

**MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO**

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO E TELECOMUNICAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**SEXTA GERAÇÃO DAS REDES MÓVEIS CELULARES (6G): Desafios e possibilidades
da faixa de frequência de Terahertz**



1ºTen. VITOR FLORENCIO NUNES

**Rio de Janeiro
2023**

1ºTen. VITOR FLORENCIO NUNES

SEXTA GERAÇÃO DAS REDES MÓVEIS CELULARES (6G): Desafios e possibilidades
da faixa de frequência de Terahertz

Monografia apresentada ao Centro de Instrução
Almirante Alexandrino como requisito parcial à
conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em
Segurança da Informação e Comunicações.

Orientadores:

Prof. Dr. CARLOS VINICIO RODRÍGUEZ RON

CIAA
Rio de Janeiro
2023

FOLHA DE APROVAÇÃO

1ºTen VITOR FLORENCIO NUNES

SEXTA GERAÇÃO DAS REDES MÓVEIS CELULARES (6G): Desafios e possibilidades da faixa de frequência de Terahertz

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Segurança da Informação e Comunicações.

Aprovada em ____ de _____ de _____

Banca Examinadora:

CMG (RM1-EN) Gian Karlo Huback Macedo de Almeida – CIAA

Carlos Vinicio Rodríguez Ron, D. Sc. – PUC-RIO

CIAA
Rio de Janeiro
2023

Dedico este trabalho à minha esposa, pelo companheirismo, apoio e compreensão ao meu afastamento físico e mental em decorrência das necessidades da carreira naval, e aos meus pais por terem me dado a educação necessário para ser um homem humilde e temente à Deus.

AGRADECIMENTOS

Aproveito essa oportunidade para deixar registrado o meu agradecimento à Deus por ter me permitido chegar até esse momento da carreira, e agradeço a Ele por ter estado ao meu lado em todos os momentos difíceis e, também, nos bons momentos.

Além disso, agradeço aos meus pais por terem se esforçado tanto para me proporcionar uma educação de alta qualidade. Não me refiro à educação proveniente dos bancos escolares, mas sim, do processo de educação que ocorre dentro de casa, que é passado de pais para filhos. Apesar das dificuldades financeiras, e de algumas vezes, ter me faltado a educação formal de escolas caras, e até mesmo de escolas baratas, essa educação de dentro de casa foi suficiente para que eu pudesse compensar as dificuldades impostas a mim e conseguisse seguir em busca dos meus objetivos. Com certeza, se não fosse por essa educação eu não teria ingressado na Escola Naval e conseqüentemente não estaria escrevendo este trabalho.

Gostaria de agradecer, também, a minha esposa pela amizade, pela compreensão e pela ajuda direta através da facilitação da rotina diária dentro de casa, com o objetivo de preservar algum tempo livre para que eu pudesse me dedicar ao estudo e às pesquisas durante o curso. Sem dúvida tal fato influenciou de maneira significativa no meu aproveitamento.

Agradeço a todos os professores que ministraram alguma disciplina no Curso de Aperfeiçoamento Avançado de Segurança da Informação e Comunicações, todos eles contribuíram sobremaneira com o meu crescimento profissional e pessoal. Esses conhecimentos, inclusive, foram essenciais para a compreensão do material estudado durante as pesquisas realizadas em função deste trabalho.

Agradeço ao coordenador do curso, o Capitão de Mar e Guerra Huback, coordenador do curso de SIC, por ter se esforçado para permitir que nós, alunos do curso, pudéssemos nos preocupar somente com as questões acadêmicas relacionadas ao curso e tivéssemos uma boa rotina de estudo.

Por último, agradeço muito ao orientador deste trabalho, o Prof. Dr. Carlos Rodriguez, pelos esclarecimentos prestados a cerca deste trabalho e pelas orientações precisas que ajudaram nortear a pesquisa e o desenvolvimento da pesquisa de forma clara. Além disso, ressalto a dedicação ao curso de maneira geral, e a inspiração que trouxe a todos os alunos ao demonstrar entusiasmo na ministração das matérias que, inclusive, me motivaram a seguir esse campo de pesquisa.

“When wireless is perfectly applied, the whole Earth will be converted into a huge brain, which in fact it is, all things being particles of a real and rhythmic whole.”

Nikola Tesla

SEXTA GERAÇÃO DAS REDES MÓVEIS CELULARES (6G): Desafios e possibilidades da faixa de frequência de Terahertz

Resumo

A evolução das redes móveis tem sido uma constante busca por melhorias na conectividade e nas aplicações. Este artigo analisa a transição da tecnologia móvel, desde o 1G até o 5G, identificando desafios atuais que impulsionam o desenvolvimento do 6G. Com ênfase nas frequências na faixa de Terahertz, são explorados como o 6G promete capacidades revolucionárias, incluindo altas taxas de dados e latência ultrabaixa, habilitando aplicações de realidade virtual aumentada, cirurgia remota e cidades inteligentes. São discutidas as tecnologias-chave, considerações de segurança. Este resumo destaca a importância da evolução contínua das redes móveis e a transição para o 6G como uma fronteira importante na comunicação móvel.

Palavras-chave: [6G, Redes Móveis, Telefonia Celular, Terahertz, Wireless]

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquemas de Internet of Smart Things.....	25
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução da Tecnologia Móvel	16
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Atenuação no espaço livre para Umidade relativa de 50%	32
Gráfico 2 – Atenuação no espaço livre para Umidade relativa de 100%	33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Apresentação do Problema	13
1.2 Justificativa e Relevância	13
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo Geral	14
1.3.2 Objetivos Específicos	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
3 METODOLOGIA	29
3.1 Classificação da Pesquisa	29
3.1.1 Classificação Quanto aos Fins	29
3.1.2 Classificação Quanto aos Meios	29
3.2 Limitações do Método	29
3.3 Coleta e Tratamento dos Dados	29
4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	30
5 CONCLUSÃO	35
5.1 Considerações Finais	35
5.2 Sugestões para futuros trabalhos	35
REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

No final do século XIX, Guglielmo Marconi realizou o experimento que permitiu mostrar ao mundo a possibilidade de comunicação a distância por meio da propagação de ondas eletromagnéticas (Riccardi, et al., 2022). Desde então, as tecnologias que proporcionam comunicação sem fio têm se desenvolvido de maneira

Ao longo das últimas décadas pode-se observar um elevado crescimento do desenvolvimento de dispositivos eletrônicos munidos de tecnologias que permitem a comunicação wireless. Com isso, faz-se necessário a evolução das infraestruturas que proporcionam a comunicação desses dispositivos.

Essa jornada de desenvolvimento iniciou-se com as redes 1G, a primeira geração de redes móveis celulares, e foi se desenvolvendo em termos de largura de banda, taxa de dados, eficiência espectral, segurança, entre outros aspectos.

No momento em que este trabalho está sendo confeccionado, a tecnologia predominante é o 4G, que permite que os dispositivos se conectem à internet com alta taxa de comunicação de dados e baixa latência, se comparado com as gerações anteriores. Isso permite que os usuários da tecnologia 4G consigam utilizar aplicações como streaming de vídeo, transferência de mídia, jogos em tempo real.

Além disso, o processo de implantação do 5G já foi iniciado em diversos países. Porém, em um primeiro momento, muitas das aplicações que estão previstas para serem utilizadas no 5G ainda não foram possíveis. O 5G está sendo implementado em muitos países reutilizando a infraestrutura do 4G e realizando alguns melhoramentos, o que permite uma melhoria na qualidade do serviço, mas ainda com sérias limitações em relação à todas as aplicações que foram previstas.

