação com a capacidade do 5G. Isso é particularmente relevante para suportar a crescente demanda por streaming de alta qualidade, downloads instantâneos e outras aplicações que requerem altas taxas de transferência de dados. Da mesma forma, a média de uploads no 6G, indo até 1 milhão de Mbps, evidencia uma transformação considerável. Isso é crucial para suportar a crescente gama de aplicações que demandam uploads rápidos, como compartilhamento de conteúdo em alta resolução e colaboração em tempo real.

Em complemento a essa análise, a Figura 1, incluída abaixo, apresenta uma visão geral das aplicações emergentes e casos de uso que serão viabilizados pelo 6G. Essas aplicações incluem telepresença holográfica, sistemas de saúde inteligentes, veículos autônomos, Internet das Coisas (IoT), robótica colaborativa e redes inteligentes. A imagem também ilustra como as capacidades aprimoradas do 6G, como baixa latência e altas taxas de transferência de dados, permitirão o desenvolvimento dessas soluções em diversas áreas.

Figura 1 – Aplicações 6G emergentes.



Fonte: Projeto 6G Brasil, Autor 2023.

Em resumo, as especificações do 6G indicam não apenas melhorias incrementais em relação ao 5G, mas sim uma revolução em termos de latência, taxas de dados e capacidades de transferência, prometendo redefinir radicalmente o panorama das comunicações móveis e impulsionar inovações em diversas áreas.

5. Esquemas de Modulação Empregados no 6G

Os esquemas de modulação desempenham um papel crucial na eficiência da transmissão de dados e na maximização do espectro disponível. No contexto da sexta geração (6G), novos desafios e oportunidades surgem, demandando abordagens inovadoras para otimizar a comunicação sem fio.

O 6G busca explorar modulações mais avançadas do que as utilizadas nas gerações anteriores. Estudos como o de Monserrat et al. (2020) destacam a necessidade de esquemas de modulação que possam suportar as altas frequências *terahertz* (THz) e além, proporcionando taxas de transmissão excepcionais. Técnicas como modulação de

amplitude e fase (APM) e modulação de amplitude, fase e frequência (APFSK) estão entre as candidatas para atender a essas demandas.

A eficiência espectral no 6G também pode ser melhorada por meio de técnicas como o **Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)**, que permite o compartilhamento do mesmo recurso espectral por vários usuários, diferenciados por níveis de potência. Essa abordagem é essencial em cenários de alta densidade de dispositivos, aumentando a capacidade da rede e reduzindo a latência

O papel da inteligência artificial (IA) na otimização da modulação é uma tendência proeminente no 6G. Algoritmos de aprendizado de máquina são aplicados para adaptar dinamicamente os esquemas de modulação com base nas condições do canal, maximizando a eficiência da transmissão. Estudos como o de Zhang et al. (2020) exploram abordagens de modulação adaptativa impulsionadas por IA.

Ao analisar os esquemas de modulação empregados no 6G, este capítulo busca não apenas descrever as técnicas utilizadas, mas também compreender como essas inovações contribuem para a superação dos desafios únicos enfrentados nas altas frequências do 6G. A busca por eficiência espectral, a utilização de algoritmos de IA e a adaptação dinâmica dos esquemas de modulação são elementos cruciais para atingir as metas ambiciosas do 6G em termos de taxa de transmissão e capacidade de rede.

6. Referências na Transmissão de Sinais 6G e Relação com o Tamanho das Células de Rede

A escolha cuidadosa das frequências de transmissão é uma consideração fundamental no desenvolvimento do 6G, influenciando não apenas a taxa de dados, mas também o alcance das comunicações e o tamanho das células de rede. Este capítulo explora as referências na transmissão de sinais 6G e examina a interconexão com a arquitetura da rede.

