



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS - UFG
INSTITUTO DE INFORMÁTICA - INF
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA
COMPUTAÇÃO- (PPGCC)

ANTONIA VANESSA DIAS ARAUJO

Arquitetura holística de redes 6G:
integração das camadas de comunicação espacial, aérea,
terrestre, marinha e submarina com gêmeos digitais e
inteligência artificial

Goiânia
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE INFORMÁTICA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

☒ Dissertação ☐ Tese ☐ Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Antonia Vanessa Dias Araujo

3. Título do trabalho

Arquitetura holística de redes 6G: integração das camadas de comunicação espacial, aérea, terrestre, marinha e submarina com gêmeos digitais e inteligência artificial

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM ☐ NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Antonia Vanessa Dias Araújo, Discente**, em 23/12/2024, às 16:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Carlos De Oliveira Junior, Professor do Magistério Superior**, em 03/01/2025, às 10:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5059733** e o código CRC **9D9AFD80**.

ANTONIA VANESSA DIAS ARAUJO

Arquitetura holística de redes 6G: integração das camadas de comunicação espacial, aérea, terrestre, marinha e submarina com gêmeos digitais e inteligência artificial

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Informática - INF da Universidade Federal de Goiás - UFG, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação- (PPGCC).

Área de concentração: Ciência da Computação .

Linha de pesquisa: Sistemas de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Oliveira Junior

Goiânia
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Dias Araujo, Antonia Vanessa

Arquitetura holística de redes 6G [manuscrito] : integração das
camadas de comunicação espacial, aérea, terrestre, marinha e
submarina com gêmeos digitais e inteligência artificial / Antonia
Vanessa Dias Araujo. - 2024.

80 f.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Oliveira Junior.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto
de Informática (INF), Programa de Pós-Graduação em Ciência da
Computação, Goiânia, 2024.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui lista de figuras, lista de tabelas.

1. Redes 6G. 2. Arquitetura Holística. 3. Redes Terrestres e Redes
Não-Terrestres. 4. Gêmeos Digitais. 5. Inteligência Artificial. I.
Oliveira Junior, Antonio Carlos de , orient. II. Título.

CDU 004



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 38 da sessão de Defesa de Dissertação de **Antonia Vanessa Dias Araújo**, que confere o título de Mestra em Ciência da Computação, na área de concentração em Ciência da Computação.

Aos vinte e dois dias do mês de novembro de dois mil e vinte e quatro, a partir das dez horas, via webconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “**Arquitetura holística de redes 6G: integração das camadas de comunicação espacial, aérea, terrestre, marinha e submarina com gêmeos digitais e inteligência artificial**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor Antonio Carlos de Oliveira Júnior (INF/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor Rodrigo Moreira (UFV), membro titular externo; e Professor Doutor Leandro Alexandre Freitas (IFG), membro titular externo. A realização da banca ocorreu por meio de videoconferência. Durante a arguição os membros da banca não fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido a candidata **aprovada** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Antonio Carlos de Oliveira Júnior, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos vinte e dois dias do mês de novembro de dois mil e vinte e quatro.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Carlos De Oliveira Junior, Professor do Magistério Superior**, em 22/11/2024, às 11:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Alexandre Freitas, Usuário Externo**, em 22/11/2024, às 11:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Moreira, Usuário Externo**, em 25/11/2024, às 13:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonia Vanessa Dias Araújo, Discente**, em 25/11/2024, às 17:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4943940** e o código CRC **0EFF006F**.

Referência: Processo nº 23070.056071/2024-14

SEI nº 4943940

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador(a).

Antonia Vanessa Dias Araujo

Graduou-se em Sistemas de Informação pela Faculdade de Imperatriz (Facimp) em 2009, como bolsista integral do Programa Universidade para Todos (Prouni). Posteriormente, concluiu as pós-graduações em Análise e Desenvolvimento de Sistemas (2012) e em Segurança da Informação em Redes de Computadores (2019), ambas pela Facimp Wyden. Em 2022, formou-se em Ciências de Dados pelo Centro Universitário FAVIP Wyden e, atualmente, cursa especialização em Análise de Dados e Inteligência Artificial na Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Como mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação (PPGCC) do Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás (INF/UFG), participou do Projeto Brasil 6G, contribuindo na pesquisa do estado da arte e na definição do framework para a futura arquitetura de redes 6G no Brasil. Esse projeto é promovido pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), em parceria com a Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP). Desde 2009, atua como docente na Faculdade de Imperatriz - Facimp Wyden, no Núcleo de Tecnologia, que abrange os cursos de Redes de Computadores, Análise e Desenvolvimento de Sistemas, e Sistemas de Informação.

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus pais, ao meu esposo e aos meus filhos, com um carinho especial à minha mãe, que sempre foi meu maior suporte e motivadora em cada etapa dessa jornada. Agradeço profundamente a todos pelo apoio constante, pela força nos momentos mais difíceis e por acreditarem que eu poderia alcançar voos mais altos. Sem vocês, nada disso teria sido possível.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pelas oportunidades e à minha família, que sempre esteve ao meu lado, incentivando e apoiando todos os meus projetos. Agradeço especialmente ao “ETERNO MESTRE” José Vieira Lima Júnior, ex-professor, chefe e amigo, que sempre me motivou na busca por novas oportunidades e aprendizado. Meu profundo agradecimento ao meu orientador, Antonio Carlos Oliveira Júnior, por ter me apresentado a oportunidade de ingressar neste programa, me direcionado à minha área de pesquisa, me integrado à equipe do Projeto Brasil 6G e por seu incentivo nos momentos mais desafiadores da jornada, especialmente na reta final de conclusão e defesa deste trabalho.

“... nunca [...] plenamente maduro, nem nas idéias nem no estilo, mas sempre verde, incompleto, experimental.

Gilberto Freyre,
Tempo morto e outros tempos, 1926. .

Resumo

DIAS ARAUJO, Antonia Vanessa. **Arquitetura holística de redes 6G: integração das camadas de comunicação espacial, aérea, terrestre, marinha e submarina com gêmeos digitais e inteligência artificial.** Goiânia , 2025. 80p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação- (PPGCC), Instituto de Informática - INF, Universidade Federal de Goiás - UFG.

Esta dissertação propõe uma arquitetura holística para redes 6G, visando a integração das redes de comunicação espacial, aérea, terrestre, marítima e submarina, visando uma conectividade global e contínua. A integração dessas redes, especialmente as redes não-terrestres (NTN), com a infraestrutura terrestre, representa desafios técnicos e arquitetônicos significativos. O estudo foca na modelagem de uma arquitetura unificada que promova a interação entre essas camadas de rede, com foco na cobertura extrema e onipresente. A metodologia utilizada envolve uma análise detalhada dos desafios tecnológicos e habilitadores-chave, como gêmeos digitais, inteligência artificial (IA) e orquestração de redes, que viabilizam a integração e a operação eficiente das redes 6G. A proposta é avaliada através de simulações, destacando a sinergia entre os diferentes componentes da rede e sua capacidade de oferecer comunicação ubíqua e transparente para o usuário. Conclui-se que a arquitetura proposta proporciona uma base promissora para a implementação de casos de uso inovadores, como comunicações de emergência, monitoramento ambiental, telemedicina e agricultura inteligente, ressaltando a importância da cobertura global extrema como um dos fundamentos da arquitetura.

Palavras-chave

Redes 6G, Arquitetura Holística, Redes Terrestres, Redes Não-Terrestres, Gêmeos Digitais, Inteligência Artificial.

Abstract

DIAS ARAUJO, Antonia Vanessa. T. Goiânia , 2025. 80p. MSc. Dissertation. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação- (PPGCC), Instituto de Informática - INF, Universidade Federal de Goiás UFG.

his dissertation proposes a holistic architecture for 6G networks, aiming at the integration of space, aerial, terrestrial, maritime, and submarine communication networks, targeting global and continuous connectivity. The integration of these networks, especially non-terrestrial networks (NTN), with terrestrial infrastructure presents significant technical and architectural challenges. The study focuses on modeling a unified architecture that fosters interaction between these network layers, with an emphasis on extreme and ubiquitous coverage. The methodology involves a detailed analysis of technological challenges and key enablers, such as digital twins, artificial intelligence (AI), and network orchestration, which facilitate the integration and efficient operation of 6G networks. The proposal is evaluated through simulations, highlighting the synergy between the different network components and their ability to provide ubiquitous and transparent communication to the user. It concludes that the proposed architecture provides a promising foundation for the implementation of innovative use cases, such as emergency communications, environmental monitoring, telemedicine, and smart agriculture, emphasizing the importance of extreme global coverage as one of the architectural cornerstones.

Keywords

6G Networks, Holistic Architecture, Terrestrial Networks, Non-Terrestrial Networks, Digital Twins, Artificial Intelligence.

Sumário

Lista de Figuras	14
Lista de Tabelas	15
1 Introdução	16
1.1 Motivação	18
1.2 Justificativa	19
1.3 Objetivos e Contribuições	20
1.4 Estrutura do Texto	22
2 Ecossistema de Redes 6G	23
2.1 O Ecossistema 6G	23
2.2 Requisitos, Habilitadores e Casos de Uso	24
2.2.1 Gêmeos Digitais	27
2.3 O <i>Design</i> 6G	29
3 Arquiteturas de Redes 6G	32
3.1 Aspectos Arquitetônicos	32
3.1.1 Convergência de Comunicações e Computação	34
3.1.2 Expansão da Cobertura	35
3.1.3 Inteligentização da Rede	37
3.2 Desafios no Escopo Arquitetônico 6G	39
3.2.1 Desafios de Integração	43
3.2.2 Desafios na Integração de Gêmeos Digitais em Redes 6G	45
4 Arquitetura Holística para Redes 6G	48
4.1 Arquitetura da Rede 6G	48
4.1.1 Visão Geral da Proposta	49
4.2 Rede 3D com Gêmeos Digitais	50
4.2.1 Cenários e Casos no Brasil	53
4.3 Avaliação da Proposta	55
4.4 Estrutura e Componentes	55
4.5 Cenário Proposto para Simulação	58
4.6 Análise de Resultados	59
4.6.1 Desempenho da Rede	59
4.6.2 Discussões	62
4.7 Desafios de Implementação	63

5	Conclusões, Trabalhos Futuros e Contribuições	66
5.1	Conclusões	66
5.2	Trabalhos Futuros	68
5.3	Contribuições	69
5.3.1	Trabalhos Publicados em anais de eventos	69
5.3.2	Trabalhos Publicados como colaboração	69
5.3.3	Colaboração em Projetos	69
	Referências Bibliográficas	70
A	Colaboração em projeto e Publicações	77
A.1	Colaboração: Projeto Brasil 6G	77
A.1.1	Publicações: Periódico Internacional	78
A.2	Publicações: Anais de eventos nacionais	78
A.2.1	Primeiro Workshop de Redes 6G (I W6G)	78
A.2.2	Segundo Workshop de Redes 6G (II W6G)	79
A.2.3	Quarto Workshop de Redes 6G (IV W6G)	80

Lista de Figuras

1.1	Evolução tecnológica das redes móveis [Elaborado pelo autor].	18
2.1	Novos cenários e Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs) para o 6G [8].	25
2.2	Pilares de um sistema DT [5].	28
3.1	Visão da evolução arquitetônica das redes móveis: (a) Entidades arquitetônicas da rede, (b) Arquitetura 4G, (c) Arquitetura 5G e (d) Visão da arquitetura 6G. Adaptado de [56].	34
3.2	Comunicação onipresente.	36
4.1	Arquitetura de Escopo Universal: comunicação, integração de aplicações e suporte a casos de uso e tecnologias habilitadoras [Elaborado pelo autor].	49
4.2	Arquitetura de Rede 3D habilitada por Gêmeos Digitais [Elaborado pelo autor].	51
4.3	(a) Biomas e (b) Amazônia Azul (inclui as Ilhas Oceânicas brasileiras) [9].	54
	(b) Amazônia Azul(um pedaço).	54
4.4	Modelagem da estrutura e dos componentes da arquitetura proposta [Elaborado pelo autor].	56
4.5	Cenário: UEs, RANs, <i>CyberTwins</i> , Núcleo e suas interações [Elaborado pelo autor].	58
4.6	Latência: Valores Médios e Dispersão [Elaborado pelo autor].	60
4.7	Jitter: Valores Médios e Dispersão [Elaborado pelo autor].	60
4.8	Throughput: Médias e Dispersão [Elaborado pelo autor].	61
4.9	Perda de Pacotes: Médias e Dispersão [Elaborado pelo autor].	61
4.10	Disponibilidade: Médias e Dispersão [Elaborado pelo autor].	62
A.1	Colaboração: Projeto Brasil 6G. [12]	77
A.2	Publicação em Colaboração: Brasil6G - 2023, [51]	78
A.3	Publicação: W6G I - 2021, [48]	79
A.4	Publicação: W6G II - 2022, [8]	79
A.5	Publicação: W6G IV - 2024, [7]	80

Lista de Tabelas

2.1	Comparação de KPIs para 4G, 5G e 6G [14].	26
2.2	Requisitos não funcionais para redes 6G [37].	27
2.3	Tipos de arquitetura de Gêmeos Digitais [39].	28
2.4	Comparação entre Arquiteturas 5G e 6G [48].	30
3.1	Desafio do escopo 6G. [8]	40
3.2	Principais características dos desenhos arquitetônicos [Elaborado pelo autor].	43
3.3	Desafios da implementação de DT [32].	46
4.1	Desafios de Implementação [Elaborado pelo autor].	64
5.1	Melhorias que podem ser Implementadas em Trabalhos Futuros	68

Introdução

A arquitetura das redes móveis evoluiu significativamente desde a sua criação, refletindo avanços tecnológicos e a crescente demanda por conectividade onipresente. Este capítulo apresenta a motivação e a justificativa para a evolução das redes móveis, desde a Primeira Geração (1G, *First Generation*) até a visão para a Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*). A discussão foca na necessidade de uma nova arquitetura de rede que atenda aos desafios emergentes, como a alta densidade de dispositivos conectados, a interatividade em tempo real e a busca por redes inteligentes, autossustentáveis e com cobertura global extrema.

O termo "arquitetura" surgiu nos anos 1970, a partir da combinação do Protocolo de Controle de Transmissão (TCP, *Transmission Control Protocol*), responsável pela transmissão de dados, com o Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*), que conecta os dispositivos na rede, resultando na Arquitetura TCP/IP. Inicialmente utilizado para designar projetos de sistemas computacionais em níveis de hardware e software, esse conceito mostrou-se igualmente adequado para o desenvolvimento de redes de computadores [11].

A arquitetura de rede resulta de decisões técnicas e comerciais, descrevendo o sistema tanto em termos estruturais quanto comportamentais, refletindo os casos de uso e as funcionalidades esperadas. Em um nível mais abstrato, a arquitetura pode ser percebida como uma estrutura ou conjunto de estruturas de um sistema, que engloba os elementos/entidades, suas propriedades e relações. Nesse contexto, a capacidade da arquitetura da rede 6G será determinada pelas visões de suas aplicações [12].

Considerando que a padronização para as redes 5G já foi definida e está sendo implementada globalmente, é possível identificar algumas de suas limitações em relação à escalabilidade das possibilidades de uso e ao desenvolvimento de novas aplicações [48]. Desafios antecipados incluem o aumento exponencial da densidade de dispositivos conectados, a demanda massiva de tráfego, a necessidade de interatividade em tempo real, ubiquidade e a busca por uma rede inteligente, autônoma, autossustentável e com cobertura extrema. Esses desafios impulsionam o estudo e o design arquitetural para a próxima geração de redes móveis, ou seja, as redes 6G [62, 18, 24, 50, 12, 43].

As novas arquiteturas para redes 6G devem evoluir a partir do design proposto

para as redes 5G. A premissa inicial é atender às demandas que encontram limitações tecnológicas nos três principais cenários de uso propostos pelas redes 5G: *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB, banda larga móvel aprimorada), *Massive Machine Type Communications* (mMTC, comunicações massivas entre máquinas) e *Ultra Reliable Low Latency Communications* (uRLLC, comunicações ultraconfiáveis e de baixa latência) [62, 48, 60, 63, 8]. Esses temas serão abordados com mais detalhes no Capítulo 2.

Posteriormente, o desafio é aprimorar os principais Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs, *Key Performance Indicators*) propostos pelo 5G, o que deve possibilitar a expansão do alcance da rede para regiões mais remotas e oferecer suporte a aplicações mais complexas, como aquelas baseadas em *Extended Reality* (XR, realidade estendida). Essas aplicações devem ser integradas ao avanço rumo a uma rede com IA (inteligência artificial) nativa, ou seja, com inteligência de ponta a ponta [48, 43, 56].

Enquanto o mundo se empenha na implantação e otimização do 5G e na busca pelo *Beyond Fifth Generation* (B5G, além da quinta geração), a indústria, a academia e os governos já direcionam seus esforços para compreender as demandas e possibilidades para o futuro das redes móveis, particularmente o 6G. Entre essas iniciativas, destaca-se o Programa Brasil 6G, a principal iniciativa brasileira nesse contexto [56, 18, 24].

A literatura apresenta diversas abordagens visionárias para a próxima geração de redes móveis, organizando as arquiteturas propostas em diferentes escopos, como Universal, Telecomunicações, Computação e Especializada [1]. Estudos destacam habilitadores tecnológicos fundamentais, classificados em oito categorias principais: Comunicação, Softwarização, Energia, Sensoriamento e Atuação, Imutabilidade, Inteligência, Segurança e Quântica [37].

Entre as aplicações discutidas para o 6G, destacam-se seis categorias de casos de uso que exigem arquiteturas inovadoras: Cobertura Mundial Extrema, Gêmeos Digitais em Larga Escala, Interações Remotas Avançadas, Agropecuária do Futuro, Zonas Seguras Invisíveis e Comunicação Espacial [37]. Essas categorias refletem a necessidade de soluções que combinem escalabilidade, desempenho e integração global.

Neste contexto, este estudo propõe um design arquitetônico abrangente de escopo universal para redes móveis 6G. A proposta consiste na integração das redes de comunicação aeroespacial e marinha/submarina à infraestrutura de rede terrestre, embasada na tecnologia de gêmeos digitais. Antes disso, contextualizamos as visões do ecossistema 6G quanto à necessidade de uma nova arquitetura de rede, seus desafios, novos casos de uso, evolução dos KPIs e tecnologias habilitadoras, além de discutir as arquiteturas que devem integrar a nova infraestrutura.

1.1 Motivação

Desde meados de 2018, o mundo iniciou a discussão sobre a necessidade de uma nova geração de redes móveis. Essa discussão baseia-se no ciclo de maturidade de cerca de 10 anos de cada geração anterior e no avanço para as redes 5G, que estavam em processo de operacionalização [16].

A Figura 1.1 apresenta a evolução das redes móveis desde a Primeira Geração (1G) até as perspectivas para a Sexta Geração (6G):

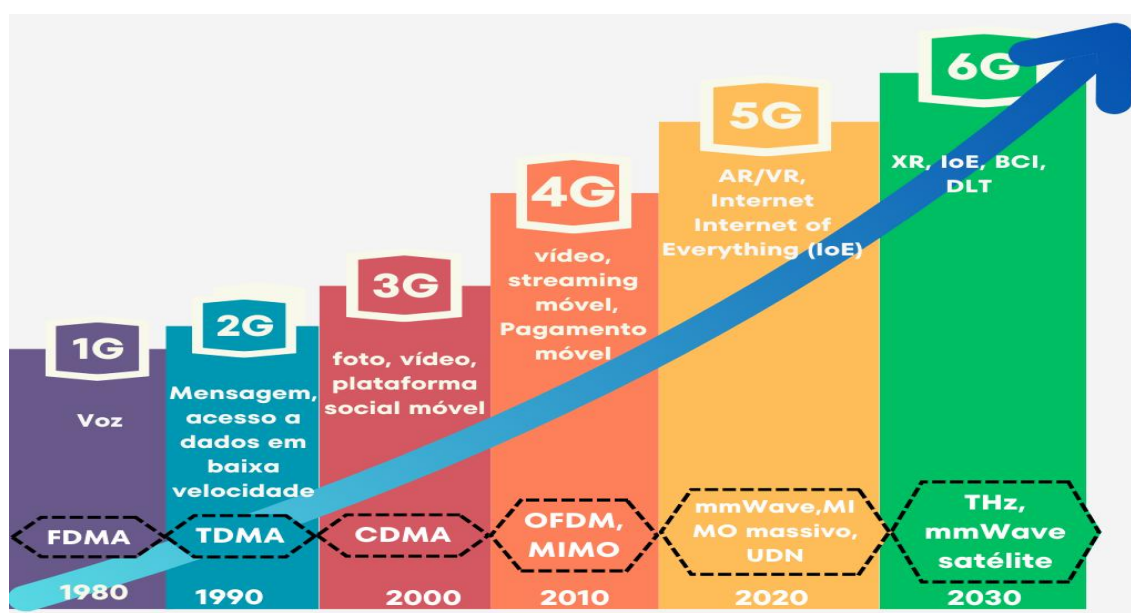


Figura 1.1: Evolução tecnológica das redes móveis [Elaborado pelo autor].

As redes móveis evoluíram significativamente ao longo de suas gerações. A Primeira Geração (1G, *First Generation*) introduziu uma arquitetura analógica com foco principal em voz. Posteriormente, a Segunda Geração (2G, *Second Generation*) trouxe a arquitetura digital e suporte a mensagens de texto (SMS). Com o avanço para a Terceira Geração (3G, *Third Generation*), o *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) foi lançado, oferecendo suporte a dados mais velozes e iniciando a transição para redes IP.

Na Quarta Geração (4G, *Fourth Generation*), o *Long-Term Evolution* (LTE) foi implementado, trazendo altas velocidades de dados e consolidando o IP como protocolo principal. A Quinta Geração (5G, *Fifth Generation*) introduziu o *5G New Radio* (5G NR), ampliando a capacidade de conexão, reduzindo a latência e permitindo maior virtualização das funções de rede. Finalmente, a Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*) busca integrar inteligência artificial (IA), *blockchain*, redes autossustentáveis e comunicações interplanetárias, além de expandir a Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*) para aplicações massivas.

Essas evoluções não apenas aumentaram a velocidade e a capacidade das redes, mas também transformaram significativamente sua arquitetura. As tecnologias 5G proporcionaram avanços em banda larga aprimorada (eMBB, *Enhanced Mobile Broadband*), conexão massiva de dispositivos (mMTC, *Massive Machine Type Communications*) e comunicações de baixa latência ultraconfiáveis (uRLLC, *Ultra Reliable Low Latency Communications*). Esses avanços abriram caminho para aplicações que atendem a cenários como cidades inteligentes, veículos autônomos e dispositivos conectados em tempo real [45].

