

Capítulo

4

Aplicações Críticas Habilitadas pela Tecnologia 5G: Oportunidades, Tendências e Desafios

Francisco Carvalho Neto (UFF), Alessandro Aparecido Milan (UFF),
Natalia Castro Fernandes (UFF) e Alberto G. Guimarães (UFF)

Abstract

This chapter presents the key critical applications that envision 5G as an enabler, discussing the essential concepts, key requirements, challenges, research trends, and technologies that make 5G meet the needs of these applications. Critical applications stand out because they are crucial for the safety and development of productive sectors and have strict performance requirements that, if not met, can cause social or environmental catastrophes. The chapter seeks to present the main critical applications made possible by 5G, discussing the enabling technologies described in releases 15, 16, 17, and 18 of 5G, in addition to discussing the challenges related to each technology and the research carried out internationally related to the applications and 5G. Furthermore, it discusses the main research trends and challenges associated with emerging technologies for 6G network development and deployment.

Resumo

Este capítulo apresenta as principais aplicações críticas que vislumbram a rede 5G como habilitadora, discutindo os conceitos essenciais, principais requisitos, desafios, tendências de pesquisa e tecnologias que fazem o 5G atender às necessidades dessas aplicações. As aplicações críticas se destacam por serem cruciais para a segurança e desenvolvimento de setores produtivos e possuem requisitos de desempenho estritos que, caso não sejam atendidos, podem provocar catástrofes sociais ou ambientais. O capítulo busca apresentar as principais aplicações críticas viabilizadas pelo 5G, discutindo as tecnologias habilitadoras descritas nos releases 15, 16, 17 e 18 do Projeto de Parceria de Terceira Geração - Third Generation Partnership Project (3GPP), além de discutir os desafios relacionados a cada tecnologia e às pesquisas realizadas internacionalmente relacionadas às aplicações críticas e 5G. Ademais, discute as principais tendências e desafios de pesquisa associados a tecnologias em ascensão para o desenvolvimento e implantação da rede 6G.

Este capítulo foi realizado com recursos do CNPq, CAPES e FAPERJ.

4.1. Introdução

As redes móveis de comunicação vêm passando por uma transformação digital resultante de demandas impostas por novas aplicações cada vez mais complexas. Essa evolução melhora o desempenho e garante segurança e qualidade de serviço, possibilitando que novas aplicações sejam desenvolvidas buscando automatizar funções majoritariamente dependentes de ação humana, como dirigir ou realizar uma cirurgia. Historicamente, as principais evoluções nas redes móveis se deram na Rede de Acesso por Rádio - *Radio Access Network* (RAN), responsável pela conexão entre o dispositivo do usuário e a rede interna da operadora de telefonia, ou Núcleo da Rede - *Core Network* (CN). Os avanços tecnológicos que viabilizaram essa evolução permitiram uma melhoria na eficiência da utilização do espectro e o desenvolvimento de novas técnicas de acesso múltiplo ao meio. Além disso, as faixas de frequência e largura de banda foram ampliadas, possibilitando uma maior taxa de transferência de dados. Entretanto, com a implementação de novos serviços atendidos pelas aplicações móveis, novos requisitos de Qualidade de Serviço - *Quality of Service* (QoS) - passaram a ser exigidos. Estes novos requisitos estão relacionados à latência da rede, à densidade de dispositivos a serem atendidos por km² e à taxa de transferência de dados ofertada. Logo, para suportar o atendimento de tais aplicações é necessário uma evolução não só na RAN, mas uma mudança no tratamento das solicitações no CN, para que a rede possa prover o suporte aos serviços sem violar os diferentes requisitos de QoS. Além disso, uma infraestrutura que atenda a diversas aplicações deve ser flexível e de fácil gerenciamento, visto que os recursos físicos são limitados e devem ser utilizados de maneira eficiente.

As prominentes redes 5G, por exemplo, apresentam modificações expressivas na RAN e CN. Dentre as principais evoluções da RAN pode-se destacar uma melhoria na utilização do espectro, ou seja, o aumento da eficiência espectral com o aperfeiçoamento da forma de onda transmitida, o aperfeiçoamento de técnicas de acesso múltiplo ao meio, e uma densificação das Estações Rádio Base, visando aumentar a vazão de transmissão e o número de dispositivos por km² atendidos por uma mesma antena [Shaik e Malik, 2021]. Já no Núcleo da Rede 5G – 5G CN –, há uma mudança completa na arquitetura, que passa a ser orientada a serviços e a utilizar com mais eficiência os recursos computacionais e de comunicação disponíveis, promovendo maior flexibilidade no atendimento de requisições. O objetivo dessa mudança é prover melhor atendimento às necessidades específicas de cada aplicação e utilizar de forma eficiente e compartilhada os recursos disponíveis. Isso só é possível com o uso de equipamentos genéricos, que não executem funções específicas na rede. Deste modo, as redes 5G disponibilizam recursos computacionais e de comunicação da rede através das Redes Definidas por *Software* - *Software Defined Network* (SDN) aliadas à Virtualização de Funções de Rede - *Network Function Virtualization* (NFV).

O uso das SDNs e da NFV permite que os recursos disponíveis, que antes eram dedicados a serviços específicos, sejam abstraídos e se comportem como recursos genéricos utilizados por qualquer aplicação. Estas funções são digitalizadas e executadas sob *softwares* (por exemplo, máquinas virtuais, *docker*), utilizando com mais eficiência e dinamicidade os recursos da rede [Khorsandroo et al., 2021, Ahvar et al., 2021]. Além disso, o uso das SDNs permite a separação do Plano de Controle e do Plano de Dados, que facilita o gerenciamento e configuração destas redes. As redes 5G ainda implementam a

entrega de conteúdos e de recursos de processamento mais próximos do usuário, através da Computação de Borda de Acesso Múltiplo - *Multi-Access Edge Computing* (MEC), que aproxima do usuário o poder computacional e os arquivos comumente buscados que antes eram disponíveis somente no CN [Spinelli e Mancuso, 2020]. Estas tecnologias possibilitam a implementação de sub-redes específicas para cada aplicação, através do Fatiamento da Rede - *Network Slicing*, separando logicamente uma aplicação da outra, o que facilita o gerenciamento e atendimento de cada requisito heterogêneo de QoS [Barakabitze et al., 2020].

Estes avanços tecnológicos são determinantes para utilizar as redes 5G como principal meio de comunicação e gerenciamento sem fio de diversas aplicações. Dentre essas, as aplicações críticas despertam grande interesse da comunidade científica e da indústria, devido aos requisitos de desempenho estritos, e por abrangerem desde aspectos cotidianos até os mais diversos setores produtivos da sociedade, como agricultura, serviços, indústria e tecnologia. São consideradas críticas as aplicações que dependem fortemente da qualidade e continuidade de serviço oferecidas pela rede de suporte, apresentando requisitos estritos de parâmetros de desempenho, como latência, vazão e confiabilidade da conexão. As redes de suporte disponíveis até o surgimento do 5G não suprem as necessidades dessas aplicações, sendo necessário, portanto, evoluir a tecnologia de rede para a próxima geração.

A implantação das aplicações críticas é desafiadora devido às limitações de grande parte das redes de comunicação ainda hoje utilizadas. A rede LTE 4G, por exemplo, não supre as necessidades de aplicações que precisam de uma alta densidade de dispositivos conectados por km², se limitando a ordem de 10⁵ conexões simultâneas. A rede 4G também não suporta, de maneira satisfatória, aplicações que demandam elevada vazão, uma vez que a vazão média, concebida no *International Mobile Telecommunications - Advanced (IMT-Advanced)*, por dispositivo da rede 4G está limitada a cerca de 10 Mbit/s [Cox, 2020]. Posteriormente no LTE *Advanced PRO* foi possibilitada uma vazão média de 1 Gbps por dispositivo que é difícil de ser alcançada em um cenário com vários dispositivos conectados. Assim, evidencia-se a necessidade de evolução da rede para a próxima geração.

A rede 5G é capaz de atender aos requisitos mínimos das aplicações críticas devido às mudanças na RAN, como a utilização de novas bandas de frequências, novas larguras de faixa para transmissão, e novas técnicas de acesso ao meio pelo uso de *beamforming*, Entrada Múltipla Saída Múltipla - *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) - massivo e a Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) - com variadas numerologias; e mudanças no CN, como a utilização de SDN e NFV. A evolução tecnológica aumenta a complexidade da rede, de forma que é necessário compreender as novas técnicas utilizadas para propiciar o desenvolvimento ou aprimoramento de novas aplicações, e para o gerenciamento daquelas já existentes [Gupta e Jha, 2015].

Historicamente, as principais evoluções nas redes móveis se deram na RAN, responsável pela conexão entre o dispositivo do usuário e a rede interna da operadora de telefonia, ou CN. Entretanto, com a implementação de novos serviços atendidos pelas aplicações móveis, novos requisitos de QoS passaram a ser exigidos. Estes novos requi-

sitos estão relacionados ao tempo de resposta do servidor, à densidade de dispositivos a serem atendidos por km² e à taxa de transferência de dados ofertada. Logo, para suportar o atendimento de tais aplicações, é necessária uma evolução não só na RAN, mas uma mudança no tratamento das solicitações na CN, para que a rede possa prover o suporte aos serviços sem violar os diferentes requisitos de QoS. Além disso, uma infraestrutura que atenda a diversas aplicações deve ser flexível e de fácil gerenciamento, visto que os recursos físicos se tornam escassos e devem ser utilizados de maneira eficiente.

As aplicações críticas permitem, por exemplo, o atendimento de saúde ou realização de cirurgias remotamente (*eHealth*) [Moglia et al., 2022]; o controle ou automação de plantas industriais remotas (plataformas de petróleo) [Maroufkhani et al., 2022]; a implantação de tecnologias de manufatura colaborativa em indústrias (*smart manufacturing*) [Wu et al., 2021a]; o controle e automação de redes elétricas *Smart Grid* [Esenogho et al., 2022]; o fornecimento de conexão e serviços a áreas remotas como zonas rurais e centros de pesquisa isolados [Cavalcante et al., 2021]; o controle de tráfego em ruas e rodovias *Internet of Vehicles* (IoV) e de *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) [Sehla et al., 2022, Wei et al., 2022].

Este capítulo tem como objetivo apresentar as principais aplicações críticas que vislumbram a rede 5G como habilitadora, discutindo como esta rede pode suprir as necessidades dessas aplicações, com apresentação dos principais desafios, soluções e tendências de pesquisa existentes na literatura. Para isso, serão apresentados os conceitos essenciais e principais requisitos técnicos das aplicações críticas, apontando os principais desafios existentes e como a rede 5G pode solucioná-los. A atividade prática foca na realização de simulações de cenários com a implementação de aplicações em redes de 4^a Geração (4G) e 5G possibilitando a comparação de desempenho.

Ao final deste capítulo, espera-se que os participantes sejam capazes de: (i) compreender os desafios associados à implantação de aplicações críticas, (ii) identificar as principais aplicações críticas viabilizadas pelo 5G, (iii) compreender as principais características e tecnologias habilitadoras da rede 5G e porque essa rede habilita a implantação das aplicações críticas, e (iv) identificar e compreender as principais tendências e desafios de pesquisa associados a tecnologias em ascensão para o desenvolvimento e implantação da rede de 6^a Geração (6G).

O restante desse capítulo está organizado como descrito a seguir. Na Seção 4.2, são apresentados os principais conceitos sobre a evolução das redes móveis celulares, padronização, categorias de serviço e *Key Performance Indicators* (KPIs) do 5G. Além disso, são apresentadas as tecnologias habilitadoras do 5G. Na Seção 4.3, são apresentadas as principais aplicações críticas que vislumbram as redes 5G como habilitadoras. Na Seção 4.4, são discutidas as tendências das tecnologias habilitadoras, desafios de pesquisa e é apresentada uma demonstração de simulação para pesquisas em redes 5G. Por fim, a Seção 4.5 traz as considerações finais do texto.

4.2. Conceitos Fundamentais das Redes 5G

Com o passar dos anos, as redes móveis celulares se tornaram o principal meio de comunicação usado no mundo. Estas redes, que antes ofereciam apenas serviços de voz através da comutação de circuitos, agora atendem a aplicações heterogêneas com requi-

sitos distintos de operação. Isso só foi possível com os esforços de setores industriais e acadêmicos, a fim de proporcionar estudos e padronizações que permitissem o desenvolvimento de novas tecnologias e o uso de tecnologias já existentes e consolidadas nos mais diversos setores. As redes 5G se caracterizam como a convergência de tecnologias atuais resultantes das evoluções tecnológicas nas áreas de comunicação e computação. Esta convergência proporciona um avanço expressivo nos indicadores de desempenho das redes 5G.

Dessa forma, esta seção aborda os conceitos fundamentais das redes móveis de 5ª Geração. Ressalta-se brevemente a evolução e os indicadores de desempenho das redes móveis celulares. Em seguida, destaca-se a padronização, as categorias de serviço e os requisitos técnicos das redes 5G. Por fim, são ressaltadas as principais tecnologias que permitem ao 5G atingir os indicadores de desempenho desejados, dentre elas a Computação de Borda de Acesso Múltiplo, as Redes Definidas por *Software* e o Fatiamento de Rede.

4.2.1. Evolução das redes móveis

O avanço nas redes móveis celulares vem impulsionando o surgimento de diversas aplicações desde a implantação da 2ª Geração (2G). Os avanços tecnológicos que viabilizaram essa evolução permitiram uma melhor eficiência espectral e o desenvolvimento de novas técnicas de acesso múltiplo ao meio [Gupta et al., 2019, Arshad et al., 2019]. Além disso, as faixas de frequência e largura de banda foram ampliadas, aumentando a taxa de dados, e foram aplicadas novas técnicas de compartilhamento espectral, melhorando a eficiência no uso de recursos computacionais. Os avanços tecnológicos nessas redes foram determinantes para utilizá-las como principal meio de comunicação e gerenciamento sem fio de aplicações críticas.

A Figura 4.1 apresenta as referências temporais do surgimento das gerações das redes celulares, indicando que, aproximadamente, a cada década, há uma evolução geracional dessas redes.

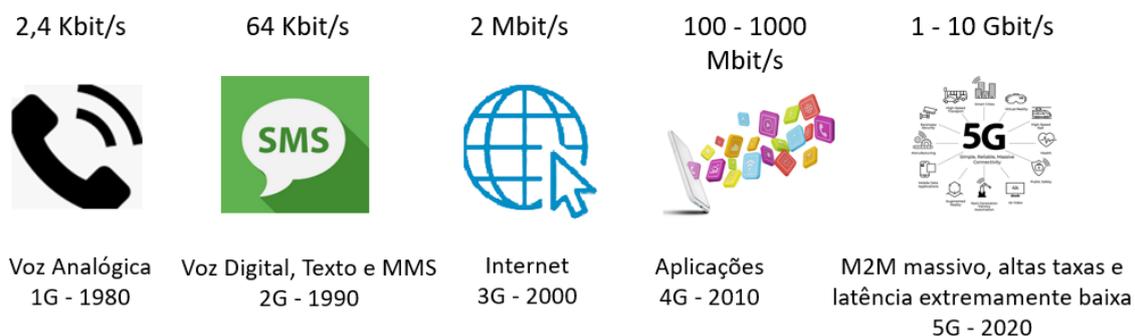


Figura 4.1. Evolução cronológica das gerações de redes celulares. As redes móveis, que antes só ofereciam serviços de voz, hoje suportam diversas aplicações com distintos requisitos de serviço.

As redes móveis de 1ª Geração surgiram nos anos 1980, com transmissão de informação analógica na interface rádio e baseadas na comutação por circuitos. O padrão mais utilizado no mundo foi o norte-americano, chamado de *Advanced Mobile Phone Sys-*

tem (AMPS). Essas redes disponibilizavam apenas serviços de voz, com frequências de operação entre 800 – 900 MHz (bandas "A" e "B"), utilizando modulação em frequência – *Frequency Modulation* (FM) – e com largura de canal de 30 KHz. As redes de 2ª Geração foram lançadas principalmente nos anos 1990 e representaram um grande avanço, sendo um sistema de comunicação digital e com preocupações relacionadas à segurança da interface rádio (enlaces criptografados). Nessa geração, já estavam disponíveis serviços de dados, além dos de voz, com o desenvolvimento do padrão *General Packet Radio Service* (GPRS), também conhecido como 2,5G, e o *Enhanced Data rate for GSM Evolution* (EDGE), usualmente chamado de 2,75G. O GPRS proporcionava taxas de dados até 144 Kbps e, o EDGE, de até 384 Kbps. As redes de 3ª Geração foram projetadas para aumentar a segurança das comunicações e efetuar melhorias nos serviços de voz e dados. Foram lançadas nos anos 2000, utilizando parcialmente a comutação por pacotes e alcançando taxas de até 2Mbps. Uma evolução nessas redes foi permitida através da introdução do padrão *High Speed Packet Access* (HSPA), que é resultado da combinação entre o *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) e o *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA). Posteriormente, o HSPA recebeu aperfeiçoamentos, permitindo um aumento da taxa nominal máxima de transmissão, da capacidade do sistema, e redução da latência, sendo então denominado de HSPA+, o qual é, usualmente, chamado de padrão 3,75G da telefonia móvel. O HSPA proporciona taxas de até 42 Mbps de *downlink* e 11,5 Mbps de *uplink* em um canal de 5 MHz [De Alwis et al., 2021, Shaik e Malik, 2021].

O início da implantação do HSPA coincide com o aparecimento dos *smartphones* com mais recursos e aplicativos. Em paralelo, em 2008, a União Internacional de Telecomunicações - *International Telecommunications Union* (ITU) - publicou os requisitos para o IMT-Advanced, que estabelece os níveis de desempenho da rede a serem atingidos no padrão de 4ª geração de redes móveis. A Evolução a Longo Prazo - *Long-Term Evolution* (LTE), padrão cujo desenvolvimento teve como objetivo atender ao IMT-Advanced e que foi em grande parte coordenado pelo 3GPP, tornou-se amplamente dominante. O LTE foi desenvolvido de forma a otimizar a comunicação de dados. Nele, pela primeira vez em redes móveis, a comutação é totalmente por pacotes e as chamadas de voz acontecem preferencialmente por comutação IP, através da funcionalidade conhecida como *Voice over LTE* (VoLTE). Ao longo dos anos, foram implementados aperfeiçoamentos ao LTE, como a agregação de portadora - *Carrier Aggregation* (CA), resultando nos padrões LTE *Advanced* e LTE *Advanced Pro* (usualmente denominados de padrões 4,5G e 4,75G respectivamente), com capacidade de transmissão aumentada em relação à primeira versão do LTE. Além disso, no LTE *Advanced Pro* as possibilidades de comunicação entre máquinas é expandida, sendo um marco importante do *roadmap* desta forma de comunicação que viria a se consolidar no 5G [Cox, 2020].

Entretanto, a rede 4G não supre as necessidades de aplicações que precisam de uma alta densidade de dispositivos conectados por km². Além disso, essa rede não suporta aplicações que demandam elevada vazão, alcançando no máximo 100 Mbit/s. Cabe observar que, apesar de a vazão média de pico por dispositivo conectado à rede 4G poder chegar, conceitualmente no LTE *Advanced Pro*, a 1 Gbit/s, ela não é alcançada em um ambiente densamente conectado. Assim, evidencia-se a necessidade de evolução da rede para a próxima geração. A rede 5G é capaz de atender aos requisitos mínimos das aplicações críticas devido ao aperfeiçoamento da RAN e à implementação de uma nova

arquitetura no CN.

