

Digital Twins: habilitador tecnologico para Redes 6G

**Antonia Vanessa D. Araujo^{1,2}, Rayane Araujo Lima¹,
Renan R. de Oliveira^{1,3} e Antonio Oliveira-Jr^{1,4}**

¹Instituto de Informática – Universidade Federal de Goiás (UFG)
Goiânia – GO – Brasil

²Faculdade de Imperatriz- Facimp Wyden
Imperatriz – MA – Brasil

³Instituto Federal de Goiás (IFG)
Goiânia – Goiás – Brasil

⁴Fraunhofer Portugal AICOS
Porto – Portugal

{rayane.lima, antoniavanessa}@discente.ufg.br
renan.rodrigues@ifg.edu.br, antoniojr@ufg.br

Abstract. *6G mobile networks promise to revolutionize the interaction between the physical and digital worlds, but they are still in their early stages and require a holistic architecture capable of incorporating both evolutionary and revolutionary technologies to meet expected performance requirements. Through a bibliographic analysis, we propose a comprehensive architectural design for 6G networks in 3D, integrating Digital Twins technology, where we explore the synergy of this integration and its challenges.*

Resumo. *As redes móveis 6G prometem revolucionar a interação entre o mundo físico e digital, mas ainda estão em estágio inicial e requerem uma arquitetura holística capaz de incorporar tecnologias tanto evolucionárias quanto revolucionárias para atender aos requisitos de desempenho esperados. Por meio de uma análise bibliográfica, propomos um design arquitetônico abrangente para redes 6G em 3D, integrando a tecnologia de Digital Twins, onde exploramos a sinergia dessa integração e seus desafios.*

1. Introdução

As redes móveis evoluíram através de várias gerações. A próxima etapa é a 6ª geração (6G), que promete ainda mais velocidade, baixa latência, maior confiabilidade e capacidade de conectar uma ampla variedade de dispositivos e aplicações, além de fornecer conectividade em três dimensões (3D), abrangendo não apenas superfícies terrestres, mas também o espaço aéreo e subaquático [Neto et al. 2021, Wang et al. 2023].

Para habilitar a ampla gama de casos de uso versionados, a tecnologia 6G precisa atender a requisitos diversificados que não seriam viáveis com tecnologias sem fio anteriores. Nesse contexto, várias tecnologias de ponta surgiram como facilitadores-chave para os casos de uso da 6G, destacando-se a tecnologia de Digital Twins (DT) como um candidato altamente promissor para facilitar a concepção, análise e operação das redes sem fio 6G [Kuruvatti et al. 2022, Lin et al. 2023].

Dentro deste contexto, propomos um desenho arquitetônico de escopo universal para rede 6G, no qual exploramos o potencial e os desafios da tecnologia DT em relação aos requisitos visionados para o ecossistema 6G. Embora o estudo esteja em fase teórica, ou seja, não tenhamos resultados concretos, nossa abordagem visa a convergência entre as arquiteturas de DT e 6G, aproveitando a sinergia e otimização dos habilitadores tecnológicos 6G para criar uma rede altamente eficiente e adaptável.

2. O escopo da arquitetura 6G

A padronização da arquitetura para redes 6G encontra-se em uma fase inicial, abertas a estudos e contribuições que possam superar as limitações já identificadas ou previstas na geração 5G/B5G. Essas limitações englobam requisitos como cobertura global extrema, 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, além de inteligência onipresente [Flagship 2018, Hexa-X 2021, Jiang et al. 2021].

No entanto, o escopo 6G enfrenta desafios que vão desde a viabilização das tecnologias visionadas como revolucionárias, que deverão suportar as principais inovações previstas para o 6G até a integração de todos esses requisitos e tecnologias em um único desenho arquitetônico capaz de proporcionar conectividade onipresente em uma rede inteligente. Portanto, essa rede deve atender não apenas às premissas dos cenários de uso atuais, mas também às previsões futuras, considerando a fase inicial das pesquisas em 6G [Neto et al. 2021, Araújo and Júnior 2022].