No entanto, as demandas de conectividade continuam crescendo, motivando o desenvolvimento do 6G. Pesquisas projetam cenários de uso avançados, como banda larga onipresente (uMBB, *ubiquitous Mobile Broadband*), comunicação de baixa latência ultraconfiável (ULBC, *Ultra-Low Latency Broadband Communication*) e comunicação massiva de baixa latência ultraconfiável (mULC, *massive Ultra-Low Latency Communication*). Esses cenários exigem arquiteturas mais inteligentes e sustentáveis, que considerem aspectos tecnológicos, socioambientais e a necessidade de cobertura global [6, 26, 48, 29, 54, 57].

As redes 6G estão em fase inicial de pesquisa e visam superar as limitações identificadas no 5G. Isso inclui desafios como transmissão com taxas de dados ultra-altas, latência ultrabaixa, conexões ultradensas, posicionamento preciso, segurança confiável, baixo consumo de energia e alta eficiência energética [13, 18, 24, 29]. Além disso, novos casos de uso, como comunicações interplanetárias e aplicações baseadas em realidade estendida (XR, *Extended Reality*), destacam a necessidade de avanços tecnológicos.

Nesse cenário, tecnologias inovadoras como *Digital Twins* (DT, gêmeos digitais), inteligência artificial (IA), *Self-Sustaining Networks* (SSN, redes autossustentáveis) e *Network Slicing* (fatiamento de rede) desempenham papéis fundamentais. Essas ferramentas são cruciais não apenas para conceber e integrar infraestruturas terrestres e não terrestres, mas também para otimizar a análise e a operação das redes 6G, atendendo às demandas crescentes de desempenho, escalabilidade e sustentabilidade [7, 56].

1.2 Justificativa

O avanço para redes de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*) exige uma evolução arquitetônica que ultrapasse as definições e padrões estabelecidos pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP). Embora o 3GPP tenha desempenhado um papel crucial na padronização do 5G, muitos de seus conceitos, como o *Network Data Analytics Function* (NWDAF), apresentam limitações em cenários emergentes. Esses cenários incluem dentre outras características alta densidade de dispositivos, requisitos dinâmicos de qualidade de

serviço (QoS, *Quality of Service*) e demandas crescentes por sustentabilidade energética [52].

Neste trabalho, partimos de conceitos já estabelecidos, como a *Arquitetura Baseada em Serviços (SBA, Service-Based Architecture)* e o paradigma *MDA/E2E (End-to-End Mandate-Driven Architecture)*, para propor uma evolução arquitetônica capaz de atender às novas exigências das redes 6G [60, 45]. A proposta se fundamenta na integração de tecnologias habilitadoras, incluindo gêmeos digitais (DT, *Digital Twins*), redes autoorganizáveis (SON, *Self-Organizing Networks*), redes autossustentáveis (SSN, *Self-Sustaining Networks*) e fatiamento de rede (*network slicing*). Essas tecnologias expandem as capacidades arquitetônicas ao abordar desafios relacionados à automação, flexibilidade modular e eficiência energética [8, 26, 29, 38, 61].

Além disso, enquanto o NWDAF do 5G fornece funcionalidades analíticas limitadas, este trabalho avança ao integrar inteligência artificial distribuída e modelagem em tempo real com gêmeos digitais. Essa integração possibilita uma orquestração mais eficiente e resiliente, especialmente em cenários críticos, como comunicações de emergência, monitoramento ambiental e telemedicina. Essas aplicações são essenciais para oferecer conectividade ubíqua e adaptável, alinhada às demandas futuras.

Por fim, a arquitetura proposta não se limita a seguir as diretrizes do 3GPP, mas busca complementá-las e superá-las. Ao integrar estruturas terrestres e não terrestres, a proposta apresenta uma abordagem holística que conecta infraestrutura, tecnologias habilitadoras e casos de uso emergentes, promovendo uma rede 6G mais escalável, sustentável e inovadora.

1.3 Objetivos e Contribuições

O objetivo geral deste trabalho é propor uma arquitetura holística de escopo universal para redes de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*), que integre redes não-terrestres (NTN, *Non-Terrestrial Networks*), como redes espaciais, aéreas, marítimas e submarinas, à infraestrutura de rede terrestre. A proposta visa criar uma infraestrutura única que proporcione conectividade global e contínua.

Para tanto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- **Examinar o ecossistema das redes 6G:** Examinar propostas de arquiteturas integradas, incluindo cenários, casos de uso, fundamentos, Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs, *Key Performance Indicators*), habilitadores tecnológicos e métricas de avaliação, considerando também suas possíveis restrições arquitetônicas.
- **Modelar um escopo arquitetônico abrangente:** Desenvolver um modelo arquitetônico para redes de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*) que integre infraestruturas terrestres e não-terrestres, utilizando tecnologias como gêmeos digitais (DT,

Digital Twins), redes auto-organizáveis (SON, *Self-Organizing Networks*), redes autossustentáveis (SSN, *Self-Sustaining Networks*) e fatiamento de rede (*network slicing*), fundamentado em estudos e propostas da literatura especializada.

- **Avaliar a proposta:** Avaliar por meio de simulações computacionais, com o objetivo de analisar o desempenho do modelo arquitetônico. As simulações focarão nas interações entre as diferentes camadas da rede e nas tecnologias habilitadoras utilizadas, permitindo validar a eficiência e a integração da arquitetura desenvolvida.

A partir de uma estrutura tridimensional, conforme ilustrado na Figura 4.1, este estudo apresenta uma visão abrangente sobre a sinergia entre o desenho da infraestrutura de comunicação, os microsserviços e a orquestração das redes, bem como as tecnologias habilitadoras e casos de uso que fundamentam as redes de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*). Entre essas dimensões, destaca-se especialmente a infraestrutura de comunicação, que integra redes espaciais, aéreas, marítimas/submarinas e terrestres, proporcionando uma abordagem arquitetônica de escopo universal.

Adicionalmente, são implementadas tecnologias habilitadoras como gêmeos digitais (DT, *Digital Twins*), que permitem simulação e otimização em tempo real das redes. A inteligência artificial (IA, *Artificial Intelligence*) é utilizada para orquestração, automação e gestão eficiente dos recursos. O fatiamento de rede (*network slicing*) garante flexibilidade ao adaptar a rede para diferentes requisitos de Qualidade de Serviço (QoS, *Quality of Service*), enquanto a softwarização e virtualização permitem a criação de redes flexíveis e adaptáveis, separando funções em microsserviços independentes.

Outra contribuição relevante é a integração de tecnologias que suportam redes autossustentáveis (SSN, *Self-Sustaining Networks*), capazes de gerenciar seus próprios recursos energéticos. Nesse contexto, as tecnologias de carga transparente e carga regenerativa destacam-se por aumentar a eficiência energética dos dispositivos da Rede de Acesso por Rádio (RAN, *Radio Access Network*), permitindo que eles regenerem ou redistribuam a carga de forma transparente durante a operação.

Por fim, o estudo apresenta uma variedade de casos de uso inovadores adaptados às diversas realidades do território brasileiro. Exemplos incluem comunicações de emergência, monitoramento ambiental, telemedicina e agricultura inteligente.

Essas tecnologias habilitadoras são essenciais para garantir a operação eficiente da arquitetura 6G. Elas promovem comunicação ubíqua, contínua e transparente, com ênfase na sustentabilidade e na otimização dos recursos de rede. Os casos de uso destacados são explorados no contexto territorial brasileiro e debatidos à luz da proposta de integração entre as diferentes camadas de comunicação que compõem a arquitetura estudada.

1.4 Estrutura do Texto

Este documento está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta uma visão geral do ecossistema previsto para as redes de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*), discutindo as premissas, fundamentos, requisitos e características que devem sustentar os novos cenários e aplicações, que exigem uma nova arquitetura de redes. O Capítulo 3 aborda a evolução da arquitetura de redes móveis e os desafios relacionados ao escopo arquitetônico para as redes 6G, além de revisar estudos que propõem soluções arquitetônicas para essa tecnologia.

O Capítulo 4 apresenta a proposta deste estudo, destacando a integração de diferentes arquiteturas que suportarão o ecossistema 6G. A proposta inclui uma arquitetura holística de escopo universal, que integra redes aeroespaciais, marítimas/submarinas e terrestres. Por fim, o Capítulo 5 reúne as conclusões deste trabalho, apresenta propostas para pesquisas futuras e destaca as publicações derivadas deste estudo.

Ecosistema de Redes 6G

Este capítulo explora o ecossistema das redes móveis de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*), destacando os requisitos, habilitadores tecnológicos e casos de uso emergentes. A análise aborda a necessidade de novas arquiteturas capazes de suportar cenários como gêmeos digitais (DT, *Digital Twins*), interações remotas avançadas e cobertura mundial extrema. Além disso, são apresentados os principais Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs, *Key Performance Indicators*) que diferenciam as redes 6G das gerações anteriores, bem como os desafios técnicos e operacionais que precisam ser superados para concretizar a visão do 6G.

2.1 O Ecosistema 6G

Com a implementação dos sistemas de Quinta Geração (5G, *Fifth Generation*) em pleno curso, a pesquisa em sistemas celulares móveis de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*) está em andamento. Historicamente, aproximadamente a cada 10 anos, uma nova geração de sistemas celulares é padronizada, conforme ilustrado na Figura 1.1. Com o início da comercialização do padrão 5G em 2019, espera-se que o 6G seja padronizado, com implementações previstas para começar até 2030 [8, 48, 61, 74].

Embora o 5G tenha trazido melhorias significativas em relação à Quarta Geração (4G, *Fourth Generation*), ele ainda enfrenta limitações em aplicações e serviços que demandam desempenho de comunicação superior. Desafios como cobertura global, transmissão com taxas de dados ultra-altas, latência ultrabaixa, conexões ultradensas, posicionamento de alta precisão, conexão ultraconfiável e segura, baixo consumo de energia, alta eficiência energética e inteligência onipresente estão entre os aspectos que motivam a evolução das redes futuras, conhecidas como 6G [29, 45, 62, 73].

O desenvolvimento da indústria de comunicações móveis exige que as limitações do 5G sejam superadas para viabilizar o ecossistema 6G. Para atender aos requisitos esperados, a arquitetura de rede precisará evoluir para oferecer hiperconectividade e possibilitar cenários nos quais as pessoas não apenas se conectem, mas também interajam com o mundo físico e digital ao seu redor [73, 56].

Desde a Primeira Geração (1G, *First Generation*) até o 5G, conforme ilustrado na Figura 1.1, observou-se a transição da interconexão entre pessoas para a interconexão entre pessoas e objetos. Esse progresso foi possibilitado pela evolução das tecnologias de comunicação. Por exemplo, o 4G permitiu a popularização dos smartphones com acesso à Internet, enquanto o 5G ampliou essas capacidades para suportar dispositivos conectados em larga escala e aplicações de baixa latência, como veículos autônomos. No 6G, espera-se que os usuários experimentem uma imersão completa por meio de comunicações holográficas, armazenamento em nuvem, realidade estendida (XR, *Extended Reality*) imersiva, Internet tátil e outras aplicações [62].

A percepção da realidade será ampliada pela integração de diversos órgãos sensoriais humanos, possibilitando uma ampla gama de aplicações, como telemedicina, veículos autônomos, interfaces cérebro-computador e sistemas autônomos [25, 35].

Há consenso na literatura de que a Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*) exige uma evolução significativa em sua arquitetura. Considerando a relação custo-benefício e a eficiência, a evolução deve ser pautada pelo avanço dos serviços oferecidos e demandados [59]. Isso pode ser observado nas Figuras 1.1 e 3.1, que destacam as principais transformações nas gerações de redes.

Na transição para a era 3G, um componente central de comutação de pacotes emergiu como complemento à comutação de circuitos, atendendo à introdução do serviço de dados [59]. Posteriormente, diante do crescimento exponencial do tráfego de dados, o 4G apresentou uma arquitetura redesenhada e simplificada, estabelecendo uma rede plana baseada no Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*), que proporcionou taxas de dados mais altas e menor latência [59].

O 5G, com suas redes mais heterogêneas e serviços diversificados, introduziu inovações como Redes Definidas por Software (SDN, *Software-Defined Networks*), Rede de Acesso de Rádio em Nuvem (C-RAN, *Cloud Radio Access Network*) e o conceito de fatiamento de rede (*network slicing*) [65]. Por fim, o 6G trará uma diversidade sem precedentes de serviços com requisitos rigorosos de Qualidade de Serviço (QoS, *Quality of Service*) ou Qualidade de Experiência (QoE, *Quality of Experience*), demandando inovações revolucionárias em sua arquitetura [62].

2.2 Requisitos, Habilitadores e Casos de Uso

A pesquisa e o desenvolvimento das redes móveis de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*) indicam uma clara tendência ao agrupamento de tecnologias habilitadoras e ao surgimento de novos cenários e casos de uso. Esses avanços emergem da interseção dos cenários padronizados no 5G New Radio (5G NR, *5G New Radio*), como ilustrado na Figura 2.1.

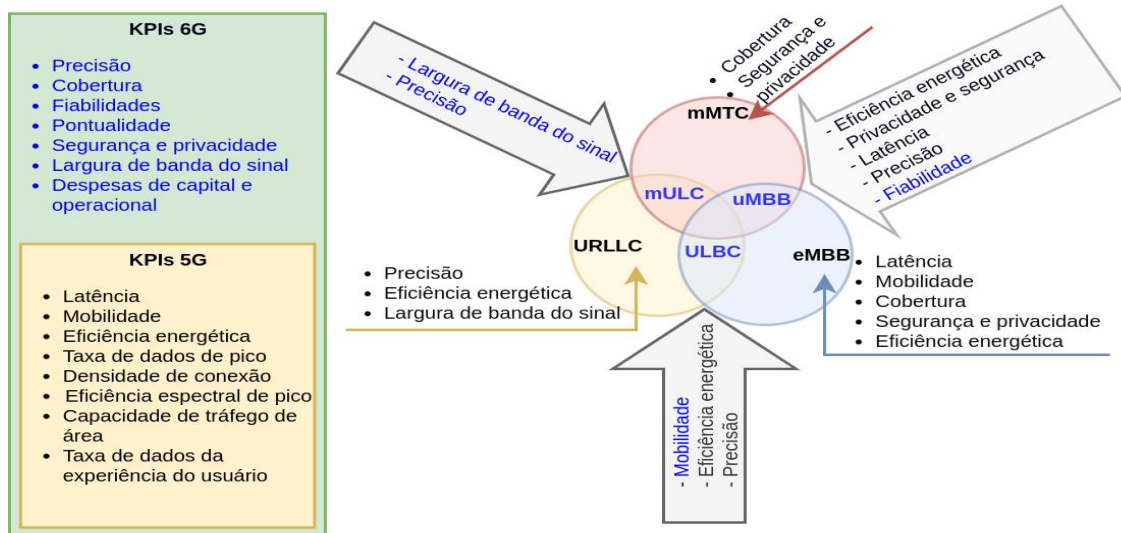


Figura 2.1: Novos cenários e Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs) para o 6G [8].

Estudos, como o de [58], classificam as tecnologias habilitadoras em dois grandes grupos: tecnologias evolucionárias, que possuem antecedentes no 5G, mesmo que limitadas em sua aplicação, e tecnologias revolucionárias, que introduzem paradigmas completamente novos. Entre as tecnologias evolucionárias destacam-se: redes não-terrestres, inteligência artificial aplicada ao 6G (IA/6G), coleta de energia, grandes superfícies inteligentes (LIS, *Large Intelligent Surfaces*), computação de borda móvel (MEC, *Mobile Edge Computing*), acesso múltiplo não ortogonal (NOMA, *Non-Orthogonal Multiple Access*), comunicação dispositivo a dispositivo (D2D, *Device-to-Device*), transmissão sem subsídio, processamento de sinal esparsos e superfícies MIMO holográficas. As tecnologias revolucionárias incluem comunicações em frequências THz, tecnologia óptica sem fio, arquitetura de rede tridimensional (3D), inteligência de borda (EI, *Edge Intelligence*), comunicações quânticas e arquitetura sem células.

Outros estudos, como [22] e [29], complementam essa classificação ao associar os habilitadores tecnológicos às cinco categorias principais: espectro, rede, interface aérea, arquitetura e paradigma. Além disso, [29] correlaciona os habilitadores a 15 *Key Performance Indicators* (KPIs, Indicadores-Chave de Desempenho), incluindo oito já definidos no 5G e sete essenciais para a arquitetura 6G, conforme ilustrado na Figura 2.1.

Em [42], os habilitadores tecnológicos são organizados em cinco categorias: comunicação sem fio, antenas e materiais sintéticos de próxima geração, técnicas de codificação e modulação avançadas, compartilhamento de espectro e novas tecnologias integradas. Entre os habilitadores estão: comunicações THz, comunicações de luz visível, grandes antenas, materiais sintéticos básicos, codificação de canal avançada, acesso

múltiplo não ortogonal, espectro duplex/full duplex, tecnologias de compartilhamento dinâmico de espectro, comunicação baseada em IA, *Internet of Things* (IoT, Internet das Coisas) no 6G e *blockchain*.

Estudos como [68] propõem uma infraestrutura 6G ultraflexível, classificando 31 habilitadores em sete categorias: uso flexível de várias bandas, Camada Física (PHY, Physical Layer) e Controle de Acesso ao Meio (MAC, Medium Access Control) ultraflexíveis, redes heterogêneas ultraflexíveis, sensores e comunicações integrados, comunicações inteligentes, comunicações verdes e comunicações seguras. Já [14] apresenta uma análise comparativa dos KPIs das redes 4G, 5G e 6G, conforme a Tabela 2.1, destacando os requisitos mais exigentes para a nova geração.

Tabela 2.1: Comparação de KPIs para 4G, 5G e 6G [14].

KPIs	4G	5G	6G
Taxa de dados de pico	1 Gbps	10 Gbps	1 Tbps
Frequência máxima	6 GHz	90 GHz	10 THz
Latência de ponta a ponta	100 ms	10 ms	1 ms
Eficiência espectral	15 bps/Hz	30 bps/Hz	100 bps/Hz
Suporte à mobilidade	350 km/h	500 km/h	1000 km/h
Inteligência Artificial (IA)	–	Parcial	Nativa
Integração de satélite	–	–	Completa
Realidade Estendida (XR)	–	Parcial	Completa
Veículos autônomos	–	Parcial	Completa
Comunicação Háptica	–	Parcial	Completa
Comunicação THz	–	Limitada	Largamente utilizada
Nível de Serviço	Video	VR/AR	tátil
Arquitetura	MIMO	MIMO Massivo	superfície inteligente

O Projeto Brasil 6G, uma iniciativa do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), complementa a discussão ao categorizar 72 habilitadores tecnológicos em oito famílias principais, incluindo comunicação, softwarização, energia, sensoriamento e atuação, imutabilidade, inteligência, segurança e tecnologias quânticas [37].

Além disso, seis grandes categorias de casos de uso foram identificadas [12]: Cobertura Mundial Extrema, Gêmeos Digitais em Larga Escala, Interações Remotas Avançadas, Agropecuária do Futuro, Zonas Seguras Invisíveis e Comunicação Espacial. Esses cenários exemplificam a amplitude de aplicações que o 6G deverá suportar, abrangendo desde conectividade em áreas remotas até tecnologias avançadas de segurança e interação em tempo real.

Os requisitos não funcionais também desempenham um papel crítico no design arquitetônico do 6G. A Tabela 2.2 destaca requisitos como flexibilidade, modularidade, robustez e programabilidade, que são fundamentais para garantir a adaptabilidade e a eficiência operacional das redes futuras.

Tabela 2.2: *Requisitos não funcionais para redes 6G [37].*

Requisito	Descrição
Flexibilidade	Capacidade de adaptar-se a diferentes necessidades de vazão, precisão espacial e outros parâmetros variáveis.
Modularidade	Permite ativar funcionalidades conforme a demanda, reduzindo a complexidade do sistema.
Robustez	Garante confiabilidade e redundância em aplicações sensíveis, como telemedicina.
Programabilidade	Habilita a configuração dinâmica de dispositivos e sistemas em larga escala.
Inteligência artificial como serviço	Facilita a operação, gerenciamento e desenvolvimento de novos serviços baseados em IA.

Em resumo, a construção do ecossistema 6G envolve a integração de habilitadores tecnológicos, a definição de casos de uso emergentes e o atendimento a requisitos rigorosos, tanto funcionais quanto não funcionais. Essas diretrizes estabelecem as bases para o desenvolvimento de redes móveis que sejam escaláveis, sustentáveis e capazes de atender às demandas futuras.

2.2.1 Gêmeos Digitais

A tecnologia de Gêmeos Digitais (DT, *Digital Twins*) encapsula objetos físicos, suas interações e o ambiente desejado, criando uma réplica virtual conhecida como Gêmeo Físico (PT, *Physical Twin*). Essa tecnologia permite uma comunicação bidirecional quase em tempo real entre o Gêmeo Digital e o mundo físico, capturando atributos essenciais do sistema. Como ilustrado na Figura 2.2, um sistema DT consiste em três pilares principais: o físico, o virtual/digital e a ligação entre eles [7].

Os Gêmeos Digitais desempenham diversas funções, como armazenamento, modelagem, aprendizado, análise de dados, previsão e simulação, além de fornecer feedback ao Gêmeo Físico. Isso viabiliza a execução de tarefas complexas de maneira mais eficiente, rápida e econômica. Esses sistemas podem ser implantados em dispositivos finais, borda ou nuvem, dependendo dos requisitos específicos de latência e poder computacional, conforme descrito na Tabela 2.3.

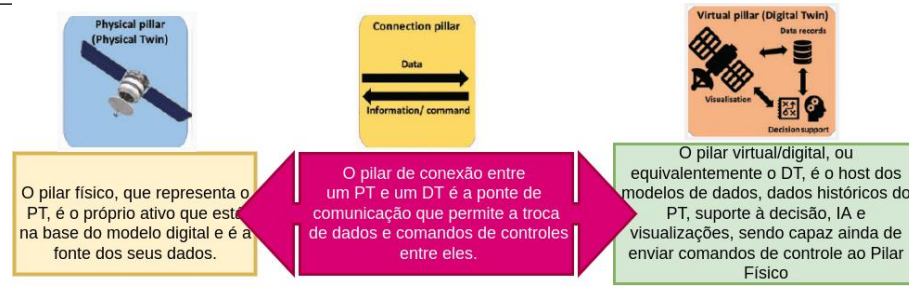


Figura 2.2: Pilares de um sistema DT [5].

Tabela 2.3: Tipos de arquitetura de Gêmeos Digitais [39].

Categoria	Descrição
Baseada em borda	Ideal para aplicações 6G com restrição de latência, como comunicações ultraconfiáveis e de baixa latência (uRLLC, <i>Ultra Reliable Low Latency Communications</i>).
Baseada em nuvem	Indicada para aplicações que requerem alto poder computacional, como simulações em larga escala.
Baseada em nuvem de borda	Combina recursos de borda (baixa latência) e nuvem (alto poder computacional), permitindo flexibilidade e eficiência.