Em 2012, a *International Telecommunications Union - Radiocommunication Sector* (ITU-R) deu início ao programa IMT-2020, que desencadeou atividades de pesquisa, no mundo inteiro, para a concepção de redes móveis de 5ª geração. De acordo com a visão estabelecida, os sistemas IMT-2020 deveriam ampliar a capacidade e funcionalidades previstas nos objetivos do IMT-Advanced, conforme mostrado na Figura 4.2. Especificamente, os sistemas da próxima geração deveriam suportar aplicativos de baixa a alta mobilidade, e uma ampla gama de taxas de dados, de acordo com os requisitos do usuário e do serviço em vários cenários de utilização. Além disso, deveriam dispor de recursos para aplicativos multimídia de alta qualidade em uma ampla gama de serviços e plataformas, proporcionando uma melhoria significativa no desempenho e qualidade de serviço.

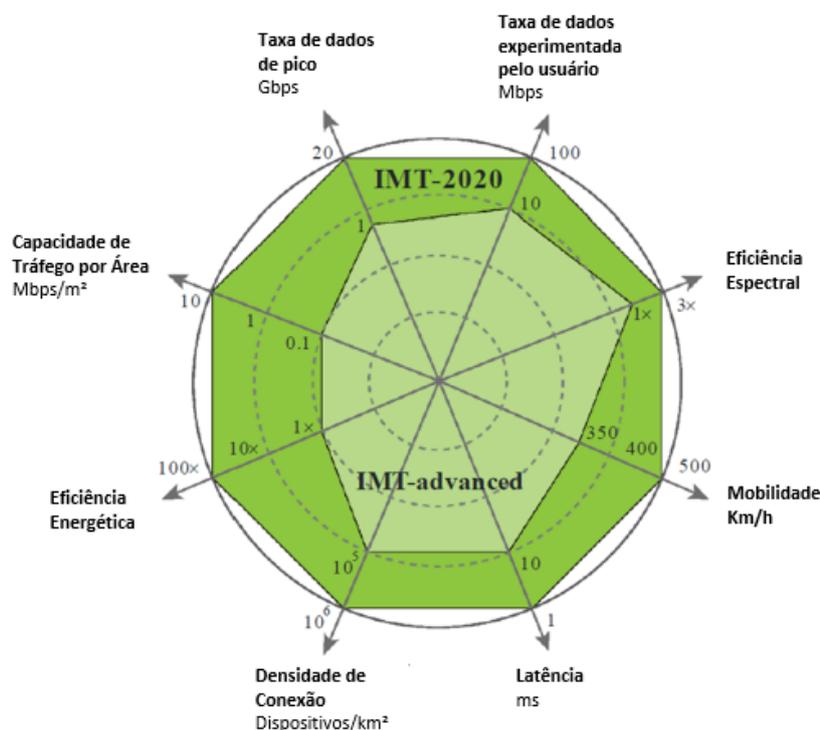


Figura 4.2. Comparação entre os indicadores de desempenho das redes móveis 4G (IMT-Advanced) x 5G (IMT-2020). Avanços expressivos na taxa de dados, densidade de dispositivos conectados e eficiência espectral e energética são resultado dos avanços tecnológicos implementados nas redes móveis. Adaptado de [ITU-R, 2015b]

Após a definição e refinamento do programa IMT-2020, o 3GPP, órgão encarregado de desenvolver as especificações técnicas para o sistema aderente ao IMT-2020, iniciou, em 2015, o trabalho gradual de definição das tecnologias que deveriam compor este novo sistema. O *Release 15* do 3GPP, finalizado em junho de 2019, está associado à primeira fase das especificações 5G que definem características básicas desses sistemas, e o *Release 16* especifica a segunda fase das especificações, definindo recursos adicionais que, combinados com os da primeira fase, satisfazem aos requisitos principais do

IMT-2020.

A implantação do 5G vem sendo realizada em dois modos possíveis: não autossuficiente - *Non-Standalone* (NSA), no qual o 5G aproveita parte da infraestrutura (principalmente o CN) do 4G para ser implementado; e o autossuficiente - *Standalone* (SA), no qual a rede 5G é implementada independentemente da rede 4G existente. O 5G SA apresenta desempenho melhor que o 5G NSA, mas o último é uma boa opção para as operadoras fazerem a migração para a nova geração com custos diluídos ao longo do tempo.

Na RAN da rede 5G, as principais inovações compreendem: (i) o uso de novas bandas de frequência (bandas sub-6 GHz e de ondas milimétricas) com larguras de faixa significativamente ampliadas; (ii) novas formas de onda utilizando a técnica OFDM com numerologia adaptativa e um novo e mais eficiente código (*Low-Density Parity-Check* (LDPC)) para controle de erro na camada física; (iii) técnicas multi antenas expandidas (MIMO massivo), que aumentam a eficiência espectral e permitem a implantação de técnicas de *beamforming* com multiplexação espacial [Shaik e Malik, 2021, Cox, 2020]. Já no CN, há mudança completa na arquitetura, sendo baseada em serviços, fatiamento de rede e NFV. Além disso, a Computação de Borda de Acesso Múltiplo - MEC - é implementada para fornecer processamento mais próximo ao usuário, reduzindo assim o tempo de resposta pela rede de suporte [Plachy et al., 2021a]. Essa mudança provê atendimento às necessidades específicas das categorias de aplicações e permite utilizar de forma eficiente e compartilhada os recursos computacionais disponíveis. Também são usadas técnicas para separação do Plano de Controle, que é responsável pelo gerenciamento e controle da sinalização dos dispositivos conectados, do Plano de Usuário, responsável pela entrega do tráfego de dados, (através da Separação do Plano de Controle e do Usuário - *Control and User Plane Separation* (CUPS)) possibilitando que os KPIs de cada categoria de aplicações sejam atingidos.

O 3GPP identificou vários mercados potenciais e um grande número de casos de uso para o 5G [3GPP, 2016], os quais foram referendados pelo ITU-R [ITU-R, 2015b], e, a partir deste estudo, ficaram consagradas as três famílias de casos de uso para o 5G: a *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), que atende a casos similares aos atendidos pelo LTE 4G, mas com capacidades (taxa de dados principalmente) ampliadas; a *Ultra-Reliable and Low Latency Communication* (uRLLC), para cenários que possuem requisitos de alta confiabilidade na conexão e baixa latência; e a *Massive Machine Type Communications* (mMTC), que possibilita a comunicação entre máquinas (dispositivos autônomos) com altíssima densidade de unidades por área de cobertura [ITU-R, 2015b].

4.2.2. Padronização e órgãos reguladores

Em se tratando de padronização do 5G, órgãos padronizadores e associações desempenham uma papel de grande relevância. A padronização visa implementar uma tecnologia e visão de rede em consonância com as necessidades do mercado e da sociedade. Os órgãos de maior destaque na padronização do 5G são: 3GPP, ITU, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI), *Global System for Mobile Communications Association* (GSMA) e *Telecommunications Industry Association* (TIA) [Barakabitze et al., 2020].

Em 2015, o ITU-R finalizou a recomendação M.2083-0 (2015) que define o arcabouço e os objetivos globais para o desenvolvimento das redes móveis 5G, conforme apresentado na Figura 4.2. Na visão do ITU-R, a evolução das redes celulares proporciona a evolução social e tecnológica contribuindo, para o desenvolvimento econômico, e foi com base nisso que o arcabouço foi construído. Já o 3GPP se encarregou do desenvolvimento e padronização das tecnologias necessárias e das classes de serviço eMBB, uRLLC e mMTC, através dos *Releases* 15 e 16. Especificamente, o *Release* 15 se relaciona aos serviços de eMBB, em relação ao CN, e busca desenvolver e padronizar uma arquitetura baseada em serviços, o projeto de um sistema multiacesso, a característica nativa de nuvem e o fatiamento da rede, além de iniciar a especificação para serviços de uRLLC. O *Release* 16 se concentrou em finalizar as especificações para os serviços de uRLLC, além de permitir suporte total para a Internet das Coisas Industriais [Ghosh et al., 2019].

Conforme mencionando anteriormente, foi definido que a implantação do 5G poderia ser realizada em dois modos: modo não autossuficiente – NSA, no qual o 4G e o 5G coexistem, e o modo autossuficiente – SA, no qual há total soberania da rede 5G. Especificamente, no modo NSA, o equipamento do usuário é ancorado em antenas da rede 4G e as antenas da rede 5G – *New Radio* (NR) são utilizadas quando existe a exigência e cobertura de conexão. Além disso, no modo NSA o núcleo da rede utilizado continua sendo o núcleo da rede 4G – *Evolved Packet Core* (EPC). De maneira oposta, no modo SA, o equipamento do usuário se conecta diretamente à NR e utiliza o núcleo das redes 5G – *5th Generation Core* (5GC) [Liu et al., 2020a]. Estes dois modos são habilitados principalmente pela separação do plano de controle e do usuário. A Figura 4.3 demonstra esta estrutura.

No *Release* 17, foi buscada uma melhoria do desempenho da rede para os serviços e cenários de uso existentes, através da proposição de soluções de rede inteligentes. Essa melhoria foi chamada de 5G *Advanced* e possui como uma das principais novidades a utilização de inteligência artificial baseada em aprendizado de máquina no gerenciamento da rede, solucionando problemas de otimização. A inteligência artificial também é utilizada na melhoria da interface rádio, melhorando o desempenho de sistemas complexos de antenas. Também foram adicionadas melhorias em funcionalidades já existentes da NR como gerenciamento da formação de feixes e pontos de múltiplas transmissões e recepções. Foram feitas melhorias no compartilhamento dinâmico do espectro entre as redes 4G e 5G, economia de energia em equipamentos de usuário, posicionamento, entre outros. As novas funcionalidades ficaram por conta da criação de uma classe de equipamentos de usuário com capacidade reduzida que possui requisitos de serviços intermediários, na introdução das topologias de rede baseadas em satélite *Non-Terrestrial Networks* (NTN), e na utilização de frequências superiores a 71GHz na NR.

O *Release* 18 começou a ser discutido em junho de 2021, prevendo melhorias nos cenários de uso eMBB (consumo de energia, MIMO e mobilidade), aplicações (*Extended Reality* (XR), segurança pública e dispositivos com capacidade reduzida) e aplicação de inteligência artificial na camada física [Rahman et al., 2021]. A Figura 4.4 resume os principais avanços obtidos ao longo dos *Releases* 15 a 17, e a previsão dos futuros *Releases* para a evolução do 5G até a geração seguinte de redes móveis.

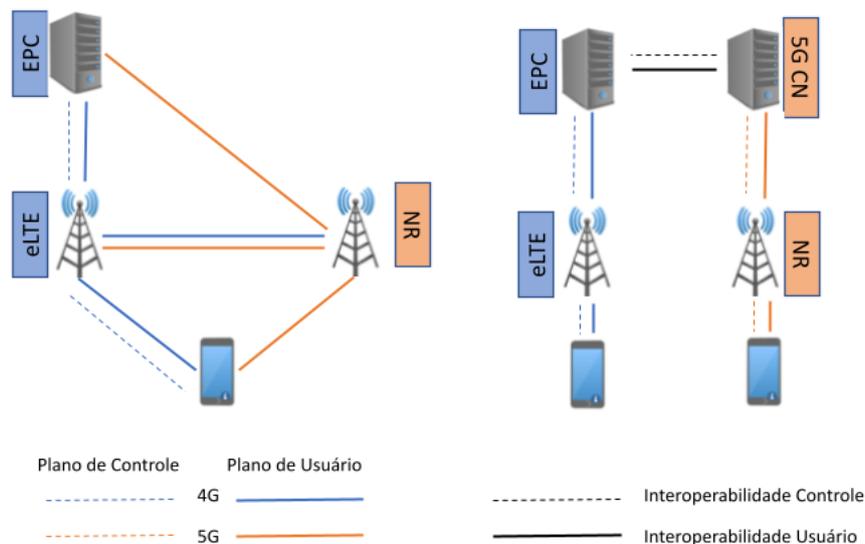


Figura 4.3. Modos de operação: NSA, à esquerda, e SA, à direita. No modo NSA as redes 4G e 5G coexistem, e o dispositivo móvel se conecta à rede através das antenas da rede 4G ou antenas da rede 5G, quando disponível, porém o núcleo da rede utilizado ainda é o EPC. No modo SA existe total separação entre as redes 4G e 5G, e o núcleo da rede 5G já é usado para o fluxo de dados. Adaptado de [Liu et al., 2020b]

4.2.3. Categorias de serviço nas redes 5G

O ITU-R, quando começou em 2015 a definição da estrutura e objetivos gerais do novo padrão de internacional de telecomunicações móveis para 2020 e além (resultando no conjunto de requisitos contidos no IMT-2020), considerou a evolução do papel que as comunicações móveis alcançaram no cotidiano da sociedade. O novo padrão deve considerar o surgimento de novas necessidades que demandem grande uso de dados a taxas elevadas, uma grande quantidade de dispositivos conectados, latências extremamente baixas e alta confiabilidade. Portanto, do novo padrão são esperados alguns comportamentos que não eram suportados pelos padrões de redes móveis anteriores [ITU-R, 2015b]. Entre eles podemos destacar:

1. Conectividade instantânea: algumas aplicações (saúde, realidade virtual, segurança) demandam uma resposta imediata após uma simples solicitação. Essa resposta só é possível com a autenticação e processamento dos dados mais próximo ao usuário.
2. Comunicação em tempo real: previsão de comunicação em tempo real entre máquinas (carros autônomos, comunicação em nuvem, controle de tráfego, *smart grid*, *e-health*, *indústrias* sem necessidade de um usuário humano).
3. Alta densidade de usuários: apesar da grande quantidade de usuários e dispositivos conectados, é necessário que todos experimentem um serviço com boa qualidade e com baixo consumo de energia.

2017-2018	REL-15	5G Basic eMBB Basic URLLC
2019-2020	REL-16	5G Evolution V2X, NR-U, IIoT/TSN, IAB, Positioning
2020-2022	REL-17	5G Evolution eMBB, URLLC, Características mMTC
2022-2023	REL-18	5G Advanced
2024-2025	REL-19	
2025-2026	REL-20	
2027-2028	REL-21	

6G Basic

Figura 4.4. Cronograma Previsto do 3GPP para Evolução do 5G. As especificações para o desenvolvimento e padronização das tecnologias necessárias do 5G e dos cenários de eMBB, uRLLC e mMTC se dividem em cerca de 6 *Releases*, onde cada uma oferece o aprimoramento de tecnologias previamente inseridas no cenário de redes móveis em *Releases* anteriores, além da padronização de novo casos de uso. Adaptador de [Rahman et al., 2021]

4. Alta mobilidade: mesmo usuários em altas velocidades, em carros ou trens, precisam experimentar um serviço de qualidade e similar aos usuários estáticos.
5. Serviços Multimídia Melhorados e aumento do tráfego de dados: o consumo de dados irá aumentar e aplicações de mídia serão as principais responsáveis (definições ultra altas, projeções 3D, vídeos imersivos, entre outros).
6. Internet das Coisas: Com a perspectiva de que, em um futuro próximo, quase todos objetos (eletrodomésticos, sensores, atuadores, carros, casas) estejam conectados entre si, um novo universo para desenvolvimento de aplicações e serviços emerge. Essa necessidade de conexão para um número incontável de dispositivos precisa ser levada em consideração.

Com base nesses comportamentos, foram definidos 3 classes de serviços básicos que balizaram o desenvolvimento das redes de quinta geração. São eles:

1. ***Enhanced Mobile Broadband (eMBB)***: no cenário de aprimoramento de banda larga móvel, são atendidas as necessidades de comunicação multimídia dos usuários humanos das redes 5G. Foi buscada uma melhoria no desempenho e experiência para os usuários desse tipo de aplicação.
2. ***Ultra-Reliable and Low Latency (uRLLC)***: o cenário de comunicações ultra-confiáveis e latências extremamente baixas possui requisitos estritos de transmissão, atraso e disponibilidade. Com isso, ele é voltado para aplicações de controle industrial, segurança de transportes, saúde (p.ex. cirurgia remota), entre outros.

3. **Massive Machine-Type Communication (mMTC)**: cenário de uso caracterizado pela comunicação massiva entre máquinas. É previsto um grande número de dispositivos conectados transmitindo, com pequeno consumo de energia, um volume de dados relativamente baixo com dados não sensíveis ao atraso. Os dispositivos são de baixo custo e com alta vida útil das baterias.

A Figura 4.5 apresenta alguns dos exemplos vislumbrados para cada categoria de uso das redes 5G. Aplicações como carros autônomos e automação industrial demandam alta confiabilidade e disponibilidade da rede, sendo atendidas pelos cenários de uRLLC. Já as cidades inteligentes impõem à rede sem fio uma alta densidade de dispositivos conectados, sendo principalmente atendidos pelos cenários de mMTC.

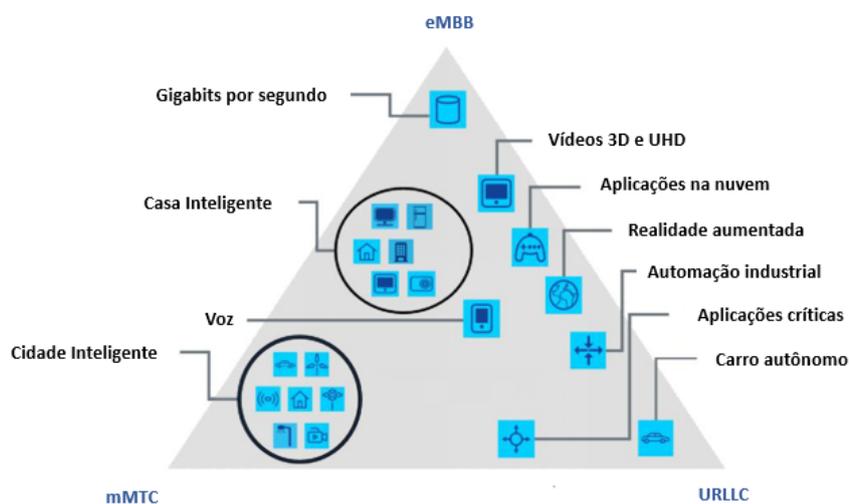


Figura 4.5. Categorias de uso do 5G, considerando as classes de serviço eMBB, mMTC e uRLLC, que mapeiam os novos tipos de serviço que são habilitados com o uso do 5G. Adaptado de [ITU-R, 2015b]

4.2.4. Capacidades-chave das redes 5G

Diante das categorias de uso definidas para o 5G, ficou claro que as redes deveriam passar por uma evolução significativa quanto aos serviços oferecidos e aos KPIs traçados em relação à geração anterior. Havia necessidade de melhoria no pico da taxa de dados (Gbps), na taxa de dados experimentada pelos usuários (Mbps/Gbps), na latência (ms), mobilidade (km/h), densidade de conexão (usuários/km²), eficiência energética (b/joule), eficiência espectral (b/s/Hz) e capacidade de tráfego por área (Mbps/s/m²). A Figura 4.2 apresenta a evolução dos requisitos entre as redes 4G e 5G (definidos respectivamente no IMT *Advanced* e IMT 2020), mostrando em ordens de grandeza a evolução do 5G com relação ao 4G de diversos parâmetros de rede.