2.1. Gêmeos digitais

A tecnologia DT encapsula vários objetos físicos, suas interações, ambiente e outros recursos no nível desejado, constituindo um gêmeo físico *Physical Twin* (PT), além de estabelecer uma comunicação bidirecional entre o DT e o mundo físico capturando seus atributos na representação digital quase em tempo real [Kuruvatti et al. 2022]. De acordo com a Figura 1, um sistema DT é constituído por três pilares, o físico, o virtual/digital e a ligação entre eles.

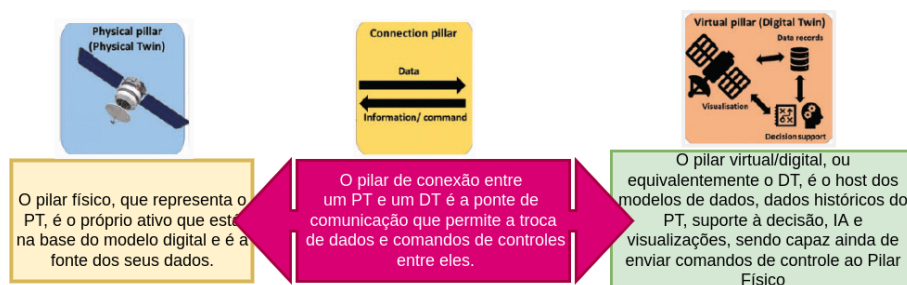


Figura 1. Pilares de um sistema DT [Ahmadi et al. 2021].

O DT pode realizar tarefas de armazenamento, modelagem, aprendizado, análise de dados, previsão, simulação, etc., e fornecer o *feedback* ao PT. Assim, várias tarefas maçantes e não triviais poderiam ser executadas de maneira mais rápida, eficiente e econômica usando um DT [Kuruvatti et al. 2022].

Os objetos gêmeos podem ser implantados em dispositivos finais, borda ou nuvem. Dependendo da implantação do gêmeo digital, consegue-se dividir a arquitetura do gêmeo em três categorias, sendo a primeira baseada em borda, a segunda baseada em nuvem e a terceira baseada em nuvem de borda [Li et al. 2021], conforme descrito na Tabela 1.

Categoria	Descrição
Baseada em borda	São os mais adequados para aplicativos 6G com restrição de latência (URLLC massiva).
Baseada em nuvem	Podem ser usados para aplicações que requerem grandes esforços computacionais.
Baseada em nuvem de borda	Podem usar ambos os recursos de borda (baixa latência) e nuvem (alto poder computacional).

Tabela 1. Tipos de arquitetura de DT [Li et al. 2021]

2.2. Convergência Tecnológica

A convergência tecnológica entre DT e redes móveis 6G deve impulsionar a próxima revolução na conectividade e na capacidade de simulação em tempo real. Isso terá um impacto profundo em uma ampla gama de setores, melhorando a eficiência operacional, a tomada de decisões e a experiência do usuário em uma variedade de aplicativos e serviços, essa convergência entre DT e 6G ocorre em vários aspectos, tais como:

- **Latência ultrabaixa:** A latência extremamente baixa das redes 6G permitirá aos DTs reagir instantaneamente às mudanças no mundo real, o que é fundamental em aplicações críticas, como manufatura avançada e saúde.
- **Velocidade de dados:** A alta velocidades de dados sem redes 6G permitirá a transferência rápida de grandes volumes de dados entre sistemas de DTs distribuídos, melhorando a precisão das simulações e análises.
- **Conectividade massiva:** O suporte a densidade de conexões, viabilizará a coleta de dados em tempo real para alimentar os DTs, que podem representar sistemas complexos com múltiplos componentes interconectados.
- **Aplicações avançadas:** A convergência de gêmeos digitais e 6G permitirá aplicações avançadas em áreas como cidades inteligentes, saúde, manufatura, realidade virtual/aumentada e muito mais.

2.2.1. Casos de usos e desafios

A maioria dos estudos aborda os casos de uso de Digital Twins de forma geral e abrangente, sem considerar especificamente as aplicações de Digital Twins em telecomunicações. Neste contexto [Lin et al. 2023] afirma que as DTNs podem suportar muitos casos de uso, incluindo,

1. **Simulação e planejamento de rede:** a simulação de rede e o processo de planejamento usando réplicas digitais fisicamente precisas e em grande escala
2. **Operação e gerenciamento de rede:** pode ser usado para criar um drive-test virtual para manter a robustez e resiliência do sistema,
3. **Geração de dados por simulação:** dados sintéticos, obtidas no caso de uso 1, podem ser usadas para complementar dados do mundo real.
4. **Treinamento e inferência de IA:** uma rede neural incorporada em um agente de aprendizagem por reforço profundo (DRL) será continuamente atualizada em resposta ao ambiente provendo o treinamento *on-line* da rede.