As arquiteturas baseadas em borda são mais indicadas para aplicações 6G com restrições severas de latência, enquanto arquiteturas baseadas em nuvem são ideais para aplicações que demandam grande capacidade de processamento. Alternativamente, arquiteturas híbridas de nuvem e borda combinam os benefícios de baixa latência e alto poder computacional.

A integração entre Gêmeos Digitais e redes móveis de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*) representa um marco na evolução da conectividade e na capacidade de simulação em tempo real. Essa convergência impacta diversos setores, promovendo maior eficiência operacional, melhoria na tomada de decisões e enriquecimento da experiência do usuário em aplicações avançadas [7].

A latência ultrabaixa das redes 6G permitirá aos DTs reagir instantaneamente às mudanças no mundo físico, fator essencial para aplicações críticas, como manufatura avançada e saúde. Além disso, as altas velocidades de dados possibilitarão a transferência rápida de grandes volumes de informações entre sistemas DT distribuídos, aumentando a precisão de simulações e análises.

A capacidade de conectividade massiva oferecida pelas redes 6G facilitará a coleta de dados em tempo real, alimentando DTs que representam sistemas complexos com múltiplos componentes interconectados. Essa combinação de recursos habilitará aplicações inovadoras em áreas como cidades inteligentes, saúde, manufatura e realidade

estendida (XR, *Extended Reality*). Embora muitos estudos abordem os casos de uso de Gêmeos Digitais de forma ampla, poucos exploram suas aplicações específicas em telecomunicações.

Nesse contexto, [41] destaca que os DTs podem suportar diversos casos de uso estratégicos. Um exemplo notável é a simulação e o planejamento de redes utilizando réplicas digitais fisicamente precisas e em larga escala. Além disso, os DTs podem ser utilizados para operação e gerenciamento de redes, possibilitando a criação de *drive-tests* virtuais que garantem a robustez e resiliência do sistema.

Outra aplicação interessante são dados sintéticos gerados em simulações que podem complementar dados reais, enriquecendo análises e treinamentos. Redes neurais integradas a agentes de aprendizado por reforço profundo (DRL, *Deep Reinforcement Learning*) podem ser continuamente ajustadas para otimizar redes de forma dinâmica. Outro caso de uso relevante é a análise hipotética, onde falhas deliberadamente injetadas no DT permitem a criação de dados valiosos para aprendizado de máquina e outras análises.

A interação entre Gêmeos Digitais e redes 6G não apenas aprimora a eficiência operacional, mas também estabelece um novo paradigma para soluções robustas, escaláveis e alinhadas às demandas tecnológicas emergentes em telecomunicações e outros setores.

2.3 O Design 6G

As discussões sobre as redes de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*), descritas como ecossistemas de hiperconectividade para redes futuras, fundamentam-se fortemente na arquitetura da geração atual 5G [61, 53, 72]. De acordo com a padronização do *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*, a arquitetura 5G é composta por duas partes principais: (i) Rede de Acesso por Rádio (*Next Generation - Radio Access Network, NGRAN*) e (ii) Núcleo (*Core Network, 5GC*), com base em uma Arquitetura Baseada em Serviços (*Service-Based Architecture, SBA*). Embora apresentadas separadamente, essas partes são independentes e interoperáveis [49, 53].

Embora a arquitetura 5G tenha introduzido avanços significativos, ela continua evoluindo para atender às demandas crescentes de aplicações, requisitos técnicos e limitações econômicas. Nesse contexto, as redes 6G serão desenvolvidas a partir de uma evolução da arquitetura 5G, muitas vezes referida como *Beyond Fifth Generation (B5G)* [62]. A necessidade de atender a novos cenários e requisitos motiva a adaptação e a introdução de tecnologias avançadas.

Entre as principais inspirações para as propostas evolutivas estão os três grandes cenários de serviços definidos pelo 5G: *Enhanced Mobile Broadband (eMBB)*, Banda

Larga Móvel Aprimorada), *Massive Machine Type Communications* (mMTC, Comunicações Massivas entre Máquinas) e *Ultra Reliable Low Latency Communications* (URLLC, Comunicações Ultraconfiáveis e de Baixa Latência). Além disso, as redes 6G buscam expandir a softwarização, utilizando *softwares* abertos, incorporar inteligência artificial (IA) em diversas entidades da rede e garantir conectividade ampla, tanto em infraestruturas terrestres quanto não-terrestres. Também é essencial a gestão eficiente da relação entre o desempenho do *link*, a capacidade computacional e a vida útil da bateria dos dispositivos móveis [56, 31, 72, 43].

Conforme apresentado em [54], quatro novos domínios de aplicação devem moldar o desempenho das redes 6G: Realidade Estendida (XR, *Extended Reality*), Robótica Conectada e Sistemas Autônomos (*Connected Robotics and Autonomous Systems*, CRAS), Interações Sem Fio Cérebro-Computador (*Wireless Brain-Computer Interactions*, BCI) e Tecnologias de Razão Distribuída (*Blockchain e Distributed Ledger Technologies*, DLT). Esses domínios são impulsionados por avanços em dispositivos, como sensores, sistemas CRAS e tecnologias XR, viabilizando aplicações em entregas por drones, veículos autônomos, realidade mista (MR, *Mixed Reality*), telemedicina e interfaces cérebro-computador.

A Tabela 2.4 sintetiza as principais diferenças entre as arquiteturas 5G e 6G, destacando objetivos, características de rede e dispositivos. Enquanto o 5G busca conectar pessoas e dispositivos, o 6G visa proporcionar interações imersivas entre pessoas e o mundo físico e digital.

Tabela 2.4: Comparação entre Arquiteturas 5G e 6G [48].

	5G	6G
Objetivo	Conexão (Pessoas e “Coisas”)	Interação (Pessoas e o “Mundo”)
Características de Rede	Cloudização Softwarização Virtualização Fatiamento	Inteligentização Cloudização Softwarização Virtualização Fatiamento Profundo
Dispositivos	Smartphones Sensores Drones	Sensores e dispositivos DLT CRAS Equipamentos XR e BCI Implantes Inteligentes

De acordo com [1], as propostas arquitetônicas presentes na literatura podem ser organizadas em quatro escopos principais. O Escopo Universal compreende visões amplas que englobam infraestruturas físicas e virtuais, abrangendo desde cobertura global até interplanetária, com atenção a múltiplos casos de uso. O Escopo de Telecomunicações concentra-se na troca de informações entre terminais e nós, abordando aspectos tradicionais, como redes de acesso (Radio Access Network, RAN) e núcleo. O Escopo de

Computação prioriza o processamento distribuído e descentralizado, destacando a computação em borda, nuvem e arquiteturas híbridas. Por fim, o Escopo Especializado explora em profundidade temas específicos, como segurança e gestão eficiente de redes.

A proposta deste estudo baseia-se no Escopo Universal, considerando sua abrangência e capacidade de atender às demandas previstas para as redes móveis de Sexta Geração.

Arquiteturas de Redes 6G

Neste capítulo, são analisados os aspectos arquitetônicos das redes de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*), com foco na evolução das arquiteturas de redes móveis desde a Quarta Geração (4G) até a visão projetada para o 6G. A convergência entre comunicações e computação, a ampliação da cobertura global e a implementação de inteligência nativa na rede emergem como pilares fundamentais das novas propostas arquitetônicas. A discussão aborda as inovações necessárias para atender aos rigorosos requisitos de qualidade de serviço (QoS, *Quality of Service*) e experiência do usuário (QoE, *Quality of Experience*), além das estratégias voltadas para a integração de redes terrestres e não terrestres.

3.1 Aspectos Arquitetônicos

A arquitetura é um elemento essencial em sistemas que integram hardware e software, sendo responsável por descrever o sistema tanto em termos estruturais quanto comportamentais. Ela deve atender a requisitos técnicos e funcionais, garantindo a eficácia e a eficiência da operação [48, 8, 62].

Nas redes de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*), espera-se que a nova arquitetura evolua para atender às necessidades de otimização dos três principais cenários de uso já suportados no *5G New Radio* (5G NR, *5G New Radio*): *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *Massive Machine Type Communications* (mMTC) e *Ultra Reliable Low Latency Communications* (uRLLC). Essa evolução está fundamentada em duas abordagens arquitetônicas complementares: a Arquitetura Baseada em Serviços (SBA, *Service-Based Architecture*) e a *End-to-End Mandate-Driven Architecture* (MDA/E2E), onde locatários e usuários finais desempenham papéis ativos no ecossistema [49, 60, 45].

A SBA promove a decomposição dos serviços de rede em microsserviços independentes no núcleo (*Core Network*, 5GC). Na Rede de Acesso por Rádio (RAN, *Radio Access Network*), destaca-se a separação do plano de usuário da camada física, permitindo um design modularizado, orientado a serviços e com divisão funcional clara [60, 49]. Por outro lado, a MDA/E2E é estruturada em torno de interações ponta a ponta, contem-

plando modelos diversos de interação, incluindo interfaces homem-máquina intuitivas e outras formas de comunicação [45].

Na abordagem MDA/E2E, cada *mandate* é compreendido como um conjunto de serviços de rede necessários para garantir os níveis de qualidade de serviço (QoS, *Quality of Service*) exigidos. Essa arquitetura baseia-se em estratégias escalonáveis de monitoramento e verificação ponta a ponta (*End-to-End, E2E*), que abrangem desde a infraestrutura até os dispositivos finais. Além disso, ela é agnóstica em relação às tecnologias e sistemas operacionais subjacentes [60, 45].

A integração das abordagens SBA e MDA fomenta a pesquisa em características cruciais para as redes 6G, como inteligência nativa, virtualização, softwarização, fatiamento profundo da rede e *cloudization*. Esses conceitos visam possibilitar uma interação contínua e abrangente entre os usuários e o ambiente físico ou digital, alinhada à visão futura das redes [56, 57, 26].

A convergência entre comunicações e computação, a cobertura global extrema e a implementação de inteligência nativa na rede constituem os pilares centrais das propostas arquitetônicas para o 6G. Esses esforços buscam superar as limitações de capacidade computacional dos dispositivos móveis e promover a otimização dos parâmetros e do desempenho geral do sistema.

A Figura 3.1 ilustra a evolução das arquiteturas de redes móveis, destacando as mudanças estruturais e funcionais desde a quarta geração (4G) até as perspectivas para a sexta geração (6G).

Novas tecnologias habilitadoras têm desempenhado papéis fundamentais na evolução arquitetônica das redes móveis desde a quarta geração. No 4G, a introdução da *cloud computing* permitiu a transferência de cargas computacionais para dispositivos com maior capacidade de processamento. Já no 5G, o avanço de tecnologias como *edge computing*, virtualização, softwarização e fatiamento de rede aproximou os recursos computacionais dos usuários, proporcionando maior eficiência e personalização nos serviços.

O desenvolvimento arquitetônico do 6G é guiado por três fundamentos principais. A convergência entre comunicações e computação viabilizará processamento distribuído e descentralizado, abrangendo estações base, dispositivos de borda (*edge devices*), nuvem e equipamentos de usuário final. Essa abordagem atenderá às demandas crescentes de capacidade computacional, reduzindo latência e otimizando a eficiência do sistema.

A cobertura global extrema será assegurada pela integração de componentes não terrestres, como satélites e plataformas de alta altitude (*High Altitude Platform Systems, HAPS*), ampliando a conectividade para regiões remotas e desafiadoras. Essa infraestrutura garantirá comunicação confiável em escala global.

Por fim, a inteligência nativa incorporará inteligência artificial (IA) à rede, per-

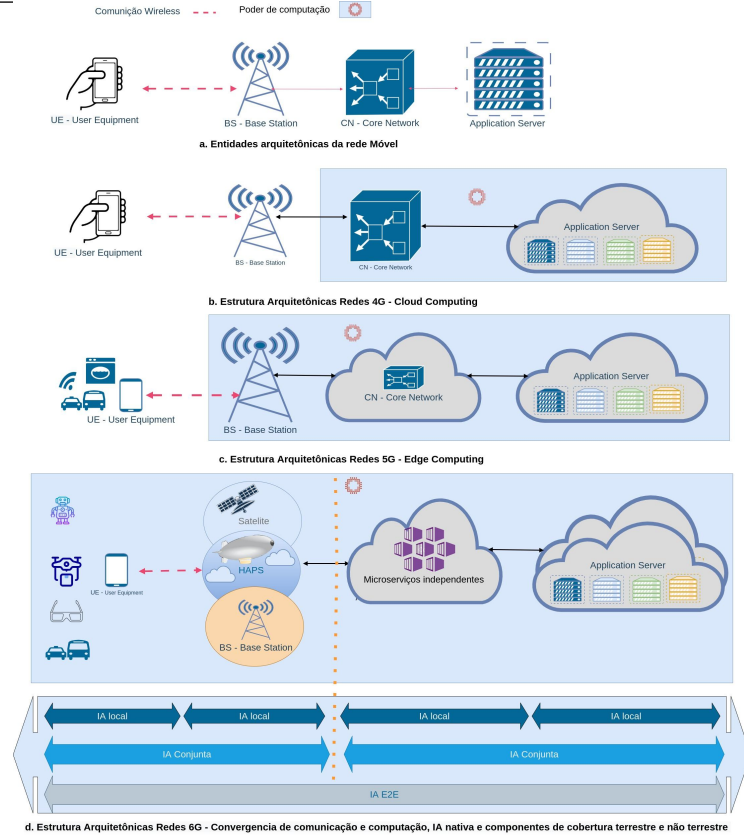


Figura 3.1: Visão da evolução arquitetônica das redes móveis: (a) Entidades arquitetônicas da rede, (b) Arquitetura 4G, (c) Arquitetura 5G e (d) Visão da arquitetura 6G. Adaptado de [56].

mitindo a orquestração eficiente de serviços e comunicações. Essa integração otimizará parâmetros de desempenho e garantirá flexibilidade e adaptabilidade às necessidades específicas de cada aplicação, respeitando limites práticos de latência e taxas de dados.

3.1.1 Convergência de Comunicações e Computação

A estratégia de convergência entre comunicações e computação tem como objetivo maximizar o uso do poder de processamento disponível em diferentes entidades da rede. Essa abordagem arquitetônica, fundamentada em uma visão holística, permite a transferência eficiente de tarefas de computação para dispositivos ou servidores mais adequados, levando em consideração os limites práticos de latência e taxa de dados [48].

Ao longo da evolução das redes móveis, as tarefas de computação foram gradualmente transferidas para dispositivos ou servidores mais poderosos. Nas redes de Quarta Geração (4G, Fourth Generation), por exemplo, essa transferência foi facilitada pela computação em nuvem (cloud computing). Já nas redes de Quinta Geração (5G, Fifth Generation), o foco foi aproximar a capacidade de computação dos dispositivos móveis.

Para tanto, o posicionamento de servidores de Computação de Borda de Acesso Múltiplo (MEC, Multi-Access Edge Computing) no núcleo (core) ou na Estação Base (BS, Base Station) reduziu significativamente a latência geral experimentada pelos Equipamentos de Usuário (UE, User Equipment) [56].

Na arquitetura de Sexta Geração (6G, Sixth Generation), espera-se que o núcleo (core), ou seja, o poder de processamento, esteja presente tanto na Rede de Acesso por Rádio (RAN, Radio Access Network) quanto nos Equipamentos de Usuário (UEs, User Equipment) [56].

Com a tendência crescente de centralização das funções da RAN de camada superior e a distribuição das funções principais, é possível simplificar a rede por meio da integração de algumas dessas funções em entidades únicas. Na era do 6G, prevê-se um conjunto mais simplificado de blocos funcionais que combinam elementos da RAN e do núcleo. Essa abordagem resultará em uma RAN sem núcleo, especialmente no que diz respeito ao plano do usuário [61].

3.1.2 Expansão da Cobertura

Os serviços de comunicação atuais concentram-se predominantemente em redes móveis terrestres, deixando muitas áreas remotas e cenários específicos sem cobertura adequada. Para alcançar uma presença verdadeiramente global, o ecossistema das redes de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*) propõe uma conectividade tridimensional (3D) contínua e onipresente. Essa visão requer uma integração arquitetônica abrangente, incluindo redes espaciais, aéreas, terrestres e marítimas, capazes de oferecer uma ampla gama de serviços de comunicação [62].

A evolução das redes 6G incorporará tecnologias avançadas para atender a essas demandas. Comunicações por satélite utilizarão satélites artificiais em órbitas terrestres para fornecer conectividade em regiões onde a infraestrutura terrestre é limitada ou inexistente. Esses satélites desempenharão um papel essencial na entrega de serviços como internet, telefonia e transmissão de televisão [34].

Além disso, comunicações de veículos aéreos não tripulados (UAV, *Unmanned Aerial Vehicles*) possibilitarão interações entre drones e outros dispositivos, permitindo aplicações como monitoramento ambiental, entregas autônomas e suporte emergencial. Redes terrestres ultradensas e comunicações marítimas ampliarão a capacidade em áreas urbanas densas e em cenários marítimos, conectando embarcações, portos e outras instalações. Já as comunicações subaquáticas serão cruciais para o monitoramento oceânico, exploração de recursos submarinos e interações entre veículos submersos e estações de superfície [29, 47, 70].

Por sua vez, comunicações subterrâneas buscarão superar os desafios de propagação de sinal em ambientes como túneis, minas e metrô. Essas inovações exigirão tecnologias específicas para assegurar conectividade confiável e eficiente nesses cenários complexos [30, 55].

As redes 6G devem integrar elementos terrestres, como Estações Base (BS, *Base Station*) fixas e móveis, com componentes não terrestres, incluindo satélites em Órbita Terrestre Baixa (LEO, *Low Earth Orbit*) e Geoestacionária (GEO, *Geostationary Orbit*), plataformas de alta altitude (HAPS, *High Altitude Platform Systems*) e veículos submarinos autônomos (AUV, *Autonomous Underwater Vehicles*). Essa infraestrutura promoverá uma cobertura global robusta, capaz de oferecer serviços de comunicação a usuários em locais remotos, melhorar a conectividade em embarcações e atender a demandas críticas em desastres naturais, como inundações e incêndios [56, 29, 62].

A integração das redes 6G combina Redes Não Terrestres (NTN, *Non-Terrestrial Networks*) e redes terrestres. As NTN incluem satélites em Órbita Terrestre Baixa (LEO), plataformas estratosféricas, como balões, e drones de alta altitude (HAPS). Essas redes complementam a cobertura terrestre, especialmente em áreas remotas ou de difícil acesso. A Figura 3.2 apresenta a abstração dessa integração, ilustrando uma rede de comunicação onipresente.

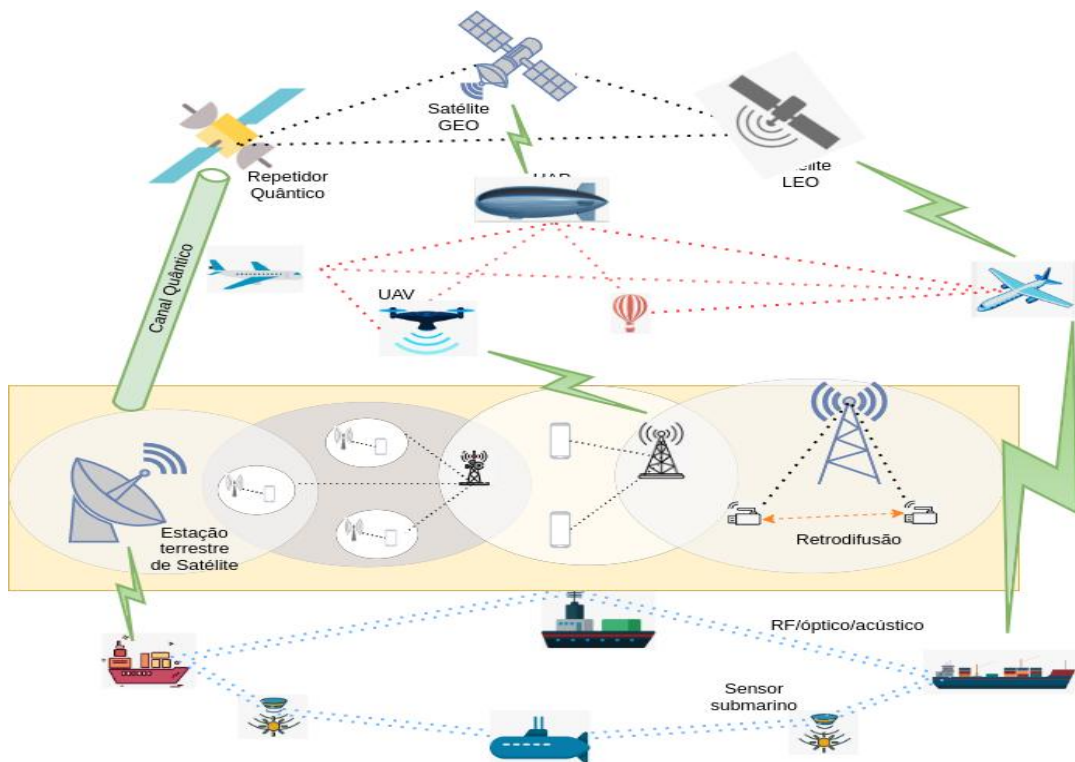


Figura 3.2: Comunicação onipresente.

Essa rede integrada pode ser organizada em duas camadas principais. A primeira, Terra-Mar, abrange redes terrestres e marítimas. Essa camada conecta navios, plataformas

de petróleo, veículos submarinos e sensores subaquáticos. Inclui, ainda, redes de superfície, compostas por embarcações, bóias e Veículos de Superfície Não Tripulados (USV, *Unmanned Surface Vehicles*), além de redes subaquáticas que utilizam cabos ópticos ou ondas acústicas para comunicação [21].

A segunda camada, Aeroespacial, abrange redes aéreas e espaciais. A rede aérea é composta por plataformas de baixa altitude (LAP, *Low Altitude Platform*) e alta altitude (HAPS), que atuam como retransmissores entre redes terrestres e marítimas. A rede espacial inclui satélites em diversas órbitas, como GEO, LEO e Média (MEO, *Medium Earth Orbit*). Esses satélites podem atuar como servidores de ponta, processando dados descarregados pelos usuários e otimizando a eficiência da comunicação [66].

Estratégias de integração foram propostas com base no tipo de carga útil utilizada. Cargas transparentes retransmitem sinais entre dispositivos terrestres e pontos de acesso sem alterar os protocolos de comunicação, sendo úteis para ampliar a cobertura em regiões remotas. Por outro lado, cargas regenerativas processam e amplificam sinais diretamente na carga útil, como em satélites ou drones, melhorando a qualidade do sinal em comunicações de longa distância.