Espera-se que o 5G possa comportar uma grande quantidade de dispositivos IOT (Internet of Things), uma taxa ainda maior de dados, e baixa latência, que permitirão que aplicações complexas possam ser utilizadas através das redes 5G, como realidade virtual e realidade aumentada, cidades inteligentes, telemedicina, entre outros.

Mesmo com a implementação do 5G ainda em andamento, muitos estudos estão sendo concentrados no detalhamento do 6G, uma nova geração que está sendo prevista para iniciar sua comercialização na década de 2030. Porém muitos desafios precisam ser enfrentados para que o 6G forneça todo o seu potencial.

Como será visto mais adiante no desenvolvimento deste trabalho, apesar das dificuldades encontradas no avanço do 6G, algumas tecnologias estão se mostrando promissoras para serem utilizadas como bases das tecnologias 6G.

1.1 Apresentação do Problema

Ao analisar o desenvolvimento da tecnologia móvel celular, pode-se perceber uma tendência natural do aprimoramento das técnicas utilizadas em prol da melhoria da qualidade do serviço fornecido pelas operadoras de telefonia móvel.

Contudo, os paradigmas de comunicação se mantiveram os mesmos ao longo do desenvolvimento das gerações, do 1G ao 4G, sendo os melhoramentos ocorridos na infraestrutura das redes suficientes para permitir a inclusão de novos recursos aos dispositivos, e que os recursos previamente utilizados fossem aperfeiçoados.

Na implantação do 5G observa-se importantes mudanças nos aspectos de funcionamento da infraestrutura base das tecnologias, como gerenciamento das redes e a forma como os dispositivos se comunicam com os terminais e entre si.

Espera-se que o 6G apresente recursos que vão muito além do aumento da taxa de dados e diminuição da latência. O 6G promete revolucionar a forma como as comunicações são realizadas, permitindo aplicações como comunicação tátil, cirurgia remota, cidades inteligentes, e uma utilização massiva na indústria.

Dentre as tecnologias apresentadas para comporem o 6G, uma que se destaca como fundamental é a exploração das frequências na faixa de Terahertz (THz), que promete taxas de dados ultra altas e uma capacidade sem precedentes.

1.2 Justificativa e Relevância

Cada vez mais os dispositivos móveis encontram-se presentes na vida cotidiana da humanidade. Quanto mais recursos esses dispositivos oferecem, mais eles se tornam parte das vidas das pessoas, que em certos aspectos se tornam dependentes deles para muitas das atividades do dia-a-dia.

Devido ao importante impacto que o desenvolvimento dessas tecnologias causa na vida humana, faz-se necessário o estudo detalhado das tecnologias que podem vir a se tornar facilitadores da vida humana, bem como revolucionar diversas áreas que vão além da comunicação, como indústria, saúde e transporte.

Além disso, o estudo do 6G pode contribuir para a antecipação das necessidades futuras, uma vez que a pesquisa sobre o 6G permite que as sociedades e indústrias antecipem e atendam às necessidades do futuro. À medida que novas aplicações e demandas surgem, é crucial estar preparado para atendê-las.

Ainda, o estudo do 6G estimula a inovação em tecnologias de comunicação e abre caminho para descobertas que podem melhorar a eficiência e o desempenho das redes móveis. Além de suprir necessidades que são encontradas em muitos lugares do mundo, como a falta de cobertura em locais remotos, onde o acesso à internet é dificultado, devido ao afastamento de grandes centros demográficos e infraestrutura precária. O desenvolvimento do 6G pode ajudar a conectar essas áreas remotas e rurais que ainda não têm acesso confiável à Internet.

O desenvolvimento do 6G pode ser benéfico, também, para o meio ambiente, uma vez que, o 6G está sendo projetado com um foco na eficiência energética e sustentabilidade, contribuindo para a redução do impacto ambiental das redes móveis.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo explorar a evolução das tecnologias móveis, com destaque especial para a exploração das frequências de Terahertz. Serão analisados como as gerações anteriores (1G a 5G) pavimentaram o caminho para as inovações do 6G, examinando as tecnologias, aplicações e desafios associados a cada fase. Além disso, serão investigadas as tecnologias que estão sendo propostas para comporem o 6G, e que prometem transformar a forma como as pessoas se conectam, comunicam e interagem com o ambiente digital.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise abrangente da evolução das redes móveis celulares, desde as suas origens no 1G até as atuais implementações do 5G, também, explorar as perspectivas da tecnologia 6G.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Apresentar uma visão histórica da evolução das redes móveis, destacando as principais características, tecnologias e avanços de cada geração, incluindo, capacidades e os recursos oferecidos.

- Avaliar as aplicações potenciais do 6G em diversos setores, como saúde, indústria, transporte e entretenimento, identificando as transformações esperadas em cada área.
- Explorar em detalhes as frequências na faixa de Terahertz, identificando as oportunidades e desafios associados à sua utilização para comunicações móveis de próxima geração.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados os fundamentos técnicos básicos nos quais se baseiam o desenvolvimento deste trabalho. As informações contidas nesse capítulo têm por objetivo contextualizar o leitor sobre as tecnologias que serão encontradas no desenvolvimento do trabalho.

Portanto, a leitura e compreensão deste capítulo são fundamentais para compreensão do problema apresentado e suas propostas de implementação.

2.1 Histórico das Redes Móveis Celulares

Os telefones celulares, até chegarem ao nível de desenvolvimento em que se encontram hoje, passaram por um longo processo de desenvolvimento e contaram com a contribuição de muitas empresas e cientistas.

Em 1973, a Motorola lançou o telefone celular portátil Motorola DynaTAC 8000X por Martin Cooper (Gullu, 2017). A partir deste momento, iniciou-se o desenvolvimento dos telefones celulares, até chegarem ao ponto como são conhecidos hoje. Contudo, mesmo com o seu lançamento em 1973, sua comercialização iniciou-se em 1983 nos EUA e na Europa (Gullu, 2017).

Nesse momento, o telefone celular era muito diferente da forma e quem se encontra hoje e possuía uma quantidade muito menor de recursos, mas ainda assim, representava um avanço expressivo no campo das comunicações, uma vez que, até àquele momento era necessário que os dispositivos utilizados na comunicação estivessem conectados um ao outro por meio de cabos.

Na tabela 1 pode ser visto um esquema que resume bem o avanço da tecnologia móvel desde o 1G até o 5G. Como pode ser visto, uma enorme diferença em termos de tecnologias e capacidades que ocorreram durante esta evolução. Nas próximas seções serão abordados os aspectos de cada geração.