Apesar de não ser considerada uma capacidade chave a melhoria na capacidade de localização de dispositivos na rede 5G é aproveitada por diversas aplicações críticas. Essa melhoria é possível por conta de novas características do 5G que tornam mais fácil e exato esse processo. Os 3 fatores básicos são: o menor tamanho médio das células (podem existir picocélulas), o uso de larguras de banda e frequências maiores torna mais preciso

o cálculo do tempo de chegada do sinal e a maior densidade de dispositivos conectados facilita a troca de informações de localização [Zhang et al., 2017].

As capacidades da rede 5G possuem pesos diferentes quando correlacionadas com os cenários de uso previstos. Apesar de algumas capacidades serem aplicáveis a mais de um cenário de uso, os valores necessários para alcance de um desempenho satisfatório podem ser extremamente diferentes. Por essa razão, foi realizada uma classificação em 3 níveis de importância (alto, médio e baixo) de acordo com a dependência que cada cenário de uso possui em relação a determinada capacidade da rede. A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos KPIs versus classes de serviço.

Como pode ser observado, o eMBB possui grande dependência de uma boa taxa de dados experimentada pelo usuário e boa mobilidade. Para os cenários de uRLLC, a baixa latência e alta mobilidade será de extrema importância. Quando analisa-se as aplicações mMTC, a alta densidade de conexões é essencial, sendo o KPI mais importante para essa classe [ITU-R, 2015b].

Tabela 4.1. Importância dos KPIs nas classes de serviço. Adaptado de [ITU-R, 2015b]

KPI	eMBB	uRLLC	mMTC
Taxa de dados de pico	Alta	Baixa	Baixa
Taxa de dados experimentada pelo usuário	Alta	Baixa	Baixa
Eficiência espectral	Alta	Baixa	Baixa
Mobilidade	Alta	Alta	Baixa
Latência	Média	Alta	Baixa
Densidade de conexões	Média	Baixa	Alta
Eficiência energética da rede	Alta	Baixa	Média
Capacidade de tráfego por área	Alta	Baixa	Baixa

4.2.5. Tecnologias habilitadoras

Para atender aos requisitos mencionados anteriormente, as redes 5G implementam diversas evoluções na Rede de Acesso por Rádio - RAN - e no CN. A arquitetura passou de rígida e monolítica para flexível e baseada em serviços, resultando no uso eficiente dos recursos computacionais disponíveis e um gerenciamento fim-a-fim das aplicações para atender aos requisitos heterogêneos. O paradigma das **Redes Definidas por Software** - SDNs - aliado à **Virtualização das Funções de Rede** - NFV - são as principais tecnologias habilitadoras das redes 5G que permitem o atendimento rápido das demandas e o uso eficiente dos recursos. A **Computação de Borda de Acesso Múltiplo** - MEC - aproxima do usuário o poder computacional antes disponível apenas no núcleo da rede, diminuindo a latência das aplicações e o fluxo de dados nos enlaces de *backhaul* (por exemplo, enlaces entre as estações rádio-base (que no 5G são denominadas de *next Generation Node B* (gNB) e o núcleo da rede). Todas estas tecnologias habilitam o **Fatiamento da Rede** - *Network Slicing* - que isola de maneira lógica uma aplicação de outra, o que permite a flexibilidade das operações [Barakabitze et al., 2020]. A arquitetura e interoperabilidade destas tecnologias pode ser observada na Figura 4.6. Serviços distintos (por exemplo, aplicações de processamento de dados, entrega de conteúdo, etc.) coexistem nas redes

5G, sendo estruturados pelo Encadeamento de Funções de Serviço - *Service Function Chaining* (SFC). Cada instância dessas funções são distribuídas próximas ou distantes do usuário, de acordo com a sua função. Em alguns cenários de uso, a funções são instanciadas na MEC, uma vez que não é necessária a comunicação com o CN. A fatia de rede de cada serviço garante que os recursos alocados para o serviço sejam consumidos somente por ele, assegurando o atendimento aos requisitos de QoS.

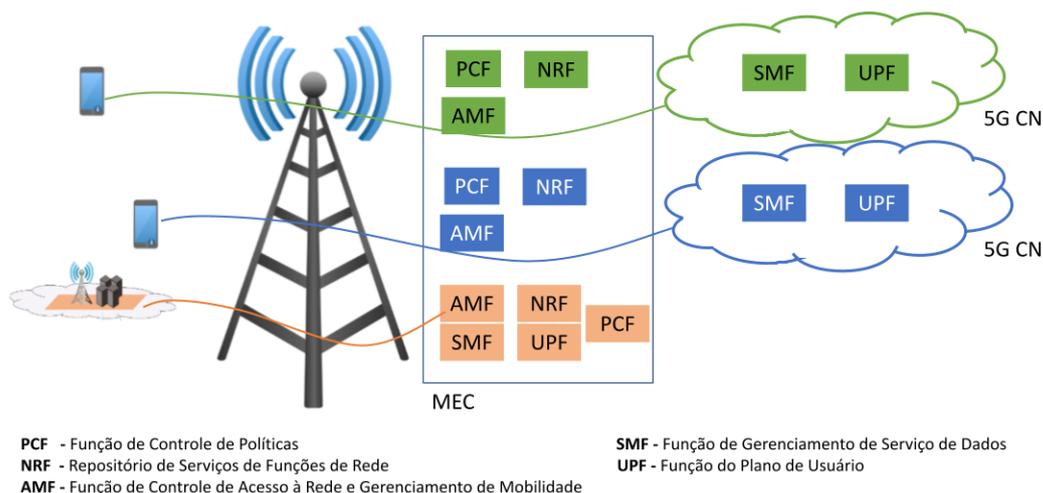


Figura 4.6. Interoperabilidade das tecnologias habilitadoras. O uso das SDNs e da NFV permite a alocação das funções de serviço, que são encadeadas e executadas próximas ou distantes do usuário, compondo a fatia da rede reservada para a aplicação. Em alguns casos, todas as funções de rede são alocadas na MEC, capaz de executá-las na borda da rede. Adaptado de [3GPP, 2017].

4.2.5.1. SDN

O principal objetivo das **SDNs** é a separação do Plano de Controle e do Plano de Dados [Fernandes et al., 2011]. Nas redes tradicionais, o gerenciamento e a manutenção da rede são complexos e custosos, uma vez que as políticas de encaminhamento de pacotes (Plano de Controle) e o fluxo de dados (Plano de Dados) estão centralizados no mesmo equipamento de rede (por exemplo, *switch*, roteador), e as políticas de encaminhamento só podem ser alteradas com uma nova configuração do equipamento. Além disso, os comandos de configuração são específicos de cada fornecedor, não existindo um padrão de linguagem. Nas SDNs, o controle das políticas de encaminhamento de pacotes é migrado para um controlador, que gerencia os recursos do Plano de Dados [Ahvar et al., 2021].

A definição de separação do Plano de Controle e de Dados nas SDNs é o conceito fundamental da separação dos Planos de Controle e de Usuário [Khorsandroo et al., 2021], responsáveis pelo gerenciamento e controle da sinalização dos dispositivos conectados e pela entrega do tráfego de dados aos usuários, respectivamente. Nas redes 5G, a CUPS permite que as Funções de Redes Virtualizadas - *Virtualized Network Functions* (VNFs) - relacionadas ao controle e sinalização do dispositivo do usuário sejam alocadas no núcleo da rede, e as VNFs da aplicação sejam alocadas próximas ao usuário.

A Figura 4.7 demonstra a dinâmica do uso das redes 5G com o CUPS. Dentre as funções de controle destaca-se a Função de Acesso e Mobilidade – *Access and Mobility Management Function* (AMF), responsável pelo controle de acesso e de mobilidade do usuário por prover serviços de comunicação e localização para outras funções de rede; a Função de Controle de Políticas – *Policy Control Function* (PCF), que incorpora as políticas de mobilidade, fatiamento da rede e *roaming*; e a Função de Gerenciamento de Sessão – *Session Management Function* (SMF), que cria e mantém as sessões de conexão, selecionando e alocando o endereço de IP e configurando as regras de tráfego da Função do Plano de Usuário. A Função do Plano de Usuário – *User Plane Function* (UPF) é a principal função responsável pelo roteamento dos dados para o usuário [Shah et al., 2021]. Para facilitar o entendimento sobre as funções da rede, a Tabela 4.2 apresenta os elementos da rede 4G e a respectiva correspondência na rede 5G.

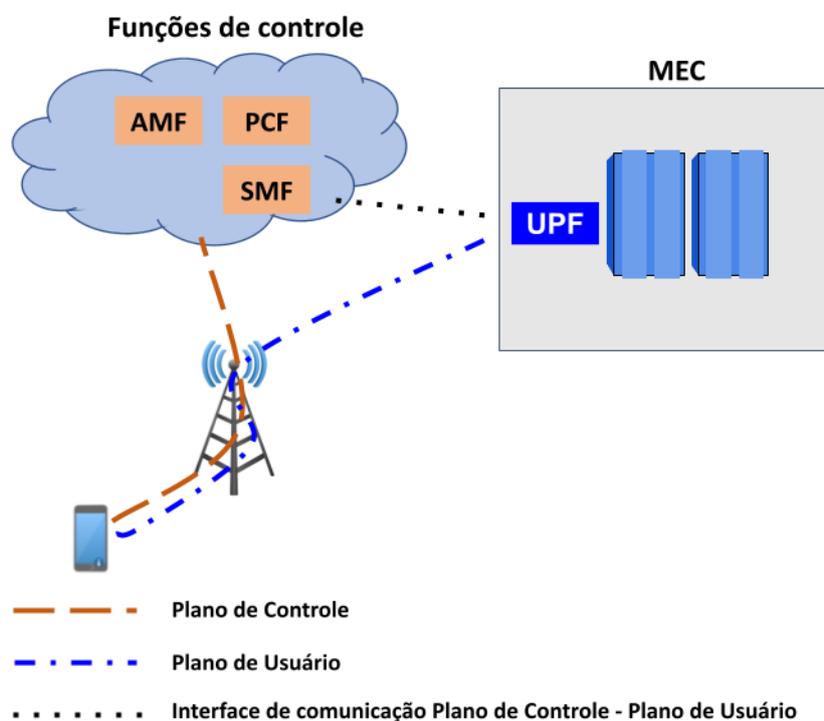


Figura 4.7. Separação do Plano de Controle e de Usuário. No dispositivo do usuário, o acesso à rede, a sessão, a mobilidade e as políticas de acesso são controladas pelas Funções de Controle, no Plano de Controle. O tráfego de dados é controlado pela Função do Plano de Usuário. Adaptado de [Shah et al., 2021]

4.2.5.2. NFV

A NFV é a virtualização das funções de rede que antes eram realizadas por equipamentos específicos (por exemplo, *firewalls*, NAT, TCP). Estas funções se tornam VNFs que podem ser executadas em máquinas virtuais sob recursos computacionais heterogêneos, reduzindo o Custo de Capital – *Capital Expenditures* (CAPEX) – e o Custo Opera-

Tabela 4.2. Relação entre elementos da rede 4G e funções das redes 5G

Equipamento 4G	Tarefa	Função 5G CN
Entidade de Gestão de Mobilidade	Gestão de Mobilidade	AMF
	Autenticação do usuário	AUSF
	Gestão da sessão	SMF
Gateway de rede de dados de pacote	Encaminhamento de dados do plano do usuário	UPF
Função de Política e Recurso de Cobrança	Política de QoS	PCF
Servidor de Assinante Doméstico	Armazenamento do perfil do usuário	UDM

cional – *Operational Expenditures* (OPEX) – das redes. Neste sentido, as aplicações são construídas a partir do encadeamento destas VNFs, com enlaces lógicos interligando as funções de rede [Barakabitze et al., 2020] e todo o ciclo de vida da aplicação gerenciado por uma entidade da rede. A Figura 4.8 demonstra o encadeamento de funções de rede de um serviço de solicitação de conteúdo. O usuário ingressa na rede e a VNF1 realiza a autenticação com base em seus dados. A VNF2 inspeciona os pacotes de solicitação, evitando assim, invasões na rede, enquanto a VNF3 checa a disponibilidade dos dados na borda da rede. A VNF4 é executada caso os dados solicitados se encontrem somente no CN, caso contrário ela não é encadeada na aplicação. Por fim a VNF5 entrega o conteúdo solicitado. Vale ressaltar que o uso da NFV possibilita um controle fino das funções que serão executadas pela aplicação como demonstrado na VNF5, que pode dar origem a duas VNFs, uma de cobrança – VNF5-1, e outra de aceleração de vídeo – VNF5-2, sem a necessidade de instalação de novos equipamentos na rede. Todo o ciclo de vida da aplicação é gerenciado pelo Gerenciado de Aplicações, responsável por alocar os recursos necessários para a execução das VNFs.

A NFV vem ocupando lugar de destaque pela facilidade no uso de recursos heterogêneos. Sua inclusão no projeto de Gerenciamento e Orquestração NFV - NFV MANO (*Management and Orchestration*) - ressaltou os esforços do ETSI na padronização da MEC [Spinelli e Mancuso, 2020].

4.2.5.3. MEC

A MEC se caracteriza por entregar recursos de processamento ou conteúdos em *cache* (por exemplo, vídeos frequentemente buscados, mapas em alta definição) na borda da rede móvel que antes eram disponíveis somente no núcleo da rede. O processamento e entrega de conteúdos comumente buscados mais próximo do usuário diminui a latência de atendimento do serviço e o fluxo de dados nos enlaces entre as *evolved Node Bs* (eNBs) e o núcleo da rede de acesso (por exemplo, enlaces de *backhaul*). Ela se divide em três níveis, como demonstrado na Figura 4.9. O Nível de Sistema tem uma visão geral da arquitetura MEC e coordena todos os outros níveis e entidades, sendo composto: pelo *Proxy* de Gerenciamento do Ciclo de Vida da Aplicação do Usuário - (PGCAU), responsável por

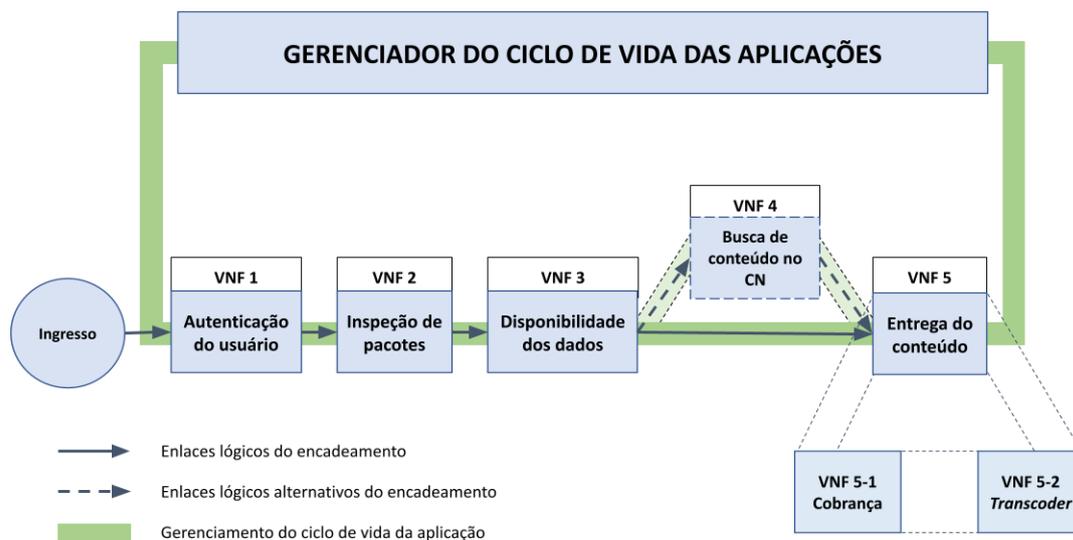


Figura 4.8. Encadeamento de VNFs em um serviço de entrega de conteúdo. As aplicações são construídas a partir do encadeamento das VNFs, que se conectam com enlaces lógicos e podem ser divididas para customização da aplicação. O Gerenciador do ciclo de vida das aplicações é responsável por alocar recursos e monitorar a execução das VNFs. Adaptado de [Wang et al., 2016]

checar a existência ou não da aplicação solicitada pelo usuário e por encaminhá-la ao Sistema de Suporte Operacional; pelo Sistema de Suporte Operacional - (SSO), responsável por receber os pedidos de uso da infraestrutura e encaminhá-los para o Orquestrador da MEC caso forem aceitos; e pelo Orquestrador MEC - (OMEC), que retém toda informação do sistema MEC, como os recursos disponíveis, os serviços, os *hosts* instanciados, as políticas das operadoras, e monitora a topologia da rede, além de escolher o melhor *host* para instanciar a aplicação considerando os requisitos de QoS. O Nível de *host* MEC também é composto por três entidades: o Gerente de Virtualização de Infraestrutura - (GVI), que gerencia a alocação e liberação dos recursos virtualizados e prepara a infraestrutura para o uso de uma imagem de *software*; o Gerente da Plataforma MEC - (GPMEC), que gerencia a plataforma MEC e o ciclo de vida das aplicações, repassando ao OMEC informações relevantes recebidas do GVI sobre falhas ou medidas de desempenho. A última entidade do Nível de *host* MEC são os *Hosts* MEC, dividido em três sub-entidades: a Infraestrutura Virtualizada - (IV), que fornece os recursos de rede e computação (por exemplo, servidores) e o Plano de Dados; a Plataforma MEC, que é o controlador da SDN, recebendo as regras de tráfego e configurações de DNS do GPMEC e instruindo o Plano de Dados a segui-las; e as Aplicações MEC, que são instanciadas em máquinas virtuais ou *containers* sob a infraestrutura virtualizada. O último nível da estrutura MEC é o de Redes de Comunicações, que é composto pelas entidades de comunicação que se conectam à estrutura MEC (por exemplo, as redes 5G).

É importante destacar que uma revisão do ETSI em 2018 incluiu a estrutura do Gerenciador e Orquestrador - (MANO) - no padrão MEC. Esta inclusão basicamente altera o GPMEC para Gerente de Plataforma MEC NFV, que agora delega as atividades de gerenciamento do ciclo de vida de funções de rede para um Gerente de Função de Rede

dedicado a cada *host* ou até a cada aplicação. Além disso, o OMEC se subdividiu entre Orquestrador de Aplicação MEC - OAMEC - e Orquestrador de NfV - ONfV [Spinelli e Mancuso, 2020]. Estas alterações na estrutura MEC proporcionaram uma sensibilidade maior em relação às fatias de rede, promovendo o isolamento fim-a-fim entre aplicações.