Com essa infraestrutura integrada, as redes 6G serão capazes de oferecer conectividade global resiliente, garantindo comunicação eficiente em diferentes cenários e promovendo suporte em situações emergenciais.

3.1.3 Inteligentização da Rede

Estamos vivenciando uma convergência de avanços significativos em hardware, armazenamento e software que impulsionam o progresso da Inteligência Artificial (IA, *Artificial Intelligence*). Setores como visão computacional, jogos e processamento de linguagem natural já demonstram aplicações maduras dessa tecnologia. No entanto, a aplicação da IA no domínio das redes móveis, embora promissora, ainda está em uma fase inicial [57].

Para melhorar a eficiência na implantação, gestão e manutenção de redes, além de reduzir custos operacionais, foi introduzido o conceito de Redes Auto-Organizadas (SON, *Self-Organizing Networks*). Essa abordagem foi amplamente explorada nas redes de Quarta Geração (4G, *Fourth Generation*) e Quinta Geração (5G, *Fifth Generation*) [62]. O advento das redes de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*), entretanto, exige uma transição para Redes Autossustentáveis (SSN, *Self-Sustaining Networks*). As SSNs são projetadas para manter elevados Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs, *Key Performance Indicators*) de forma contínua, mesmo em cenários dinâmicos e complexos [62, 54].

Diferentemente das SONS, que adaptam suas funções às condições ambientais específicas, as SSNs devem garantir a sustentabilidade dos recursos, como energia e espectro, enquanto utilizam tecnologias avançadas de IA para otimizar suas operações. Essa evolução arquitetônica visa desenvolver redes capazes de operar de forma autônoma, mantendo KPIs elevados de forma consistente [26, 54].

Atualmente, as pesquisas sobre SSNs estão concentradas principalmente na Rede de Acesso por Rádio (RAN, *Radio Access Network*). A investigação está em sua fase inicial, com foco em soluções que explorem os avanços em IA para impulsionar o desempenho das redes 6G [57, 62]. Essa abordagem requer uma transformação arquitetônica, que integre IA em diferentes níveis.

A implementação de Inteligência Artificial (IA) nas redes 6G ocorre em três níveis distintos: IA Local, IA Conjunta e IA de Ponta a Ponta (E2E, *End-to-End*), conforme ilustrado na Figura 3.1 [56]. Cada um desses níveis desempenha um papel fundamental no aprimoramento das operações e funcionalidades da rede, garantindo maior eficiência e resiliência em diversos contextos de aplicação.

No nível de IA Local, a inteligência é implementada em cada entidade individual da rede, como as Estações Base (BSs, *Base Stations*) ou os Equipamentos de Usuário (UEs, *User Equipment*). Esse nível é responsável por tarefas específicas, como a otimização da modulação e a codificação de fonte e canal. Apesar de já estar em uso em várias aplicações industriais, ainda há desafios a serem enfrentados, como a aquisição contínua de dados, as atualizações de modelos e o treinamento em tempo real. Adicionalmente, é necessário integrar aceleradores de hardware ao processamento na camada física, aumentando a eficiência das operações.

No nível de IA Conjunta, a inteligência é empregada para otimizar operações que envolvem a colaboração entre diferentes entidades da rede. Isso inclui, por exemplo, a coordenação entre UEs e BSs, bem como entre redes centrais e servidores de aplicativos. Uma aplicação prática dessa abordagem é a previsão de condições futuras em ambientes sem fio complexos, permitindo a antecipação de decisões, como o *handover*, de forma proativa. Essa colaboração otimizada resulta em uma experiência de usuário mais fluida e em uma gestão de rede mais eficiente.

Por fim, o nível de IA E2E expande a aplicação da inteligência artificial para todo o sistema de comunicação. Nesse caso, a IA é utilizada para monitorar continuamente o funcionamento da rede, identificar anomalias e propor ações corretivas de maneira automatizada. Essa abordagem abrangente é essencial para garantir a robustez da rede, especialmente em cenários que demandam alta resiliência e desempenho consistente.

As duas primeiras fases, IA Local e IA Conjunta, podem ser implementadas em redes de Quinta Geração (5G, *Fifth Generation*) ou além (B5G, *Beyond 5G*), permitindo a acumulação de experiência prática enquanto as pesquisas sobre as redes 6G continuam

a avançar. O nível de IA E2E, no entanto, requer uma infraestrutura mais sofisticada, alinhada às demandas específicas das redes 6G, como baixa latência, alta capacidade de processamento e integração de dispositivos heterogêneos [26].

A implementação de IA nas redes 6G exige uma abordagem arquitetônica inovadora, que não apenas otimize o uso da IA para decisões de rede, mas também adapte a infraestrutura para suportar técnicas avançadas de aprendizado de máquina. Essa integração deve incluir a orquestração dinâmica de serviços personalizados, garantindo que a rede seja capaz de atender às necessidades específicas dos usuários enquanto mantém alto desempenho e resiliência.

3.2 Desafios no Escopo Arquitetônico 6G

A capacidade das redes de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*) será amplamente determinada pela sua arquitetura. O escopo arquitetônico do novo ecossistema de redes será definido pelos casos de uso e funcionalidades previstos, como ilustrado na Figura 4.1. A delimitação e padronização dessas redes enfrentam diversos desafios, principalmente em termos técnicos, tecnológicos e funcionais.

Segundo [19], os principais desafios incluem segurança, interoperabilidade e sustentabilidade ambiental. Esses fatores são essenciais para superar barreiras técnicas e funcionais no desenvolvimento das redes 6G. Além disso, a necessidade de integrar diferentes tecnologias adiciona complexidade ao processo de definição arquitetônica.

Por outro lado, [62] explora tecnologias fundamentais como comunicação espacial, virtualização de rede e computação em nuvem. O autor destaca também a importância de segurança e privacidade avançadas, tecnologias de antenas massivas e *beam-forming*, além de frequências extremamente altas. Esses avanços, aliados à aplicação de Inteligência Artificial (IA, *Artificial Intelligence*) e aprendizado de máquina, são vistos como pilares para redes de comunicação holográfica.

Adicionalmente, [7] aponta os Gêmeos Digitais (DT, *Digital Twin*) como uma solução promissora para a concepção, análise e operação das redes sem fio 6G. O estudo enfatiza o potencial de sinergia entre os Gêmeos Digitais e as redes 6G, além dos desafios inerentes à sua implementação prática.

A Tabela 3.1 sintetiza as principais características destacadas na literatura para o desenho do escopo arquitetônico das redes 6G. Esses aspectos abrangem avanços em cenários de uso, paradigmas arquitetônicos e integração de tecnologias habilitadoras.

Na padronização da Quinta Geração (5G, *Fifth Generation*), três cenários de uso foram inicialmente recomendados: Banda Larga Móvel Aprimorada (eMBB, *enhanced Mobile Broadband*), Comunicações Massivas do Tipo Máquina (mMTC, *massive Machine Type Communications*) e Comunicações Ultraconfiáveis de Baixa Latência

Tabela 3.1: *Desafio do escopo 6G. [8]*

	5G	6G
Objetivo	Conexão de Pessoas e Coisas	Interação de Pessoas e o Mundo
Cenários de uso	eMBB, uLRRC, mMTC	uMBB, uLBC, mULC, feMBB, umMTC, euRLLC, meMBB, MBRLLC, muRLLC.
Casos de uso	Realidades Virtual e Aumentada, Internet Tátil, Direção autônoma, Veículos conectados, Escritório sem fio na nuvem, Videoconferência de múltiplos usuários, Indústria 4.0	Comunicação de Tipo Holográfico, Realidade Estendida, Internet tátil, Experiência Multi-Sense, Gêmeos Digitais, Inteligência Pervasiva, Transporte e Logística Inteligentes, Comunicações de bordo aprimoradas, Conectividade onipresente global
Características da rede	Cloudization, Softwarização, Virtualização, Fatiamento	Inteligentização, Cloudization, Softwarização, Virtualização, Fardamento Profundo da rede
Dispositivos	Smartphones, Sensores, Drones	Sensores e DLT, CRAS, Equipamento XR e BCI, Implantes inteligentes
Arquiteturas	Arquitetura Baseada em Serviços (SBA)	Arquitetura Baseada em Serviços (SBA), Arquitetura Orientada por Mandato de ponta a ponta (MDA)
Paradigma	Redes auto-organizadas (SON)	Redes auto-sustentáveis(SSN)

(URLLC, *Ultra Reliable Low Latency Communications*). Esses cenários visavam atender a requisitos rigorosos, como grande largura de banda e alta taxa de dados, grande densidade de conexão, alta confiabilidade e baixa latência, respectivamente [56, 29].

O cenário eMBB aborda aplicações centradas no ser humano, proporcionando acesso a serviços móveis de alta taxa de dados, incluindo conteúdo multimídia e transmissão de dados. Já o cenário mMTC é projetado para suportar conectividade densa, permitindo a conexão simultânea de um grande número de dispositivos, geralmente em cenários de Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*).

Por fim, o cenário URLLC é direcionado para conectividade de missão crítica, atendendo aplicações como veículos automáticos, redes inteligentes (Smart Grid, *Smart Grid*) e Indústria 4.0. Essas aplicações possuem requisitos rigorosos de confiabilidade, latência e disponibilidade.

Com uma abordagem metodológica holística, [29] propõe três novos cenários de

uso para a Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*), que abrangem áreas sobrepostas aos cenários da 5G, mas com o objetivo de suportar casos de uso e aplicações disruptivas.

O cenário MBB Onipresente (uMBB, *ubiquitous Mobile Broadband*) foca em comunicações de alta qualidade a bordo, promovendo conectividade global. Esse cenário prevê um aumento significativo na capacidade da rede e na taxa de transmissão para pontos de acesso, sendo a base para aplicações como Gêmeos Digitais (DT, *Digital Twins*), inteligência difundida, comunicações aprimoradas a bordo e conectividade onipresente global.

Já a Comunicação de Banda Larga Ultraconfiável e de Baixa Latência (uLBC, *ultra Reliable Low Bandwidth Communications*) é projetada para aplicações que exigem não apenas alta confiabilidade e baixa latência, mas também rendimento extremamente elevado. Exemplos incluem jogos imersivos e comunicações do tipo holográfico (HTC, *Holographic-Type Communications*).

Por fim, o cenário de Comunicação Massiva e Ultraconfiável de Baixa Latência (mULC, *massive Ultra Reliable Low Latency Communications*) combina as características de mMTC e URLLC. Esse cenário facilitará a implantação de sensores e atuadores massivos, especialmente em indústrias verticais, como automação industrial e sistemas ciberfísicos.

De acordo com [62], as redes de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*) continuarão a aprimorar e expandir os cenários de aplicação já existentes, introduzindo novos conceitos como Banda Larga Móvel Aprimorada Estendida (feMBB, *further enhanced Mobile Broadband*), Comunicações Massivas do Tipo Máquina Ultrapotentes (umMTC, *ultra massive Machine Type Communications*) e Comunicações Ultraconfiáveis de Baixa Latência Aprimoradas (euRLLC, *enhanced Ultra Reliable Low Latency Communications*).

Esses novos cenários atenderão não apenas aos Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs, *Key Performance Indicators*) tradicionais, mas também a requisitos adicionais, como inteligência avançada, posicionamento e detecção mais precisos, maior capacidade de segurança e eficiência energética aprimorada.

No âmbito do 6G, o cenário eMBB Massivo (meMBB, *massive enhanced Mobile Broadband*) busca alcançar alta taxa de dados, grande largura de banda e elevada densidade de conexões. Esse cenário é projetado para suportar casos de uso como comunicações em ambientes densos, onde o tráfego de dados é extremamente alto.

Outro cenário importante é a Comunicação de Banda Larga Móvel Confiável e de Baixa Latência (MBRLLC, *Mobile Broadband Reliable Low Latency Communications*). Ele atende aplicações que demandam baixa latência, alta confiabilidade e grande largura de banda simultaneamente. Exemplos incluem centros de dados sem fio e interfaces cérebro-máquina sem fio, onde as operações precisam ser rápidas e seguras.

A Comunicação Massiva Ultraconfiável de Baixa Latência (muRLLC, *massive Ultra Reliable Low Latency Communications*) combina alta confiabilidade e baixa latência com suporte a um grande número de conexões simultâneas. Esse cenário é especialmente relevante para aplicações industriais, como transporte inteligente, fábricas inteligentes e soluções de Internet das Coisas Industriais (IIoT, *Industrial Internet of Things*).

Segundo [29], as redes 6G também devem acomodar casos de uso já introduzidos pelo 5G, como Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*), Indústria 4.0, realidade virtual e condução autônoma. Além disso, viabilizarão novos casos de uso que não podem ser suportados pelo 5G, como comunicações holográficas e inteligência abrangente. O estudo enfatiza que o 6G permitirá a transição do paradigma atual, baseado em Comunicações do Tipo Máquina (MTC, *Machine-Type Communications*), para a Internet de Tudo (IoE, *Internet of Everything*), possibilitando conectividade ubíqua e serviços mais inteligentes.

Em [69], são discutidas novas métricas de desempenho para o 6G, como cobertura global, eficiência energética e espectral, custos reduzidos, maior segurança e resiliência. O autor propõe quatro paradigmas fundamentais para alcançar uma rede 6G totalmente integrada: cobertura global (incluindo satélites, Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs, *Unmanned Aerial Vehicles*) e comunicações marítimas), suporte a todos os espectros de frequência (sub-6 GHz, mmWave, THz e bandas ópticas), aplicações completas habilitadas por Inteligência Artificial (IA, *Artificial Intelligence*) e segurança robusta de rede.

O estudo de [27] explora a evolução arquitetônica do 6G, destacando a integração entre redes terrestres e não terrestres e conexões inteligentes habilitadas por IA pervasiva. Além disso, o autor enfatiza a necessidade de aprimorar a pilha de protocolos de rede para atender aos requisitos de sustentabilidade e eficiência energética das redes de nova geração.

Já [54] aborda a integração de dispositivos e habilitadores tecnológicos fundamentais para o 6G. Esses habilitadores incluem Inteligentização, Softwarização, Virtualização e Fatiamento Profundo da Rede. Tecnologias como sensores avançados, Contabilidade Distribuída (DLT, *Distributed Ledger Technology*), Interações Cérebro-Computador (BCI, *Brain-Computer Interaction*), Realidade Estendida (XR, *Extended Reality*) e Robótica Conectada e Sistemas Autônomos (CRAS, *Connected Robotics and Autonomous Systems*) são vistas como essenciais para novos casos de uso e cenários do 6G.

Por fim, [48] discute a integração entre as arquiteturas Baseada em Serviços (SBA, *Service-Based Architecture*) e Orientada por Mandato de Ponta a Ponta (MDA/E2E, *Mandate-Driven Architecture/End-to-End*). O autor analisa como essas abordagens podem influenciar os serviços, as características de rede e os dispositivos, moldando o escopo arquitetônico das redes 6G.

3.2.1 Desafios de Integração

Os estudos sobre o desenvolvimento arquitetônico das redes 6G destacam a integração entre infraestrutura e serviços de rede como um aspecto essencial para atender aos requisitos dessa nova geração. Elementos como cobertura global e pervasiva, comunicação massiva, baixa latência, gerenciamento confiável, autonomia e eficiência energética emergem como pilares fundamentais para o desenho arquitetônico dessas redes. A Tabela 3.2 apresenta uma síntese dos principais pontos abordados na literatura, evidenciando as convergências e contribuições nesse campo.

Tabela 3.2: Principais características dos desenhos arquitetônicos
[Elaborado pelo autor].

Estudo	Elementos da Arquitetura	Tecnologias \ Paradigmas	Fundamentos da proposta
[27]	Cobertura terrestre à ubíqua 3D, Rede inteligente, Nova arquitetura de pilha de protocolo de rede	THZ, VLC, Molecular, Quântica	Blockchain para Segurança Descentralizada, Coleta e gestão de energia, Materiais Flexíveis e Inteligentes
[19]	Pilha de comunicação full-duplex, Novas técnicas de estimativa de canal, Detecção e localização baseada em rede	THZ, VLC, Molecular	
[73]	Nuvem Het aberta escalonável e elástica, Arquitetura funcional, Redes especializadas, Gestão e Orquestração		Aceleração de <i>hardware</i> , Convergência Ran-Core, Fatiamento de rede profundo
[45]	Expressive Application Program Interface (xAPI), E2E orientada por mandato, Mandatos inteligentes e autogerenciais, serviços ágeis		Perfis, Integração de usuários finais e aplicativos, Gerenciamento de fatia E2E e orquestração, Implantação de serviços cientes do contexto e da finalidade, Aprendizado de máquina e inteligência artificial

A rede de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*) será definida pela capacidade de sua arquitetura em atender aos casos de uso e funcionalidades esperadas para o sistema.

A partir de indicadores-chave, como desempenho, requisitos e casos de uso, a literatura analisada identifica habilitadores tecnológicos e mecanismos de integração que suportam aspectos como eficiência, resiliência e manutenibilidade. O design arquitetônico das redes 6G busca integrar esses indicadores [12]. Estudos sobre as redes móveis Quinta Geração (5G, *Fifth Generation*) servem de base para compreender as demandas projetadas para o 6G, com o objetivo de integrar premissas evolutivas e revolucionárias dessa nova geração [22, 69].

A literatura discute os cenários de uso, requisitos funcionais e não funcionais, e agrupamentos de habilitadores tecnológicos. Contudo, faltam abordagens quantitativas que integrem esses elementos ao desenho arquitetônico [58, 22, 29, 42, 68]. Além disso, propor uma arquitetura que atenda ao desempenho extremo projetado exige soluções baseadas nos requisitos e tecnologias habilitadoras necessárias [29, 42, 46, 8].

O estudo de [73] propõe um desenho arquitetônico em blocos. Nessa abordagem, a arquitetura é dividida em quatro blocos de construção: "plataforma", "funcional", "especialização" e "orquestração". Para cada bloco, o estudo discute os habilitadores tecnológicos que norteiam o desenho básico da rede.

A discussão de [19] aborda as tecnologias que impulsionam a evolução das redes 6G, considerando Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs, *Key Performance Indicators*) e habilitadores tecnológicos. O foco está na necessidade de inovação em arquitetura, exigida pela heterogeneidade de aplicações previstas. Um dos conceitos destacados é o design sem células, no qual os usuários estão conectados à rede como um todo, e não a uma única célula.

Giordani também explora a relação entre a densidade de dispositivos, a alta taxa de dados das comunicações em terahertz (THz, *Terahertz*) e o aumento das demandas de capacidade da rede de transporte. Para isso, propõe mais pontos de acesso à fibra e maior capacidade em comparação às redes de retaguarda (*backhaul*) atuais. Além disso, aborda virtualização e desagregação extrema, com componentes das camadas Controle de Acesso ao Meio (MAC, *Media Access Control*) e física (PHY, *Physical Layer*) virtualizados, reduzindo a dependência de hardware dedicado.

O estudo de [45] apresenta uma evolução arquitetônica para as redes de Sexta Geração com a adoção da Arquitetura Dirigida por Mandatos (MDA, *Mandate-Driven Architecture*). Essa abordagem baseia-se na criação de "mandatos", que representam conjuntos de serviços de rede requisitados por uma aplicação. Esses mandatos são configurados dinamicamente para atender a níveis específicos de Qualidade de Serviço (QoS, *Quality of Service*). Essa arquitetura é neutra em relação à tecnologia, podendo ser implementada independentemente de gerações tecnológicas específicas ou relações comerciais.

Em [27], os autores analisam as arquiteturas para redes 6G sob três dimensões

principais: infraestrutura, controle e rede. A dimensão de infraestrutura considera redes de acesso utilizando diferentes meios de comunicação, como terrestre, aéreo, aquático e espacial. Já a dimensão de controle está relacionada aos habilitadores que tornam as redes 6G orientadas por Inteligência Artificial (IA, *Artificial Intelligence*). Entre os habilitadores destacam-se o rádio inteligente, a computação de borda em tempo real e os serviços distribuídos de IA.

Por fim, a dimensão de rede é subdividida em um estrato inferior e um estrato superior. O estrato inferior incorpora técnicas emergentes de comunicação no espectro, como comunicação em terahertz e Comunicação por Luz Visível (VLC, *Visible Light Communication*). O estrato superior, por sua vez, é composto por novas pilhas de protocolos voltadas para atender requisitos rigorosos, como latência ultrabaixa e alta confiabilidade.

O estudo destaca que os principais fatores que devem guiar o projeto de arquiteturas para redes 6G incluem eficiência energética, cobertura global e garantias para serviços com requisitos extremos. Entre esses requisitos, estão latência ultrabaixa, alta vazão e confiabilidade, aspectos fundamentais para sustentar as demandas dessa nova geração de redes.

3.2.2 Desafios na Integração de Gêmeos Digitais em Redes 6G

A integração da tecnologia de Gêmeos Digitais (DTs, *Digital Twins*) em arquiteturas de Rede de Sexta Geração (6G, *Sixth Generation*) apresenta desafios significativos, especialmente no que diz respeito ao desenvolvimento e à implementação prática [33]. Alguns desses desafios estão detalhados na Tabela 3.3.

Esses aspectos devem ser considerados desde a fase inicial do desenho das redes 6G. Geralmente, as visões concentram-se em cenários, aplicações e tecnologias habilitadoras, mas o desafio está em integrá-los em um único projeto arquitetônico. Além disso, questões como adaptabilidade, autosustentabilidade e flexibilidade para prover cobertura global com hiper-eficiência e gerenciamento simplificado são os principais desafios para o novo desenho arquitetônico.

Quanto à integração das redes de comunicação, a literatura ainda se encontra em estágios iniciais, com foco na proposta de tecnologias que habilitem essa integração.

Em estudos como o de [63], é proposta uma arquitetura de rede integrada baseada em redes centrais dispersas e redes centrais centralizadas em terra. Na primeira abordagem, o núcleo da rede (*Core, Core Network*) está localizado no solo, e a plataforma aérea oferece apenas serviços de Rede de Acesso via Rádio (RAN, *Radio Access Network*).