O 6G expande as fronteiras tradicionais das frequências utilizadas em comunicações móveis, explorando o espectro de ondas milimétricas e *terahertz*. Estudos como o de Yang et al. (2019) discutem as vantagens e desafios associados ao uso dessas frequências ultraelevadas, destacando suas capacidades de transmissão de alta taxa de dados, mas também reconhecendo a necessidade de superar obstáculos de propagação e absorção atmosférica.

A escolha das frequências no 6G está intrinsecamente ligada ao tamanho das células de rede. Frequências mais altas têm uma propagação mais limitada, resultando em células de menor tamanho. O trabalho de Liu et al. (2022) aborda a relação entre as frequências utilizadas no 6G e a necessidade de implementar células de rede mais densas para garantir uma cobertura eficaz. Isso é essencial para atender à demanda por alta capacidade em áreas urbanas densamente povoadas.

A exploração de frequências ultraelevadas no 6G não apenas impulsiona as taxas de dados, mas também influencia a cobertura e capacidade da rede. Estudos como o de Dang et al. (2021) investigam estratégias de mitigação de perdas de sinal em frequências mais altas, utilizando técnicas como *beamforming* e antenas direcionais para compensar os desafios de propagação.

Ao abordar as referências na transmissão de sinais 6G e sua relação com o tamanho das células de rede, este capítulo busca proporcionar uma compreensão abrangente das escolhas de frequências e suas implicações na arquitetura e desempenho das redes móveis de sexta geração. A balanceada consideração entre altas taxas de dados, cobertura eficiente e capacidade da rede emerge como um desafio multidimensional na construção do 6G.

Além disso, o uso de **Visible Light Communication (VLC)** surge como uma solução complementar no 6G. Essa tecnologia utiliza luz visível para transmitir dados, oferecendo alta capacidade de transmissão em ambientes internos, onde a atenuação do sinal em frequências terahertz é menos severa.

7. Conceitos Importantes Associados ao 6G

O 6G não é apenas uma evolução das capacidades de transmissão, mas uma revolução que incorpora conceitos inovadores para aprimorar ainda mais a eficiência e a flexibilidade das redes móveis. Este capítulo explora conceitos fundamentais associados ao 6G, destacando avanços notáveis.

O uso de múltiplas antenas, conhecido como MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), é uma abordagem central no 6G para melhorar a eficiência espectral e aumentar a capacidade da rede. Estudos, como o de Rout et al. (2020), discutem a implementação de MIMO em altas frequências e exploram suas implicações na melhoria da qualidade do sinal e do desempenho geral da rede.

Já o *beamforming* é uma técnica que direciona intencionalmente o sinal de transmissão para uma direção específica, aumentando a eficiência e a qualidade da comunicação. Pesquisas como o trabalho de Zhang et al. (2021) examinam as diferentes abordagens de *beamforming* no contexto do 6G, destacando sua aplicação em ambientes urbanos densos e em cenários de comunicação veicular.

O conceito de Large Intelligent Surfaces (LIS) complementa tecnologias como MIMO e *beamforming*, permitindo a reconfiguração do ambiente de propagação do sinal em tempo real. Ao transformar superfícies em elementos ativos, o LIS melhora a cobertura e reduz a atenuação, sendo especialmente útil em áreas urbanas densas e cenários de alta obstrução.

Por sua vez, a integração da inteligência artificial (IA) na gestão de redes é um ponto crucial no 6G. Estudos, como o de Sun et al. (2020), exploram como algoritmos de aprendizado de máquina podem otimizar a alocação de recursos, antecipar demandas de tráfego e aprimorar a eficiência global da rede. A IA não apenas impulsiona a automação, mas também adapta dinamicamente a rede às condições em constante mudança.

Ao explorar esses conceitos importantes associados ao 6G, este capítulo busca fornecer uma visão abrangente das inovações que definirão o cenário das redes móveis de sexta geração. A implementação de MIMO, a aplicação estratégica do *beamforming* e a integração da IA representam pilares fundamentais para alcançar as metas ambiciosas do 6G em termos de desempenho, confiabilidade e flexibilidade.