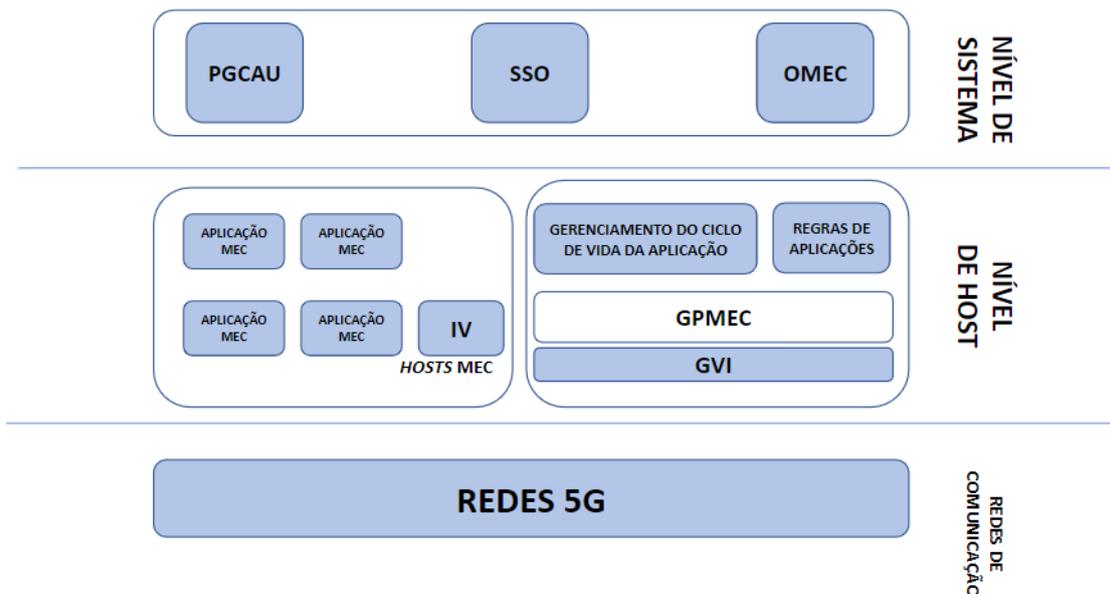


Figura 4.9. Estrutura MEC proposta pelo ETSI. A MEC é composta pelo nível de Sistema, que recebe as solicitações de uso da infraestrutura e, com uma visão geral da arquitetura MEC, coordena todos os outros níveis e entidades; pelo nível de Host, que gerencia diretamente o uso dos recursos virtualizados das SDNs, preparando a imagem das VNFs e alocando as funções de rede nos respectivos hosts; e pelo nível de Comunicação, responsável pela interface dos dispositivos móveis com a rede 5G. Adaptado de [Spinelli e Mancuso, 2020].

4.2.5.4. Fatiamento da Rede

O **Fatiamento de Rede** consiste em separar logicamente uma rede de modo que várias fatias coexistam isoladamente na mesma infraestrutura, com controle e gerenciamento independentes sem interferência uma na outra. O Fatiamento de Rede provê escalabilidade e alta confiabilidade, uma vez que os recursos são usados de forma eficiente e as fatias são monitoráveis e gerenciáveis, sendo reconfiguradas e alocadas em novos recursos em caso de falhas. Além disso, ele permite que operadores da rede 5G customizem as fatias para atendimento dos requisitos estritos de cada aplicação.

A Figura 4.10 denota a visão do *Next Generation Mobile Network* (NGMN) acerca das camadas do fatiamento de rede da rede 5G. O gerenciador da rede recebe uma solicitação para o uso de recursos. Nesta solicitação é descrito o tipo de aplicação que será usada e seus requisitos. Na Camada de Instância de Serviço, se encontram a imagem de *software* e o conjunto das VNFs, além do encadeamento necessário para o atendimento da aplicação. Com base nos requisitos das aplicações e políticas da operadora da rede,

o gerenciador decide se é necessário a customização da fatia. Após a criação dos enlaces lógicos entre as VNFs, a alocação das funções é iniciada. Na Camada de Recursos, as VNF são alocadas sob os recursos computacionais (por exemplo, roteadores, enlaces, partições em servidores) abstraídos. Por fim, a Camada de Fatia de Rede 5G oferece as características de rede necessárias para o uso e gerenciamento do serviço. Uma instância da fatia da rede pode ser composta por nenhuma, uma ou várias sub-redes. A Camada de Recursos consiste nos recursos físicos ou lógicos (por exemplo, roteadores, enlaces, partições em servidores) [Barakabitze et al., 2020].

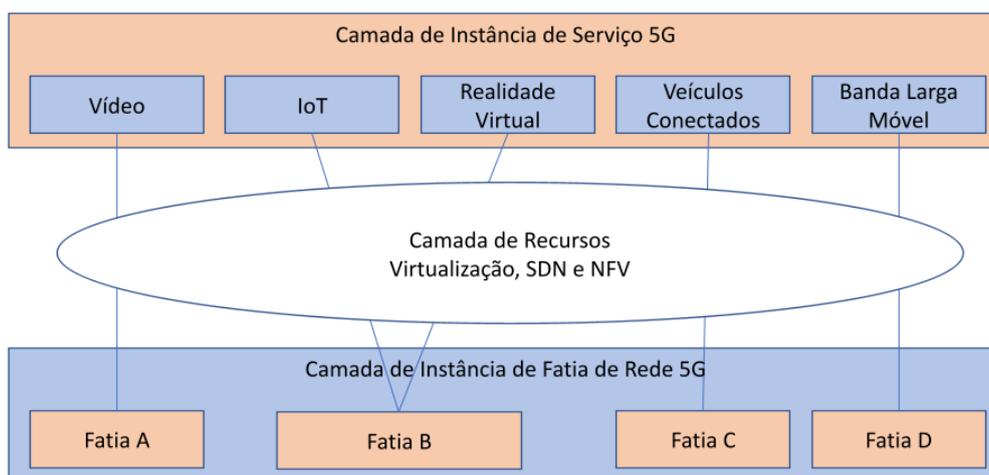


Figura 4.10. Visão do NGMN acerca do fatiamento de rede. O gerenciador da rede encadeia as VNFs e verifica a possibilidade de customização da fatia. Os recursos da rede são alocados e em caso de falha, uma nova fatia é criada para atender a solicitação. Adaptado de [Barakabitze et al., 2020]

As tecnologias citadas anteriormente aumentam o controle do operador de telecomunicações e possibilitam a alta disponibilidade esperada das redes 5G. O uso das SDNs associado às funções virtualizadas proporciona uma granularidade fina aos serviços, possibilitando a utilização da MEC e de seus recursos de maneira eficiente e rápida. Ademais, o Fatiamento de Rede garante a customização da aplicação, com atendimento aos requisitos heterogêneos de QoS, e um isolamento entre diferentes instâncias de serviços, proporcionando assim o atendimento a diferentes aplicações críticas.

4.3. Aplicações Críticas e seus Principais Requisitos e Desafios

Esta seção aborda as principais aplicações que são habilitadas pelas redes de 5ª Geração e os desafios que movimentam a comunidade acadêmica e industrial. Cada aplicação possui requisitos extremamente específicos, que só podem ser atendidos por uma arquitetura que seja flexível, robusta e confiável. Dentre os desafios abordados, destaca-se a eficiência energética, a baixa latência, a confiabilidade das conexões e o grande fluxo de dados.

4.3.1. Internet dos Veículos - IoV

A **Internet dos Veículos** é uma área de pesquisa ativa que integra as redes Ad Hoc Veiculares - *Vehicular Ad Hoc Networks* (VANETs) - e a Internet das Coisas - *Internet of Things* (IoT), contribuindo diretamente com os Sistemas de Transporte Inteligentes no desenvolvimento das Cidades Inteligentes. Essa integração adiciona novas capacidades às VANETs e amplia o ecossistema da comunicação entre veículos, proporcionando mais segurança para pedestres e veículos, economia de combustível, controle do tráfego e prevenção de colisões [Agbaje et al., 2022]. No ecossistema de IoV, o veículo é um dispositivo inteligente capaz de se comunicar diretamente com os outros dispositivos integrantes da rede veicular, por meio do novo conceito de comunicação chamado Veículo-para-Tudo - *Vehicle-to-Everything* (V2X). Especificamente, o conceito de V2X engloba a capacidade do veículo se comunicar diretamente: com outros veículos, por intermédio da comunicação Veículo-para-Veículo - *Vehicle-to-Vehicle* (V2V); com dispositivos móveis de pedestres, mediante a comunicação Veículo-para-Pedestre - *Vehicle-to-Pedestrian* (V2P); com a infraestrutura fixa na beira de estradas, com o uso da comunicação Veículo-para-Infraestrutura - *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I); ou com a infraestrutura da rede celular, através da comunicação Veículo-para-Rede - *Vehicle-to-Network* (V2N) [Sehla et al., 2022]. A Figura 4.11 apresenta o ecossistema IoV e o conceito de comunicação V2X.

É possível destacar duas tecnologias que buscam atender aos requisitos de QoS necessários para a IoV: a tecnologia WiFi e a tecnologia celular - *Cellular Vehicle-to-Everything* (C-V2X).

A tecnologia WiFi se baseia na comunicação sem fio para o envio/recepção de mensagens e dados entre os dispositivos, necessitando de uma infraestrutura auxiliar na beira das ruas e estradas (por exemplo, *Road-Side Unit* (RSU)), no modo infraestruturado, ou da comunicação par a par entre carros ou entre carro e infraestrutura, no modo ad hoc.

A tecnologia C-V2X se baseia no uso da infraestrutura celular para habilitar as comunicações V2X. No ecossistema IoV, a existência de dispositivos distintos gerando dados com estruturas diversas promove a coexistência de diferentes tecnologias de comunicação com o mesmo objetivo: garantir que o usuário possa utilizar os serviços disponíveis com segurança, conforto e eficiência, mantendo a privacidade dos dados trocados pelas entidades da rede [Agbaje et al., 2022].

Nas tecnologias de comunicação WiFi, o primeiro protocolo padronizado para uma rede veicular (por exemplo, VANET) foi o protocolo de Comunicações Dedicadas de Curto Alcance - *Dedicated Short-Range Communication* (DSRC), que é baseado no padrão IEEE 802.11p. Este protocolo habilita apenas as comunicações V2V e V2I, sendo que o alcance é de 300 metros para uma taxa de dados efetiva de 18,06 Mb/s. Além disso, o DSRC não suporta os cenários de alta velocidade buscados pela IoV. Deste modo, o IEEE criou o Grupo de Estudo IEEE 802.11 Próxima Geração V2X - *IEEE 802.11 Next Generation V2X Study Group* - para padronização do protocolo de 802.11bp, baseado na evolução dos protocolos 802.11a ao 802.11ax. Os aprimoramentos na camada de Controle de Acesso ao Meio - *Media Access Control* (MAC) - e na Camada Física permitem que 802.11bp alcance o dobro da taxa de dados e da distância máxima de cobertura em cenários de alta mobilidade e com velocidades desejadas pela IoV para alguns casos de uso [Noor-A-Rahim et al., 2020, Sehla et al., 2022].

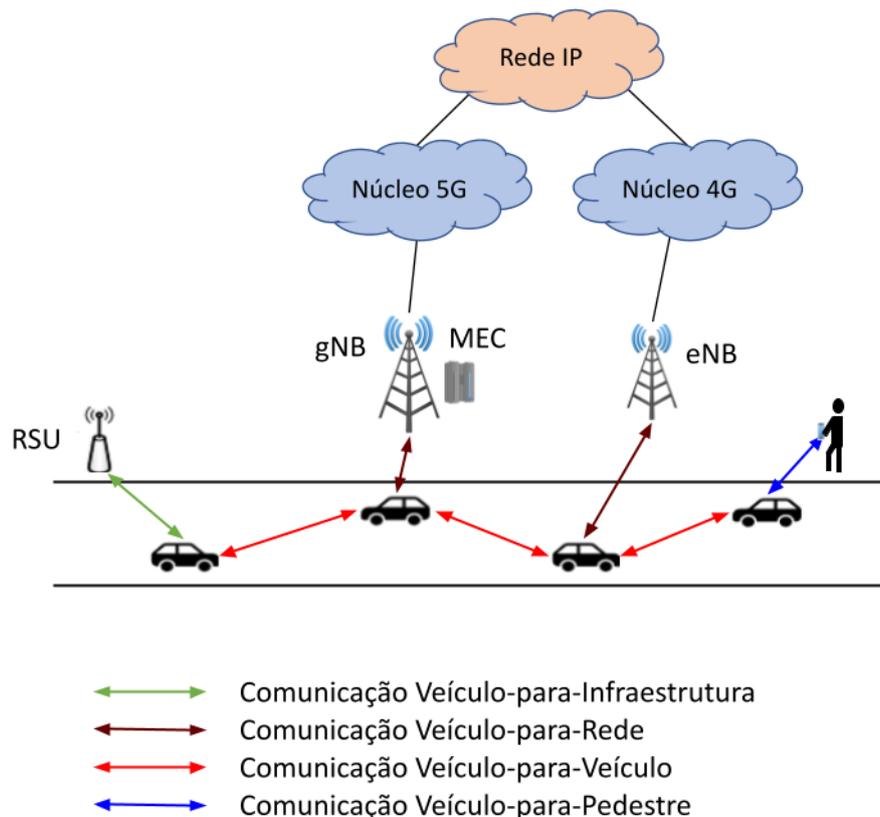


Figura 4.11. Ecossistema da IoV. Neste novo ecossistema o veículo se torna um dispositivo inteligente e se comunica com todos os agentes a sua volta através da V2X, que engloba a comunicação entre o veículo e: sensores e radares na beira de estradas – V2I, a rede 5G – V2N, outros veículos – V2V, os pedestres – V2P. Adaptado de [Soto et al., 2022].

Nas Tecnologias C-V2X, cabe destaque que o *Release 14* do 3GPP foi a primeira especificação contemplando esta tecnologia. No contexto da IoV, ela trata da tecnologia de comunicação *Long-Term Evolution-V2X* (LTE-V2X), que habilita as comunicações V2N, V2V, V2P e V2I, através da tecnologia *Device to Device* (D2D). O uso da D2D, por meio da interface *Sidelink*, permite a comunicação direta entre dois dispositivos próximos sem necessidade de interação com a infraestrutura celular, gerando dois modos de comunicação: o modo 3, usado em regiões cobertas pelas eNBs; e o modo 4, usado em regiões que não são cobertas pelas eNBs. No modo 3 as eNBs agendam e alocam os recursos de rádio para os veículos. Já no modo 4, os veículos reservam automaticamente seus recursos de rádio através de algoritmos semi-persistentes de alocação baseados em detecção. O projeto inicial da LTE-V2X se baseia apenas na troca de mensagens que garantem a segurança em cenários de tráfego moderado, ficando limitados pela tecnologia subjacente da rede Fourth Generation (4G). Entretanto, para cenários V2V, a LTE-V2X já oferta uma latência de 20 ~ 100 ms com alta confiabilidade e velocidades relativas dos veículos de até 500 km/h. Uma vez que a tecnologia LTE-V2X não é capaz de suprir os requisitos de QoS dos casos de uso mais desafiadores da IoV, o 3GPP realizou melhorias na tecnologia *Sidelink* da LTE-V2X e iniciou a especificação da nova inter-

face aérea (por exemplo, NR) na *Release 15*, tecnologia *Sidelink* para *Fifth Generation - Vehicle-to-Everything (5G-V2X)*. Completamente especificada na *Release 16*, a *New Radio - Vehicle-to-Everything (NR-V2X)* foi projetada para atender às aplicações avançadas de V2X [Bazzi et al., 2021, Sehla et al., 2022].

Dentre estas aplicações pode-se destacar: o uso da direção cooperativa entre Veículos em Pelotão - (*Vehicle Platooning*); a Direção Avançada - (*Advanced Driving*), e a Direção Remota - (*Remote Driving*).

Na direção cooperativa entre **Veículos em Pelotão**, ou Veículos em Grupo, os veículos trafegam cooperativamente, proporcionando mais eficiência no trânsito a medida que reduzem a distância entre os outros veículos de seu pelotão e aumentam a velocidade de deslocamento, sem comprometer a segurança do trânsito. Isso só é possível devido à disseminação de informações extremamente rápida por parte do líder do pelotão. Para a troca de informações entre os veículos de um pelotão, por exemplo, é necessário uma latência de comunicação máxima de 25 milissegundos com uma confiabilidade de 90%, no nível mais baixo de automação dos veículos (por exemplo, o motorista controla toda a movimentação do veículo, mesmo com o suporte de sistemas de segurança), e uma latência fim-a-fim máxima de 10 milissegundos com uma confiabilidade de 99,99%, no nível mais alto de automação do veículo (por exemplo, o sistema de automação controla toda a movimentação do veículo, sem a supervisão humana, em qualquer ambiente).

A **Direção Avançada** habilita a condução de veículos semi-automáticos, ou completamente automáticos, através do compartilhamento de dados coletados de dispositivos de beira de estrada ou de outros veículos, o que possibilita a coordenação da trajetória ou de manobras (por exemplo, conversão à direita/esquerda, estacionamento). Ademais, neste caso de uso, os veículos compartilham com os outros integrantes da IoV manobras ou trajetórias que pretendem executar, aprimorando a prevenção de colisões, a eficiência do trânsito e proporcionando viagens mais seguras. Para aplicações de prevenção cooperativa de colisão, a latência máxima aceitável é de 10 milissegundos, com uma confiabilidade de 99,99%.

Na **Direção Remota**, um motorista ou uma aplicação V2X controla um veículo remotamente, principalmente em ambientes que representem perigo para humanos, e em casos em que as trajetórias possuem poucas variações (por exemplo, transporte público) é habilitado o uso da condução baseada em nuvem. A Direção Remota requisita 5 milissegundos de latência máxima com 99,999% de confiabilidade e uma taxa de dados de 25 Mbps no *Uplink* e 1 Mbps no *Downlink* [Sehla et al., 2022].

A Tabela 4.3 denota os principais requisitos dos casos de uso habilitados pela IoV.

Tabela 4.3. Requisitos de QoS das comunicações C2

Caso de uso	Latência	Confiabilidade	Taxa de dados
Veículos em Pelotão	10-500 ms	90-99,99%	50-65Mbps
Direção avançada	3-100 ms	90-99,99%	10-50Mbps
Direção Remota	5 ms	90-99,99%	<i>Uplink (UL):</i> 25Mbps
			<i>Downlink (DL):</i> 1Mbps

4.3.2. Veículos Aéreos não Tripulados (*Unmanned Aerial Vehicle – UaV*)

O uso de **Veículos Aéreos Não Tripulados** - UAVs - (por exemplo, *drones*) vem ganhando destaque em vários setores da sociedade, uma vez que estes veículos podem realizar uma série de tarefas devido à sua versatilidade, mobilidade e baixa altitude de operação. Um UAV é um dispositivo voador inteligente que possui uma unidade de processamento, sensores que auxiliam a navegação e movimentação, uma fonte energética (por exemplo, bateria, combustível), dispositivos de comunicação e mecanismos de vôo. Ele é capaz de se movimentar cooperativamente em grupo ou isolado, se comunicando com as estações de controle para troca de dados e recepção e/ou sinalização de comandos. Os UAVs se dividem em duas categorias principais quanto ao mecanismo de vôo: de asa fixa ou de asa rotativa. [Fotouhi et al., 2019]. Alguns modelos de UAV de asa fixa podem atingir velocidades próximas a 452 km/h, altitudes de 15 km e suportarem uma carga de até 1700 kg, tornando-se propícios para o carregamento de mercadorias e pessoas ou para aplicações militares ou de resgate (por exemplo, reconhecimento de território, magnitude de desastres), com modelos menores e mais leves. O voo vertical e a aerodinâmica deste modelo permite que a aeronave "deslize" no ar, sendo energeticamente eficiente. No entanto, estes modelos necessitam de pista de voo e pouso, não são capazes de sobrevoar um local fixo e seu custo é mais elevado. Já os modelos de asa rotativa possuem mais versatilidade quanto a movimentação, uma vez que a decolagem e pouso são verticais. Alguns modelos desta categoria podem atingir de 50km/h a 100km/h e cerca de 3km de altitude. A grande vantagem desta categoria é a facilidade de manobra e a possibilidade de sobrevoar em pontos fixos e em baixa altitude.