Na segunda abordagem, algumas das funções principais da rede são instaladas nos nós aéreos, aproximando a rede central de borda da RAN, enquanto a rede principal

Tabela 3.3: *Desafios da implementação de DT [32].*

Desafio	Descrição
Dimensionalidade	Para um DT refletir um PS deve-se atentar em dimensões temporais, espaciais de pequena a grande granularidade, logo quaisquer método e dispositivos computacionais existentes não conseguem lidar com tamanho fluxo e tratamento de dados.
Sincronização em tempo real	O delay mínimo é requerido para construção do DT, considerando os quesitos de simulação, modelagem e processamento de dados, como a quantidade de recursos de rede é limitada, a redução do tempo de computação pode ser obtida temporariamente por meio da implementação de DT baseada em estágios.
Padronização	Falta de um protótipo padronizado de DTs, faz com que cada aplicação use uma definição de DT específica para seu domínio. Um protocolo padronizado é imperativamente necessário para o uso adequado da tecnologia.
Segurança	O uso de DT apresenta problemas de segurança significativos. Com um DT como replica do PS, manter o sistema seguro requer não só proteger o PS, mas também o DT e a conexão entre eles.
Especialização	Em sistema grande que consiste em vários subsistemas pode usar suas próprias DTs. Esses DTs podem ser todos especializados ou personalizados para diferentes aplicações de seus subsistemas correspondentes.

baseada em nuvem permanece no solo. No entanto, ambas as estratégias consideram apenas a integração entre as redes espaciais e terrestres.

Em [64], é apresentada uma proposta de Arquitetura Baseada em Serviços (SBA, *Service-Based Architecture*) para redes integradas de Quinta Geração (5G, *Fifth Generation*), redes Além da Quinta Geração (B5G, *Beyond Fifth Generation*) e redes 6G. Nessa proposta, a rede pode atribuir requisitos de funções de rede de forma inteligente, com ênfase especial no plano de controle, visando melhorar o desempenho da arquitetura integrada.

O estudo discute a implementação da SBA, uma das principais inovações do 5G, que aproveita serviços modularizados, autônomos e independentes para fornecer uma rede flexível e nativa da nuvem. Essa abordagem é aplicável à Rede Integrada Espaço-Ar-Terra (SAGIN, *Space-Air-Ground Integrated Network*), com foco principal nas funções do plano de controle.

Em ambiente de testes, foram enfatizados novos protocolos de comunicação desenvolvidos pela Força-Tarefa de Engenharia da Internet (IETF, *Internet Engineering Task Force*), como o protocolo de Conexão UDP Rápida com a Internet (QUIC, *Quick UDP Internet Connections*), o Roteamento por Segmento sobre Programação de Rede IPv6 (SRV6, *Segment Routing over IPv6*) e o Plano de Usuário do Protocolo de Encapsula-

mento do Serviço Geral de Pacotes por Rádio (GTP-U, *GPRS Tunneling Protocol - User Plane*). Esses protocolos demonstraram-se promissores em ambientes de simulação. No entanto, o foco principal permanece nas redes 5G, e a extensão para redes 6G limita-se à integração SAGIN.

Em [28], é apresentada uma pesquisa abrangente sobre redes 6G, cobrindo tópicos que vão desde objetivos técnicos até possíveis aplicações e estudos de caso. Embora a síntese dessas pesquisas ofereça uma visão geral sobre princípios de design, tecnologias-chave e desafios abertos relacionados às redes 6G, há pouca discussão sobre propostas específicas de arquitetura de rede.

Em [23], é proposta uma arquitetura SAGIN reconfigurável baseada em Redes Definidas por Software (SDN, *Software-Defined Networking*) e Virtualização de Funções de Rede (NFV, *Network Function Virtualization*), com foco na construção e orquestração de Cadeias de Funções de Serviço (SFCs, *Service Function Chains*). Contudo, a discussão limita-se aos segmentos espaço-ar e ar-terra, sem incluir o segmento marítimo.

Em [2], são propostas duas visões de arquitetura: uma evolucionária e outra disruptiva. A abordagem evolucionária considera a compatibilidade com o padrão 5G e os próximos *Releases* do Projeto de Parceria de Terceira Geração (3GPP, *Third Generation Partnership Project*). A abordagem disruptiva, por outro lado, propõe integrar habilitadores de forma inovadora, sem preocupação com a compatibilidade com gerações anteriores. No entanto, no Relatório (Reporte, *Report*) [3], a proposta foca na integração espaço-terra, com uma infraestrutura terrestre complementada por enlaces de satélite.

Neste contexto, no Capítulo 4, discutimos a interação entre o design da infraestrutura de comunicação, a orquestração de microsserviços nas redes e as tecnologias habilitadoras, além de casos de uso que fundamentam as redes 6G. Especial ênfase é dada à infraestrutura de comunicação, agregando a tecnologia de Gêmeos Digitais (DTs, *Digital Twins*), e propondo uma arquitetura de escopo universal que integra redes terrestres, espaciais, aéreas e marítimas/submarinas.

Arquitetura Holística para Redes 6G

Este capítulo apresenta uma proposta de arquitetura holística para redes 6G, integrando redes espaciais, aéreas, terrestres, marítimas e submarinas, com suporte de tecnologias como Gêmeos Digitais (DTs, *Digital Twins*), Inteligência Artificial (IA, *Artificial Intelligence*), Redes Auto-Organizáveis (SONs, *Self-Organizing Networks*), Redes Autossustentáveis (SSNs, *Self-Sustaining Networks*) e fatiamento de rede (*Network Slicing*). A proposta detalha os componentes da arquitetura, cenários de simulação e desafios de implementação, destacando estratégias baseadas em cargas regenerativas e transparentes para otimizar a gestão de recursos e a diferenciação entre redes autossustentáveis e convencionais.

4.1 Arquitetura da Rede 6G

Baseada nos conceitos discutidos em [12], a proposta integra infraestruturas físicas e virtuais para garantir cobertura global, conectividade contínua e suporte a casos de uso diversificados, desde a camada de infraestrutura até o nível de aplicação. Ela está baseada na evolução do padrão 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), incorporando novos conceitos como a Arquitetura Dirigida por Modelos (MDA, *Model-Driven Architecture*) e a Orquestração de Ponta a Ponta (E2E, *End-to-End*).

Os Gêmeos Digitais (DTs, *Digital Twins*) desempenham um papel central na proposta de arquitetura de rede 6G, atuando como o principal habilitador para a integração eficaz das camadas da Rede de Acesso via Rádio (RAN, *Radio Access Network*) com o núcleo da rede. Por meio dos DTs, é possível criar réplicas virtuais em tempo real dos sistemas físicos, possibilitando monitoramento contínuo, análises preditivas e ajustes dinâmicos para otimizar o desempenho da infraestrutura de rede.

Em sinergia com os DTs, a Inteligência Artificial (IA, *Artificial Intelligence*) fornece suporte à tomada de decisões rápidas e inteligentes, enquanto as Redes Auto-Organizáveis (SONs, *Self-Organizing Networks*) asseguram a auto-configuração e a auto-otimização dos recursos. Além disso, as Redes Autossustentáveis (SSNs, *Self-Sustaining*

Networks) promovem eficiência energética, complementando as capacidades analíticas e preditivas dos DTs.

Tecnologias como o Fatiamento de Rede (*Network Slicing*), a Virtualização de Funções de Rede (VNF, *Virtual Network Functions*) e as Redes Definidas por Software (SDN, *Software-Defined Networking*) integram-se à funcionalidade dos DTs. Essas tecnologias permitem ajustes dinâmicos nos recursos da rede e na configuração de slices, assegurando uma qualidade de serviço (QoS, *Quality of Service*) consistente.

Essa combinação de habilitadores reflete a evolução do padrão 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) e possibilita uma arquitetura de rede 6G que é simultaneamente flexível, escalável e sustentável.

4.1.1 Visão Geral da Proposta

Baseada em uma abordagem de revisão bibliográfica, a Figura 4.1, apresenta um overview da proposta de arquitetura de rede 6G. Essa abstração integra as visões discutidas em [27, 19] sobre o desenho da infraestrutura de comunicação, os princípios propostos em [45] quanto ao desenho de microsserviços e à orquestração de redes e sub-redes, além de abordagens apresentadas em [64, 23] sobre arquiteturas integradas e reconfiguráveis.

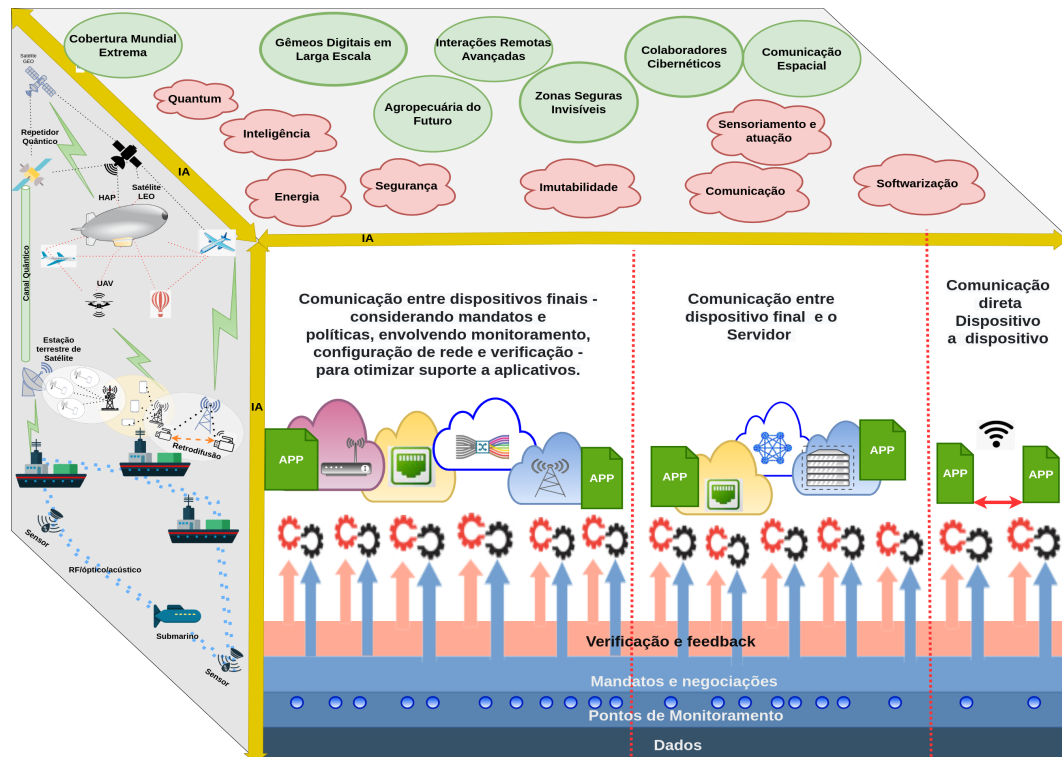


Figura 4.1: *Arquitetura de Escopo Universal: comunicação, integração de aplicações e suporte a casos de uso e tecnologias habilitadoras [Elaborado pelo autor].*

A camada de controle e orquestração, representada em uma das faces, conecta as sub-redes da infraestrutura, integrando máquinas, pessoas e aplicações de forma onipresente. Essa interação ocorre por meio de interfaces homem-máquina (IHM, *Human-Machine Interface*) e comunicação M2M (*Machine-to-Machine*), permitindo interações automatizadas e otimizadas.

Inspirados por [45], a proposta de orquestração E2E (*End-to-End*) integra dispositivos finais, sejam eles físicos ou aplicações, no desenho da rede. Baseada na arquitetura MDA/E2E (*Model-Driven Architecture/End-to-End*), essa abordagem organiza as especificações de QoS (*Quality of Service*) em mandatos dinâmicos, que facilitam a comunicação entre as sub-redes e asseguram que os serviços sejam entregues de maneira eficiente e personalizada.

A integração de microsserviços solicitados pelas sub-redes, denominada mandado, permite que o sistema crie e configure dinamicamente novos perfis de QoS. Essa abordagem conduz o gerenciamento do ciclo de vida dos serviços, otimizando recursos e garantindo a entrega ponta a ponta. Entre os principais desafios dessa proposta, destacam-se a integração dos dispositivos finais à infraestrutura e a implementação de um mecanismo para coletar as preferências dos usuários em acordos de nível de serviço refinados, garantindo que as demandas de QoS sejam atendidas de forma eficiente.

A camada superior da abstração, discutida na Seção 2.2, apresenta uma visão macro dos casos de uso previstos para as redes 6G, que devem ser suportados por essa arquitetura. Essa camada também destaca as tecnologias habilitadoras que sustentam os requisitos de desempenho necessários para implementar esses casos de uso.

Os habilitadores tecnológicos, detalhados no Capítulo 2, são apresentados em oito grupos que representam os fundamentos tecnológicos do desenho 6G. Tecnologias como SDN (*Software-Defined Networking*), VNF (*Virtual Network Functions*) e Fatiamento de Rede (*Network Slicing*) são essenciais para atender às expectativas de flexibilidade e escalabilidade das redes de sexta geração.

Por fim, a camada de infraestrutura de comunicação, representada em outra face, propõe uma rede integrada Espaço-Ar-Terra-Mar. Essa integração combina diferentes tecnologias e infraestruturas para oferecer conectividade contínua e eficiente. Essa abordagem alinha-se às recomendações em [3], que destacam a necessidade de infraestrutura adaptável para atender à conectividade em áreas remotas e de difícil acesso, garantindo eficiência operacional, resiliência e escalabilidade.

4.2 Rede 3D com Gêmeos Digitais

Inicialmente, expandimos a visão da arquitetura Gêmeo Cibernético (*Cyber Twin*), conforme Figura 4.2, integrando-a à evolução prevista para a padronização do

3rd Generation Partnership Project (3GPP, *3rd Generation Partnership Project*) na rede 5G/B5G, à Service-Based Architecture (SBA, *Service-Based Architecture*) e a novos conceitos como a Arquitetura Dirigida por Modelos (MDA, *Model-Driven Architecture*) e a Orquestração de Ponta a Ponta (E2E, *End-to-End*) [7].

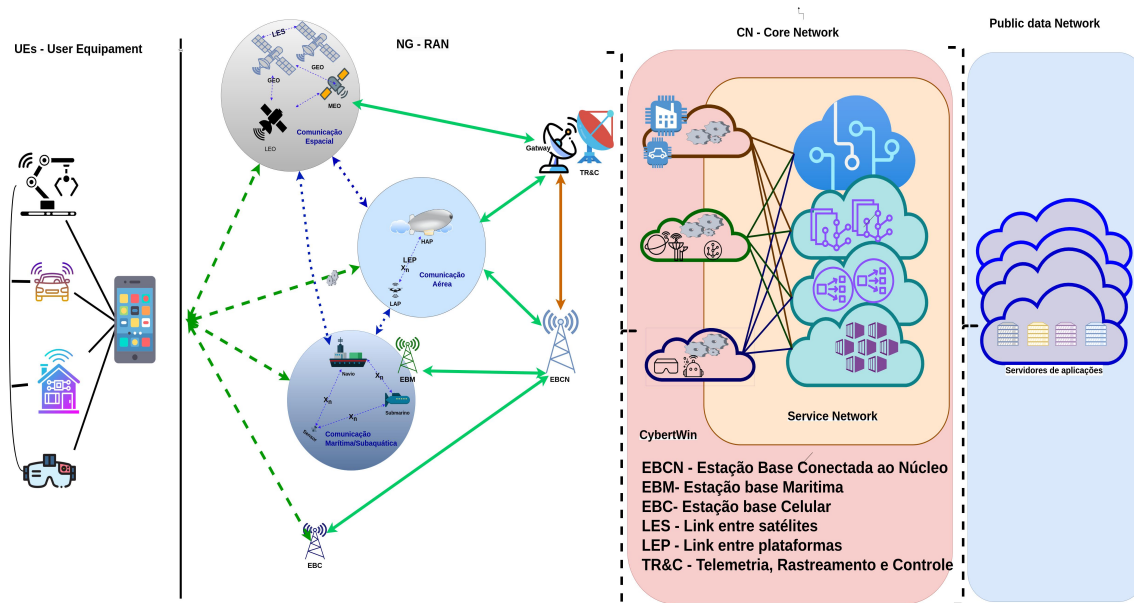


Figura 4.2: Arquitetura de Rede 3D habilitada por Gêmeos Digitais [Elaborado pelo autor].

A arquitetura proposta é habilitada por tecnologias inovadoras, como Gêmeos Digitais (DTs, *Digital Twins*), inteligência artificial (IA, *Artificial Intelligence*), redes auto-organizáveis (SON, *Self-Organizing Networks*), redes auto-sustentáveis (SSN, *Self-Sustainable Networks*), fatiamento dinâmico de rede (*Network Slicing*). Essas tecnologias atuam de forma integrada para otimizar recursos, gerenciar mobilidade e garantir uma orquestração eficiente e dinâmica em cenários de alta densidade.

Dividimos a proposta em quatro blocos principais: Equipamentos de Usuário (UEs, *User Equipments*), Rede de Acesso (RAN, *Radio Access Network*), Rede Principal (Core) e Rede Pública de Dados (*Public Data Network*), conforme Figura 4.2.

O primeiro bloco, Equipamentos de Usuário (UEs, *User Equipments*), representa os dispositivos finais, sejam eles físicos ou aplicações, que interagem diretamente com a Rede de Acesso (RAN). Esses dispositivos podem incluir sensores, câmeras, *smartphones*, *drones*, Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*) e veículos autônomos (VAs, *Autonomous Vehicles*).

Os UEs são responsáveis por gerar tráfego de dados e interagir com seus respectivos Gêmeos Digitais (DTs, *Digital Twins*), habilitadores tecnológicos essenciais nesta arquitetura. Geridos pela camada de borda, os DTs garantem que os dispositivos mantenham a sincronização com a infraestrutura, otimizando a alocação de recursos e monitorando o desempenho da rede.

O segundo bloco, Rede de Acesso (RAN, *Radio Access Network*), conecta os UEs à infraestrutura de comunicação. Essa camada é composta por subcamadas especializadas, projetadas para garantir cobertura eficiente e acesso em diferentes cenários.

A RAN Espacial utiliza satélites geoestacionários (GEO, *Geostationary Earth Orbit*) e de baixa altitude (LEO, *Low Earth Orbit*) para alcançar regiões remotas ou de difícil acesso, garantindo conectividade em locais onde a infraestrutura terrestre é inviável.

A RAN Aérea utiliza plataformas em altas altitudes (HAPS, *High-Altitude Platform Systems*) e veículos aéreos não tripulados (UAVs, *Unmanned Aerial Vehicles*). Essas tecnologias são empregadas para fornecer suporte à conectividade móvel, especialmente em cenários de emergência ou regiões isoladas.

A RAN Terrestre é formada por torres de comunicação e estações base conectadas ao núcleo (EBCN, *Edge-Based Core Nodes*), proporcionando cobertura robusta em áreas urbanas e rurais, com alta capacidade de conexões simultâneas.

A RAN Marinha e Submarina integra sensores subaquáticos, plataformas de petróleo e embarcações. Essa subcamada possibilita a comunicação em ambientes aquáticos, essencial para aplicações marítimas e de exploração submarina.

Cada subcamada da RAN é cuidadosamente projetada para atender a requisitos específicos, como baixa latência, alta capacidade de conexões simultâneas e suporte avançado à mobilidade. Os Gêmeos Digitais (DTs, *Digital Twins*) desempenham um papel essencial, interagindo diretamente com as subcamadas da RAN para monitorar e otimizar continuamente as condições de conectividade.

O terceiro bloco, Rede Principal (Core, *Core Network*), integra diversas nuvens centrais, conectadas entre si por links ópticos de alta velocidade, fornecendo recursos de computação, armazenamento em cache e comunicação como um serviço de infraestrutura de rede. Essa camada é otimizada pela integração com as Nuvens de Borda (*Edge Clouds*), coordenadas pelo *Cybertwin*.

O *Cybertwin* atua como o núcleo de orquestração inteligente, gerenciando os Gêmeos Digitais (DTs, *Digital Twins*) e aplicando decisões dinâmicas para garantir a sincronização global, a otimização dos recursos e o atendimento às exigências de qualidade de serviço (QoS, *Quality of Service*) e eficiência energética.

A Rede de Serviços conecta as diferentes camadas da infraestrutura, incluindo as estações base conectadas ao núcleo (EBCN, *Edge-Based Core Nodes*), as estações marítimas (EBM, *Edge-Based Maritime Nodes*) e as estações celulares (EBC, *Edge-Based Cellular Nodes*). Além disso, os links entre satélites (LES, *Links Between Satellites*) e os links entre plataformas (LEP, *Linked Edge Platforms*) desempenham um papel fundamental ao garantir a comunicação eficiente entre as camadas espacial, aérea, terrestre e marítima. Os serviços de rastreamento e controle (TR&C, *Telemetry, Tracking and Control*)

coordenam e monitoram a interação entre as sub-redes, integrando-as de forma eficiente ao Core.

Embora a Rede Pública de Dados (*Public Data Network*), apresentada na Figura 4.2 represente uma infraestrutura relevante para escalabilidade e processamento de dados, sua função não é o foco desta proposta. O destaque da abordagem recai sobre a integração e interação das camadas de rede e sobre como os habilitadores tecnológicos que suportam essas funções. Em particular, os Gêmeos Digitais (DTs, *Digital Twins*), geridos dentro do Cybertwin, que desempenham um papel essencial na orquestração, otimização e gestão dos recursos da rede.

De acordo com as arquiteturas de Gêmeos Digitais apresentadas no Capítulo 2, a implementação proposta é baseada em nuvem de borda. Essa escolha é motivada pela capacidade de reduzir a latência com o processamento local na borda, essencial para comunicações URLLC (URLLC, Ultra Reliable Low Latency Communications), pela orquestração eficiente entre camadas, permitindo a realização de decisões tanto locais quanto globais, e pela flexibilidade de escalabilidade, que equilibra o processamento descentralizado na borda com o suporte de nuvens centrais no Core.

A proposta integra redes espaciais, aéreas, terrestres e marítimas, otimizadas por Gêmeos Digitais que gerenciam recursos de rede. O objetivo é desenvolver uma arquitetura holística de escopo universal que represente a visão 6G de cobertura global extrema.

4.2.1 Cenários e Casos no Brasil

O Brasil possui diversas áreas remotas devido à sua vasta extensão territorial e à diversidade de biomas, como a Amazônia, Mata Atlântica, Cerrado, Caatinga, Pampa e Pantanal [9]. Além disso, as ilhas oceânicas, como o Atol das Rocas, o Arquipélago de Fernando de Noronha, o Arquipélago de São Pedro e São Paulo, o Arquipélago de Martim Vaz e a Ilha da Trindade, conforme Figura 4.3 [44, 17].

A região amazônica é uma das mais remotas do Brasil, com vastas extensões de floresta tropical e pouca presença humana. Muitas comunidades vivem isoladas, dependendo da navegação fluvial para se conectar ao mundo exterior. No Pantanal, localizado principalmente em Mato Grosso do Sul e Mato Grosso, a biodiversidade é única, mas há desafios de infraestrutura devido às áreas alagadas. O Sertão nordestino, caracterizado por paisagem semiárida e clima severo, também enfrenta dificuldades no acesso a serviços essenciais.