5. **Análise hipotética:** embora não seja viável na rede real, as falhas podem ser injetadas deliberadamente no irmão cibernético com a finalidade de gerar um conjunto de dados rico para ML ou outros processos de análise de dados.

Existem muitos desafios associados ao desenvolvimento e incorporação de DTs em aplicações práticas para redes móveis 6G [Khan et al. 2022a]. Alguns desses desafios estão listados abaixo na Tabela 2.

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.

Tabela 2. Desafios da implementação de DT em redes móveis [Khan et al. 2022b].

Neste contexto, destaca-se dois dos principais obstáculos para a implementação de gêmeos digitais em redes aéreas, que incluem a limitação da capacidade energética e a insuficiência do poder computacional dos veículos aéreos não tripulados. A alocação de recursos da rede ar-terra é desafiadora devido à alta mobilidade, grande escala de rede e dispositivos heterogêneos [Lian et al. 2022]. Outro ponto que requer atenção são os desafios técnicos, que devem ser modelados pelas operadoras de telecomunicações [Araújo and Júnior 2022].

Ao considerar o ecossistema 6G, a literatura ainda é muito embrionária em termos de arquiteturas que integrem a tecnologia DT ao desenho das redes. Entretanto, pode ser observado nas publicações a natureza inovadora e disruptiva do DT, além do seu potencial como tecnologia habilitadora para ecossistema 6G, conforme sumarizada na Tabela 3.

Trab. Relacionados	Arquitetura 6G	Cybertwin	Rede 3D	Casos de uso	Sinergia DT e 6G
[Yu et al. 2020]	✓	✓			
[Lu et al. 2021]	✓	✓			
[Li et al. 2021]	✓	✓			
[Lian et al. 2022]	✓	✓	✓		
[Yu et al. 2023]	✓	✓			
[Lin et al. 2023]	✓	✓		✓	
[Gu et al. 2024]		✓			
Nossa Proposta	✓	✓	✓	✓	✓

Tabela 3. Comparação deste trabalho com trabalhos relacionados.

O trabalho de [Yu et al. 2020] apresenta uma arquitetura de rede baseada em Cybertwin, com um modelo de comunicação para substituir o modelo tradicional de ponta

a ponta (*End-to-End* (E2E)). Em [Lu et al. 2021], propõe-se a integração de DTs em redes sem fio (DTWN) de ponta para mitigar a lacuna de recursos entre usuários finais e estações base (BSs), implementando aprendizado federado, habilitada para *blockchain*. Na proposta de [Li et al. 2021], é apresentada uma topologia de rede virtual conjunta, contemplando as nuvens de borda habilitadas para *cybertwin* e a rede core do 6G baseado em RAN (*Radio Access Network*).

Em [Lian et al. 2022], os autores propuseram uma arquitetura de rede ar-terra habilitada para DT, com tarefa de modelagem de DT distribuída em diversos dispositivos terrestres com base no aprendizado federado. Na proposta de [Yu et al. 2023], é apresentado um modelo de rede chamado *Cybertwin Based Cloud Native Networks* (CCNN), que integra a rede de acesso por rádio (RAN), a rede de transporte IP e a rede de centro de dados baseada em nuvem.

Em seu estudo [Lin et al. 2023] apresenta uma visão geral para as redes gêmeas digitais (DTNs), onde apresenta casos de uso proeminentes e seus requisitos de serviço, além de apresentar e discutir os aspectos de design de uma arquitetura de referência para DTNs. Por fim, em [Gu et al. 2024], é proposto um framework de computação de borda que combina a tecnologia *cybertwin* com as superfícies inteligentes reconfiguráveis (RISs) para otimizar a *offloading* de tarefas e a alocação de recursos em redes da Internet de Tudo (IoE).

3. Arquitetura 6G e Digital Twin

Expandimos a visão da arquitetura *Cybertwin*, conforme Figura 2, integrando-a a evolução visionada para a padronização do *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) para a rede 5G/B5G a *Service-Based Architecture* (SBA).