A alta mobilidade e versatilidade permite o emprego dos UAVs em cenários como: entrega de conteúdo; monitoramento e vigilância; coleta de dados de sensores espalhados em uma região e processamento de dados, além de estender a cobertura das redes celulares [Wei et al., 2022, Geraci et al., 2022]. O amplo uso dos UAVs também aumenta o volume de dados transmitidos entre as estações de controle e os UAVs. Neste cenário, as redes 5G desempenham um papel crucial para manter a comunicação rápida, garantindo o comando e controle em tempo real dos veículos aéreos. O 3GPP identificou três cenários de comunicação de Comando e Controle - *C2 Communication*, sendo: Comunicação C2 Direta - *Direct C2*, quando o controlador e o UAV estabelecem um enlace direto utilizando os recursos de rádio e se registrando na rede 5G; Comunicação C2 Assistida pela Rede - *Network-Assisted C2*, quando o UAV e o controlador estabelecem uma comunicação *unicast* com a rede 5G, permitindo que o controlador e o UAV se conectem em diferentes antenas; e a Comunicação C2 Assistida pelo Sistema de Navegação de Tráfego – (SNT), quando o UAV possui um plano de voo pré determinado (por exemplo, para um voo autônomo), mas uma aplicação de controle acompanha em tempo real o *status* do voo e, quando necessário, realiza modificações na trajetória [Geraci et al., 2022]. A Figura 4.12 denota os cenários de C2 que utilizam as redes 5G como a rede de transporte.

Classifica-se, basicamente, três modos de controle de voo, e cada modo necessita de um requisito de QoS específico. Considere uma aplicação de reconhecimento de território. O UAV decola e o controlador envia uma mensagem de controle contendo os **pontos de passagem** que o UAV deve seguir para um reconhecimento inicial. Durante o voo, o UAV identifica uma região de interesse específica e solicita que o controlador realize o **controle direto da direção**, e envia imagens ao controlador que realiza as ma-

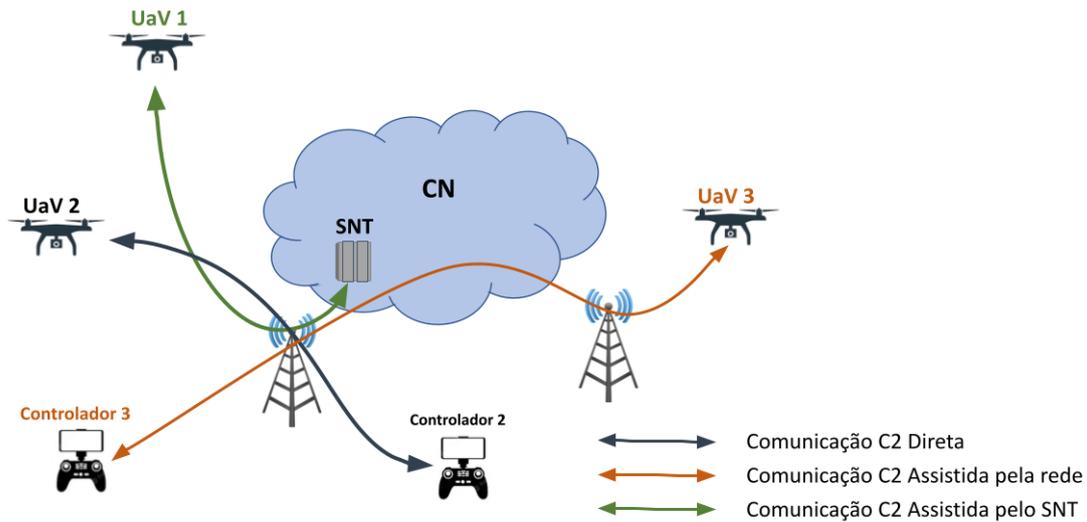


Figura 4.12. Comunicação de Controle e Comando. O UAV é diretamente controlado por um controlador autenticado na mesma RAN, por uma aplicação de voo autônomo ou por um controlador autenticado em uma RAN diferente. Adaptado de [ETSI, 2022].

nobras do UAV. Além disso, considere um **voo autônomo** do UAV supervisionado por uma aplicação de gerenciamento de tráfego de UAV. O modo de controle direto da direção é o mais desafiador, requerendo uma latência inferior a 40 ms, além de 99,9% de confiabilidade somente para controle do UAV. Para o controle direto da direção é mandatório o retorno de vídeo, sendo requisitada uma taxa mínima de 2 Mbps no cenário com linha de visada direta - *Visual Line-of-Sight* (VLoS) e 4 Mbps além da visada direta, 1 s e 140 ms de latência e 99,9% e 99,9% de confiabilidade respectivamente [Geraci et al., 2022]. A Tabela 4.4 detalha os requisitos de QoS para as comunicações C2.

Tabela 4.4. Requisitos de QoS das comunicações C2.

C2	Latência	Velocidade do UAV	Confiabilidade
Pontos de Passagem	1s	300 km/h	99,9%
Controle Direto da Direção	40 ms	60km/h	99,9%
Voo Autônomo	1s	300km/h	99,9%

Além dos requisitos específicos para a comunicação de comando e controle, cada cenário de uso de um UAV possui seus próprios requisitos de QoS. Para transmissão ao vivo de vídeo em 8K para uso em óculos de Realidade Virtual, a aplicação necessita de 100 Mbps de UL (para transmissão das imagens) e 600 kps de DL de taxa de bits e uma latência de UL e DL de 200 ms e 20 ms, respectivamente. Apesar de não apresentar requisitos tão relevantes de latência e taxa de bits, estas aplicação necessitam uma precisão de 0,5 m da posição do UAV [Geraci et al., 2022].

A Tabela 4.5 denota os requisitos dos principais casos de uso dos UAVs [Geraci et al., 2022]. Para além dos desafios relacionados ao grande volume de dados e localização precisa dos UAVs, a comunidade científica e setores da indústria buscam solucionar os

desafios relacionados à eficiência energética e planejamento da trajetória dos veículos aéreos em cenários como os de coleta de dados de sensores [Luo et al., 2020], entrega de conteúdo [Zhao et al., 2021, Zhang et al., 2021] extensão da cobertura da rede celular [Lyu et al., 2022].

Tabela 4.5. Requisitos de QoS das aplicações UAV.

Aplicação	Taxa de Bit	Latência	Altitude	Precisão de posição
Transmissão de vídeo 8K	UL: 100 Mbps	UL: 200 ms	<100 m	0,5 m
	DL: 600 Kbps	DL: 20 ms		
Mapeamento a Laser/ Patrulhamento em HD	UL: 120 Mbps	UL: 200 ms	30-300 m	0,5 m
	DL: 300 Kbps	DL: 20 ms		
Controle Remoto de UAV com vídeo HD	UL: 25 Mbps	UL: 300 ms	<300 m	0,5 m
	DL: 300 Kbps	DL: 20 ms		

4.3.3. Aplicações de *eHealth*

As aplicações *eHealth* ganharam bastante destaque nos últimos anos, impulsionadas principalmente pela pandemia de COVID-19 (2019-2021), que remodelou as interações interpessoais e motivou a comunidade médica a buscar alternativas ao atendimento presencial [Santos et al., 2020]. Em cenários pandêmicos, o uso da tecnologia através de sensores inteligentes e das Redes de Sensores sem fio - *Wireless Sensor Networks* (WSNs) - para o acompanhamento remoto de sinais vitais e da recuperação do paciente é primordial para o controle da disseminação de doenças. Em especial, as Redes Corporais sem fio - *Wireless Body Area Networks* (WBANs) - são responsáveis pela coleta dos sinais vitais, emoções e hábitos de pacientes e pelo envio dos dados ao corpo clínico para acompanhamento e prescrição de tratamentos [Santos et al., 2020]. A Figura 4.13 denota a arquitetura básica destas redes. Minissensores com baixo consumo de energia, invasivos ou não, são colocados dentro, sobre ou em volta do corpo humano. Cada sensor é responsável por medir um sinal vital (por exemplo, frequência cardíaca, pressão arterial, etc) e enviar os sinais vitais ao nó coordenador (por exemplo, *smartphone*, *smartwatch*), através da comunicação Intra-BAN. Os nós coordenadores podem se conectar a outros dispositivos pessoais, a robôs domésticos ou a outras WBANs por meio da comunicação Inter-BAN. O grande volume de dados é enviado pela Internet para serem processados, na camada Além-da-BAN, para a equipe médica [Santos et al., 2020], que acompanha o estado de saúde do paciente e propõe tratamentos necessários. Com a proliferação das WBAN, o volume de dados a serem processados se torna imensurável e as redes 5G com o paradigma MEC podem ofertar recursos computacionais sob demanda e de larga escala [Alenoghena et al., 2022].

Além do monitoramento remoto de sinais vitais, vale destacar a Telemedicina como aplicação fundamental para os cuidados com a saúde. Consultas à distância foram adotadas durante a pandemia de COVID-19 para manter o acompanhamento médico de rotina, evitando visitas desnecessárias aos hospitais e mitigando a sobrecarga do sistema de saúde [Mogliá et al., 2022]. Ademais, a telemedicina possibilita: as **cirurgias**

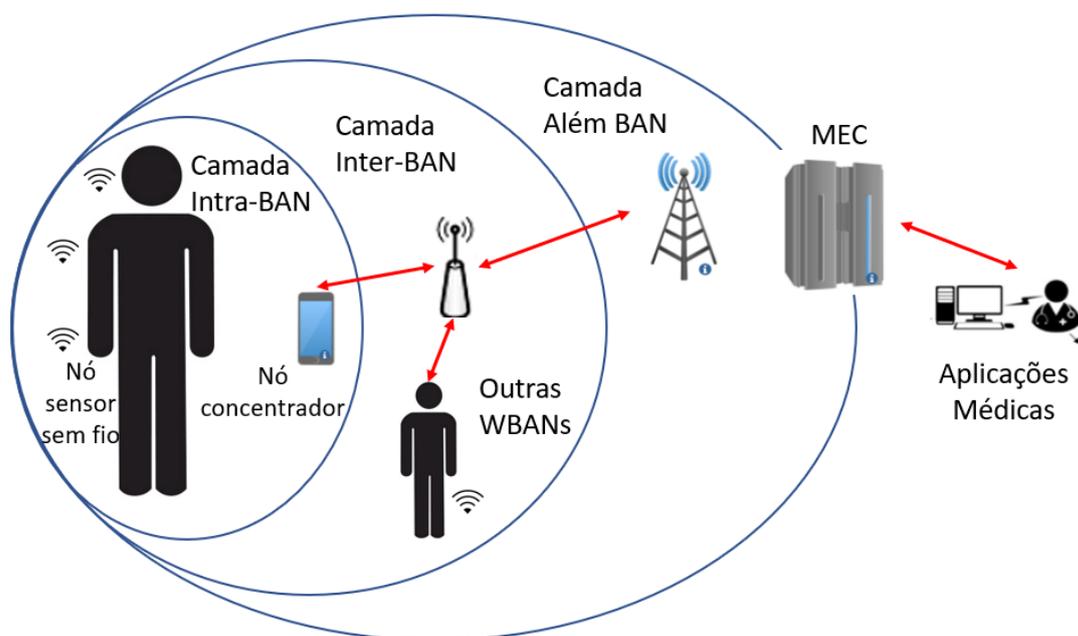


Figura 4.13. Arquitetura de Rede WBAN. Os dados coletados dos sensores são enviados para a MEC a fim de serem processados e encaminhados à equipe médica, que analisa os sinais vitais dos pacientes em tempo real. Adaptado de [Santos et al., 2020]

educativas remotas, quando residentes médicos acompanham em tempo real cirurgiões especialistas que realizam telecirurgia, a realização de **exames remotamente**, o **suporte paramédico** durante o transporte de pacientes para o hospital, entre diversos outros. A Tabela 4.6 apresenta as métricas de serviço obtidas a partir do uso da Telemedicina durante a pandemia de COVID-19 [Moglia et al., 2022]. É possível observar que altas taxas de dados em *uplink* (UL) e *downlink* (DL) e baixas latências são necessárias para manter a segurança das atividades médicas. Em especial para realização de cirurgias, uma vez que é utilizado um sistema robótico mestre-escravo. Além disso, para a realização de exames, a taxa de DL é extremamente alta, sendo atendida apenas pelas redes 5G. A eficiência energética é outro desafio enfrentado pelas aplicações *eHealth*. No contexto de monitoramento de sinais vitais, a vida útil das baterias de sensores invasivos é um tema relevante estudado pela comunidade acadêmica [Saba et al., 2020].

4.3.4. Manufatura Inteligente (*Smart Manufacturing*)

A evolução dos setores industriais acompanha os ciclos de desenvolvimento das tecnologias. O surgimento das máquinas a vapor, no século XVIII, proporcionou a primeira geração industrial, que foi marcada pela mecanização de determinados processos. Na segunda geração, a linha de produção desenvolvida por Henry Ford, no início do século XX, e a massificação do uso da eletricidade aprimorou as técnicas de produção até então utilizadas. A terceira geração industrial foi marcada pelo surgimento da computação e automação, além da globalização dos mercados. A quarta geração, também chamada de Indústria 4.0 ou Quarta Revolução Industrial, representa a evolução dos setores industriais, que passam a utilizar a conexão de diferentes máquinas, objetos e dispositivos para

Tabela 4.6. Métricas alcançadas com a Telemedicina

Aplicação	Latência	Velocidade
Cirurgia assistida por robô	264 ms	1 Gbs
Laparoscopia (cirurgia educativa)	146 ms- 202 ms	UL:98-101 Mb/s DL:98-101 Mb/s
Cirurgia cardíaca (telementoria)	30 ms	25 Mb/s
Ultrassom	23 - 30 ms	UL:130 Mb/s DL:930 Mb/s
Cirurgia a Laser Telerretiniana	20 ms	UL:88 Mb/s DL:854 Mb/s

facilitar a coleta de dados e automatizar a manufatura de um produto. Essa evolução permite um sistema de produção mais eficiente, aumentando a capacidade de customização dos produtos e reduzindo o ciclo de produção. A indústria 5.0 será a próxima revolução que permitirá uma customização em massa através da criatividade dos especialistas trabalhando em conjunto com máquinas inteligentes, eficientes e extremamente precisas [Mahmood et al., 2020] e [Maddikunta et al., 2022]. A Tabela 4.7 mostra as fases da evolução industrial desde o começo aos dias de hoje.

Tabela 4.7. Ciclos da Evolução Industrial. Adaptado de [Maddikunta et al., 2022]

Geração	Avanço	Ano
Indústria 1.0	Mecanização, vapor como energia	1784
Indústria 2.0	Produção em massa, linha de produção, eletrificação	1870
Indústria 3.0	Computação e automação	1969
Indústria 4.0	Sistemas físico-cibernéticos	2011
Indústria 5.0	Customização massiva e sistemas físico-cibernéticos cognitivos	–

A **Manufatura Inteligente** consiste em aplicações baseadas em *Cyber-Physical Manufacturing Systems* (CPMS) e no paradigma da IoT. O tema se tornou relevante por permitir a evolução na automação, no controle e na monitoração de equipamentos e processos industriais em tempo real [O’Connell et al., 2020]. O CPMS possibilita controle com precisão próxima a do tempo real a partir de qualquer local. Para tanto, utilizam-se as redes sensores sem fio, a computação na nuvem, a computação na borda e a computação em névoa. Nesse cenário industrial, há ainda a possibilidade de implantação da comunicação máquina para máquina – *Machine to Machine* (M2M) – e da manufatura colaborativa, que ocorre quando máquinas e humanos coexistem. Essas aplicações demandam alta confiabilidade, alta cobertura, baixa latência, dentre outras características que não estão disponíveis na rede 4G, mas se tornam acessíveis na rede 5G [Wu et al., 2021a].

O conceito de manufatura inteligente vai além da fábrica em si. É necessário considerar a logística inteligente (distribuição e transporte). Surge, portanto, o conceito de Internet das Coisas Industriais – *Industrial Internet of Things* (IIoT), que é uma rede

de dispositivos e sistemas industriais que compartilham informações entre si. Além dos requisitos específicos das aplicações, o ambiente industrial é desafiador para a rádio propagação do 5G. A presença de grande número de maquinário com superfície metálica lisa gera múltiplas reflexões de sinal, assim como o considerável tamanho dificulta a propagação direta. O processo industrial e a presença de grande quantidade de motores gera muita interferência eletromagnética aleatória, alterando as características do meio sem fio e, conseqüentemente, o modelo de canal de propagação em comparação com ambientes de escritórios. Essas diferenças ambientais fazem necessário o estudo detalhado das características de propagação e do modelo de canal sem fio antes de ser desenhado um sistema confiável e eficiente. Em outubro de 2019, o 3GPP lançou uma atualização (V16.0.0) do relatório técnico TR 38.901 (*Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*, contendo o modelo e características do canal para IIoT [Jiang et al., 2021].

A revisão para inclusão das características do canal IIoT incluiu alguns itens como: descrição do cenário, modelo de perda de propagação do trajeto, probabilidade de comunicação com linha de visada, parâmetros para calibração, entre outros. As principais características de ocasionam essas mudanças em relação a um ambiente fechado de escritórios são o maior espaço físico de uma fábrica, alto teto, maior presença de objetos metálicos, objetos com tamanhos irregulares e os bloqueios de propagação que são feitos por máquinas ao invés de paredes [Jiang et al., 2021].

A comunicação com latência extremamente baixa (menores que 10 ms) e a utilização de grandes larguras de banda proporcionadas pela utilização de tecnologias como uso de ondas milimétricas, fatiamento de rede, virtualização de funções de rede, redes definidas por *software* e computação na nuvem, névoa e borda são primordiais para o atendimento dos requisitos das novas aplicações industriais [Wu et al., 2022]. O grande volume de dados gerados pelos diversos dispositivos instalados e a necessidade de análise rápidas desses dados tornam as indústrias um ambiente que podem ser extremamente beneficiados pelas redes 5G [Mourtzis et al., 2021]. A Tabela 4.8 apresenta casos de tecnologias IIoT habilitadas pelo 5G.

4.3.5. Gêmeos Digitais (*Digital Twins*)

O conceito de gêmeos digitais não é recente. Ele foi criado há mais de meio século e está relacionado ao programa espacial americano, quando a Agência Espacial Norte Americana – *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) – usou ideias iniciais de replicação digital durante os anos 1960 [Nguyen et al., 2021]. Nesse período, a NASA, proporcionalmente à tecnologia da época, utilizou simuladores de alta fidelidade para treinar os astronautas. O paradigma de gêmeos digitais atual está diretamente associado a necessidade, após uma explosão inesperada durante a missão Apollo 13 que causou um desvio da rota de aterrissagem, do controle da missão em terra simular, quase em tempo real, o comportamento da aeronave e a partir disso tomar decisões para proporcionar uma volta segura para os astronautas. Foram utilizados simuladores de voo disponíveis e que foram alimentados com os dados reais vindos da aeronave [Mihai et al., 2022].