As ilhas oceânicas, como Fernando de Noronha, Trindade e Martim Vaz, desempenham um papel crucial na pesquisa científica e na conservação ambiental, mas sofrem com limitações de conectividade. As fronteiras terrestres do Brasil, especialmente na

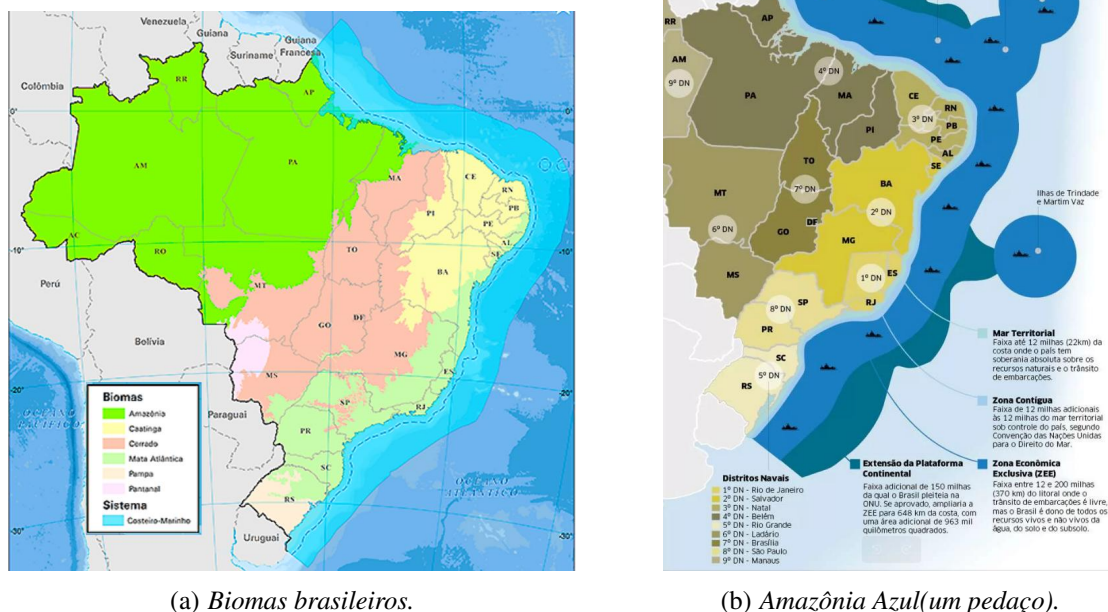
(a) *Biomos brasileiros.*(b) *Amazônia Azul (um pedaço).*

Figura 4.3: (a) *Biomos* e (b) *Amazônia Azul* (inclui as Ilhas Oceânicas brasileiras) [9].

Amazônia, apresentam baixa infraestrutura e acesso limitado, o que torna a comunicação desafiadora.

Essas regiões remotas enfrentam problemas significativos em telecomunicações. O acesso restrito à *Internet*, a cobertura limitada de telefonia móvel e a energia elétrica pouco confiável impactam o desenvolvimento econômico e social. A comunicação em emergências é prejudicada, e o funcionamento de serviços básicos se torna instável. Além disso, a instalação e manutenção de redes são dificultadas pela geografia e pela falta de recursos.

As redes de comunicação 6G integradas podem oferecer soluções para superar esses desafios. A integração dos dispositivos de usuários (UEs) em áreas remotas aos segmentos de rede mais adequados é essencial para atender às necessidades específicas de comunicação. Posteriormente, a distribuição da comunicação entre outros segmentos da rede ocorre conforme os requisitos das aplicações discutido no Capítulo 3.

Regiões como a Amazônia, o Pantanal, o Sertão e as ilhas oceânicas podem se beneficiar diretamente das redes 6G. Elas viabilizam o monitoramento ambiental com sensores que acompanham desmatamento, incêndios e qualidade do ar. Também possibilitam telemedicina, com consultas remotas de alta qualidade, e educação remota, permitindo aulas online em regiões sem escolas tradicionais.

Outros exemplos incluem agricultura de precisão para otimizar práticas no Sertão, turismo sustentável que melhora a experiência dos visitantes e vigilância com *drones*

e sensores para monitorar atividades ilegais. As redes 6G também ajudam no monitoramento de desastres naturais, permitindo respostas rápidas, e facilitam colaborações científicas em tempo real.

Esses exemplos mostram como as redes 6G podem promover inclusão digital, superar desafios de conectividade e melhorar a qualidade de vida em áreas remotas do Brasil.

4.3 Avaliação da Proposta

Para validar uma arquitetura de rede 6G, duas abordagens comuns são utilizadas em ambientes de pesquisa: simulação e testbeds. A simulação cria um modelo virtual da rede, permitindo experimentos com diferentes configurações, número de dispositivos, camadas de rede e condições de operação, sem a necessidade de hardware físico. Essa abordagem destaca-se por sua flexibilidade, baixo custo e rapidez na validação de conceitos e parâmetros da rede.

Por outro lado, um testbed real requer hardware físico e software para replicar o ambiente de uma rede 6G. Dispositivos de usuário (UEs), estações de Rede de Acesso via Rádio (RAN) e o núcleo da rede precisam ser implementados e conectados fisicamente. Embora ofereça maior precisão nos resultados, essa abordagem apresenta custos elevados, maior complexidade e desafios técnicos consideráveis.

A escolha pela simulação, especialmente em estágios iniciais de pesquisa, justifica-se por sua economia e escalabilidade. Diferentes topologias, condições ambientais, padrões de tráfego e estratégias de gerenciamento podem ser modelados e analisados com agilidade. Em um testbed, essas alterações seriam significativamente mais trabalhosas e demoradas.

Além disso, a simulação proporciona coleta e análise detalhadas de métricas de desempenho, como latência, throughput e interferência. Essa capacidade é fundamental para validar modelos teóricos e otimizar algoritmos de rede de forma eficiente.

Dessa forma, a simulação é uma ferramenta indispensável para a pesquisa em redes 6G, oferecendo um ambiente controlado e versátil para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras.

4.4 Estrutura e Componentes

O desenvolvimento de redes de comunicação 6G exige uma abordagem holística, integrando múltiplos componentes e tecnologias habilitadoras. A estrutura proposta é composta por módulos que operam de maneira interconectada para assegurar conectividade global, alta resiliência e qualidade de serviço (QoS, *Quality of Service*). Essa abor-

dagem visa atender às demandas emergentes de comunicação, destacando a importância de habilitadores como gêmeos digitais, inteligência artificial e redes auto-organizáveis na otimização da infraestrutura. A Figura 4.4 apresenta a modelagem da estrutura e dos componentes.

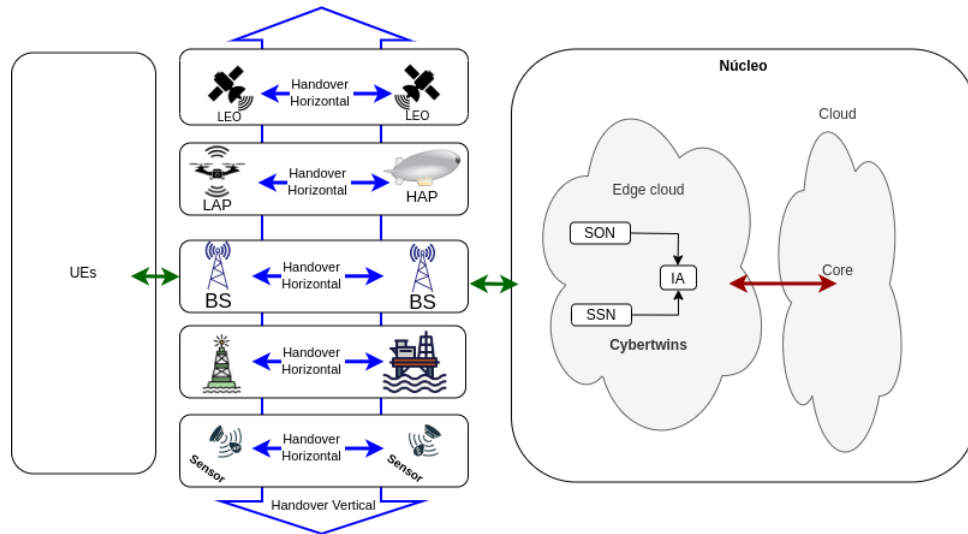


Figura 4.4: Modelagem da estrutura e dos componentes da arquitetura proposta [Elaborado pelo autor].

A estrutura é composta por equipamentos de usuário (UEs, *User Equipments*), redes de acesso por rádio (RANs, *Radio Access Networks*), núcleo da rede (Core), gêmeos digitais (DTs, *Digital Twins*) e tecnologias habilitadoras como redes auto-organizáveis (SON, *Self-Organizing Networks*), redes autossustentáveis (SSN, *Self-Sustaining Networks*), inteligência artificial (IA, *Artificial Intelligence*) e fatiamento de rede (*Network Slicing*).

Os UEs são dispositivos finais configurados com parâmetros dinâmicos de QoS, como latência, largura de banda e jitter. As RANs são divididas em cinco camadas: espacial, aérea, terrestre, marítima e submarina, cada uma desempenhando funções específicas para garantir a entrega de serviços em diferentes ambientes.

A camada espacial inclui satélites de órbita baixa (LEO, *Low Earth Orbit*), que oferecem cobertura em áreas remotas e conectividade global. Essas redes são especialmente úteis em cenários onde não há infraestrutura terrestre disponível.

A camada aérea é composta por plataformas de alta altitude (HAP, *High Altitude Platforms*) e plataformas de baixa altitude (LAP, *Low Altitude Platforms*), além de drones, que proporcionam conectividade adaptativa em operações logísticas e eventos temporários. Essa camada é crucial para suportar regiões de difícil acesso.

A camada terrestre compreende estações base (Base Stations, BS) distribuídas em ambientes urbanos e rurais. Essas estações oferecem alta capacidade de tráfego

e baixa latência, sendo fundamentais para atender a densas populações urbanas e redes industriais.

A camada marítima é formada por plataformas flutuantes e navios equipados com estações de retransmissão. Essa infraestrutura suporta conectividade em regiões costeiras e no alto-mar, viabilizando casos de uso como transporte marítimo e monitoramento ambiental.

A camada submarina utiliza sensores submersos e veículos autônomos para comunicação subaquática. Essa camada é essencial para monitoramento oceanográfico, pesquisa científica e exploração de recursos subaquáticos.

Os gêmeos digitais estão localizados na camada *Edge Cloud* e utilizam IA para monitorar, prever e otimizar os recursos da rede em tempo real. Eles realizam o gerenciamento dos *slices* conforme os requisitos de QoS, garantindo um balanceamento dinâmico de carga e prevenindo congestionamentos. O núcleo da rede, dividido entre as camadas *Edge Cloud* e *Core Cloud*, centraliza as funções de processamento, autenticação, roteamento e gerenciamento. Além disso, o núcleo realiza as interações com as RANs e os gêmeos digitais para assegurar a continuidade do serviço através de *handover* dinâmico e a eficiência na entrega de dados.

A proposta oferece cobertura global, escalabilidade e flexibilidade operacional. A cobertura global é garantida pela integração de camadas espaciais e aéreas, enquanto a escalabilidade é viabilizada por tecnologias como SON e SSN, que ajustam automaticamente os recursos conforme a densidade dos dispositivos e as demandas da rede. A flexibilidade decorre da capacidade de criar e ajustar dinamicamente *slices*, permitindo que diferentes casos de uso, como monitoramento ambiental e telemedicina, sejam atendidos de forma eficiente.

Segundo Zhang et al. (2020), os DTs e a IA monitoram o desempenho da rede e realizam previsões proativas para otimizar os *slices* e os parâmetros de QoS. As redes SON automatizam a configuração e otimização das RANs, enquanto as SSN ajustam o consumo energético com base nas condições da rede, promovendo eficiência operacional. De acordo com os padrões definidos pelo 3GPP (3rd Generation Partnership Project), que servem como base para a arquitetura proposta, a implementação vai além ao introduzir inovações como a aplicação de gêmeos digitais e inteligência artificial para gerenciamento dinâmico e preditivo. Essas inovações promovem uma operação integrada e resiliente, essencial para redes futuras.

A interação entre esses componentes garante que a infraestrutura opere de forma flexível, resiliente e adaptável às demandas dinâmicas da rede 6G. Esse conjunto reflete a visão de uma rede integrada que suporta aplicações críticas, como telemedicina, monitoramento ambiental e comunicações de emergência (You et al., 2020).

4.5 Cenário Proposto para Simulação

O cenário proposto para a simulação abrange a distribuição de 1000 equipamentos de usuário (UEs) entre as cinco camadas de comunicação, com suas respectivas redes de acesso por rádio (RANs) e interações habilitadas pelas tecnologias mencionadas anteriormente. A Figura 4.5 ilustra a interação entre os componentes no cenário simulado.

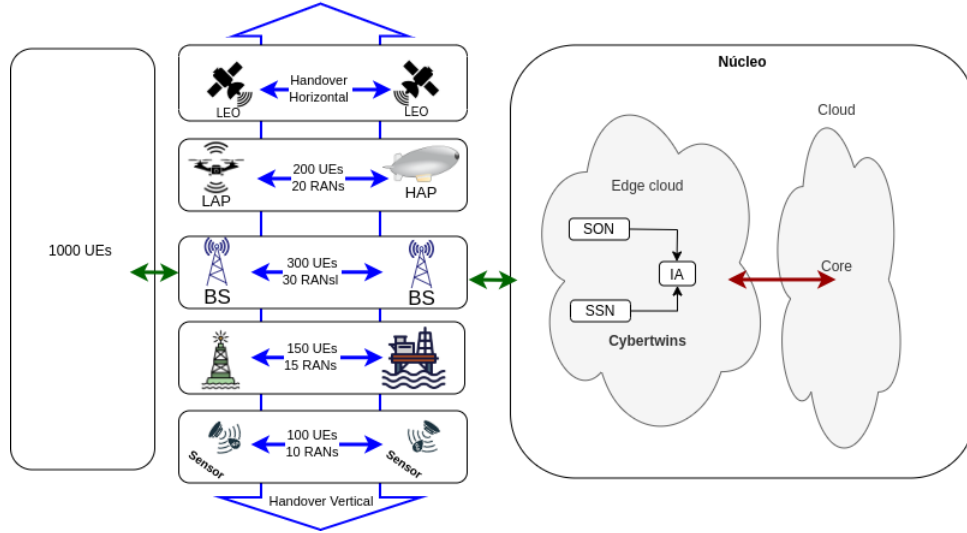


Figura 4.5: Cenário: UEs, RANs, CyberTwins, Núcleo e suas interações [Elaborado pelo autor].

No total, 200 UEs foram alocados na camada espacial, que conta com 20 RANs e utiliza satélites de órbita baixa (LEO, *Low Earth Orbit*). A camada aérea foi equipada com 300 UEs e 30 RANs, suportada por dispositivos do tipo plataformas de alta altitude (HAP, *High Altitude Platforms*) e plataformas de baixa altitude (LAP, *Low Altitude Platforms*). Essas tecnologias oferecem flexibilidade para atender cenários de conectividade emergenciais e temporários. Esse arranjo destaca a importância das NTN (redes não terrestres) para áreas remotas [19].

Na camada terrestre, 250 UEs foram distribuídos entre 25 RANs, com suporte de estações base para gerenciar o tráfego em áreas urbanas e rurais, visando a alta densidade populacional nessas áreas e a exigência de baixa latência e alta capacidade de tráfego [72].

A camada marítima inclui 150 UEs conectados por 15 RANs, utilizando plataformas e navios como pontos de comunicação. Por fim, a camada submarina conta com 100 UEs distribuídos em 10 RANs, usando sensores submersos para transmissão de dados. Esses dispositivos atendem a casos de uso relacionados ao monitoramento oceanográfico e à exploração subaquática [67].

No cenário proposto, as tecnologias habilitadoras desempenham papéis complementares e essenciais. Os gêmeos digitais e a IA realizam o gerenciamento dinâmico dos *slices*, ajustando os parâmetros conforme os requisitos de cada UE e a distribuição de

carga entre as camadas. As redes SON automatizam a configuração e a otimização das RANs, assegurando uma distribuição eficiente dos recursos. E, as SSN ajustam o consumo de energia em tempo real, promovendo uma operação sustentável e eficiente.

O núcleo da rede realiza a coordenação centralizada das interações, garantindo balanceamento de carga dinâmico, conexões consistentes e a continuidade do serviço entre as camadas por meio do *handover* vertical e horizontal.

A simulação deste cenário valida a arquitetura proposta ao demonstrar sua flexibilidade, resiliência e capacidade de atender a requisitos específicos de conectividade em ambientes heterogêneos. O alinhamento entre os componentes e habilitadores tecnológicos assegura cobertura global, escalabilidade e adaptabilidade para diferentes aplicações. Além disso, a abordagem pode promover inovação em casos de uso como agricultura de precisão, educação remota e turismo sustentável.

4.6 Análise de Resultados

A análise comparativa dos parâmetros de Qualidade de Serviço (QoS) revela melhorias significativas após as intervenções promovidas pelo *CyberTwin*. Foram avaliados os valores iniciais e finais de latência, jitter, throughput, perda de pacotes e disponibilidade em todas as camadas da RAN: *Espacial, Aérea, Terrestre, Marinha e Submarina*. A comparação foi validada por meio de testes t pareados, confirmando a significância estatística das diferenças observadas.

4.6.1 Desempenho da Rede

A análise do desempenho da rede está fundamentada em análise descritiva e estatística das métricas de Qualidade de Serviço (QoS) obtidas na simulação do cenário proposto. Elas incluem valores iniciais e finais de Latência, Jitter, Throughput, Perda de Pacotes e Disponibilidade, bem como os testes estatísticos que fundamentam a eficácia das intervenções.

A latência inicial apresentou uma média de 0,808 ms, com um desvio padrão de 0,393 ms, variando entre 0,1 ms e 1,5 ms. Após as intervenções, a latência média foi reduzida para 0,705 ms ($p\text{-value} = 0.0$), com um desvio padrão semelhante de 0,395 ms, Figura 4.6. Essa redução é estatisticamente significativa ($t = 59,99$) e evidencia uma melhora no tempo de resposta da rede.

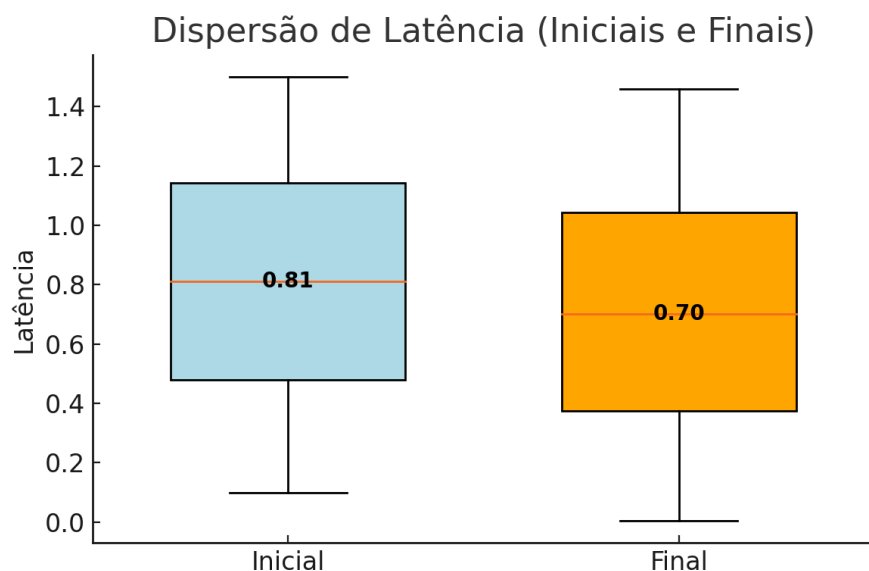


Figura 4.6: Latência: Valores Médios e Dispersão [Elaborado pelo autor].

O jitter inicial apresentou uma média de 0,153 ms e um desvio padrão de 0,086 ms, com valores que variaram entre 0,01 ms e 0,3 ms. Após as intervenções, o jitter foi reduzido para uma média de 0,127 ms ($p\text{-value} = 0.0$), com um $t\text{-statistic}$ de 61,80, Figura 4.7, indicando maior estabilidade temporal.

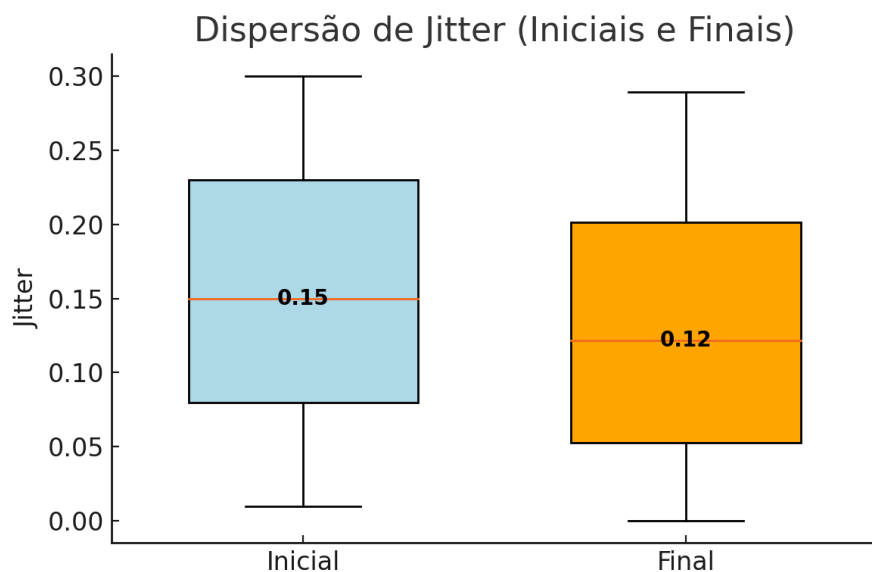


Figura 4.7: Jitter: Valores Médios e Dispersão [Elaborado pelo autor].

Já o throughput inicial teve uma média de 1,042 Gbps, com um desvio padrão de 0,119 Gbps, refletindo a diversidade de cenários simulados. Após as intervenções, o throughput médio foi ajustado para 1,317 Gbps ($p\text{-value} = 0.0014$), com valores variando

entre 0,14 Gbps e 2,47 Gbps. Apesar do aumento significativo ($t = 3,20$), Figura 4.8, os resultados ainda indicam a necessidade de melhorias para alcançar os níveis esperados para dispositivos de alta capacidade em redes 6G.