Tabela 1 – Evolução da tecnologia móvel

	1G	2G	3G	4G	5G
Período	1980-1990	1990-2000	2000-2100	2010-2020	2020-2030
Tecnologia	Voz Analógica	GSM	CDMA-2000	WiFi, WiMax, LTE	5G NR, IPv6, LAN, WAN, PAN
Multiplexação	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA OFDM	OFDM BMA
Taxa de Dados	2.4 - 14.4 Kbps	14.4 - 64 Kbps	3.1 – 14.7 Mbps	100 Mbps – 1 Gbps	1 Gbps +

Largura de Banda	150 KHz	5 - 20 MHz	25 MHz	100 MHz	1 – 2 GHz
Arquitetura	SISO	SISO	SISO	MIMO	MIMO massivo
Rede Principal	PSTN	PSTN	Pacote	Internet	Internet
Recursos	Voz	Voz, SMS	Voz, Dados	Vídeo	VoIP, ultra HD
Tipo de Banda	Estreita	Estreita	Larga	Ultra larga	Ultra larga
Destaque	Mobilidade	Digitalização	Internet	Streaming em tempo real	Taxa extra alta
Comutação	Circuito	Circuito, Pacote	Pacote	Todo Pacote	Todo Pacote
Handoff	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal, vertical	Horizontal, vertical

Fonte: (Alsabah et al, 2021)

2.1.1 Primeira Geração (1G)

Ao se tornar comercial na década de 1980, as tecnologias de telefone celular começaram a se desenvolver para permitir a comunicação entre esses dispositivos e telefones fixos. Ao redor do mundo, as redes móveis foram implementadas de diferentes formas utilizando diferentes padrões.

Inicialmente, a tecnologia 1G permitia somente comunicação por voz, e a tecnologia utilizada era toda baseada em circuitos analógicos. Além disso, todos os padrões 1G utilizam técnicas de modulação de frequência para sinais de voz (Myo; Soe, 2019).

As principais características dos padrões mais utilizados no 1G são descritos por Singh, K., Thakur e Singh, S. (2015), como:

- Nordic Mobile Telephone (NMT): Foi o primeiro sistema analógico operacional e foi originalmente introduzido nos países nórdicos da Dinamarca, Finlândia, Suécia e Noruega. O NMT funciona em 450 MHz e 900 MHz.
- Advanced Mobile Phone System (AMPS): Foi lançado em 1982 e entrou em operação pela primeira vez na América do Norte e Latina. Ele aloca largura de banda de 40 MHz na faixa de frequência de 800 a 900 MHz. Antenas omnidirecionais foram usadas na implementação anterior do AMPS e depois mudaram para antenas direcionais que produziram uma melhor reutilização de células, ou seja, o padrão de reutilização de 7 células foi adotado para AMPS. AMPS usa tecnologia de acesso múltiplo por divisão de frequência (FDMA).
- Total Access Communication System (TACS): Foi derivado do AMPS e foi introduzido como padrão analógico para o Reino Unido. Opera em 900 MHz no Reino Unido e 800-900 MHz na China e no Japão.
- Cellular Digital Packet Data (CDPD): Faz uso do excesso de capacidade da rede AMPS para fornecer conexão em pacotes de até 19,2 Kbps; as sobrecargas de dados inerentes reduzem isso a uma taxa de dados operacional prática de cerca de 10 Kbps.

Como pode ser visto, são utilizados diferentes padrões em regiões distintas do mundo, possuindo características operacionais incompatíveis. O que tornou o telefone celular, operacional apenas nas regiões em que foram desenvolvidos para funcionar. Ou seja, a conexão entre essas redes era muito difícil devido às diferenças das características técnicas.

2.1.2 Segunda Geração (2G)

Posteriormente ao desenvolvimento do 1G, a segunda geração começou a ser implementada no final dos anos 1980. Onde, além da comunicação por voz, que era feita no 1G, o 2G oferecia, também, o suporte a comunicação com uma pequena quantidade de transmissão dados, dando início ao SMS (Short Message Service). Outra diferença importante em relação ao 1G é a multiplexação que feita utilizando tanto divisão no tempo (TDMA), como por divisão de código (CDMA). Além disso, toda a tecnologia presente no 2G era digital, diferente do 1G.

Uma das grandes dificuldades apresentadas pelo 1G, a interoperabilidade entre as redes de telefonia celular dispostas em continentes diferentes, foi sanada pelo 2G através da implantação do GSM (Global System for Mobile communication).

Além disso, através do GSM todas as mensagens de texto foram criptografadas digitalmente para que apenas o destinatário pretendido receba a mensagem (Singh, K.; Thakur; Singh, S., 2015). Tal fato aumentou significativamente a segurança na comunicação na telefonia celular, uma vez que no 1G, caso houvesse uma interceptação da comunicação, uma entidade mal-intencionada seria capaz de ouvir o que estava sendo falado entre as partes.

Os principais elementos do GSM são descritos por Singh, K., Thakur e Singh, S. (2015) como:

- 1) BTS (Base Transceiver Station)
- 2) BSC (Base Station Controller)
- 3) NSS (Network Switching Subsystem):
 - MSC (Mobile Switching Center)
 - VLR (Visitor location Register)
 - HLR (home Location Register)
 - AC (Centro de Autenticação)
 - EIR (Registro de Identidade de Equipamentos).

Esses componentes foram fundamentais para o desenvolvimento da tecnologia móvel celular, e de certa forma ainda fazem parte das gerações mais atuais, porém, em alguns casos com nomes diferentes e funções expandidas.

À medida que aumentava a necessidade de envio de dados pela interface aérea, surgiu o GPRS (General Packet Radio Services) (Singh, K.; Thakur; Singh, S., 2015).

GPRS introduziu a comutação de pacotes, o que significa que os dados eram divididos em pequenos pacotes que podiam ser transmitidos individualmente pela rede. O que o torna uma tecnologia importante no desenvolvimento da tecnologia 2G, pois implementou funcionalidades que permitiram que os dispositivos móveis pudessem se conectar à internet.

2.1.2 Terceira Geração (3G)

A segunda Geração apresentou avanços importantes na comunicação móvel celular como a possibilidade de interligação de dispositivos móveis à internet. Porém a taxa de dados com que essa comunicação era feita, ainda estava muito abaixo da capacidade que seria suficiente para acompanhar os recursos disponíveis na internet. Com isso, surge no início dos anos 2000 a geração 3G.

O 3G implementou uma diferença importante à tecnologia 2G, a comunicação com uma taxa maior de dados, o que possibilitou que os dispositivos móveis conseguissem uma série de novas aplicações.

A rede 3G foi adiada nos mesmos países devido a vários motivos, como em muitos países, a rede 3G não utiliza as mesmas frequências de rádio que a 2G, pelo que a construção de uma rede inteiramente nova e a licença de frequências inteiramente novas foram os maiores problemas (Singh, K.; Thakur; Singh, S., 2015).

Além da telefonia móvel, a maior velocidade permitiu a conexão 3G em PCs, consoles de jogos, tablets e outros dispositivos portáteis que proporcionam conexão à Internet de maior qualidade (Singh, K.; Thakur; Singh, S., 2015).

2.1.3 Quarta Geração (4G)

Assim como as demais tecnologias em relação a geração anterior, o 4G trouxe uma série de avanços significativos em termos de velocidade, capacidade e recursos de conectividade.

Analogamente ao 3G, não existe um padrão 4G único. Em vez disso, diferentes provedores de celular usam tecnologias diferentes para atenderem aos requisitos 4G (Giotopoulou, 2015).

O 4G oferece velocidades de dados significativamente mais rápidas em comparação com as redes 3G. Isso permite que os usuários acessem a internet, transmitam

vídeos, joguem jogos online e realizem tarefas que exigem largura de banda mais alta de maneira mais eficiente.

As principais diferenças entre o 3G e o 4G são método de acesso, taxa de transferência de dados, terminologia de transmissão e segurança (Ezhilarasan; Dinakaran, 2017).

Dentre os padrões utilizados no 4G os padrões 4G incluem Long Term Evolution, Ultra Mobile Broadband e o padrão IEEE 802.16 (Giotopoulou, 2015).