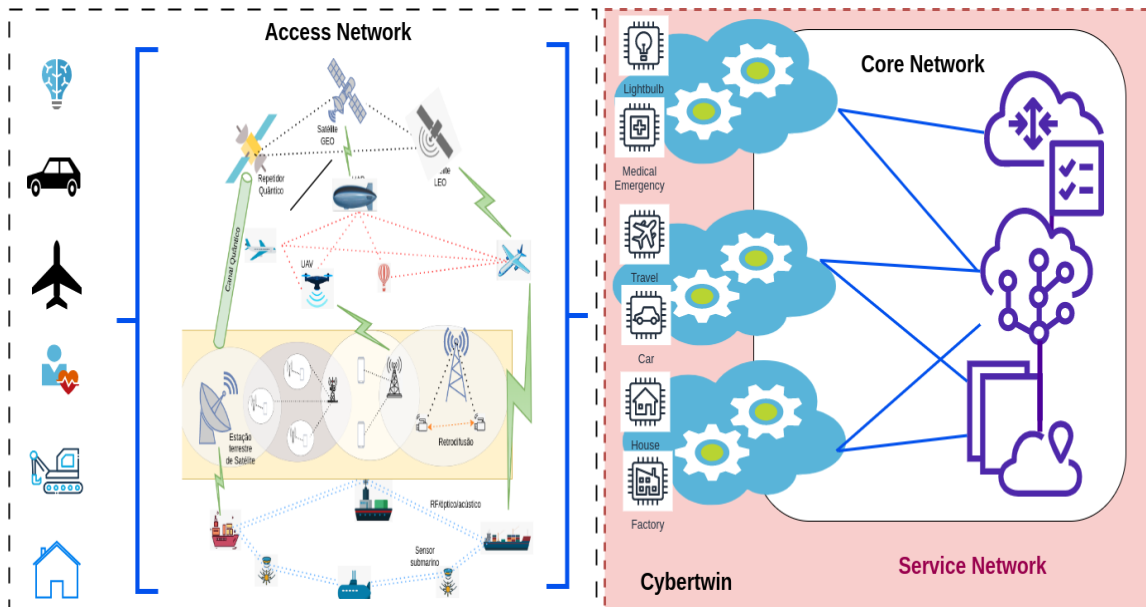


Figura 2. Comunicação onipresente, escopo Universal.

Considerando que a nova arquitetura de redes móveis, a exemplo das redes 5G/B5G, deve ser baseada em serviços (SBA) e fortemente embasados nos fundamentos tecnológicos de *cloudization*, fatiamento profundo, softwarização, virtualização e

inteligentização da rede [Neto et al. 2021], abordamos a divisão do escopo da proposta em dois blocos principais: RAN e *Core*.

O primeiro bloco, **Rede de Acesso** (*Access Network*), integra os *User Equipments* (UEs) sejam eles físicos ou aplicações, a infraestrutura de comunicação de rede não terrestre - NTN, composta pela rede espacial e pela rede aérea, a estrutura de rede terrestre - NT e Marinha/Submarina. Ela é responsável por prover a conexão entre os fins e seus respectivos DTs na nuvem de borda, além de receber e encaminhar as solicitações de acesso e serviço no *uplink*, e entregar dados/conteúdos aos usuários no *downlink*.

A rede de acesso de escopo universal, ou seja, ampla cobertura, integra as redes espacial, composta por satélites geoestacionários (GEO) e Satélites de baixa altitude (LEO), rede aérea, constituída de plataformas em altas altitudes (HAPS) e Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANTS) e UAVs e a rede marinha/Submarina que integra navios de grande porte, plataformas de petróleo, embarcações em geral, veículos submarinos autônomos (AUVs) e sensores à infraestrutura de rede terrestre, criando uma infraestrutura única que permite uma cobertura mais ampla e uma comunicação mais robusta em diferentes cenários e ambientes.

No Segundo bloco, **Rede Principal** (*Core Network*), integra diversas nuvens centrais, conectadas entre si por links ópticos de alta velocidade, fornecendo recursos de computação, cache e comunicação para os fins como um serviço de infraestrutura de rede, que é otimizada pela camada de Nuvens de borda.