8. Metodologia

Este artigo realiza simulações computacionais para analisar o comportamento de uma rede 6G, utilizando dois modelos fundamentais: o Modelo de Perda de Caminho (Lei de Friis) e a Capacidade de Shannon. As simulações foram implementadas em Python, uma linguagem de programação amplamente utilizada para análise de dados e modelagem matemática, devido à sua flexibilidade e vasta biblioteca de ferramentas científicas.

O objetivo das simulações é explorar como as características técnicas do 6G, como altas frequências (na faixa de terahertz) e larguras de banda extremas, impactam a perda de sinal e a capacidade de transmissão de dados. Esses modelos permitem

antecipar os desafios e oportunidades associados à implementação do 6G, fornecendo insights valiosos para o desenvolvimento de soluções tecnológicas.

8.1 Modelo de Perda de Caminho (Lei de Friis)

O Modelo de Perda de Caminho, descrito pela Lei de Friis, é amplamente utilizado para calcular a atenuação de sinal em sistemas de comunicação sem fio. Esse modelo demonstra como a propagação de ondas eletromagnéticas sofre grande atenuação à medida que a distância entre o transmissor e o receptor aumenta, especialmente em frequências mais altas, como aquelas na faixa de terahertz (THz).

No contexto do 6G, a Lei de Friis é essencial para entender os desafios associados à propagação do sinal em altas frequências. Frequências na faixa de THz permitem taxas de transmissão de dados extremamente altas, mas também resultam em uma perda de sinal significativa em distâncias relativamente curtas. Isso ocorre porque a energia do sinal é rapidamente dissipada devido à absorção atmosférica e à dispersão do sinal.

Para mitigar esses efeitos, tecnologias como beamforming, antenas direcionais e Large Intelligent Surfaces (LIS) são propostas como soluções para concentrar o sinal e reduzir a perda de caminho. A simulação realizada neste trabalho utiliza a Lei de Friis para analisar a perda de sinal em diferentes frequências (100 GHz, 300 GHz, 400 GHz e 1 THz) e distâncias, fornecendo uma visão clara dos desafios técnicos do 6G.

8.2 Capacidade Shannon

A Capacidade de Shannon define o limite teórico máximo de taxa de transmissão de dados em um canal de comunicação, considerando a largura de banda e a relação sinal-ruído (SNR). Esse conceito é fundamental para o desenvolvimento do 6G, pois estabelece as bases para alcançar taxas de transmissão na ordem de terabits por segundo (Tbps).

No contexto do 6G, a capacidade de Shannon é utilizada para explorar o potencial das altas frequências (THz) e larguras de banda extremas. A simulação realizada neste trabalho calcula a capacidade do canal para diferentes frequências (100