2.1.4 Quinta Geração (5G)

Tal como nas gerações anteriores, as tecnologias 5G estão no centro dos sistemas 5G, fornecendo conectividade sem fio para uma vasta gama de novas aplicações e casos de utilização, incluindo principalmente indústrias como a automóvel, logística, segurança pública, meios de comunicação e produção (Osseiran et al, 2020).

A Quinta geração da telefonia móvel ainda está em desenvolvimento, muitos países ainda estão implementando essas tecnologias em seus territórios e muito do que já foi implementado consiste, basicamente no melhoramento da tecnologia atualmente utilizada no 4G.

Segundo Shafi et al (2017), os casos de usos nos quais o 5G pode ser utilizado podem ser divididos em 3 categorias: Banda larga móvel aprimorada (eMBB), Comunicações ultra confiáveis e de baixa latência (URLLC), Comunicações massivas do tipo máquina (mMTC).

O (eMBB) se concentra na melhoria do desempenho e na experiência do usuário em comparação com as tecnologias móveis atuais. Ele abrange casos de uso que variam desde a cobertura em áreas amplas até áreas de alta densidade de usuários. Para cobertura em áreas amplas, o objetivo é fornecer uma cobertura contínua e alta mobilidade, com taxas de dados do usuário consideravelmente superiores às disponíveis hoje.

No (URLLC) são impostas exigências em termos de confiabilidade, latência e disponibilidade. Exemplos de aplicações incluem a Internet tátil, sistemas de transporte inteligentes, segurança no transporte, cirurgia médica remota, redes elétricas inteligentes, socorro em casos de desastre, controle de fabricação industrial, entre outros. Essas aplicações exigem comunicações extremamente confiáveis e com baixa latência.

O (mMTC) envolve uma variedade de aplicações para as quais os padrões de tráfego nem sempre são bem definidos. O que se sabe é que uma implantação de mMTC pode incluir muitos dispositivos com um volume relativamente baixo (ou alto) de dados não

sensíveis à latência. Esses dispositivos devem ser econômicos e ter uma vida útil de bateria muito longa. Exemplos incluem dispositivos IoT (Internet of Things) de baixa potência que podem transmitir dados de forma intermitente.

2.3 6ª Geração das Redes Móveis Celulares

Nas sessões acima foram apresentadas as gerações das tecnologias plenamente desenvolvidas, as que estão em desenvolvimento e as que entraram em desuso. Nesta seção serão apresentadas características que estão sendo previstas para comporem a 6ª Geração da Telefonia Móvel Celular.

Vale ressaltar que muitas dessas tecnologias ainda não existem no momento da confecção deste trabalho, sendo muitas delas projetos em desenvolvimento que podem ou não se tornarem uma realidade dentro do período esperado para o desenvolvimento do 6G. Porém, vários projetos 6G já foram iniciados em todo o mundo, visando concretizar a iniciativa, definir o 6G e remodelar o quadro, bem como o modelo de negócio das comunicações sem fio (DANG et al, 2020).

Para Dang (2020), entre todos os trabalhos tecnológicos relativos ao 6G, as comunicações em Terahertz (THz), a inteligência artificial (IA) e as Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis são os protagonistas mais atraentes. Essas tecnologias poderão permitir que o 6G obtenha uma mudança de paradigmas nas comunicações, diferente dos demais avanços ocorridos na área da tecnologia móvel ao longo de seu desenvolvimento.

Comparado com o 5G, o 6G terá uma banda de frequência mais ampla, maior taxa de transmissão, eficiência de espectro, maior capacidade de conexão, menor latência, cobertura mais ampla (Zhao et al, 2020). Como pode ser visto ao longo do desenvolvimento da história da tecnologia móvel, os avanços tecnológicos possuem uma característica de estarem focados na melhoria da qualidade do serviço prestado na comunicação entre dispositivos móveis e disponibilidade de novos recursos para os mesmos dispositivos.

Contudo, como será visto mais adiante, o 6G poderá permitir um incremento nesta tendência, trazendo, além da melhoria do serviço já existente, uma série de novos recursos que poderão permitir a comunicação em larga escala com equipamentos automatizados em fábricas, robôs, veículos autônomos e dispositivos inteligentes. Como afirma Dang (2020), as comunicações móveis convencionais continuarão a ser a aplicação mais importante do 6G por volta de 2030, embora outros cenários de aplicação se tornem onipresentes e cada vez mais significativos.

2.3.1 Aplicações do 6G

Aqui serão abordadas as principais aplicações que estão sendo previstas para comporem o conjunto das novas possibilidades permitidas pelo 6G.

- **Comunicações Móveis Convencionais Aprimoradas**

Estas aplicações são aquelas englobadas pelos aspectos gerais que são esperados em cada evolução de tecnologia móvel celular, como melhorar a qualidade do serviço prestado, acessibilidade, eficiência e segurança das comunicações móveis para atender às crescentes demandas dos usuários e permitir uma conectividade mais ampla e confiável.

Segundo Dang (2020), os desafios relativos às comunicações móveis convencionais decorrem de cinco aspectos:

- 1) Como melhorar a segurança e proteger a privacidade;
- 2) Como expandir a cobertura da rede de forma rápida e econômica, especialmente em áreas distantes e isoladas;
- 3) Como reduzir o custo das comunicações móveis;
- 4) Como prolongar a vida útil da bateria do dispositivo móvel;
- 5) Como fornecer uma taxa de dados mais alta com uma latência ponta a ponta mais baixa.

Todos esses desafios estão presentes no desenvolvimento das comunicações de maneira geral, e continuam fazendo parte dos desafios que precisarão ser superados pelas tecnologias 6G para atingir o seu pleno funcionamento.

- **Posicionamento Interno Preciso**

Os sistemas de posicionamento externo estão plenamente desenvolvidos e possuem larga escala de utilização. A maioria dos sistemas operacionais instalados em smartphones possuem aplicativos que fazem uso de GPS para algum tipo de posicionamento.

Portanto, os sistemas de posicionamento externo tornam-se completos e podem ser considerados precisos na maioria dos cenários de aplicação atualmente (Dang et al, 2020).

A dificuldade encontrada no posicionamento interno consiste na complexidade da propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes internos.

Espera-se que uma aplicação tão crucial e impactante seja realizada na era do 6G com tecnologias de comunicação não-RF mais avançadas (Dang et al, 2020).

- **Serviços de Comunicação de Alta Qualidade Embarcados**

Em um ambiente de alta mobilidade, como a comunicação de veículos aéreos, as tecnologias de transmissão multiportadoras sofrem severas interferências entre portadoras devido ao deslocamento Doppler introduzido pela alta mobilidade do transmissor ou receptor, ou ambos (Li et al, 2013).

Esse fato pode degradar sobremaneira as comunicações fornecidas a bordo de veículos em movimento.

Para fornecer serviços de comunicação de alta qualidade a bordo, não só devem ser utilizadas novas tecnologias de comunicação nas comunicações 6G, mas também devem ser utilizadas novas arquiteturas de rede (Dang et al, 2020).

- Conectividade Mundial e Rede Integrada

Existem ainda diversas localidades ao redor do mundo que carecem de conexão com a internet. Muitos desses problemas residem na ausência de infraestrutura previamente estabelecida, implicando na necessidade de construção de estruturas completas, além da falta de atratividade econômica para implementação dessas medidas por se tratarem, muitas das vezes, de áreas isoladas e com baixa densidade demográfica.