Entre o primeiro e o segundo bloco temos a camada de Nuvens de borda, onde propomos a implementação da arquitetura de DT baseado em nuvem de borda, que otimiza a comunicação entre os fins e a Nuvem principal. Esta opção se justifica devido à sua capacidade de oferecer uma maior quantidade de informações sobre o usuário final, tornando-a mais adequada para lidar eficazmente com as demandas de mobilidade, ao contrário de uma nuvem remota, como destacado em [Khan et al. 2022a].

Na implementação dos DTs, optamos pela abordagem de *Cybertwin* [Yu et al. 2020], na qual o *Cybertwin* é considerado o cérebro de toda a arquitetura, fornecendo política de acesso e orquestração de recursos, que detém a informação global e toma decisões. Nessa proposta o *cybertwin* é responsável por conectar as extremidades ou dispositivos finais, as nuvens de borda e ao Core por meio de uma arquitetura de Serviços centrada em Nuvens.

Para Araujo [Araújo and Júnior 2022] um desenho arquitetônico deve considerar além do objetivo a correlação entre os cenários de uso, requisitos de desempenho e tecnologias que habilitem essas aplicações. Neste contexto, a Tabela 4 apresenta algumas das principais tecnologias habilitadoras que embasam as visões de requisitos de desempenho para o ecossistema 6G. A partir dela é possível analisar como essas tecnologias convergem com a tecnologia DT, criando uma sinergia positiva dessa abordagem na arquitetura 6G.

4. Conclusão

Concentramos nossos esforços na tecnologia de nuvem integrada, fundamentada no *cybertwin*, como habilitadora dessa abordagem de escopo universal, explorando a convergência entre as tecnologias impulsionadoras do ecossistema 6G e a arquitetura de DT.

Habilitador	Relação entre o Habilitador e tecnologia DT
Comunicação Ultra-confiável e Latência Ultra Baixa (URLLC)	Essa tecnologia é fundamental para assegurar a comunicação em tempo real entre os gêmeos digitais e os sistemas físicos correspondentes, garantindo uma latência extremamente baixa e uma transmissão de dados confiável.
Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina (ML)	IA e ML desempenham um papel crucial no processamento e análise dos dados coletados pelos gêmeos digitais. Algoritmos avançados são usados para prever comportamentos futuros, otimizar operações e oferecer insights valiosos para aprimorar os sistemas físicos.
Computação em Nuvem Edge	A computação em nuvem edge possibilita o processamento de dados em tempo real próximo à fonte dos dados, reduzindo a latência e melhorando a eficiência na comunicação entre os gêmeos digitais e os sistemas físicos.
Redes Heterogêneas e Densificadas	As redes 6G integrarão uma combinação de redes de comunicação, incluindo redes terrestres, satélites e redes de drones. Isso proporcionará uma cobertura mais ampla e eficiente para apoiar a comunicação entre gêmeos digitais distribuídos.
Redes Definidas por Software (SDN) e Funções de Rede Virtualizadas (NFV)	Essas tecnologias permitem uma flexibilidade e adaptabilidade significativas na configuração e gerenciamento das redes 6G, facilitando a alocação de recursos de rede conforme necessário para suportar as demandas dinâmicas dos gêmeos digitais.
Redes Quânticas	As redes quânticas oferecem uma segurança de comunicação excepcional, sendo críticas para garantir a integridade e a privacidade dos dados transmitidos entre os gêmeos digitais e sistemas físicos.
Redes de Terahertz (THz) e Comunicação Baseada em Luz	Essas tecnologias fornecem uma capacidade de comunicação extremamente alta e velocidades de transmissão de dados inigualáveis, essenciais para a transferência eficiente de grandes volumes de dados entre gêmeos digitais em tempo real.

Tabela 4. Habilitadores tecnológicos 6G x Tecnologia de *Digital Twins*

O estudo apresenta um desenho arquitetônico de escopo universal para redes 6G, habilitada pela tecnologia de DT com uma abordagem de *Cybertwin*, com o objetivo de apoiar serviços sob demanda, aprimorar a eficiência da rede e a integração de redes heterogêneas de várias camadas, viabilizando uma rede ampla inteligente e onipresente.