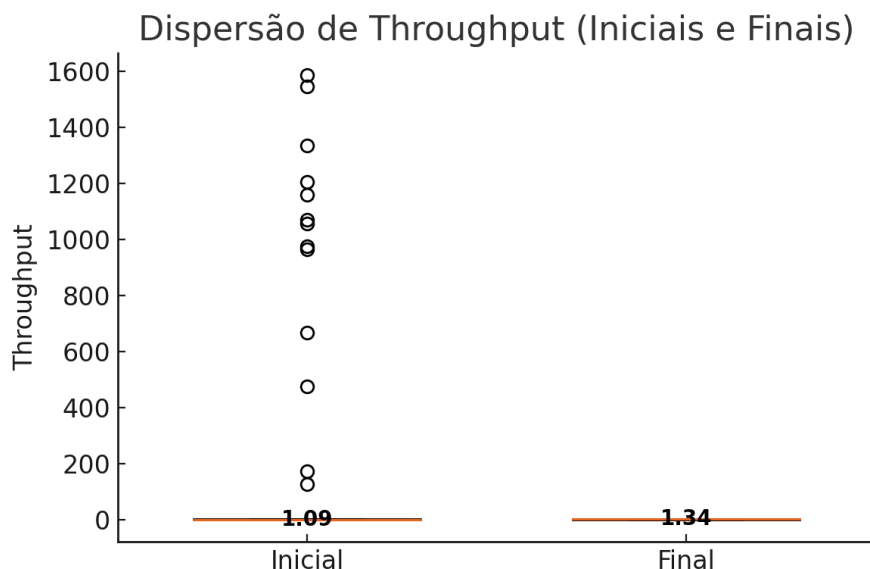


Figura 4.8: *Throughput: Médias e Dispersão [Elaborado pelo autor].*

A perda de pacotes inicial apresentou uma média de 2,495%, com variação entre 0% e 4,99%. Após as intervenções, a perda média foi reduzida para 1,984% ($p\text{-value} = 0.0$), com um desvio padrão de 1,425%, Figura 4.9. Essa redução é estatisticamente significativa ($t = 61,08$) e destaca a confiabilidade aprimorada da transmissão de dados.

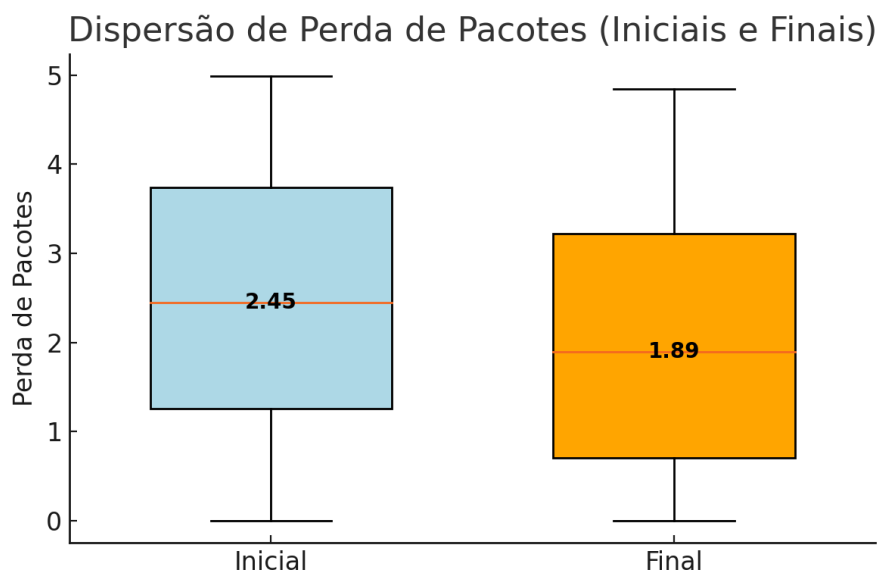


Figura 4.9: *Perda de Pacotes: Médias e Dispersão [Elaborado pelo autor].*

Já a disponibilidade inicial da rede apresentou uma média de 97,43%, com um desvio padrão de 1,416%, e valores mínimos de 95,01%. Após as intervenções, a disponibilidade foi elevada para uma média de 97,96% ($p\text{-value} = 0.0$), com um $t\text{-statistic}$ de -62,97, Figura 4.10. Esses resultados ressaltam a robustez da rede simulada, aproximando-se dos objetivos de redes 6G.

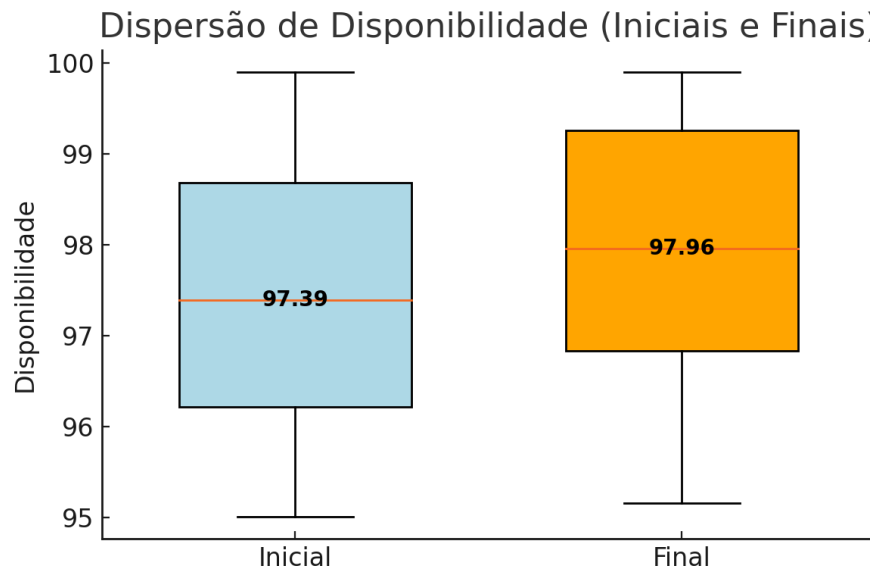


Figura 4.10: Disponibilidade: Médias e Dispersão [Elaborado pelo autor].

4.6.2 Discussões

Os resultados descritivos e estatísticos destacam a eficácia das intervenções aplicadas na simulação, com melhorias significativas em todas as métricas de Qualidade de Serviço (QoS, *quality of service*) analisadas. A redução da latência de 0,808 ms para 0,705 ms ($p\text{-value} = 0.0$) e do *jitter* de 0,153 ms para 0,127 ms ($p\text{-value} = 0.0$) reflete uma melhora na estabilidade e no tempo de resposta da rede, essencial para aplicações de baixa latência e alta precisão. O aumento no *throughput* médio, de 1,042 Gbps para 1,317 Gbps ($p\text{-value} = 0.0014$), demonstra uma capacidade otimizada da rede para lidar com volumes crescentes de dados, embora ainda existam desafios para atender a dispositivos de alta demanda.

A redução da perda de pacotes de 2,495% para 1,984% ($p\text{-value} = 0.0$) e o aumento na disponibilidade de 97,43% para 97,96% ($p\text{-value} = 0.0$) consolidam a confiabilidade e a robustez da rede, aspectos cruciais para garantir a continuidade do serviço em cenários adversos. Essas melhorias são fundamentais para aplicações críticas, como telemedicina e comunicações de emergência.

A cobertura global foi assegurada pela integração eficiente das camadas espacial, aérea, terrestre, marinha e submarina, habilitando uma conectividade ampla e robusta. Essa integração foi fundamental para atender às demandas de diferentes cenários, desde regiões remotas até ambientes urbanos densos. A escalabilidade da rede foi demonstrada pela capacidade de acomodar diferentes densidades de dispositivos e demandas de tráfego, enquanto a flexibilidade operacional foi evidenciada pela adaptação dinâmica das Redes de Acesso por Rádio (RAN, *radio access networks*) às condições de tráfego e às exigências específicas de cada camada.

O *CyberTwin* desempenhou um papel central na orquestração da rede, otimizando os parâmetros de QoS por meio do balanceamento dinâmico de carga e da alocação de *slices* em tempo real. O *slicing* dinâmico demonstrou ser uma solução eficaz para gerenciar recursos e atender aos requisitos variados de QoS, garantindo que cada camada operasse com eficiência. As tecnologias habilitadoras, como Redes Auto-Organizáveis (SON, *self-organizing networks*), contribuíram para a configuração e otimização automáticas das RANs, enquanto as Redes Autossustentáveis (SSN, *self-sustaining networks*) garantiram uma gestão energética eficiente, essencial para dispositivos móveis e remotos.

As correlações entre os parâmetros analisados reforçam as interdependências dentro da rede. Por exemplo, a relação inversa entre *throughput* e perda de pacotes demonstra como intervenções específicas podem melhorar simultaneamente o desempenho e a confiabilidade. Esses resultados validam a capacidade da arquitetura proposta de atender às demandas das redes 6G, que incluem conectividade global, escalabilidade e flexibilidade em ambientes heterogêneos e de alta complexidade.

4.7 Desafios de Implementação

A rede integrada espaço-ar-terra-mar representa uma infraestrutura multidimensional e heterogênea, resultante da convergência de múltiplas redes. Essa complexidade estrutural decorre da diversidade de recursos envolvidos, tornando a gestão e a operação da rede desafiadoras. Cada camada da rede possui propriedades dinâmicas distintas, o que adiciona uma camada extra de complexidade à mobilidade e ao desempenho geral da rede [15, 64, 63, 23].

A integração de tecnologias habilitadoras, como *Cyber Twins* (Gêmeos Digitais), Redes Autossustentáveis (SSN, *Sustainable Self-Networks*), Redes Auto-Organizáveis (SON, *Self-Organizing Networks*) e Inteligência Artificial (IA) nativa, amplia ainda mais os desafios de modelagem e descrição precisa da rede. A interdependência e a interação entre essas tecnologias demandam abordagens avançadas de modelagem para capturar a complexidade das operações e assegurar uma comunicação eficiente.

Simular uma rede de sexta geração (6G) apresenta diversos desafios que refletem a complexidade e as exigências de implementação dessas tecnologias de próxima geração. Esses desafios são essenciais para garantir que a simulação represente de forma fiel o comportamento real da rede. A Tabela 4.1 apresenta alguns dos principais desafios que devem ser considerados.

Tabela 4.1: *Desafios de Implementação [Elaborado pelo autor].*

Categoria	Desafio	Contexto
Complexidade da Arquitetura	Diversidade de Dispositivos	Interação entre satélites, Plataformas de Alta Altitude (HAPs, <i>High-Altitude Platforms</i>), Plataformas de Baixa Altitude (LAPs, <i>Low-Altitude Platforms</i>) e drones exige modelagem eficiente das camadas da rede. HAPs e LAPs são fundamentais para conectividade regional e global, e Gêmeos Digitais (<i>Cyber Twins</i>) são essenciais para monitoramento em tempo real.
Gestão de Interferência	Mitigação de Interferências	Prever e reduzir interferências em cenários densos com SON para adaptação dinâmica.
Energia e Sustentabilidade	Limitações Energéticas	Modelagem do consumo energético com SSN para soluções mais sustentáveis.
Latência e <i>Throughput</i>	Desempenho da Rede	Garantir baixa latência e alto <i>throughput</i> ; incluir análise de <i>handover</i> e carga.
Gestão de Recursos e <i>Slices</i>	Criação Dinâmica de <i>Slices</i>	Validar alocação dinâmica de <i>slices</i> para atender às demandas de QoS.
Inteligência Artificial e Automação	Modelos de IA	Implementar IA para prever congestionamentos e otimizar recursos.
Segurança	Proteção Contra Ameaças	Simular ataques cibernéticos e protocolos para melhorar a resiliência.
Desafios Técnicos Específicos	Capacidade Computacional	Modelar mobilidade e escalabilidade em demandas elevadas.
Desafios Operacionais	Implementação em Áreas Remotas	Garantir suporte técnico em locais de difícil acesso.
Custos	Viabilidade Econômica	Avaliar custos totais de infraestrutura e investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D, <i>Research and Development</i>).

Além disso, a ausência de modelos abrangentes do ecossistema 6G representa

um dos principais desafios para o avanço das redes de sexta geração. Esses modelos são essenciais para orientar a pesquisa e facilitar a integração das diversas tecnologias que compõem a arquitetura dessas redes. Sem padrões estabelecidos, o progresso é limitado por problemas de compatibilidade e pela dificuldade em validar soluções inovadoras.

A falta de padronização também complica a comparação entre diferentes propostas tecnológicas, tornando difícil identificar as melhores práticas e promover o alinhamento entre as iniciativas de desenvolvimento. Essa ausência de uniformidade compromete a validação de novas tecnologias, pois os resultados obtidos podem variar amplamente dependendo das abordagens adotadas, reduzindo a confiabilidade dos testes.

Outro impacto significativo é o risco de fragmentação no desenvolvimento de soluções. Sem um modelo unificado, diferentes setores podem adotar caminhos divergentes, dificultando a interoperabilidade entre sistemas. Essa fragmentação não apenas aumenta os custos de integração futura, mas também pode retardar a adoção de soluções inovadoras em escala global.

Ademais, a implementação de redes 6G enfrenta desafios operacionais significativos, especialmente pela ausência de um entendimento claro sobre como as tecnologias se integram e operam em conjunto. Essa lacuna pode resultar em soluções ineficientes ou inviáveis, comprometendo a capacidade de atender às demandas crescentes de conectividade, eficiência e segurança. Portanto, o desenvolvimento de modelos abrangentes e a padronização das tecnologias são fundamentais para garantir a viabilidade e o sucesso das redes 6G.

Conclusões, Trabalhos Futuros e Contribuições

Este capítulo apresenta as conclusões deste trabalho, destacando as principais contribuições da proposta de uma arquitetura holística de escopo universal para redes 6G, capaz de integrar as camadas de comunicação espacial, aérea, terrestre e marítima/submarina. Além disso, são discutidos os desafios tecnológicos e arquitetônicos enfrentados, assim como as oportunidades futuras de pesquisa e aprimoramento. Neste capítulo, também são sugeridas direções para trabalhos futuros que possam expandir a aplicabilidade da arquitetura proposta e suas tecnologias habilitadoras. Por fim, são mencionadas as publicações resultantes deste estudo, evidenciando o impacto e a relevância acadêmica e técnica da pesquisa realizada.

5.1 Conclusões

A evolução para a sexta geração de redes móveis (6G, *sixth-generation mobile networks*) representa um marco significativo na história das telecomunicações, trazendo consigo a promessa de uma conectividade global, inteligente e autossustentável. A arquitetura proposta neste trabalho visa integrar de maneira holística os diferentes segmentos de comunicação, aproveitando tecnologias emergentes como gêmeos digitais (*CyberTwins*) e inteligência artificial (IA, *artificial intelligence*).

A arquitetura holística proposta para redes 6G integra redes de comunicação espacial, aérea, terrestre e marítima, criando uma estrutura coesa e interconectada. Esta integração é essencial para fornecer cobertura global e garantir a continuidade do serviço, mesmo em ambientes desafiadores e remotos. A utilização de gêmeos digitais (*CyberTwins*) na borda da rede entre a Rede de Acesso por Rádio (RAN, *radio access network*) e o núcleo permite a monitorização em tempo real e a otimização dos dispositivos da RAN, melhorando a eficiência e a resiliência da rede.

A simulação do cenário proposto demonstrou a viabilidade técnica e operacional da arquitetura, evidenciando a capacidade da rede em manter uma latência baixa, um *throughput* elevado e uma interferência controlada, mesmo em condições de alta densidade de dispositivos e variabilidade ambiental. No curto prazo, a rede mostrou-se eficiente com

uma latência média de 0,8 ms e um *throughput* médio de 8,5 Gbps. À medida que o tempo de simulação aumentou, a latência e a interferência aumentaram ligeiramente, enquanto o *throughput* diminuiu, refletindo os desafios de gestão de recursos em uma rede dinâmica e heterogênea.

Os resultados obtidos por meio de simulações demonstram a capacidade da arquitetura em atender aos requisitos de Qualidade de Serviço (QoS, *quality of service*). A análise estatística revelou melhorias significativas nas principais métricas avaliadas.

A latência foi reduzida de 0,808 ms para 0,705 ms ($p\text{-value} = 0.0$), essencial para aplicações sensíveis ao tempo de resposta. O *jitter* diminuiu de 0,153 ms para 0,127 ms, indicando maior estabilidade temporal para transmissões multimídia e comunicações em tempo real.

O *throughput* aumentou de 1,042 Gbps para 1,317 Gbps ($p\text{-value} = 0.0014$), demonstrando a capacidade de lidar com volumes crescentes de dados em cenários de alta densidade. A perda de pacotes caiu de 2,495% para 1,984% ($p\text{-value} = 0.0$), reforçando a confiabilidade da rede. A disponibilidade cresceu de 97,43% para 97,96%, evidenciando a robustez da arquitetura em cenários adversos.

No entanto, a implementação de uma rede 6G holística enfrenta desafios significativos. A gestão de interferência requer modelos de IA avançados e algoritmos de otimização para prever e mitigar os efeitos negativos. A sustentabilidade energética é um desafio crítico, especialmente para dispositivos móveis e remotos que dependem de fontes de energia renováveis. Além disso, a segurança das comunicações e a resiliência a falhas são essenciais para garantir a integridade e a confiabilidade da rede.

A proposta destaca a necessidade de uma colaboração contínua entre a academia, a indústria e o governo para superar as barreiras técnicas e realizar a visão completa das redes 6G. A implementação de uma arquitetura abrangente e integrada é essencial para atender às demandas futuras de conectividade, promovendo inovação e melhorando a qualidade de vida globalmente. Em última análise, a rede 6G não é apenas uma evolução das gerações anteriores, mas uma transformação profunda que promete revolucionar a maneira como interagimos com o mundo digital e físico.

A simulação da arquitetura holística de rede 6G demonstrou a viabilidade do modelo proposto para suportar um ecossistema de comunicação global, flexível e de alta resiliência. Os resultados ressaltam a importância de tecnologias como Arquitetura Baseada em Serviços (SBA, *service-based architecture*), *CyberTwins* com IA, o paradigma de redes Sensíveis ao Contexto e Sustentáveis (NSS, *network sustainability-sensitive*), Redes Auto-Organizáveis (SON, *self-organizing networks*), QoS dinâmico, dentre outras tecnologias habilitadoras, em um ambiente de redes multicamadas integradas para garantir conectividade confiável em ambientes heterogêneos e altamente demandantes.

5.2 Trabalhos Futuros

Considerando o estágio atual do estudo e os desafios identificados, várias melhorias podem ser implementadas em trabalhos futuros para aprimorar a arquitetura e o desempenho da rede 6G simulada. A Tabela 5.1 lista áreas que oferecem oportunidades para avanços significativos:

Tabela 5.1: *Melhorias que podem ser Implementadas em Trabalhos Futuros*

Categoria	Melhorias
Modelos de IA para Gestão de Interferência	Desenvolvimento de algoritmos avançados, Integração de dados em tempo real e etc.
Gestão de Energia	Fontes de energia renováveis e sustentáveis, Técnicas de gerenciamento de energia mais eficientes e etc.
Otimização de Slices de Rede	Criação dinâmica e adaptação de slices, Gerenciamento de QoS aprimorado e etc.
Segurança e Resiliência	Cibersegurança avançada, Implementação de sistemas de redundância e recuperação rápida e etc.
Integração de Camadas de Rede	Aperfeiçoamento dos protocolos de comunicação, Soluções para melhorar a interoperabilidade e etc.
Infraestrutura de Simulação	Simulações mais realistas, <i>Testbeds</i> reais para validação e etc.
Automação e Orquestração	Desenvolvimento de sistemas de automação total, Implementação de plataformas de orquestração inteligente e etc.
Gêmeos Digitais	Desenvolvimento de modelos mais detalhados, Integração com a Internet das Coisas (IoT) e etc.
Impacto Ambiental e Sustentabilidade	Estudos sobre o impacto ambiental, Foco em soluções de sustentabilidade a longo prazo e etc.

A Tabela 5.1 organiza as melhorias propostas em diferentes categorias, fornecendo uma visão clara e estruturada das áreas específicas onde futuros trabalhos podem focar para aprimorar a rede 6G.

Implementar essas melhorias em trabalhos futuros não só aprimorará a eficiência e a resiliência da rede 6G, mas também garantirá que ela esteja preparada para enfrentar os desafios emergentes e atender às crescentes demandas de conectividade global. A colaboração contínua entre pesquisadores, desenvolvedores e reguladores será essencial para transformar essas propostas em realidade, promovendo uma rede 6G robusta, segura e sustentável.

5.3 Contribuições

5.3.1 Trabalhos Publicados em anais de eventos

NETO, H. S.; ARAUJO, A.; BOTH, C.; OLIVEIRA-JR, A.; CARDOSO, K. **Uma visão de arquitetura para redes 6G**. In: Anais do I Workshop de Redes 6G, p. 31–36, Porto Alegre, RS, Brasil, 2021. SBC[48].

ARAÚJO, Antonia Vanessa Dias; DE OLIVEIRA JÚNIOR, Antonio Carlos. **Desafios no desenho do escopo arquitetônico 6G**. In: Anais do II Workshop de Redes 6G. SBC, 2022. p. 1-6 [8] .

ARAUJO, A.; LIMA, R.; OLIVEIRA, R.; OLIVEIRA-JR, A. **Digital twins: habilitador tecnologico para redes 6G**. In: Anais do IV Workshop de Redes 6G, p. 32–39, Porto Alegre, RS, Brasil, 2024. SBC [7].

5.3.2 Trabalhos Publicados como colaboração

PIVOTO, D. G. S.; REZENDE, T. T.; FACINA, M. S. P.; MOREIRA, R.; DE OLIVEIRA SILVA, F.; CARDOSO, K. V.; CORREA, S. L.; ARAUJO, A. V. D.; SILVA, R. S. E.; NETO, H. S.; DE LIMA TEJERINA, G. R.; ALBERTI, A. M. **A Detailed Relevance Analysis of Enabling Technologies for 6G Architectures**. IEEE Access, 11:89644–89684, 2023 [51].

5.3.3 Colaboração em Projetos

BRASIL6G. **Projeto Brasil 6G**, 2021. <https://inatel.br/brasil6g/> [12] .