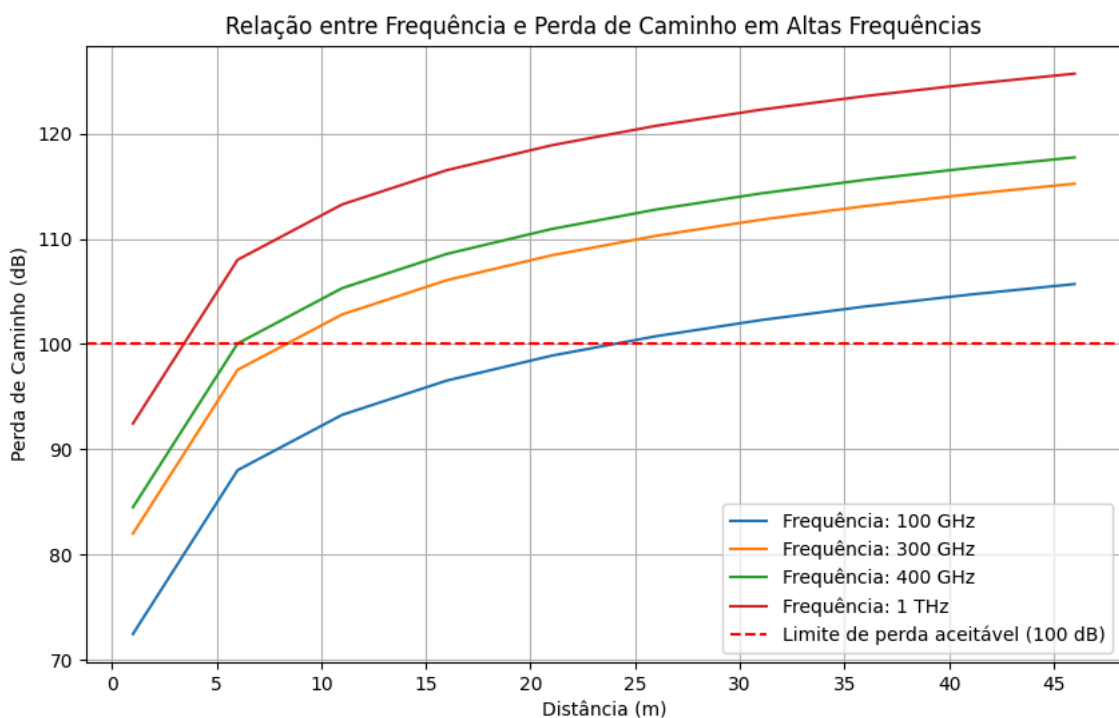
GHz, 300 GHz, 400 GHz e 1 THz) e valores de SNR, demonstrando como a vazão teórica varia em função desses parâmetros.

Os resultados mostram que, mesmo em cenários com SNR relativamente baixo, a capacidade do canal pode atingir valores extremamente altos quando a largura de banda é grande. Isso reforça a viabilidade do uso de frequências THz no 6G, desde que sejam implementadas técnicas para otimizar o SNR, como o uso de MIMO, beamforming e inteligência artificial para gerenciamento dinâmico do canal.

9. Resultados

Nesta seção, são apresentados os resultados das simulações realizadas com base nas duas leis implementadas no código Python: o Modelo de Perda de Caminho (Lei de Friis) e a Capacidade de Shannon. Essas simulações permitiram analisar o comportamento de redes 6G em diferentes frequências (100 GHz, 300 GHz, 400 GHz e 1 THz), fornecendo insights valiosos sobre os desafios e oportunidades associados à implementação dessa tecnologia.

Gráfico 1 – gráfico com relação de perda de 4 frequências 100 GHz, 300 GHz, 400 GHz, 1 THz



O gráfico evidencia que a perda de caminho aumenta exponencialmente com a distância, sendo mais acentuada para frequências mais altas. Observações específicas incluem:

- A frequência de 1 THz apresenta os níveis mais elevados de atenuação, ultrapassando 100 dB em distâncias relativamente curtas, o que limita seu alcance em aplicações práticas.
- Frequências mais baixas, como 100 GHz, têm um comportamento mais estável, com menor perda de sinal à medida que a distância aumenta.
- O limite de perda aceitável (100 dB), representado por uma linha tracejada, destaca o desafio de manter a qualidade do sinal em frequências elevadas e distâncias maiores.

Esses resultados reforçam a necessidade de tecnologias como **beamforming**, **MIMO** e **LIS** para mitigar a perda de sinal em frequências THz.

Esses resultados reforçam a necessidade de soluções tecnológicas para mitigar os efeitos da perda de caminho em sistemas que operam na faixa de frequências do 6G. Tecnologias como beamforming e antenas direcionais são indispensáveis para concentrar os sinais e reduzir a dispersão. Além disso, o uso de NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) pode otimizar a utilização do espectro e melhorar a eficiência na transmissão de dados, especialmente em cenários densos. A VLC (Visible Light Communication), que utiliza luz visível para transmissão de dados, surge como uma alternativa promissora em ambientes internos, onde a atenuação por distância é menos problemática. Já o LIS (Large Intelligent Surfaces), ao permitir a reconfiguração dinâmica do ambiente de propagação do sinal, oferece uma abordagem inovadora para reduzir perdas e melhorar a cobertura, especialmente em áreas urbanas com alta densidade de obstáculos. Essas soluções combinadas destacam o potencial de superação das limitações físicas impostas pelas frequências de THz, pavimentando o caminho para redes 6G eficientes e escaláveis.