Portanto, o advento da era 6G não deverá apenas beneficiar a maioria em áreas densas, mas também deve ser observado em áreas menos densas (Dang et al, 2020)

Espera-se que a conectividade mundial seja realizada em comunicações 6G através de um esquema de implementação de baixo custo, a fim de garantir a imparcialidade da comunicação para as minorias em áreas esparsas (Dang et al, 2020).

- Indústrias Verticais

Espera-se que as comunicações 6G apoiem continuamente as aplicações em indústrias verticais, incluindo automação de edifícios e fábricas, manufatura, e-health, transportes, agricultura, vigilância e smart-grid (Dang et al, 2020).

Como qualquer erro, atraso e ação maliciosa em aplicações de comunicação robótica pode resultar em instabilidade grave, as comunicações robóticas são críticas para a confiabilidade, para o atraso e para a segurança (Dang et al, 2020).

- Comunicações Holográficas

Comunicações holográficas são uma área de pesquisa e desenvolvimento no campo das comunicações que exploram os princípios da holografia para transmitir

informações. A holografia é uma técnica que permite a captura e a reprodução tridimensional de objetos e cenas, preservando informações sobre a fase e a amplitude da luz que incide sobre um holograma.

Espera-se que o 6G seja um ponto de conversão da videoconferência tradicional para uma reunião virtual presencial (Dang et al, 2020).

Toda esta informação precisa ser capturada e transmitida através de redes de comunicação confiáveis que devem ter uma largura de banda extremamente grande (Dang et al, 2020).

- Comunicações Táteis

Espera-se que as redes 6G suportem uma nova forma de interação humana remota, que faz uso de todos os sentidos humanos, incluindo audição, visão, paladar, olfato e tato, a fim de fornecer comunicação física remota em tempo real (Alsabah et al, 2021).

O teletransporte holográfico explora muitas câmeras de visão múltipla e vários sensores para permitir a interação remota em tempo real e criar uma reconstrução do holograma pessoal (Alsabah et al, 2021).

Especificamente, os serviços esperados incluem teleoperação, condução automatizada cooperativa e comunicação interpessoal, onde deveria ser possível aplicar controle tátil através de redes de comunicação (Dang et al, 2020).

Existem várias aplicações para Internet Tátil, como educação, negócios, saúde (tele-cirurgia), industrial (tele-manutenção), rede inteligente e sociedade (Alsabah et al, 2021).

- Realidade Estendida Multissensorial

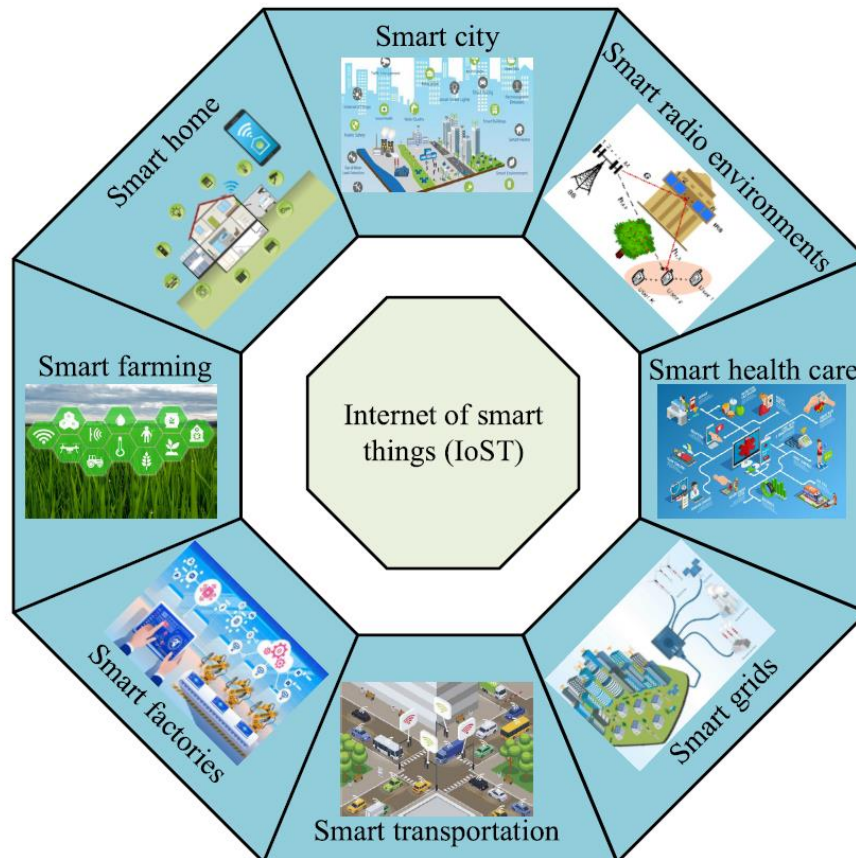
A Realidade Estendida Multissensorial combina elementos de realidade virtual (RV), realidade aumentada (RA) e realidade mista (RM) para criar ambientes e interações digitais altamente imersivos que envolvem não apenas a visão, mas também outros sentidos, como audição, tato, olfato e até mesmo o paladar em algumas aplicações.

Tais aplicações usariam uma plataforma simulada por computador com experiência de realidade e criariam um mundo virtual que se parece exatamente com o mundo real (Alsabah et al, 2021).

- Internet das Coisas Inteligentes

Espera-se que as redes 6G suportem conexões massivas de Internet of smart things, que incluem cidades inteligentes, ambientes de rádio inteligentes, sistemas de saúde inteligentes, redes inteligentes, transporte inteligente, fábricas inteligentes, agricultura inteligente e casa inteligente (Alsabah et al, 2021). A figura xx mostra esquemas dessas tecnologias de Internet of Smart Things.

Figura 1 – Esquemas de Internet of Smart Things



Fonte: (Alsabah et al, 2021).

2.3.2 Tecnologias que viabilizarão o 6G

Ao examinar as aplicações apresentadas acima, percebe-se que todas elas exigem características específicas, como alta largura de banda, baixa latência e alta confiabilidade. Para que seja possível atingir esses requisitos, novas tecnologias serão necessárias no futuro, e, portanto, esse item pretende descrever as tecnologias que estão sendo estudadas para comporem o 6G.

- Inteligência Artificial

Espera-se que o 6G comporte uma capacidade muito maior de dispositivos devido ao grande número de dispositivos que possuem capacidade de conexão com a internet, e, conseqüentemente, possuem número IP. Para que seja feita a gerência das conexões desses

dispositivos é necessário que haja mecanismos que facilitem o gerenciamento e a conexão desses dispositivos.

Como o 6G foi concebido para oferecer automação total, a IA se torna uma das tecnologias críticas e altamente valorizadas nos sistemas de comunicação sem fio 6G do futuro (Zhao et al, 2020).

Assim, espera-se que as tecnologias de IA, por exemplo, a aprendizagem automática, desempenhem um papel essencial nas redes quando estas são demasiado dinâmicas e complicadas para serem analisadas por humanos (Zhao et al, 2020).

- Superfícies inteligentes

Os aspectos relacionados à propagação eletromagnética vem sendo um grande desafio para a evolução das tecnologias de redes móveis. À medida que a capacidade de taxa de dados aumenta, conseqüentemente aumentam as frequências utilizadas na comunicação sem fio, o que acarreta problemas como absorção atmosférica, atenuação no espaço livre, entre outros fenômenos, reduzindo assim, a qualidade das conexões e o alcance dos enlaces.

Uma das maneiras de se contornar os efeitos da propagação é através da utilização de Superfícies Inteligentes.