Referências Bibliográficas

- [1] A. ALBERTI ET AL.. **Arquiteturas para a Rede 6G**. Report, Projeto Brasil 6G, 2021.
- [2] A. ALBERTI ET AL.. **Contribuições para a Arquitetura da Rede 6G: Visões Evolucionária e a Disruptiva**. Report, Projeto Brasil 6G, 2021.
- [3] A. ALBERTI ET AL.. **Definição das arquiteturas física e lógica da Plataforma Brasil 6G**. Report, Projeto Brasil 6G, 2021.
- [4] A. ALBERTI ET AL.. **Implementação da plataforma para desenvolvimento da Rede 6G protótipo**. Report, Projeto Brasil 6G, 2022.
- [5] AHMADI, H.; NAG, A.; KHAR, Z.; SAYRAFIAN, K.; RAHARDJA, S. **Networked Twins and Twins of Networks: An Overview on the Relationship Between Digital Twins and 6G**. *IEEE Communications Standards Magazine*, 5(4):154–160, Dec. 2021. Conference Name: IEEE Communications Standards Magazine.
- [6] ALWIS, C. D.; KALLA, A.; PHAM, Q.-V.; KUMAR, P.; DEV, K.; HWANG, W.-J.; LIYANAGE, M. **Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research**. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2:836–886, 2021.
- [7] ARAUJO, A.; LIMA, R.; OLIVEIRA, R.; OLIVEIRA-JR, A. **Digital twins: habilitador tecnologico para redes 6g**. In: *Anais do IV Workshop de Redes 6G*, p. 32–39, Porto Alegre, RS, Brasil, 2024. SBC.
- [8] ARAÚJO, A.; JÚNIOR, A. O. **Desafios no desenho do escopo arquitetônico 6G**. In: *Anais do II Workshop de Redes 6G*, p. 1–6, Porto Alegre, RS, Brasil, 2022. SBC.
- [9] AZEVEDO, A. L. M. D. S. **IBGE - Educa | Jovens**.
- [10] BAHARE MASOOD KHORSANDI ET AL.. **Deliverable D1.4 Hexa-X architecture for B5G/6G networks – final release**. Report, Hexa-X, 2023.
- [11] BASS, L.; CLEMENTS, P.; KAZMAN, R. **Software Architecture in Practice**. Addison Wesley, Boston, 2ª edição edition, 2003.

- [12] BRASIL6G. **Projeto Brasil 6G: Arquiteturas para a Rede 6G**, 2021. <https://inatel.br/brasil6g/>.
- [13] BRITO, J. M. C.; MENDES, L. L.; GONTIJO, J. G. S. **Brazil 6G Project - An Approach to Build a National-wise Framework for 6G Networks**. In: *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, p. 1–5, Mar. 2020.
- [14] CHOWDHURY, M. Z.; SHAHJALAL, M.; AHMED, S.; JANG, Y. M. **6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions**. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 1:957–975, 2020.
- [15] DAUREMBEKOVA, A.; SCHOTTEN, H. D. **Opportunities and Limitations of Space-Air-Ground Integrated Network in 6G Systems**. In: *2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, p. 1–7, 2023.
- [16] DAVID, K.; BERNDT, H. **6g vision and requirements: Is there any need for beyond 5g?** *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 13(3):72–80, 2018.
- [17] ECO. **Ilhas Oceânicas – Veleiro ECO**.
- [18] FLAGSHIP, G. **6G Flagship – More than wireless**, Dec. 2018. <https://www.6gflagship.com/>.
- [19] GIORDANI, M.; POLESE, M.; MEZZAVILLA, M.; RANGAN, S.; ZORZI, M. **Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies**. *IEEE Communications Magazine*, 58(3):55–61, 2020.
- [20] GSMA. **The State of Mobile Internet Connectivity Report 2023 - Mobile for Development**, 2023.
- [21] GUO, H.; LI, J.; LIU, J.; TIAN, N.; KATO, N. **A Survey on Space-Air-Ground-Sea Integrated Network Security in 6G, year=2022**. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 24(1):53–87.
- [22] HAN, B.; JIANG, W.; HABIBI, M. A.; SCHOTTEN, H. D. **An Abstracted Survey on 6G: Drivers, Requirements, Efforts, and Enablers**, 2021.
- [23] HE, J.; CHENG, N.; YIN, Z.; ZHOU, C.; ZHOU, H.; QUAN, W.; LIN, X.-H. **Service-Oriented Network Resource Orchestration in Space-Air-Ground Integrated Network**. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 73(1):1162–1174, 2024.
- [24] HEXA-X. **Main - Hexa-X**, 2021. <https://hexa-x.eu/>.

- [25] HOLLAND, O.; STEINBACH, E.; PRASAD, R. V.; LIU, Q.; DAWY, Z.; AIJAZ, A.; PAPPAS, N.; CHANDRA, K.; RAO, V. S.; OTEAFY, S.; EID, M.; LUDEN, M.; BHARDWAJ, A.; LIU, X.; SACHS, J.; ARAÚJO, J. **The IEEE 1918.1 “Tactile Internet” Standards Working Group and its Standards.** *Proceedings of the IEEE*, 107(2):256–279, 2019.
- [26] HOYDIS, J.; AOUDIA, F. A.; VALCARCE, A.; VISWANATHAN, H. **Toward a 6G AI-Native Air Interface.** *IEEE Communications Magazine*, 59(5):76–81, 2021.
- [27] HUANG, T.; YANG, W.; WU, J.; MA, J.; ZHANG, X.; ZHANG, D. **A Survey on Green 6G Network: Architecture and Technologies.** *IEEE Access*, 7:175758–175768, 2019.
- [28] JAIN, P.; GUPTA, A.; KUMAR, N. **A vision towards integrated 6G communication networks: Promising technologies, architecture, and use-cases.** *Physical Communication*, 55:101917, 2022.
- [29] JIANG, W.; HAN, B.; HABIBI, M. A.; SCHOTTEN, H. D. **The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey.** *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2:334–366, 2021.
- [30] JOUHARI, M.; IBRAHIMI, K.; TEMBINE, H.; BEN-OTHTMAN, J. **Underwater Wireless Sensor Networks: A Survey on Enabling Technologies, Localization Protocols, and Internet of Underwater Things.** *IEEE Access*, 7:96879–96899, 2019.
- [31] KAMBLE, P.; SHAIKH, A. N. **6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Applications and Challenges.** In: *2022 5th International Conference on Advances in Science and Technology (ICAST)*, p. 577–581, 2022.
- [32] KHAN, L. U.; SAAD, W.; NIYATO, D.; HAN, Z.; HONG, C. S. **Digital-Twin-Enabled 6G: Vision, Architectural Trends, and Future Directions.** *IEEE Communications Magazine*, 60(1):74–80, Jan. 2022. Conference Name: IEEE Communications Magazine.
- [33] KHAN, L. U.; SAAD, W.; NIYATO, D.; HAN, Z.; HONG, C. S. **Digital-twin-enabled 6G: Vision, architectural trends, and future directions.** *IEEE Communications Magazine*, 60(1):74–80, 2022.
- [34] KODHELI, O.; LAGUNAS, E.; MATURO, N.; SHARMA, S. K.; SHANKAR, B.; MONTOYA, J. F. M.; DUNCAN, J. C. M.; SPANO, D.; CHATZINOTAS, S.; KISSELEFF, S.; QUEROL, J.; LEI, L.; VU, T. X.; GOUSSETIS, G. **Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges.** *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 23(1):70–109, 2021.

- [35] KOLOVOU, G.; OTEAFY, S.; CHATZIMISIOS, P. **A Remote Surgery Use Case for the IEEE P1918.1 Tactile Internet Standard.** In: *ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications*, p. 1–6, 2021.
- [36] KURUVATTI, N. P.; HABIBI, M. A.; PARTANI, S.; HAN, B.; FELLAN, A.; SCHOTTEN, H. D. **Empowering 6G Communication Systems With Digital Twin Technology: A Comprehensive Survey.** *IEEE Access*, 10:112158–112186, 2022. Conference Name: IEEE Access.
- [37] L. MENDES ET AL.. **Casos de Uso e Requisitos para as Redes 6G.** Report, Projeto Brasil 6G, 2021.
- [38] LETAIEF, K. B.; CHEN, W.; SHI, Y.; ZHANG, J.; ZHANG, Y.-J. A. **The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks.** *IEEE Communications Magazine*, 57(8):84–90, 2019.
- [39] LI, J.; SHI, W.; YE, Q.; ZHANG, S.; ZHUANG, W.; SHEN, X. **Joint virtual network topology design and embedding for cybertwin-enabled 6G core networks.** 8(22):16313–16325, 2021. Conference Name: IEEE Internet of Things Journal.
- [40] LIAN, S.; ZHANG, H.; SUN, W.; ZHANG, Y. **Lightweight Digital Twin and Federated Learning with Distributed Incentive in Air-Ground 6G Networks.** In: *2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring)*, p. 1–5, June 2022. ISSN: 2577-2465.
- [41] LIN, X.; KUNDU, L.; DICK, C.; OBIODU, E.; MOSTAK, T.; FLAXMAN, M. **6g digital twin networks: From theory to practice.** *IEEE Communications Magazine*, 61(11):72–78, 2023.
- [42] LU, Y.; ZHENG, X. **6G: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues.** *Journal of Industrial Information Integration*, 19:100158, 2020.
- [43] MAHMOOD, N. H.; ALVES, H.; LÓPEZ, O. A.; SHEHAB, M.; OSORIO, D. P. M.; LATVA-AHO, M. **Six Key Features of Machine Type Communication in 6G.** In: *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, p. 1–5, 2020.
- [44] MCTI. **Ilhas oceânicas: pesquisadores brasileiros atuam no meio do Atlântico, a mais de 1,1mil km da costa.**
- [45] MOERMAN, I.; ZEGHLACHE, D.; SHAHID, A.; SANTOS, J. F.; DASILVA, L. A.; DAVID, K.; FARSCROTU, J.; DE RIDDER, A.; LIU, W.; HOEBEKE, J. **Mandate-driven Networking Eco-system: A Paradigm Shift in End-to-End Communications.** In: *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, p. 1–6, 2020.

- [46] MOHSAN, S. A. H.; MAZINANI, A.; MALIK, W.; YOUNAS, I.; OTHMAN, N. Q. H.; HUSSAIN, A.; MAHMOOD, A. **6G: Envisioning the Key Technologies, Applications and Challenges**. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11, Jan. 2020.
- [47] MOZAFFARI, M.; SAAD, W.; BENNIS, M.; NAM, Y.-H.; DEBBAH, M. **A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems**. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 21(3):2334–2360, 2019.
- [48] NETO, H. S.; ARAUJO, A.; BOTH, C.; OLIVEIRA-JR, A.; CARDOSO, K. **Uma visão de arquitetura para redes 6g**. In: *Anais do I Workshop de Redes 6G*, p. 31–36, Porto Alegre, RS, Brasil, 2021. SBC.
- [49] OLIVEIRA, L. A. N.; ALENCAR, M. S.; LOPES, W. T. A. **Evolução da Arquitetura de Redes Móveis rumo ao 5G**. *REVISTA DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO*, 8(2), 2018.
- [50] ONE6G. **one6G – Taking communications to the next level**, Jan. 2021.
- [51] PIVOTO, D. G. S.; REZENDE, T. T.; FACINA, M. S. P.; MOREIRA, R.; DE OLIVEIRA SILVA, F.; CARDOSO, K. V.; CORREA, S. L.; ARAUJO, A. V. D.; SILVA, R. S. E.; NETO, H. S.; DE LIMA TEJERINA, G. R.; ALBERTI, A. M. **A Detailed Relevance Analysis of Enabling Technologies for 6G Architectures**. *IEEE Access*, 11:89644–89684, 2023.
- [52] QUADRINI, M.; ROSETI, C.; ZAMPOGNARO, F.; SERRANTI, L. **Data collection using nwdaf network function in a 5g core network with real traffic**. In: *2023 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, p. 1–7, 2023.
- [53] ROMMER, S.; HEDMAN, P.; OLSSON, M.; FRID, L.; SULTANA, S.; MULLIGAN, C. **Chapter 3 - Architecture overview**. In: Rommer, S.; Hedman, P.; Olsson, M.; Frid, L.; Sultana, S.; Mulligan, C., editors, *5G Core Networks*, p. 15–72. Academic Press, 2020.
- [54] SAAD, W.; BENNIS, M.; CHEN, M. **A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems**. *IEEE Network*, 34(3):134–142, 2020.
- [55] SAEED, N.; ALOUINI, M.-S.; AL-NAFFOURI, T. Y. **Toward the Internet of Under-ground Things: A Systematic Survey**. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 21(4):3443–3466, 2019.

- [56] SAMSUNG ELECTRONICS CO., L. **6G the next hyper Connected Experience for All** | Samsung Research, 2021.
- [57] SHAFIN, R.; LIU, L.; CHANDRASEKHAR, V.; CHEN, H.; REED, J.; ZHANG, J. C. **Artificial Intelligence-Enabled Cellular Networks: A Critical Path to Beyond-5G and 6G.** *IEEE Wireless Communications*, 27(2):212–217, 2020.
- [58] SHAHRAKI, A.; ABBASI, M.; PIRAN, M. J.; TAHERKORDI, A. **A Comprehensive Survey on 6G Networks: Applications, Core Services, Enabling Technologies, and Future Challenges**, 2021.
- [59] SHEN, X.; GAO, J.; WU, W.; LI, M.; ZHOU, C.; ZHUANG, W. **Holistic Network Virtualization and Pervasive Network Intelligence for 6G.** *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 24(1):1–30, 2022.
- [60] TALEB, T. **White paper on 6G networking**, 2020. Publisher: Oulu : University of Oulu,.
- [61] VISWANATHAN, H.; MOGENSEN, P. E. **Communications in the 6G Era.** *IEEE Access*, 8:57063–57074, 2020.
- [62] WANG, C.-X.; YOU, X.; GAO, X.; ZHU, X.; LI, Z.; ZHANG, C.; WANG, H.; HUANG, Y.; CHEN, Y.; HAAS, H.; THOMPSON, J. S.; LARSSON, E. G.; RENZO, M. D.; TONG, W.; ZHU, P.; SHEN, X.; POOR, H. V.; HANZO, L. **On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies, and Testbeds.** *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 25(2):905–974, 2023.
- [63] WANG, J.; ZHOU, Y.; WANG, B. **Design of 6G Space-Ground Integrated Network Architecture Based on Ground Core Network.** In: *2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, p. 1250–1255, 2023.
- [64] WANG, X.; SUN, T.; DUAN, X.; WANG, D.; LI, Y.; ZHAO, M.; TIAN, Z. **Holistic service-based architecture for space-air-ground integrated network for 5G-advanced and beyond.** *China Communications*, 19(1):14–28, 2022.
- [65] WU, W.; CHEN, N.; ZHOU, C.; LI, M.; SHEN, X.; ZHUANG, W.; LI, X. **Dynamic RAN Slicing for Service-Oriented Vehicular Networks via Constrained Learning.** *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(7):2076–2089, 2021.
- [66] XIA, Y.; LI, J.; WANG, X.; WEN, X. **An Edge Cloud Resource Scheduling Mechanism in the Space-Air-Terrestrial-Sea Integrated Network.** In: *2023 15th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*, p. 188–193, 2023.

- [67] XU, J.; KISHK, M. A.; ALOUINI, M.-S. **Space-Air-Ground-Sea Integrated Networks: Modeling and Coverage Analysis**. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 22(9):6298–6313, 2023.
- [68] YAZAR, A.; DOĞAN-TUSHA, S.; ARSLAN, H. **6G Vision: An Ultra-Flexible Perspective**.
- [69] YOU, X.; WANG, C.-X.; HUANG, J.; GAO, X.; ZHANG, Z.; WANG, M.; HUANG, Y.; ZHANG, C.; JIANG, Y.; WANG, J.; OTHERS. **Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts**. *Science China Information Sciences*, 64(1):1–74, 2021.
- [70] YU, C.; LI, J.; ZHANG, C.; LI, H.; HE, R.; LIN, B. **Maritime Broadband Communications: Applications, Challenges and an Offshore 5G-virtual MIMO Paradigm, year=2020**. In: *2020 IEEE Intl Conf on Parallel Distributed Processing with Applications, Big Data Cloud Computing, Sustainable Computing Communications, Social Computing Networking (ISPA/BDCloud/SocialCom/SustainCom)*, p. 1286–1291.
- [71] YU, Q.; REN, J.; ZHOU, H.; ZHANG, W. **A cybertwin based network architecture for 6G**. In: *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, p. 1–5, 2020.
- [72] ZHANG, Z.; XIAO, Y.; MA, Z.; XIAO, M.; DING, Z.; LEI, X.; KARAGIANNIDIS, G. K.; FAN, P. **6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies**. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 14(3):28–41, 2019.
- [73] ZIEGLER, V.; VISWANATHAN, H.; FLINCK, H.; HOFFMANN, M.; RÄISÄNEN, V.; HÄTÖNEN, K. **6G Architecture to Connect the Worlds**. *IEEE Access*, 8:173508–173520, 2020.
- [74] ZONG, B.; FAN, C.; WANG, X.; DUAN, X.; WANG, B.; WANG, J. **6G Technologies: Key Drivers, Core Requirements, System Architectures, and Enabling Technologies**. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 14(3):18–27, 2019.

Colaboração em projeto e Publicações

Este Apêndice é dedicado à documentação e análise das colaborações em projetos e publicações realizadas no âmbito deste estudo, cobrindo o período de 2021 a 2024. O apêndice detalha as parcerias estratégicas e os resultados acadêmicos gerados a partir dessas colaborações.

A.1 Colaboração: Projeto Brasil 6G

A Figura A.1 ilustra o envolvimento colaborativo no Projeto Brasil 6G, destacando as interações entre instituições acadêmicas, empresas e agências governamentais. A colaboração busca promover a pesquisa e o desenvolvimento em tecnologias de comunicação de sexta geração no Brasil, enfatizando a importância da sinergia entre diferentes setores para o avanço tecnológico.

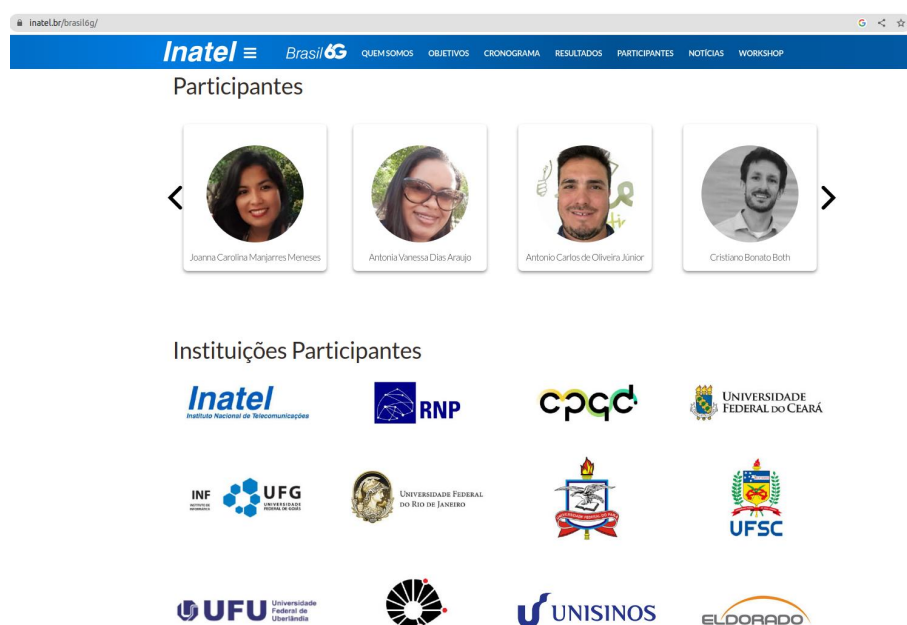


Figura A.1: Colaboração: Projeto Brasil 6G. [12]

A.1.1 Publicações: Periódico Internacional

A Figura A.2 sublinha o trabalho colaborativo realizado em 2023 dentro do projeto Brasil6G: **A Detailed Relevance Analysis of Enabling Technologies for 6G Architectures**, focalizando na análise detalhada da relevância das tecnologias habilitadoras para as arquiteturas de redes 6G. O estudo contribuiu com *insights* valiosos para a definição de prioridades tecnológicas e estratégicas na implementação de redes 6G adaptadas às necessidades específicas do Brasil.



Figura A.2: Publicação em Colaboração: Brasil6G - 2023, [51]

A.2 Publicações: Anais de eventos nacionais

Esta seção documenta as contribuições do estudo apresentadas nas edições I, II e IV do Workshop de Redes 6G (W6G), ocorridas durante o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC) no período de 2021 a 2024.

A.2.1 Primeiro Workshop de Redes 6G (I W6G)

A Figura A.3 destaca a publicação resultante do primeiro workshop sobre redes 6G (W6G I): **Uma visão de arquitetura para redes 6G**, realizado em 2021. O evento reuniu especialistas de diversas áreas para um diálogo construtivo sobre as visões para o ecossistema de redes móveis 6G, os avanços iniciais, os desafios e as oportunidades de desenvolvimento.

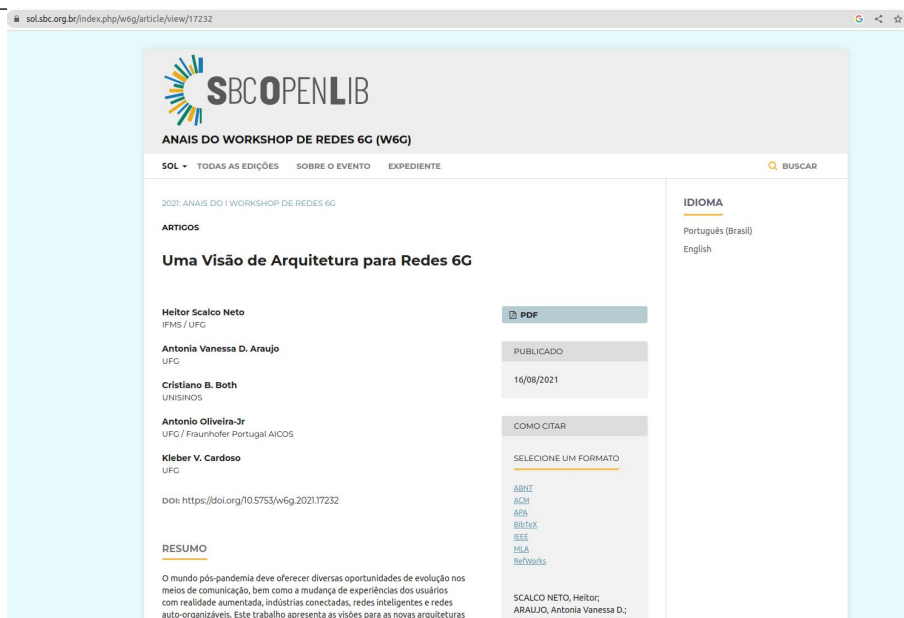


Figura A.3: Publicação: W6G I - 2021, [48]

A.2.2 Segundo Workshop de Redes 6G (II W6G)

A Figura A.4 apresenta o a publicação resultante do segundo workshop sobre redes 6G (W6G II), **Desafios no desenho do escopo arquitetônico 6G**, em 2022. neste evento o estudo concentrando-se nos desafios enfrentados no desenho do escopo arquitetônico para redes 6G, abordando problemas técnicos e conceituais, contribuindo para a discussão e o refinamento das estruturas arquitetônicas necessárias para uma implementação eficaz das redes 6G.



Figura A.4: Publicação: W6G II - 2022, [8]