Gráfico 2 – gráfico com relação de perda de 4 frequências 100 GHz, 300 GHz, 400 GHz, 1 THz



O gráfico da Capacidade de Shannon mostra a vazão teórica (em Gbps) em função do SNR para diferentes frequências (100 GHz, 300 GHz, 400 GHz e 1 THz). Observa-se que:

- A capacidade do canal aumenta exponencialmente com o SNR, especialmente para frequências mais altas.
- Para uma frequência de 1 THz, a capacidade do canal pode atingir dezenas de Tbps, o que é essencial para aplicações do 6G.
- Mesmo em cenários com SNR baixo, a capacidade do canal é significativa quando a frequência é alta.

Esses resultados destacam o potencial do 6G para suportar taxas de transmissão extremamente altas, mas também mostram a importância de otimizar o SNR e a largura de banda.

10. Considerações Finais

Ao percorrer os intrincados caminhos da pesquisa sobre a sexta geração (6G) das redes móveis celulares, emergem conclusões fundamentais que delineiam não apenas o estado atual da tecnologia, mas também as promissoras perspectivas para o futuro. A análise do processo inicial de criação da tecnologia 6G revela a sua origem nas

limitações percebidas no 5G e na visão de uma conectividade ainda mais abrangente e eficiente. Os marcos e avanços significativos nesse percurso destacam a convergência de tecnologias emergentes, a exploração de frequências ultra elevadas e a colaboração global como elementos cruciais na formação dessa nova era das comunicações móveis.

O envolvimento ativo de empresas líderes e entidades de padronização sinaliza a complexidade e a interdependência do ecossistema 6G. A sinergia entre inovação empresarial, pesquisa acadêmica e normatização global se revela como um motor propulsor para a definição de padrões e diretrizes que nortearão a implementação massiva do 6G. As metas ambiciosas do 6G em termos de taxas de dados e latência são corroboradas por uma análise comparativa com a geração anterior, o 5G. A redução significativa na latência, o aumento exponencial na taxa de dados e a capacidade de download e upload que alcança níveis inéditos refletem não apenas uma evolução, mas uma revolução nas capacidades das redes móveis.

Aprofundando-se nos esquemas de modulação, destaca-se a busca por técnicas mais avançadas, a eficiência espectral e a incorporação de inteligência artificial na adaptação dinâmica desses esquemas. Esses avanços representam pilares essenciais para alcançar as altas metas estabelecidas para o 6G.

A exploração das referências na transmissão de sinais e sua relação com o tamanho das células de rede revela a necessidade de uma abordagem equilibrada na escolha de frequências. A utilização de frequências ultraelevadas impulsiona as capacidades de transmissão, mas requer uma reconfiguração estratégica das células de rede para garantir uma cobertura eficiente.

Finalmente, ao abordar os conceitos importantes associados ao 6G, destaca-se a importância de técnicas como múltiplas antenas (MIMO), beamforming e a integração da inteligência artificial na gestão de redes. Além disso, tecnologias emergentes como Large Intelligent Surfaces (LIS), Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) e Visible Light Communication (VLC) têm papel fundamental no aprimoramento da eficiência espectral, na redução de atenuação de sinal e na expansão de aplicações inovadoras. Esses conceitos não apenas melhoram a eficiência técnica, mas também pavimentam o caminho para a criação de redes móveis mais adaptáveis e inteligentes.