Abordamos, embasados em pesquisa bibliográfica, o potencial sinérgico entre a tecnologia DT e a arquitetura visinada para o 6G, além dos principais habilitadores previstos para o ecossistema 6G e sua prontidão para futuras implementações.

Apesar de ser altamente promissora, a aplicação da tecnologia de DT nas telecomunicações ainda está em sua fase inicial e enfrenta desafios significativos que requerem discussões detalhadas nas próximas etapas de desenvolvimento.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Projeto Brasil 6G, financiado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) em parceria com a Rede Nacional de Pesquisa (RNP).

Referências

- Ahmadi, H., Nag, A., Khar, Z., Sayrafian, K., and Rahardja, S. (2021). Networked Twins and Twins of Networks: An Overview on the Relationship Between Digital Twins and 6G. *IEEE Communications Standards Magazine*, 5(4):154–160. Conference Name: IEEE Communications Standards Magazine.
- Araújo, A. and Júnior, A. O. (2022). Desafios no desenho do escopo arquitetônico 6G. In *Anais do II Workshop de Redes 6G*, pages 1–6, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Flagship, G. (2018). 6G Flagship – More than wireless. <https://www.6gflagship.com/>.
- Gu, X., Zhang, G., Duan, W., Dang, S., Wen, M., and Ho, P.-H. (2024). Computing offloading for ris-aided internet of everything: A cybertwin version. *IEEE Internet of Things Journal*, pages 1–1.

- Hexa-X (2021). Main - Hexa-X. <https://hexa-x.eu/>.
- Jiang, W., Han, B., Habibi, M. A., and Schotten, H. D. (2021). The road towards 6G: A comprehensive survey. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2:334–366.
- Khan, L. U., Saad, W., Niyato, D., Han, Z., and Hong, C. S. (2022a). Digital-twin-enabled 6G: Vision, architectural trends, and future directions. *IEEE Communications Magazine*, 60(1):74–80.
- Khan, L. U., Saad, W., Niyato, D., Han, Z., and Hong, C. S. (2022b). Digital-Twin-Enabled 6G: Vision, Architectural Trends, and Future Directions. *IEEE Communications Magazine*, 60(1):74–80. Conference Name: IEEE Communications Magazine.
- Kuruvatti, N. P., Habibi, M. A., Partani, S., Han, B., Fellan, A., and Schotten, H. D. (2022). Empowering 6G Communication Systems With Digital Twin Technology: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*, 10:112158–112186. Conference Name: IEEE Access.
- Li, J., Shi, W., Ye, Q., Zhang, S., Zhuang, W., and Shen, X. (2021). Joint virtual network topology design and embedding for cybertwin-enabled 6G core networks. 8(22):16313–16325. Conference Name: IEEE Internet of Things Journal.
- Lian, S., Zhang, H., Sun, W., and Zhang, Y. (2022). Lightweight Digital Twin and Federated Learning with Distributed Incentive in Air-Ground 6G Networks. In *2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring)*, pages 1–5. ISSN: 2577-2465.
- Lin, X., Kundu, L., Dick, C., Obiodu, E., Mostak, T., and Flaxman, M. (2023). 6g digital twin networks: From theory to practice. *IEEE Communications Magazine*, 61(11):72–78.
- Lu, Y., Huang, X., Zhang, K., Maharjan, S., and Zhang, Y. (2021). Low-Latency Federated Learning and Blockchain for Edge Association in Digital Twin Empowered 6G Networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(7):5098–5107. Conference Name: IEEE Transactions on Industrial Informatics.
- Neto, H. S., Araujo, A. V. D., Both, C. B., Oliveira-Jr, A., and Cardoso, K. V. (2021). Uma visão de arquitetura para redes 6g. In *Anais do I Workshop de Redes 6G*, pages 31–36. SBC.
- 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., and Hanzo, L. (2023). On the road to 6G: Visions, requirements, key technologies, and testbeds. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 25(2):905–974.
- Yu, Q., Liang, D., Qin, M., Chen, J., Zhou, H., Ren, J., Li, Y., Wu, J., Gao, Y., and Zhang, W. (2023). Cybertwin based cloud native networks. *Journal of Communications and Information Networks*, 8(3):187–202.
- Yu, Q., Ren, J., Zhou, H., and Zhang, W. (2020). A cybertwin based network architecture for 6G. In *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, pages 1–5.