A partir dessa ideia de simular o real com alta fidelidade, surgiu o conceito de gêmeo digital, que é um programa de computador que pega os dados e contextos do mundo

Tabela 4.8. Exemplos de aplicações industriais habilitadas pelo 5G, apontando os benefícios gerados e as características mais importante da rede para o pleno funcionamento da aplicação. Adaptado de [Mourtzis et al., 2021]

Aplicação	Caso de Uso	Benefícios	Característica 5G
Manutenção preditiva avançada	Uso de inúmeros sensores para fornecer uma representação em tempo real do estado de uma máquina, possibilitando a execução de manutenção preventiva e preditiva	Redução de tempo inoperante Redução de reposição de maquinário Redução no tempo de manutenção	Confiabilidade Custo dos dispositivos Densidade de dispositivos
Controle e monitoração precisos	Controle e monitoração em tempo real de robos e máquinas	Redução de defeitos Aumento da produtividade	Latência extremamente baixa Densidade de dispositivos
Realidade aumentada	Uso de visores de realidade aumentada para guiar o trabalhador local ou remoto.	Redução dos gastos com manutenção Redução do tempo de treinamento	Latência extremamente baixa Taxa de dados
Controle robótico remoto	Controle remoto de maquinário robótico	Melhoria de segurança e saúde Aumento da produtividade	Latência extremamente baixa
Manufatura como serviço	Reduzir tempo de configuração permitindo que a fabricação seja flexível, permitindo o uso da planta por vários atores.	Aumento da taxa de inovação Inovação Redução dos custos Aumento da produtividade	Flexibilidade Custo dos dispositivos Onipresença
Veículo guiado automatizado	Controlar veículos autônomos de maneira mais flexível sem a necessidade de configuração de rotas pré-definidas	Aumento da eficiência e produtividade	Baixa latência Confiabilidade Conhecimento de localização
Inspeção por drone	Uso de drone para tarefas perigosas e difíceis para os humanos	Melhoria de segurança e saúde Diminuição dos custos das inspeções	Baixa latência Confiabilidade Conhecimento de localização

real sobre um sistema e os processa de forma a reproduzir como o sistema ou processo real se comportaria diante de diferentes entradas. Essa tecnologia emergente tornou-se possível graças a possibilidade de conexão de um número massivo de sensores IoT. Apesar da criação de uma representação virtual do objeto, rede ou sistema real, essa representação virtual pode ou não estar conectada ao objeto real. Baseado nas informações que recebem em tempo real ou que são reproduzidas conforme captura real, é possível simular ações no ambiente virtual antes de fazê-las no objeto real e prevendo o comportamento correspondente. É possível ainda reproduzir situações críticas, para compreender melhor as falhas que geraram problemas e para buscar novas soluções funcionais para a arquitetura que já está em uso. Para que isso seja possível, considerando os casos nos quais o gêmeo digital conversa em tempo real com o gêmeo físico, é necessário uma rede extremamente confiável e robusta, com baixa latência e alta conectividade [Wu et al., 2021a].

Como exemplo de gêmeos digitais, pode-se citar o *The Spirent 5G DT²* que emula em software a réplica de uma rede 5G para teste de comportamento e performance de diversas aplicações. No contexto de emulação de redes 5G, há também a iniciativa da Huawei que, em 2020, lançou a primeira solução de engenharia para criar um *site* digital 5G que é uma réplica de um *site* físico [Huawei, 2020]. Na indústria, pode-se citar a iniciativa da Petrobras, que está utilizando gêmeos digitais para criar réplicas de suas instalações (refinarias de petróleo, plataformas, reservatórios, poços, sistemas navais e instalações submarinas) de forma a otimizar a operação, simular situações e reduzir custos. Só com

²Disponível em: <https://www.spirent.com/assets/u/video-the-5g-network-digital-twin>

a aplicações de réplicas de refinarias, a Petrobras conseguiu aumentar a rentabilidade em US\$ 200 milhões no ano de 2020 [Petrobras, 2020].

As características fundamentais que permitem identificar um gêmeo digital verdadeiro conectado em tempo real, e não um simples modelo digital, são a autoadaptação, autorregulação, automonitoramento e autodiagnóstico. A autoadaptação permite uma reação automática do gêmeo digital a mudanças de ambiente e configuração do sistema real. A autorregulação não permite que o gêmeo digital assuma características que o gêmeo físico não pode atingir. O automonitoramento permite que o gêmeo digital sempre saiba o que está acontecendo com o gêmeo físico, através do monitoramento dos parâmetros relevantes. Por fim o autodiagnóstico permite que a versão digital saiba sobre a sua saúde baseado nos dados históricos e atuais quando não é possível manter o estado ótimo de operação [Wu et al., 2021a].

A perda de conectividade ou mesmo atraso da conexão pode representar um desvio do gêmeo digital em relação ao sistema real. A computação de borda no 5G contribui muito para a diminuição da latência possibilitando que as redes de 5ª geração surjam como candidata natural para habilitar a expansão da utilização de gêmeos digitais [Zhou et al., 2021].

A tecnologia de gêmeos digitais usufrui em maior ou menor escala de todas as características dos cenários de uso do 5G. O foco maior é no cenário de mMTC e uRLLC, por conta da necessidade de conexão de diversos dispositivos e inúmeros sensores dentro do ambiente industrial, além da necessidade de troca de informações quase que em tempo real (1 ms), sendo idêntico ao tempo de reação e interação entre homem e máquina, permitindo a utilização de soluções de automatização mais complexas com operação remota de equipamentos e máquina. A confiabilidade da conexão também é extremamente importante não podendo haver perda de conexão [Ramirez et al., 2022] e [Isto et al., 2020].

A Figura 4.14 mostra uma representação de uma rede de distribuição utilizando gêmeo digital em uma rede 5G. Pode-se observar a divisão em 3 camadas: dispositivos sensores, camada de borda onde há a agregação dos dados em servidores e a camada virtual do gêmeo digital que é alimentada com as informações da rede real.

4.3.6. Atendimento de áreas remotas ou de difícil acesso

Alguns locais, como plataformas de petróleo, centros de pesquisa avançados em locais remotos, ou mesmo áreas rurais ou de baixa densidade demográfica, usualmente carecem de uma infraestrutura de telecomunicações. A dificuldade de acesso e o alto custo de instalação e manutenção da infraestrutura impedem a disponibilização de redes de alta velocidade baseada em tecnologias como fibra ótica.

Devido a essas dificuldades, se torna necessário a busca de outras soluções para atender a esses cenários, que usualmente precisam da comunicação de forma confiável para diversas aplicações de saúde, sensoriamento e controle. Nesse contexto, as redes 5G surgem com suporte a adaptações capazes de atender a essas necessidades com um custo viável.

As redes 5G para comunicação em áreas remotas preveem como principais cenários de uso os listados na Figura 4.15. Para o cenário brasileiro podemos destacar 4

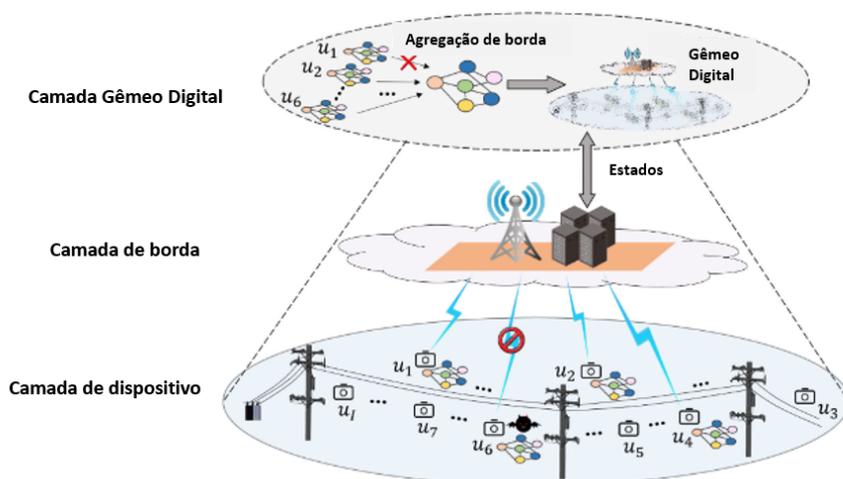


Figura 4.14. Aplicação de Gêmeo Digital com utilização de computação de borda, com a representação do gêmeo real, do gêmeo digital e da camada de borda entre eles. Adaptado de [Zhou et al., 2021].

casos de uso principais: voz e dados através da compra direta de dispositivos por usuários; *backhaul* provendo conexão para os sites 4G padrão; *e-Health* provendo acesso a esse tipo de serviço e *smart farming* [Cavalcante et al., 2021].



Figura 4.15. Principais Cenários de Uso das redes 5G em áreas remotas. Adaptado de [Mendes et al., 2020]

4.3.6.1. Atendimento a plataformas de petróleo e navios

As indústrias de energia, notadamente a de óleo e gás, são conhecidas por serem relativamente lentas na adoção em larga escala de novas soluções relacionadas a tecnologia da informação e telecomunicações. Por essa razão, a transformação digital ainda é um tema que possui ampla margem para crescimento nessas indústrias e que é extremamente relevante em cenários de transição para uma matriz energética mais sustentável.

Dados mostram que mesmo com a crise energética ocasionada pela guerra da Ucrânia, a demanda por combustíveis fósseis irá diminuir nos próximos anos. A participação desse tipo de fonte de energia na matriz energética mundial passará dos atuais 80% para 75% em 2030 e 60% em 2050. Essa queda na demanda e a necessidade na transição energética, impulsionam a busca pela redução dos custos de produção e adoção de novas tecnologias com o objetivo de tornar a indústria mais limpa. [International Energy Agency - IEA, 2022]. Nesse contexto, a Figura 4.16 apresenta um sumário com os principais benefícios operacionais trazidos pela transformação digital na indústria de óleo e gás. Esse levantamento foi realizado através da classificação e levantamento dos principais artigos científicos relacionados ao tema [Maroufkhani et al., 2022].

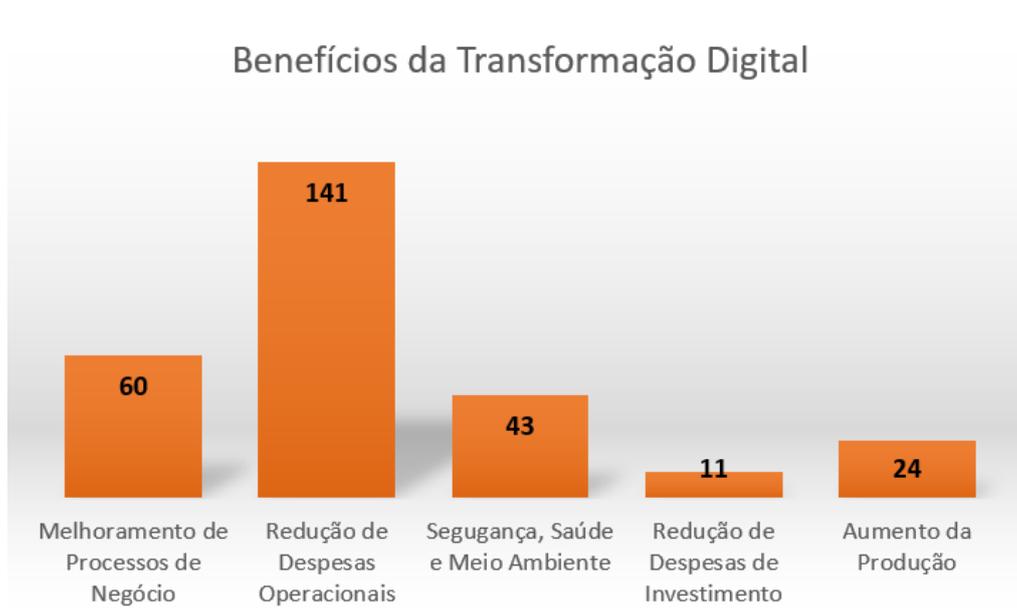


Figura 4.16. Principais benefícios operacionais proporcionados pela transformação digital na indústria de óleo e gás, compilados a partir da análise dos principais artigos científicos sobre o tema. O eixo Y apresenta a quantidade de artigos sobre cada tema apresentado no eixo X. Adaptado de [Maroufkhani et al., 2022]

Apesar de ter muitas características em comum com a manufatura inteligente, as plataformas de petróleo não são ambientes comuns. Elas estão localizadas em áreas remotas e inóspitas que na maioria dos casos não possuem infraestrutura de comunicação, havendo grande dependência de conexões por satélite. Por demandarem baixa latência, alta disponibilidade e grande quantidade de dispositivos conectados, o atendimento a plataformas de petróleo por meio de conexão por satélite representa um desafio para os cenários de uso eMBB, uRLLC e mMTC.

Diferentemente do ambiente terrestre, onde normalmente há grande disponibilidade e a infraestrutura de comunicação é relativamente fácil de ser implantada, o ambiente marítimo proporciona uma série de desafios e problemas para uma comunicação precisa e de qualidade. Pode-se citar desafios relacionados a eficiência de comunicação (taxa, latência, confiabilidade), integração multidisciplinar entre tecnologias e a deterioração aos equipamentos causadas pelo ambiente marítimo. Além disso, plataformas são metálicas o que prejudica a adoção de soluções por rádio-propagação.

Em plataformas há demandas para aplicações de automação, IoT, operação remota, robótica, realidade aumentada, telemedicina, telepresença e gêmeos digitais. Atender a todos os requisitos dessas aplicações (latência, confiabilidade de conexão, conexões simultâneas, eficiência energética) em um ambiente hostil e remoto é extremamente difícil. Há sérias limitações de espaço físico em plataformas que dificultam a instalação de soluções diferentes e concorrentes por espaço e recursos. Essas plataformas podem operar a distâncias de mais de 300 km da costa o que gera um grande desafio para sua conexão com toda a infraestrutura de tecnologia da informação e telecomunicações em terra. A conexão com a infraestrutura terrestre pode ser feita basicamente das seguintes formas:

1. Através de enlaces de rádio a partir da costa (mais próximas à costa);
2. Através de malha óptica;
3. Através de enlaces de rádio com outras plataformas concentradoras;
4. Através de satélites de média órbita e geoestacionários;
5. Através de conexão com enlace *backhaul* 4G com outras plataformas concentradoras.

Nesse cenário, as redes 5G surgem como grande candidatas para suprirem as necessidades desse ambiente, facilitando a integração entre as diversas aplicações e provendo os requisitos necessários para o pleno funcionamento de todas. Uma visão básica da operação de uma plataforma e alguns dos desafios desse ambiente, que já começam na forma de embarque, podem ser vistos no vídeo³, produzido através de uma parceria entre a Petrobras e o canal Manual do Mundo.

4.3.7. Atendimento a zonas rurais

Nos dias atuais há uma demanda reprimida por conectividade sem fio em áreas remotas e rurais. O atendimento a **Zonas Rurais ou Plataformas de Pesquisa Remotas** é desafiador porque essas áreas normalmente não possuem infraestrutura de comunicação. A rede 4G, desenvolvida para atender principalmente os requisitos e necessidades do ambiente urbano, e a cobertura padrão viabilizada pelas células 5G padrão, utilizadas em ambientes urbanos, são ineficazes para atendimento as áreas rurais e remotas. Algumas tecnologias habilitadoras adotadas nas redes 5G, por exemplo o uso de frequências mais altas e MIMO, podem ocasionar uma cobertura limitada das células 5G. Em áreas urbanas isso não é um problema, mas em áreas remotas não é alcançado um número suficiente de assinantes de forma a viabilizar um custo aceitável por assinante atendido. Soma-se a isso o investimento necessário em *CAPEX* para aquisição de equipamentos, licenças, aquisição de espectro de radiofrequência e infraestrutura (torres, energia, *backhaul*) [Mendes et al., 2020].

As comunicações melhoradas para áreas remotas – *enhanced Remote Area Communications* (eRAC) – proporcionam o uso de diversas aplicações como agricultura inteligente, monitoramento de desastres, entre outras. Também possibilitam a conexão de uma

³Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=vOuuZJ5d4Ks>

parcela da população que hoje não está conectada e não desfrutando e não fazendo parte da era da informação. Utilizando-se projetos de células 5G com o objetivo de alcançar maiores raios de cobertura (p.ex empregando-se frequências mais baixas de transmissão e numerologia adequada para o OFDM, células 5G podem ter raios de até 50 km com entrega de uma taxa de dados de 100 Mbps na borda, permitindo a entrega efetiva de conectividade em áreas remotas. Áreas rurais são pouco povoadas e Um raio de 50 km é necessário para que haja assinantes suficientes de forma a tornar a rede sustentável economicamente. Há necessidade de atendimento a aplicações de banda larga, agricultura inteligente e *backhaul* sem fio, explicam a necessidade de uma taxa de 100 Mbps. A comunicação deve ser feita prioritariamente em faixa de frequência abaixo de 1 GHz é necessário para que seja possível o aumento do raio de cobertura da célula. Um resumo dos requisitos para as redes dessas áreas podem ser vistos na Tabela 4.9 [de Souza Lopes et al., 2020].

Tabela 4.9. Principais Requisitos para Redes em Áreas Rurais. Adaptado de [Mendes et al., 2020]

Requisito	Valor
Taxa de dados	100 Mbps
Cobertura	50 km
Faixa de frequência	Sub 1 GHz e espectro não licenciado
Alocação do espectro	Fragmentada e secundária

Além da utilização de redes não terrestres, utilizando soluções com UAVs e satélites, há outras iniciativas para solução do problema de oferta de conectividade em áreas rurais. No Reino Unido o projeto *5G Rural First* busca, através de mudanças na regulamentação, permitir que outras partes interessadas utilizem o espectro eletromagnético não utilizado pelas operadoras de determinada região [Mendes et al., 2020].

Uma solução que merece destaque é a – *Remote Area Access Network for the 5th Generation (5G-RANGE)* –, um projeto de cooperação bilateral entre o Brasil e a Europa com objetivo de disponibilizar uma rede móvel projetada para prover comunicação confiável e com bom custo benefício para as áreas rurais e remotas. O 5G-RANGE consiste no uso de canais de TV não utilizados – *Tv White Space (TVWS)*– como rede secundária. A utilização de frequências na faixa de VHF e UHF somado ao uso de rádios cognitivos⁴ possibilita a formação de células 5G maiores, possibilitando até 100 Mbps a uma distância de 50 Km da estação base [Mendes et al., 2020].

4.3.7.1. Aplicações críticas em áreas remotas e de difícil acesso

Ainda dentro do contexto do atendimento de telecomunicações em áreas remotas, tem-se cenários de grande relevância, como as estações de pesquisa na Antártica, ou

⁴Rádios cognitivos são capazes de fazer o sensoramento do espectro na localidade em que são empregados e usar “brechas”, momentâneas ou não, da faixa espectral para sua transmissão, evitando interferência nas demais transmissões [Wang et al., 2022].

as estações militares em florestas ou desertos. Dentro desses contextos, as aplicações críticas demandadas vão, usualmente, de telessaúde para as equipes ao sensoriamento de áreas de interesse [Mallorquí e Zaballos, 2021]. O uso de comunicações por satélite torna-se a única opção disponível, muito embora esse tipo de canal não seja facilmente compartilhado. Nesse sentido, o uso do 5G sobre enlaces de satélite pode se mostrar de grande valia.