Existem dois tipos de superfícies inteligentes, incluindo as grandes superfícies inteligentes LIS- Large Intelligent Surfaces e as superfícies refletoras inteligentes IRS- Intelligent Reflecting Surfaces (Zhao et al, 2020).

- Terahertz (THz)

O THz permite paradigmas de comunicação de largura de banda ultra alta e latência ultrabaixa, que atendem às necessidades de muitas aplicações emergentes (Zhao et al, 2020). Ou seja, a maioria das aplicações apresentadas possuem essa exigência. O aumento natural da demanda por maiores taxas de dados que ocorre ao longo da evolução das gerações de redes móveis celulares pode ser, no caso do 6G, suprida por frequências na faixa de THz.

No entanto, à medida que a frequência aumenta, a perda de caminho também aumenta, o que torna um desafio para comunicações de longo alcance (Zhao et al, 2020).

Assim, o THz é particularmente adequado para comunicações de curto alcance com alta taxa de bits (Nawaz et al, 2019).

- Symbiotic Radio

Symbiotic Radio é considerado uma das soluções promissoras para construir 6G como um sistema de comunicação com espectro e eficiência energética (Zhao et al, 2020).

- Free Duplex

Nas gerações sem fio anteriores, os sistemas sem fio usavam duplexação fixa (TDD/FDD).

No Free Duplex todos os usuários podem usar todos os recursos (espaço, tempo e frequência) simultaneamente em um modo duplex livre que eventualmente melhora a latência e o rendimento (Akhtar et al, 2020).

- Massivo Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) livres de Células

Um dispositivo não está mais conectado a uma única estação base; em vez disso, todas as estações base atendem coerentemente o dispositivo em uma área (Zhao et al, 2020).

- Rede integrada entre Espaço-Ar-Terra-Mar

As redes de comunicação sem fio 6G integrarão redes espaço-ar-solo-mar para alcançar a cobertura global, ou seja, 6G construirá uma rede integrada espaço-ar-solo-mar (SAGSIN) (Zhao et al, 2020).

- Rede baseada em Blockchain

Blockchains são bancos de dados distribuídos construídos com base na teoria da árvore hash, e são à prova de falsificação e difíceis de reverter (Zhao et al, 2020).

- Modulação de Índice

A modulação de índice (IM) transmite os bits de informação da fonte através dos sinais APM clássicos e da seleção de índice de entidades de recursos. Portanto, o IM pode melhorar a taxa de transmissão e é potencialmente usado em 6G (Zhao et al, 2020).

- Transmissão simultânea sem fio de energia e informação

Para prolongar a vida útil de vários dispositivos na rede, é proposta a tecnologia de transferência simultânea de informação e energia sem fio (SWIPT) (Zhao et al, 2020).

- Comunicação em luz visível

Ele fornece largura de banda ultra alta (THz), zero interferência eletromagnética, espectro livre e abundante não licenciado e reutilização de frequência muito alta (Haas, 2018).

- Dispositivo para Dispositivo

A comunicação dispositivo-a-dispositivo (D2D) representa a comunicação direta entre dispositivos sem passar por estações base, e a comunicação pode ser feita sob espectro licenciado (ou seja, rede celular) ou não licenciado (ou seja, WiFi) (Kar; Sanyal, 2020).

3 METODOLOGIA

Nesta seção será apresentado processo de pesquisa, incluindo os métodos, técnicas e abordagens que foram utilizados para coletar e analisar os dados. Essa tem por objetivos fundamental fornecer informações para que os leitores compreendam como a pesquisa foi conduzida e possam avaliar sua adequabilidade.

3.1 Classificação da Pesquisa

3.1.1 Quanto aos fins

Essa pesquisa é classificada quanto aos fins como uma Pesquisa Exploratória, pois envolve a exploração e a compilação de informações de várias fontes para entender a evolução das redes móveis, as aplicações do 6G e o uso de frequências na faixa de Terahertz. O foco está em obter uma visão ampla do campo e identificar tendências.

3.1.2 Quanto aos meios

Essa pesquisa é classificada quanto aos meios como uma Pesquisa Bibliográfica, porque ela baseia-se em textos de revistas científicas, white papers de institutos internacionais como o ITU, pesquisas na internet e artigos de fabricantes. Ou seja, foram coletadas informações de fontes escritas disponíveis.

3.2 Limitações do Método

A pesquisa é realizada em torno de tecnologias que estão em desenvolvimento ou estão sendo supostas para comporem uma geração futura de redes móveis, portanto, em algum caso, algumas das tecnologias aqui apresentadas podem não se desenvolver como imaginado.

Além disso, existem limitações de fontes que exigem características técnicas mais precisas de tecnologias futuras, uma vez que estas encontram-se ainda em fase de estudo.

3.3 Coleta e Tratamento de Dados

Neste estudo, a coleta de dados se concentrou na pesquisa e seleção criteriosa de fontes de informação relevantes relacionadas à evolução das comunicações móveis, tecnologia 6G e à utilização de frequências na faixa de Terahertz.

4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os aspectos relacionados a Propagação Eletromagnética.

A seção 2 descreve as tecnologias que estão sendo estudadas para comporem o 6G. Dentre todas elas, esse trabalho visa abordar os aspectos da propagação em faixas de frequência de THz.

Como foi visto na parte do histórico das redes móveis, no momento em que este trabalho está sendo confeccionado o mundo está passando pela implementação da tecnologia 5G, que tem fornecido diversas vantagens em relação a tecnologia 4G(LTE), como maior taxa de transferência de dados, baixa latência, maior confiabilidade, entre outras características.

Porém, apesar das vantagens oferecidas pelo 5G, destaca-se que, a demanda por tráfego de dados e taxa de transmissão de comunicações sem fio está crescendo exponencialmente. Links de Terabits por segundo (Tbps) serão necessários em breve (Wang et al, 2022).

Além disso, é previsível que o 5G atinja em breve o seu estrangulamento de desempenho, enfrentando a contradição entre recursos de espectro limitados e um rápido aumento na procura de serviços com taxas de dados elevadas (Wang et al, 2022).

Este fato levará a uma demanda maior por tecnologias que forneçam uma alta taxa de dados e que permitam que novas aplicações que estão em desenvolvimento possam vir a se tornar realidade.

Os espectros de frequência utilizados na tecnologia 4G e 5G não permitem a expansão da taxa de dados e, portanto, a tendência adotada para suprir essa necessidade é a utilização da banda de THz, que varia de 0.1 THz a 10 THz.

O motivo dessa troca, segundo Wang (2022) e Wang (2021) é que em comparação com a banda mmWave, a banda THz possui maior largura de banda para suportar taxas de transmissão mais altas.

Contudo, apesar das grandes vantagens apresentadas pela utilizada das frequências nas faixas de THz, as características de propagação eletromagnética nessas frequências possuem graves implicações que devem ser superadas para que essa tecnologia se torne útil. As graves degradações sofridas pelos sinais que se propagam pela atmosfera são foco de interesse, pois são sem dúvida um fator limitante da viabilidade e disponibilidade de links sem fio (Siles; Riera; Garcia-del-pino, 2015).

Dentre as características citadas acima, destaca-se a severa atenuação pela atmosfera, incluindo absorção, espalhamento e cintilação.