Em síntese, a pesquisa sobre o 6G transcende os limites da conectividade móvel, representando uma jornada inovadora que redefine os padrões de comunicação. As

considerações finais deste estudo refletem a complexidade e a promissora trajetória do 6G, indicando não apenas avanços tecnológicos, mas também a transformação fundamental na forma como nos comunicamos e interagimos na sociedade digital do futuro.

Referências bibliográficas

YAZAR, A.; ARSLAN, H. **A Waveform Parameter Assignment Framework for 6G With the Role of Machine Learning**. In: IEEE Open Journal of Vehicular Technology, vol. 1, pp. 156-172, 2020. DOI: 10.1109/OJVT.2020.2992502.

YAZAR, A.; TUSHA, S. D.; ASLAN, H. **6G vision: an ultra-flexible perspective**. In: ITU Journal on Future and Evolving Technologies, v. 1, Issue 1, p. 1-20, 2020.

TARIQ, F. et al. A Speculative Study on 6G. **IEEE Wireless Communications**, vol. 27, no. 4, pp. 118-125, Aug. 2021. DOI: 10.1109/MWC.001.1900488.

LIU, G. et al. Vision, requirements and network architecture of 6G mobile network beyond 2030. **China Communications**, vol. 17, no. 9, pp. 92-104, Sept. 2021. DOI: 10.23919/JCC.2020.09.008.

MONSERRAT, J. F. et al. **Key Technologies for the Advent of the 6G**. In: 2020 IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE WORKSHOPS (WCNCW), Seoul, Korea (South), 2020, pp. 1-6. DOI: 10.1109/WCNCW48565.2020.9124725.

ALSHARIF, M. H. et al. **Sixth Generation (6G) Wireless Networks: Vision, Research Activities, Challenges and Potential Solutions**. Symmetry, vol. 12, no. 4, pp. 1-21, 2022.

YANG, P. et al. **6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques**. IEEE Network, vol. 33, no. 4, pp. 70-75, July/Aug. 2019. DOI: 10.1109/MNET.2019.1800418.

DANG, S. et al. What should 6G be? **Nature Electronics**, vol. 3, pp. 20– 29, 2021.

NAWAZ, S. J. et al. **Quantum Machine Learning for 6G Communication Networks: State-of-the-Art and Vision for the Future**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 7, pp. 46317- 46350, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2909490.

ROUT, S. P. **6G Wireless Communication: Its Vision, Viability, Application, Requirement, Technologies, Encounters and Research**. In: 2020 11th INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, COMMUNICATION AND NETWORKING TECHNOLOGIES (ICCCNT), Kharagpur, India, 2020, pp. 1-8. DOI: 10.1109/ICCCNT49239.2020.9225680.

INATEL. **O IMPACTO REVOLUCIONÁRIO DO 6G, A PRÓXIMA GERAÇÃO DE REDES MÓVEIS**. INATEL NOTÍCIAS, 2024. DISPONÍVEL EM: <https://inatel.br/noticias/o-impacto-revolucionario-do-6g-a-proxima-geracao-de-redes-moveis>. Acesso em: 25 nov. 2024.

ZHANG, S.; ZHANG, H.; SONG, L. **Beyond D2D: Full Dimension UAV-to-Everything Communications in 6G**. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 6, pp. 6592-6602, June 2020. DOI: 10.1109/TVT.2020.2984624.

SUN, Y. et al. **When Machine Learning Meets Privacy in 6G: A Survey**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020. DOI: 10.1109/COMST.2020.3011561.

ZHOU, Y. et al. **Service-aware 6G: An intelligent and open network based on the convergence of communication, computing and caching**. Digital Communications and Networks, vol. 6, no. 3, pp. 253-260, 2020.

De Alwis, C., Kalla, A., Pham, Q.-V., Kumar, P., Dev, K., & Hwang, W.-J. (2021). **Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research.** IEEE Open Journal of the Communications Society, 2, 836-886.