As redes NTN surgem como principais candidatas para atendimento a essas áreas. Especificamente, satélites geostacionários são amplamente usados em para comunicação, sendo uma boa possibilidade em termos de meio físico para comunicações militares em florestas e desertos. Contudo, esse tipo de satélite apenas provê cobertura de uma área nas zonas tropicais e equatoriais do planeta, além de gerar grandes atrasos na comunicação, devido à distância entre a estação base e o satélite. Em latitudes maiores, próximo dos polos, apenas satélites de baixa ou média órbita conseguem prover serviços [Ceriotti et al., 2012]. Considerando o requisito de baixos atrasos e a cobertura dos satélites, vários trabalhos discutem a integração entre satélites de baixa órbita – *Low Earth Orbit (LEO) Satellite Network (SatNet)* e o 5G [Darwish et al., 2022, Azari et al., 2022]. Esse tipo de aplicação do 5G pode revolucionar a comunicação em áreas remotas, permitindo maior flexibilidade nas aplicações e maior segurança nas operações.

4.3.8. Sensoriamento e controle em Redes Elétricas Inteligentes (*Smart Grids*)

Os sistemas de potência vem se modernizando nos últimos anos. As redes elétricas inteligentes transformaram sistemas eletromecânicos em uma Rede Físico-Cibernética de Sistemas de Potência - *Cyber-Physical Power System (CPPS)* [Xu et al., 2020a]. As redes elétricas inteligentes implementam sensores e tecnologias de controle e comunicação nos sistemas de potência para coordenar e gerenciar as atividades do setor elétrico [Esenogho et al., 2022]. Diferente dos sistemas tradicionais, onde a comunicação cobria somente os centros de controle das subestações de energia, nas redes elétricas inteligentes a comunicação bidirecional abrange desde a geração de energia até o consumidor, aumentando demasiadamente o fluxo de dados gerados pelas redes elétricas.

Uma rede elétrica inteligente pode ser descrita por sete domínios lógicos que se comunicam entre si, sendo os domínios: de Operação, do Mercado de Energia, de Geração, de Transmissão, de Distribuição, dos Consumidores e dos Provedores de Serviço. A Figura 4.17 demonstra os domínios de uma rede elétrica inteligente e o fluxo de comunicação e energia entre eles. O domínio de Operação se comunica e controla todos os domínios do sistema elétrico. O domínio do Mercado de Energia também se comunica com todos os domínios do sistema, uma vez que é responsável por manter a harmonia entre a compra e venda de energia. Os domínios de Geração, Transmissão e Distribuição fazem parte do fluxo de energia até o consumidor. O Domínio de Geração se comunica com o de Transmissão, que, por sua vez, se comunica com o de Distribuição. Além disso, o domínio de Distribuição se comunica com o domínio dos Consumidores. No domínio dos Consumidores, se encontram o consumo energético e eventualmente a geração de energia em escala reduzida. Este domínio se comunica com os Provedores de Serviço, que oferecem os serviços de faturamento e de operações de resposta às demandas [Lopes et al., 2016].

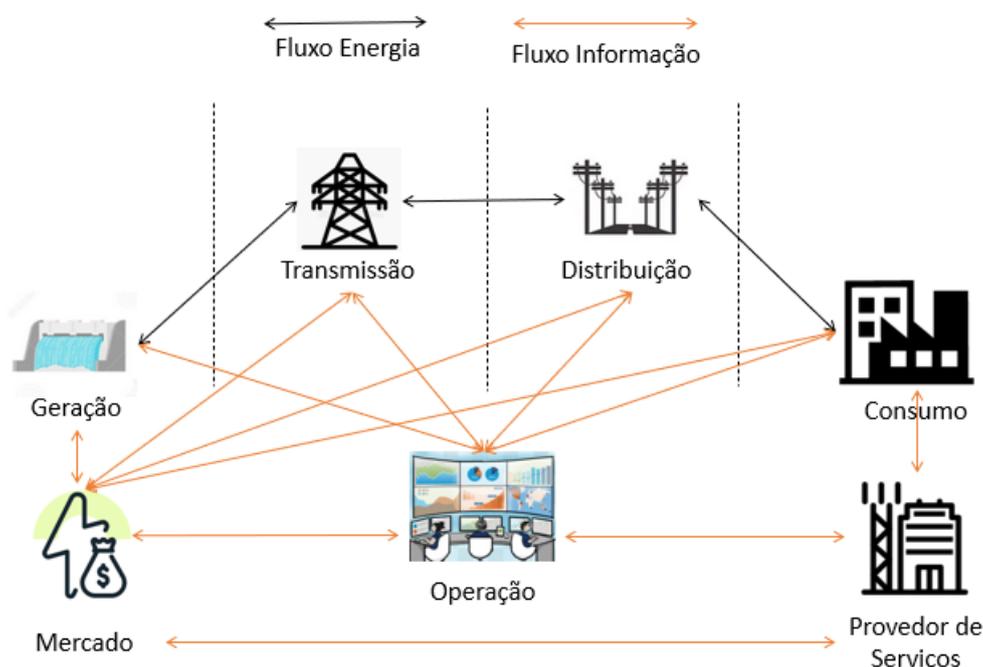


Figura 4.17. Domínios Lógicos das redes elétricas inteligentes. Sete domínios lógicos descrevem as *Smart Grid*. Diferente dos sistemas tradicionais, nas *Smart Grid*, a comunicação bidirecional abrange desde a geração de energia até o consumidor, aumentando demasiadamente o fluxo de dados. Adaptado de [Lopes et al., 2016].

Nesse contexto, o uso massivo de medidores inteligentes permite a leitura automatizada dos medidores, também conhecida como *Leitura Automatizada de Medição - Automated Meter Reading (AMR)*. Ela proporciona o encaminhamento dos dados obtidos dos medidores nos domínios de operação (por exemplo, geração, transmissão, distribuição, consumo, provisão de serviços) para os domínios de controle, como o centro de operação e o mercado de energia [Esenogho et al., 2022].

Em cada domínio das redes elétricas inteligentes, pode-se destacar diversos avanços em relação às redes elétricas tradicionais. No domínio da Geração de Energia, o principal avanço diz respeito à geração distribuída, que permite a produção de energia elétrica próxima aos locais de consumo energético, fomentando o uso de energia limpa (por exemplo, solar, eólica) e diminuindo as perdas em linhas de transmissão. Neste domínio, o paradigma de *microgrids* diz respeito a microgeradores de energia autossuficientes, localizados geralmente em uma região ou distrito, que se separam dos sistemas de energia em cenários de desastres naturais e são capazes de atender aos consumidores daquela microrregião, permitindo um sistema elétrico mais resiliente a falhas. Para suportar grandes consumidores ou picos no consumo de energia, as redes elétricas inteligentes podem agregar diferentes fontes da geração distribuída em uma *Planta Virtual de Potência - Virtual Power Plant (VPP)*. Uma VPP trata as diversas fontes de geração como uma única entidade, sendo controlada por um Sistema de Gerenciamento de Energia que aproveita o controle descentralizado para verificar a demanda de energia nos microgeradores determinar se permanecerão em funcionamento ou se ficarão em *standby* [Lopes et al.,

2016, Esenogho et al., 2022].

Além disso, nos domínios de Geração, de Transmissão e de Distribuição, as redes elétricas inteligentes modificaram a natureza das subestações, que estão passando a ser digitalizadas. Essa digitalização implica na substituição de relés eletromecânicos por dispositivos eletrônicos inteligentes (*Intelligent Electronic Devices (IEDs)*) e também na inserção de redes Ethernet dentro do contexto de subestações para comunicação entre IEDs e entre IED e sistema *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)*. Tal comunicação implica em requisitos fortes de baixos atrasos, alta confiabilidade e alta segurança do tráfego. As subestações de geração e transmissão, muitas vezes, se encontram em locais de difícil acesso, sendo, em alguns casos, não assistidas, ou seja, operam sem supervisão *in loco* humana. A dificuldade de acesso a essas subestações e a necessidade de constante supervisão com requisitos estritos na comunicação enseja o estudo de novas tecnologias, tais como as redes 5G, para atender às demandas dessa nova geração das redes elétricas [Carrillo et al., 2022, Raussi et al., 2023, Iurii et al., 2022, Adrah et al., 2022].

Ainda no Domínio de Distribuição, a automação dos sistemas de distribuição integra o gerenciamento de dados, inteligência artificial, atuadores e sensores inteligentes para aumentar a confiabilidade e qualidade da energia entregue ao consumidor e diminuir as despesas operacionais. Para que toda essa comunicação funcione, incluindo a geração distribuída com suporte à VPP, é necessária uma infraestrutura de medição avançada (*Advanced Metering Infrastructure (AMI)*), capaz de interconectar milhões de dispositivos, entre eles medidores inteligentes e sensores das redes de distribuição [Lopes et al., 2016]. Com o crescimento da medição inteligente e a integração dos medidores inteligentes com centros de controle e casas inteligentes, torna-se necessária uma rede de comunicação sem fio capaz de lidar com um altíssimo número de dispositivos a baixo custo. As redes 5G surgem como uma forma técnica e economicamente viável de atender a essa demanda.

Com a evolução da rede elétrica, os Domínios dos Consumidores e dos Provedores de Serviços se tornam mais integrados, já que medidores inteligentes são instalados nos pontos de consumo de energia para fornecer acesso em tempo real do consumo de energia, além de permitir diferentes tarifações ao longo do dia (por exemplo, tarifação mais cara em horários de pico) [Lopes et al., 2016, Esenogho et al., 2022]. Ademais, a integração entre os dois domínios permite o desligamento de energia em casos de descumprimento das políticas de pagamento. O aumento na complexidade da alocação dos recursos de energia, através das VPPs, controle e gerenciamento das linhas de transmissão e do balanceamento de carga, leitura dos dados de medição ao longo dos domínios da rede e todas as outras vantagens do uso das redes elétricas inteligentes incentivam o uso de algoritmos de Inteligência Artificial e de Aprendizado de Máquina nos Centros de Controle. Especificamente, o uso das SDNs e NFV são os componentes chave na otimização do controle e gerenciamento dos domínios das redes elétricas inteligentes.

Fica evidente que os pilares das redes elétricas inteligentes são a automação inteligente e a comunicação entre os domínios da rede. Cada domínio implementa cenários de uso que possuem requisitos de QoS heterogêneos. A Tabela 4.10 denota os diferentes cenários de uso implementados nos domínios das redes elétricas inteligentes e seus requisitos de comunicação, além das classes de serviços das redes 5G que atendem aos

requisitos destes cenários de uso [Esenogho et al., 2022]. O uso de SDNs, base sob a qual as redes 5G foram projetadas, permite o isolamento, gerenciamento e atendimento dos requisitos heterogêneos destes cenários de uso. A Automação Distribuída com Sensores Inteligentes demanda uma alta confiabilidade da rede de comunicação e uma média densificação de dispositivos, sendo atendido pelas fatias de rede de uRLLC e mMTC, enquanto a aquisição de dados dos sistemas de distribuição, através de medidores inteligentes, demanda baixa latência de comunicação e alta quantidade de dispositivos espalhados na rede, proporcionadas por fatias de mMTC.

Tabela 4.10. Requisitos de QoS dos cenários de uso das redes elétricas inteligentes. Adaptado de [Esenogho et al., 2022]

Cenário de uso	Latência	Confiabilidade	Largura de Banda	Densidade de dispositivos	Tipo de fatia
Automação das subestações	Alta criticidade	Alta	Baixa	Média	uRLLC
Automação Distribuída	Alta criticidade	Alta	Média	Média	uRLLC mMTC
Controle de carga com alta precisão	Alta criticidade	Alta	Média Baixa	Média	uRLLC
Coleta de dados dos sistemas de distribuição	Baixa criticidade	Média	Média	Alta	mMTC
<i>microgrids</i> , VPPs	Média/Alta criticidade	Alta	Baixa	Alta	uRLLC mMTC

4.4. Discussão, tendências, desafios e projetos pesquisa

Esta seção apresenta as tendências tecnológicas que complementam as tecnologias habilitadoras e o funcionamento das redes 5G de forma a torná-las a solução ideal atualmente para atendimento às aplicações críticas apresentadas na seção anterior. Também são apresentados alguns projetos de pesquisa que envolvem o desenvolvimento e melhoria das aplicações críticas. Por fim, é apresentado o cenário de simulação para a parte prática deste minicurso.

4.4.1. NTN

As **redes não terrestres** – NTN – desempenham papel fundamental na ubiquidade do 5G. As redes não terrestres são redes onde veículos espaciais (Satélites) ou aéreos (plataformas de altas altitudes – *High-altitude platform station* (HAPS) – ou veículos aéreos não tripulados UAV) atuam como nó de retransmissão ou uma estação base. A Tabela 4.11 apresenta os principais tipos de plataformas de comunicação das redes NTN.

As NTN complementam as redes terrestres, permitindo a oferta de serviço em áreas e localidades não atendidas pela infraestrutura de comunicação terrestre, aumentando a confiabilidade do 5G e garantindo comunicação contínua e viabilizando a escala-

Tabela 4.11. Principais Tipos de Plataformas de Comunicação NTN

Plataforma	Altitude	Órbita	Distância Típica de transmissão
Satélite LEO	300 – 1.500 km	Circular com velocidade de giro maior que a da Terra	100 – 1.000 km
Satélite GEO	35.786 km	Elevação/azimute fixos em relação a um ponto da terra	200 – 3.500 km
Sistema Aéreo não Tripulado	8 – 50 km	Elevação/azimute fixos em relação a um ponto da terra	5 – 200 km

bilidade de serviços, como por exemplo, *broadcasting*. Várias entidades, como *European Space Agency* (ESA), 3GPP, *Satellite and Terrestrial Network for 5G* (SaT5G), ITU-R, possuem iniciativas para desenvolver e integrar as redes NTN ao 5G. O 3GPP, através das recomendações técnicas 38.811 e 38.821, definiu quais devem ser atendidas, e cenários de uso que tornam possível a integração de redes NTN com a nova interface área do 5G - NR [3GPP, 2020a, 3GPP, 2021].

No *Release 15* o 3GPP aprovou um item de estudo sobre NTN com o objetivo de identificar os principais desafios e propor as principais soluções para a integração das redes NTN ao 5G, ao contrário da visão anterior onde sistemas de comunicação satélites eram soluções autônomas. Como resultado, foram publicados três relatórios técnicos no *Release 16*: TR 22.822, e os já mencionados anteriormente TR 38.811 e TR 38.821, cujos objetivos são [Hosseinian et al., 2021]:

1. TR 22.822 - "*Study on using Satellite Access in 5G*": lista os casos de uso considerando a integração do satélite às redes 5G [3GPP, 2020b].
2. TR 38.811 - "*Study on New Radio (NR) to support Non-Terrestrial Networks*": visa adaptar o modelo de canal aéreo do 3GPP para a NTN [3GPP, 2020a].
3. TR 38.821 - "*Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN)*": detalha uma série de adaptações que permitem os protocolos do NR funcionem na NTN [3GPP, 2021].

A grande maioria das pesquisas atuais, no que se refere as redes NTN, visa desenvolver a arquitetura das redes não terrestres baseadas em satélites. A razão para isso é que o foco, até o momento, de trabalho do 3GPP vem sendo a comunicação por satélite, com compatibilidade implícita para futuras integrações com veículos aéreos de comunicação [Lin et al., 2021]. O 3GPP definiu algumas opções de arquitetura baseada no papel que os satélites podem desempenhar em uma rede NTN. Elas são definidas a partir do tipo de tráfego do satélite e do tipo de *link* de acesso do usuário. O satélite pode operar no modo transparente, onde funciona apenas como retransmissor, e no modo regenerativo, onde possui a função de uma gNB embarcada. Quanto ao acesso do usuário, ele pode

ser direto ou através de um nó de retransmissão terrestre. A Figura 4.18 apresenta essas arquiteturas.

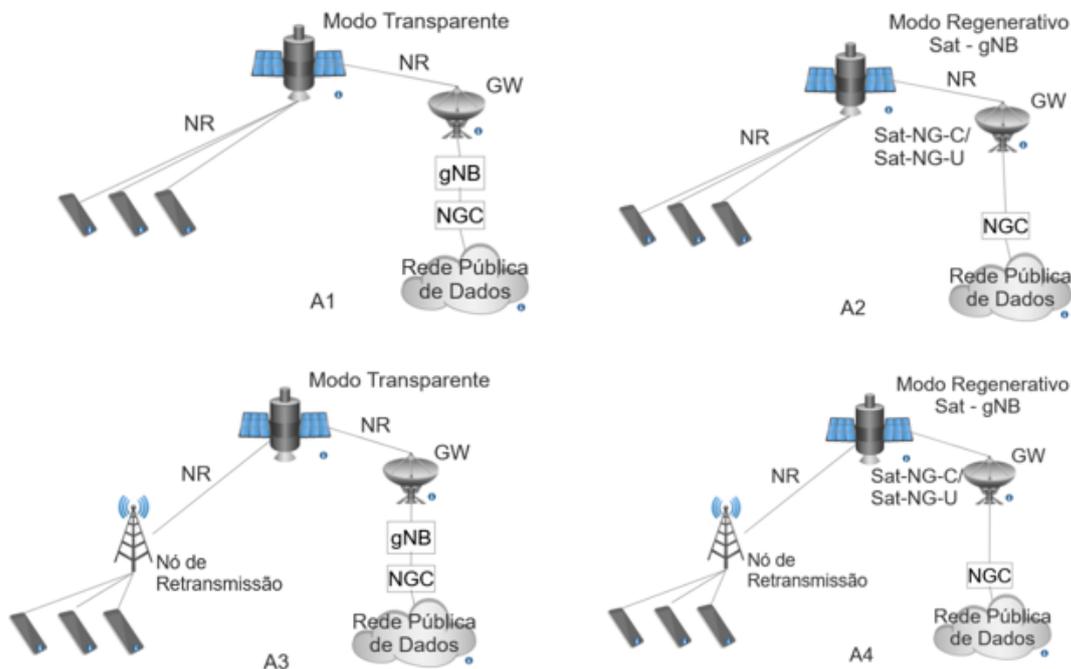


Figura 4.18. Arquitetura NTN baseada em satélites. Pode-se observar quatro cenários básicos que variam de acordo com o modo de atuação do satélite (transparente e regenerativo) e a presença ou não de um nó de retransmissão terrestre. Adaptado de [Guidotti et al., 2019].

No primeiro cenário, os dispositivos de usuário se comunicam diretamente com os satélites através da interface aérea da tecnologia 5G. Esse cenário é bastante desafiador pois submete uma interface que foi desenhada para sistemas terrestres às características peculiares do canal de comunicação por satélite. Nesse cenário, a gNB é conceitualmente localizada no *gateway* da rede satélite, provendo conexão ao *core* da rede 5G e a rede pública de dados. No cenário 2, o processamento regenerativo do sinal gera a forma de onda do 5G NR no satélite enquanto o *gateway* provê conectividade com o *core* da rede 5G e a rede pública de dados. Essa arquitetura é mais complexa e mais custosa, mas reduz os atrasos dos procedimentos das camadas físicas e MAC da NR. Nos cenários 3 e 4, a conexão entre os dispositivos de usuário é feita com nós de retransmissão terrestres que utilizam os satélites como link de *backhaul* [Guidotti et al., 2019].