“A absorção é causada por moléculas na atmosfera, incluindo moléculas de água e moléculas de oxigênio. A energia da onda THz é absorvida pelas moléculas atmosféricas que enfraquecem a energia do sinal. A dispersão atmosférica é causada principalmente por hidro meteoros (partículas de gotas de chuva, neve, partículas de cristais de gelo e gotículas de neblina) e aerossóis (fumaça, aerossóis solúveis em água, areia etc.). A cintilação atmosférica é a flutuação do sinal causada pela turbulência na atmosfera.” (Wang et al, 2022)

Contudo, deve-se notar que, de 200 GHz a 10 THz, a atenuação do vapor d'água na atmosfera é dominante (Wang et al, 2021).

Para alcançar comunicação e detecção de longo alcance, antenas THz com alto ganho são frequentemente necessárias para combater a grave atenuação no espaço livre. No entanto, isto coloca dificuldades na precisão do posicionamento devido à largura de feixe bastante reduzida. (Wang et al, 2021)

A precisão do posicionamento é afetada porque antenas com alto ganho têm um feixe muito estreito, o que significa que o sinal é direcionado em uma direção específica com alta intensidade. Essa característica é adequada para alcançar longas distâncias, mas também significa que a precisão para determinação da localização do transmissor ou receptor é mais difícil, pois é necessário que ocorra um alinhamento preciso entre transmissor e receptor.

Devido às características de propagação do THz as aplicações que as utilizam normalmente são projetadas para utilização interna, onde o ambiente é mais fácil de ser modelado e, em muitos casos, pode ser controlado. Porém, segundo Singh e Sicker (2020), com aplicação e planejamento adequados, pode-se desenhar um número limitado de casos de uso para comunicação THz externa.

Abaixo serão apresentadas aplicações onde, segundo Singh e Sicker (2020), poderiam ser aplicadas frequências na faixa THz.

- **Backhaul sem fio**

O backhaul (também conhecido como back-net ou backbone ou rede de transporte), em redes celulares, é a rede que conecta as estações base à rede principal e consiste principalmente em links dedicados de fibra, cobre, microondas e de satélite (JABER et al, 2016).

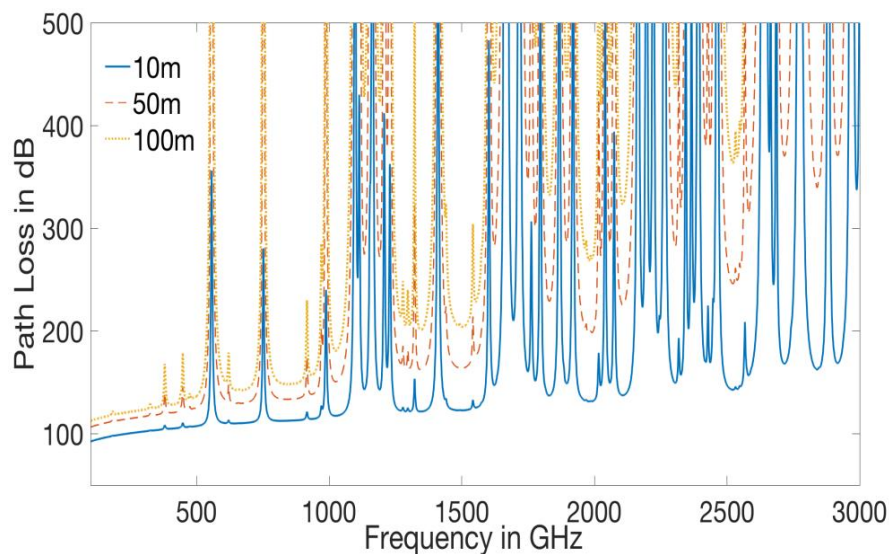
Tezergil e Onur (2022) definem Backhaul sem fio como o uso de conexão sem fio para conectividade de rede central para a qual cabos de fibra são tradicionalmente usados.

Para 5G ou mesmo 6G, é necessário um backhaul confiável para suportar um fronthaul de alta velocidade e baixa latência.

A maior parte do backhaul atualmente é suportada por cabos de fibra óptica. A fibra apresenta muitos desafios, como infraestrutura cara, necessidade de permissão e o investimento é um custo irre recuperável. Por outro lado, o backhaul sem fio pode ser implantado muito rapidamente, mas a conexão é incerta, dependendo das condições ambientais. Fatores ambientais como chuva, neblina, obstáculos físicos e oscilações do edifício devido ao vento podem ser críticos para um backhaul confiável (Singh; Sicker, 2020).

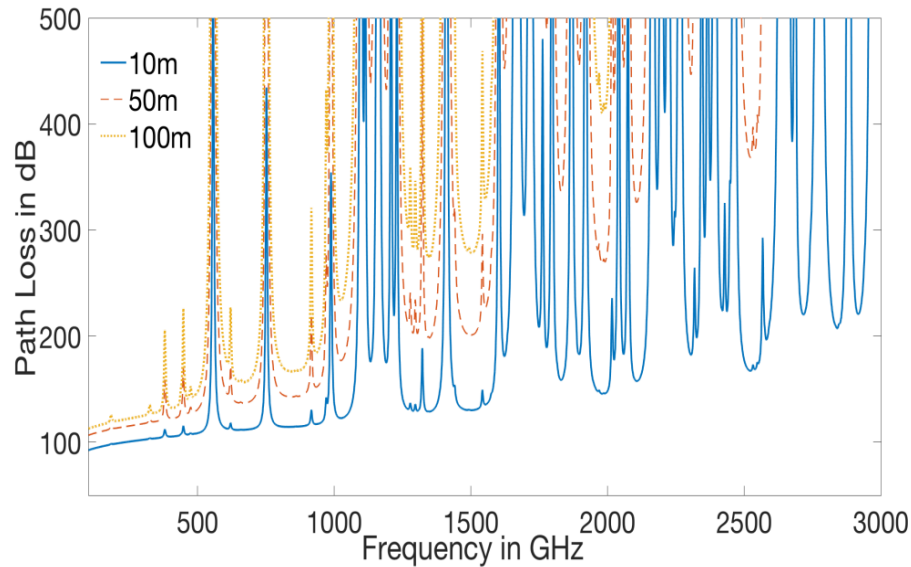
Uma solução é ter uma malha de transmissores com repetidores, que permita que as conexões tenham caminhos alternativos durante incertezas ambientais. A substituição de fibras por backhaul sem fio requer comunicação em linha de visada direta com a máxima separação possível (Singh; Sicker, 2020).

Gráfico 1 – Atenuação no Espaço Livre para umidade Relativa de 50%



Fonte: (Singh; Sicker, 2020)

Gráfico 2 – Atenuação no espaço livre para Umidade relativa de 100%



Fonte: (Singh; Sicker, 2020)

A perda de absorção aumenta várias vezes dependendo da frequência de operação e da concentração de umidade. À medida que a separação euclidiana e a umidade relativa aumentam, o número de janelas de frequência (uma janela é o intervalo de frequência entre os picos) aumenta, o que resulta em uma diminuição da largura de banda contígua (Singh; Sicker, 2020).

A capacidade de transmissão de dados do sistema de backhaul será determinada pela frequência em uso, pela eficiência da antena e pela localização da instalação, influenciando diretamente a quantidade de repetidores requeridos entre o ponto de partida e o ponto de destino.

- Quiosque de alta velocidade

Com o THz, pode ser um desafio atender usuários móveis de alta velocidade. No entanto, os usuários que necessitam de taxa de transferência de alta velocidade podem se deslocar para um quiosque estático próximo.

Embora estes quiosques ultra altos possam ser utilizados para utilizadores de curto alcance, as ligações de comunicação podem ainda ser susceptíveis de mobilidade em pequena escala, como a orientação do dispositivo ou o movimento da parte do corpo humano na qual o dispositivo foi montado.

Singh e Sicker (2020) mostram que pode-se atingir até 20 Gbps/GHz no lado inferior do espectro THz, mas a taxa de dados diminui à medida que avança no espectro.

- Estação Base Aérea

A estação base aérea é um conceito novo onde drones são usados como estações base para atender usuários com serviços sem fio. O ABS é útil em cenários de gestão de desastres, segurança pública e controle de congestionamento sob demanda. Ele também pode fornecer flexibilidade para backhaul sem fio, obtendo um caminho alternativo durante condições climáticas adversas. (Singh; Sicker, 2020).

Para Singh e Sicker (2020), a uma altitude considerável, com baixa temperatura e umidade muito baixa, o espectro THz pode ser efetivamente utilizado por drones para formar redes ad-hoc voadoras.

Uma rede ad-hoc voadora é um tipo de rede sem fio formada por veículos em movimento, como carros, caminhões, drones ou até mesmo aeronaves, que se comunicam entre si e com infraestruturas de suporte para compartilhar informações e dados.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou percorrer o caminho pela evolução das tecnologias móveis, desde o seu início no 1G até as implementações de vanguarda do 5G, com um olhar focado nas perspectivas revolucionárias da tecnologia 6G. Ao longo dessa investigação, foram examinadas como cada geração, do 1G ao 5G, contribuiu para a formação do cenário atual e foram apresentadas as tecnologias, aplicações e desafios inerentes a cada fase dessa jornada.

Além disso, foi apresentado o 6G, uma fronteira promissora que promete transformar profundamente os paradigmas de comunicação. A pesquisa explorou as potenciais aplicações do 6G em áreas essenciais, como saúde, indústria, transporte e entretenimento, prevendo transformações revolucionárias em cada um desses setores.

Um dos pontos importantes do trabalho foi a exploração das frequências na faixa de Terahertz, um território ainda pouco explorado e com diversos desafios, mas com um grande potencial para as comunicações móveis de próxima geração.

Em resumo destaca-se que. As redes móveis continuam a ser um motor de inovação e transformação em nossas vidas, capacitando-nos a alcançar níveis de conectividade e comunicação que outrora eram inimagináveis. O progresso continua, e o potencial do 6G, juntamente com a exploração das frequências de Terahertz, representa uma nova fronteira emocionante na evolução das comunicações móveis.

5.1 Considerações Finais

Por tudo isso, fica claro que as redes móveis continuam a ser um motor de inovação e transformação em para a humanidade. O progresso é constante, e a busca pela próxima fronteira, o 6G, juntamente com a exploração das frequências de Terahertz, representa uma longa jornada em prol do avanço da comunicação.

A evolução das tecnologias móveis é um testemunho do poder da inovação e da capacidade da humanidade de se adaptar e prosperar em um mundo cada vez mais conectado e dinâmico.

5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Como sugestões para trabalhos futuros destaca-se a necessidade de experimentações práticas nas de enlaces que utilizem frequências nas faixas de Terahertz. Essas pesquisas contribuiriam para o melhor entendimento dos fenômenos de propagação e uma maior quantidade de dados

coletados facilitaria o desenvolvimento de modelos para utilização nessas faixas de frequência.

REFERÊNCIAS

- AKHTAR, Muhammad Waseem et al. The shift to 6G communications: Vision and requirements. **Human-centric Computing and Information Sciences**, v. 10, p. 1-27, 2020.
- ALSABAH, Muntadher et al. 6G wireless communications networks: A comprehensive survey. **IEEE Access**, v. 9, p. 148191-148243, 2021.
- DANG, Shuping et al. What should 6G be?. **Nature Electronics**, v. 3, n. 1, p. 20-29, 2020.
- EZHILARASAN, E.; DINAKARAN, M. A review on mobile technologies: 3G, 4G and 5G. **In: 2017 second international conference on recent trends and challenges in computational models (ICRTCCM)**. IEEE, 2017. p. 369-373.
- GIOTOPOULOU, Panagiota D. **The evolution of mobile communications: Moving from 1G to 5G, and from human-to-human to machine-to-machine communications**. 2015.
- GULLU, Sahin. **Comparison of reference signal received power measurements between cell phone and scanning receiver in LTE**. 2017.
- HAAS, Harald. LiFi is a paradigm-shifting 5G technology. **Reviews in Physics**, v. 3, p. 26-31, 2018.
- JABER, Mona et al. 5G backhaul challenges and emerging research directions: A survey. **IEEE access**, v. 4, p. 1743-1766, 2016.
- KAR, Udit Narayana; SANYAL, Debarshi Kumar. A critical review of 3GPP standardization of device-to-device communication in cellular networks. **SN Computer Science**, v. 1, n. 1, p. 37, 2020.
- LI, Xue et al. Intercarrier interference immune single carrier OFDM via magnitude-keyed modulation for high speed aerial vehicle communication. **IEEE transactions on communications**, v. 61, n. 2, p. 658-668, 2013.
- MYO, Aye Myat Myat; SOE, Zar Chi. **Study on Infrastructure Developments of Mobile Generations**. 2019.
- NAWAZ, Syed Junaid et al. Quantum machine learning for 6G communication networks: State-of-the-art and vision for the future. **IEEE access**, v. 7, p. 46317-46350, 2019.
- OSSEIRAN, Afif et al. **5G wireless access: an overview**. Ericsson White Paper. 2020. Disponível em: < <https://www.ericsson.com/4ac666/assets/local/reports-papers/white-papers/whitepaper-5g-wireless-access.pdf> >
- RICCARDI, P. et al. Wireless at its origin. **Physics Education**, v. 58, n. 1, p. 015024, 2022.

SHAFI, Mansoor et al. 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice. **IEEE journal on selected areas in communications**, v. 35, n. 6, p. 1201-1221, 2017.

SILES, Gustavo A.; RIERA, Jose Manuel; GARCIA-DEL-PINO, Padro. Atmospheric attenuation in wireless communication systems at millimeter and THz frequencies [wireless corner]. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 57, n. 1, p. 48-61, 2015.

SINGH, Kanupriya; THAKUR, Sanjeev; SINGH, Somya. Comparison of 3G and LTE with other generation. **International Journal of Computer Applications**, v. 121, n. 6, 2015.

SINGH, Rohit; SICKER, Douglas. Reliable THz communications for outdoor based applications-use cases and methods. **In: 2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)**. IEEE, 2020. p. 1-4.

TEZERGIL, Berke; ONUR, Ertan. Wireless backhaul in 5G and beyond: Issues, challenges and opportunities. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, 2022.

TIPMONGKOLSILP, Orawan; ZAGHLOUL, Said; JUKAN, Admela. The evolution of cellular backhaul technologies: Current issues and future trends. **IEEE communications surveys & tutorials**, v. 13, n. 1, p. 97-113, 2010.

WANG, Cheng-Xiang et al. Key technologies in 6G terahertz wireless communication systems: A survey. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, v. 16, n. 4, p. 27-37, 2021.

WANG, Jun et al. 6G THz Propagation Channel Characteristics and Modeling: Recent Developments and Future Challenges. **IEEE Communications Magazine**, 2022.

ZHAO, Yang et al. **A comprehensive survey of 6G wireless communications**. arXiv preprint arXiv:2101.03889, 2020.