Todos os 3 cenários de uso previstos para o 5G (eMBB, mMTC e uRLLC) devem ser suportados pelas redes não terrestres. Nesse contexto, os satélites geostacionários *Geostationary Earth Orbiting* (GEO) de alta capacidade *High Throughput Satellite* (HTS) e de baixa órbita *Low Earth Orbiting* (LEO) surgem como destaque. Os satélites GEO HTS com suas altas taxas de dados são ideais para serviços eMBB e as megaconstelações de satélites LEO proporcionam o baixo atraso de propagação, 14ms em um sentido e 50ms no percurso de ida e volta, necessário para atender aos requisitos das aplicações uRLLC não tão sensíveis [Rinaldi et al., 2020].

Apesar das boas perspectivas, a integração das NTN com o 5G traz uma série de

desafios. Questões relacionadas a não-linearidade do canal, atrasos de propagação gerando impactos direto nos mecanismos de acesso inicial ao meio (acesso aleatório, controle de *loop*, temporizadores, *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ)) e a mobilidade do satélite (nos satélites LEO, a alta velocidade gera muitas mudanças e variação das taxas do efeito Doppler) são significativas e de difícil solução [Hosseinian et al., 2021].

As pesquisas em redes de satélites estão em franca ascensão. Um campo que surge com potencial de tornar essas redes mais acessíveis e universais é o de satélites menores e também de satélites miniaturizados ou *CubeSats*, em órbitas LEO. Exemplos de investimento para a formação de megaconstelações de satélites pequenos, proporcionando altas taxas de dados e baixa latência, não faltam. Estas redes, cujos principais exemplos são a Starlink, Oneweb e projeto Kuiper (Amazon), possibilitam conexão em áreas remotas e desassistidas por infraestrutura de conexão terrestre. Em relação a *cubesats*, que se constituem em satélites miniaturizados, em formato cúbico e com massa extremamente reduzida, podem também servir para formar redes provendo conexão, ainda que com menor capacidade, em áreas inóspitas. Um exemplo é o projeto KIPP da empresa *KEPLER Communication*⁵. Embora estas iniciativas ainda não estejam integradas a redes 5G, é possível dizer que, no futuro, há alta probabilidade de que suas infraestruturas sejam aproveitadas para esta finalidade [Saeed et al., 2020].

4.4.2. Desafios relacionados às tecnologias habilitadoras

Questões técnicas relacionadas a privacidade e segurança são importantes quando observamos o MEC. Aspectos de acesso, autenticação, criptografia e como prover acesso a apenas dispositivos confiáveis são pontos importantes e que deve ser devidamente endereçados. Uma falha de segurança pode permitir ataques a toda infraestrutura da NFV podendo ocasionar a sua manipulação ou desligamento.

Somam-se ao caso anterior aspectos relacionados ao uso de inteligência artificial que precisam ser melhor estudados para que seja possível extrair todo o potencial de forma a incrementar a eficiência de sistemas físico cibernéticos.

O consumo de energia também é preocupante para a vasta implementação de computação na borda e poucos trabalhos abordam a redução de consumo em *data centers* que são reconhecidamente grandes consumidores de energia [Spinelli e Mancuso, 2020]. Alguns trabalhos que buscam instanciar VNFs modelam os recursos da rede e as VNFs como grafos direcionados, a fim de implementar seus algoritmos de otimização [Xie et al., 2021, Quang et al., 2019, Zheng et al., 2018]. Especificamente, Xie *et al.* propõem a utilização da Aprendizagem por Reforço Profundo para a tomada de decisão ao instanciar as VNFs ao longo da rede, através do algoritmo proposto Kolin. Eles ainda utilizam uma Rede Neural em Grafos para explorar a estrutura das NFVs, que são representadas como Grafos Direcionados Acíclicos. Já Quang *et al.* modelam o problema de instanciação de VNFs como um Processo de Decisão de Markov, onde o espaço de estados S representa os requisitos computacionais de cada serviço e de cada enlace virtual entre funções de rede, o espaço de ações A que representa a prioridade em se instanciar uma função de rede em determinado nó e os pesos dos enlaces usados no encadeamento das funções. A taxa de aceitação é considerada como a recompensa r . Quang *et al.* utilizam o Aprendizado por

⁵Mais informações em: <https://kepler.space/network/>

Reforço Profundo para resolver o problema de instanciação.

Li *et al.* apresentam uma nova arquitetura de *Edge Computing* para IoT com módulos responsáveis por identificar o local que o serviço está sendo requisitado, realizar o processamento ou, quando necessário, a migração do processamento das requisições, gerenciar e otimizar o desempenho de uma borda específica e gerenciar a mobilidade dos dispositivos. Li *et al.* ainda propõem um novo esquema de acesso e controle dos dispositivos [Li et al., 2018]. Já Song *et al.* apresentam um forma de alocação de recursos de rede em um ambiente de computação de borda baseada no contexto do usuário das aplicações, ou seja, baseado localização e requisitos das aplicações. Eles dividem os usuários em grupos de acordo com suas velocidades e alocam os recursos de rede para cada grupo, utilizando um algoritmo de particionamento de grafos [Song et al., 2019]. Xiong *et al.* utilizam técnicas de aprendizado por reforço para resolverem o problema de alocação de recursos em redes de computação de borda. Eles modificam uma rede Q Profunda (*Deep Q-Network*) para otimizar a aprendizagem e modelam o problema de alocação de recursos como um Processo de Decisão de *Markov*. Além disso, eles adicionam uma camada no final da Q-network para filtrar os valores de ação-estado inválidos [Xiong et al., 2020].

Liu *et al.* modelam o problema de mapeamento e roteamento dinâmico de VNF sensível a atraso, perda de pacotes e *jitter* como um problema de programação linear inteira e propõem uma heurística baseada em um método de relaxamento Lagrangeano melhorado para resolver o problema [Liu et al., 2021]. Já Wang *et al.* modelam o problema de posicionamento das encadeamentos de Funções de Rede, que visa a otimização na utilização dos recursos, como um problema de correspondência em Grafos Ponderados (*graph matching*). Eles modelam as requisições de SFC e a infraestrutura de rede como um grafo ponderado reformulando o problema de SFC como um problema de correspondência de grafos [Wang et al., 2019]. Xu et al. [Xu et al., 2020b] estudam o problema de encadeamento de funções e o mapeamento de VNFs sensível a QoS em redes IoT multicamadas, e formulam o problema de maximização na taxa de transferência como um problema de programação linear inteira. Wu *et al.* estudam o problema de mapeamento de VNFs considerando que as VNF de um serviço requisitado podem ser executadas em paralelo e representadas por grafos direcionados. Eles modelam o problema como um problema de Programação Linear Inteira com uma abordagem que leva em consideração a probabilidade de um mapeamento contribuir com a recompensa positiva [Wu et al., 2021b].

Diferente de trabalhos que modelam as VNFs como um grafo direcionado, os autores em [Agarwal et al., 2019] modelam as funções de rede como M/M/1, associando os requisitos de QoS a diferentes classes e associando a taxa de serviço a quantidade de CPU para executar a função. O trabalho conduzido em [Plachy et al., 2021b] busca alocar recursos computacionais e de comunicação considerando a movimentação dos usuários, instanciando máquinas virtuais e analisando a qualidade dos recursos de comunicação ao longo de um caminho que pode ser percorrido pelos usuários. Em um primeiro momento, é proposto alocar os recursos minimizando a latência das aplicações, definida como a soma dos atrasos de propagação no meio de rádio, nos enlaces de *backhaul*, na inicialização das máquinas virtuais e no tempo demandado de *handover*. Entretanto, obter o ótimo global neste problema de minimização é complexo, visto que deve considerar todas as possibilidades de instanciar e alocar os recursos. Deste modo, o problema de minimiza-

ção da latência é transformado em um problema de maximização da taxa de comunicação, considerando as restrições iniciais do problema.

Apesar dos vários benefícios (agilidade, flexibilidade, entre outros) proporcionados pelas tecnologias habilitadoras, há vários desafios a serem resolvidos. A mudança de uma arquitetura baseada em *hardware* para uma baseada em *software* simplificará o compartilhamento de recursos de uma mesma infraestrutura entre vários clientes e aplicações. Contudo, a configuração de várias VNFs em uma única plataforma NFV trás problemas de gerenciamento em fatias de rede muito grandes. Para haver uma utilização eficiente de recursos de rede, é necessário o uso de algoritmos de agendamento inteligentes. Esse problema de gerenciamento só aumenta quando se expande o problema para o gerenciamento entre e intra fatias distintas. A orquestração fim a fim da rede, bem como o gerenciamento de diferentes fatias, cada uma com requisitos de SLAs diferentes, ao mesmo tempo que é necessário um uso eficiente de recursos da rede é extremamente desafiador.

Uma preocupação básica devido ao compartilhamento de uma única infraestrutura é com a segurança e privacidade das informações. Existirão várias fatias da rede, cada uma com suas políticas de segurança e privacidade de acordo com as aplicações e serviços que possuem.

Também há desafios de pesquisa relacionados à mobilidade dos dispositivos. Cada fatia de rede possuirá dispositivos com requisitos distintos de latência e mobilidade e isso fica claro quando se compara, por exemplo, a utilização da rede por um serviço para atendimento a carros autônomos e outra fatia para atender a trens de alta velocidade onde serão demandados muito mais *handovers* [Barakabitze et al., 2020].

4.4.3. Coexistência das Aplicações Críticas

No ecossistema das redes 5G, as aplicações coexistem e interagem umas com as outras. A Figura 4.19 demonstra um exemplo da interação entre diferentes aplicações habilitadas pelo 5G. Cabe destaque especial aos dispositivos UAV, que podem ser usados para a coleta de dados de pesquisa em áreas remotas ou fornecer conteúdos bastante buscados em determinada região. Além disso, as redes *Smart Grid* podem utilizar os dispositivos UAV para a coleta de dados dos sensores espalhados pelas linhas de transmissão e distribuição. As *microgrids*, abastecem as redes elétricas a partir da geração limpa de energia (por exemplo, eólica e solar). A concessionária de energia controla a geração distribuída de energia através de sensores incorporados às linhas de transmissão, e os centros de controle analisam a demanda de energia elétrica em tempo real.

As aplicações de IoV se beneficiam da conectividade disponível na borda da rede móvel e podem trafegar com segurança à velocidades elevadas com baixíssimo risco de colisão, uma vez que os veículos compartilham dados de obstáculos a sua volta. O grande volume de dados gerados a partir do monitoramento dos sinais vitais do pedestre, que caminha à beira da estrada, são processados na MEC e encaminhados à equipe médica que avalia remotamente o seu estado de saúde.

Assim, as aplicações críticas poderão funcionar, apesar da segregação em fatias, em uma mesma rede 5G e, além disso, interoperarem entre si. Além disso, algumas das aplicações podem funcionar como provedora de recursos ou conexão para outra. Cabe

destaque que todas as aplicações devem ser atendidas por fatias da rede que garantem o isolamento e confiabilidade do serviço prestado e que a criação dinâmica e o gerenciamento dessas fatias ainda são desafios de pesquisa.

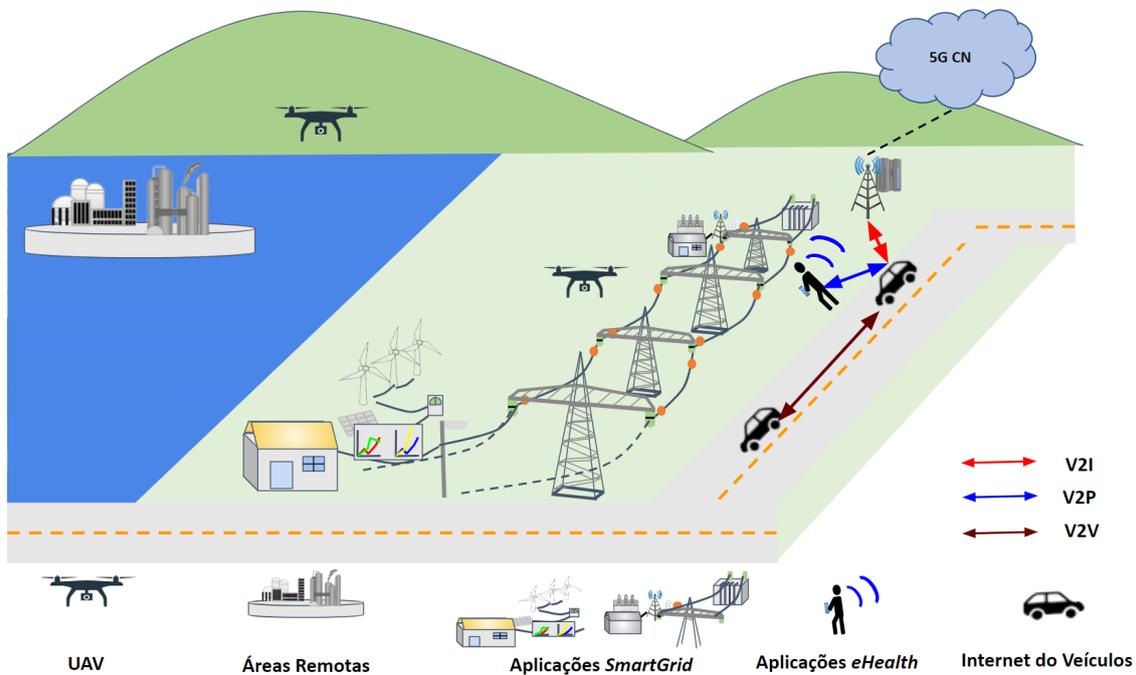


Figura 4.19. Coexistência das aplicações críticas nas redes 5G.

4.4.4. Simulação de redes 4G e 5G

Uma grande dificuldade na pesquisa em 5G é a disponibilidade de ferramentas de código aberto que permitam uma análise da comunicação em rede com a tecnologia 5G. Assim, essa parte do capítulo visa apresentar o uso do *Network Simulator 3* para o estudo das redes 5G.

A proposta prática deste minicurso é baseada na simulação de uma aplicação crítica utilizando como meio de conectividade as redes 4G e 5G, permitindo assim uma comparação dos resultados entre as tecnologias. No cenário proposto, a rede possui cinco estações rádio-base distribuídas ao longo de um trecho de 1 km de uma autoestrada. Nessa autoestrada, veículos se movem de uma ponta a outra. A rede possui conectividade com a Internet através da conexão de um *host* remoto conectado ao núcleo da rede. A quantidade de veículos é alterada e eles são divididos em 2 grupos que apresentam velocidades constantes diferentes (115 km/h e 120 km/h). A Figura 4.20 apresenta o cenário básico da simulação.

Existem atualmente vários simuladores de redes que estão em constante evolução e desenvolvimento para representar de maneira mais realista as novas redes 5G. Os mais relevantes são: “5G K-Simulator”⁶ do *Korea Advanced Institute of Science and Technology*; o “Vienna 5G Link Level Simulator”⁷ desenvolvido em Matlab feito pela *Technical*

⁶Disponível em: <https://github.com/5GKSimSys/5G-K-SimSys>

⁷Disponível em: <https://www.tuwien.at/etit/tc/en/vienna-simulators/vienna-5g-simulators/>

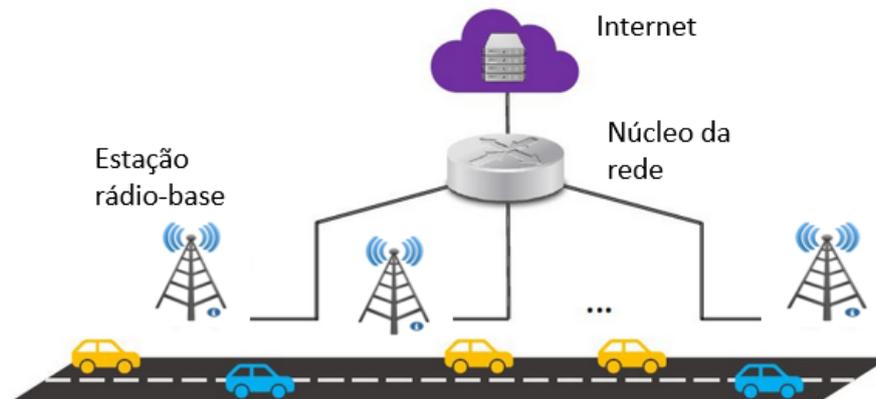


Figura 4.20. Cenário de simulação.

University of Vienna; o "5G-air-simulator"⁸ e desenvolvido pela Politecnico di Bari; o "Simu5G"⁹ que é uma extensão para o simulador Omnet++ e foi desenvolvido pela University of Pisa; e o "5G LENA" que é um módulo para o Network Simulator – ns-3 desenvolvido pelo Centre Tecnològic Telecomunicacions Catalunya (CTTC).

O simulador escolhido foi o ns-3¹⁰ que é um simulador de eventos discretos e desenvolvido com fins educacionais e de pesquisa. Ele possui código aberto é amplamente reconhecido pela comunidade acadêmica, além de conter vasta documentação, desenvolvimento e manutenção constantes.

O módulo 5G LENA¹¹ é baseado no módulo de ondas milimétricas, módulo totalmente aderente as recomendações do 3GPP, do ns-3 e uma evolução natural do simulador 4G, "LTE/EPC Network Simulator", desenvolvido pelo mesmo centro tecnológico. Os scripts utilizados e as instruções para execução da simulação se encontram em repositório¹² na internet.

4.4.5. Projetos de pesquisa

Diversos órgãos e entidades estão investindo recursos e tempo para na pesquisa de aplicações críticas e como as redes 5G podem atender seus requisitos.

O projeto 5G-MOBIX¹³ é uma cooperação entre instituições de ensino, órgãos governamentais e empresas de países da União Europeia, Turquia, China e Coreia, que visa desenvolver e avaliar funcionalidades de veículos automatizados sob as principais inovações tecnológicas do 5G. O projeto conta com infraestrutura completa de conectividade 5G em 2 fronteiras entre países (Grécia-Turquia e Espanha-Portugal) e 6 sites de testes na França, Alemanha, Holanda, Finlândia, China e Coreia do Sul. Os sites supor-

⁸Disponível em: <https://github.com/telematics-lab/5G-air-simulator>

⁹Disponível em: <http://simu5g.org/>

¹⁰Disponível em: <https://www.nsnam.org>

¹¹Disponível em: <https://5g-lena.cttc.es>

¹²Disponível em: https://github.com/fp-cn/Minicurso4_SBRC_2023

¹³Disponível em: <https://www.5g-mobix.com/about>

tam funcionalidades avançadas de mobilidade automatizada. São testadas uma variedade de tecnologias, funções e aplicações 5G.

O projeto PD_manager¹⁴, desenvolvido na Europa, busca fornecer um acompanhamento para pacientes com *Parkinson* por uma equipe multidisciplinar de médicos. Os pacientes utilizam sensores simples e acessíveis, como relógios inteligentes e palmilhas para medir o equilíbrio, e os dados são enviados para a equipe de médicos, que pode fornecer o tratamento terapêutico específico para cada paciente. Já o projeto SERAS¹⁵, também desenvolvido na Europa, busca alertar pacientes que sofrem de epilepsia antes de suas crises epiléticas. O paciente utiliza um fone de ouvido que monitora a atividade cerebral e envia os dados para um aplicativo, que ao detectar uma possível crise epilética, com cerca de 1 minuto de antecedência, envia um alarme ao paciente, que pode se colocar em uma posição segura para evitar acidentes e lesões.

O HORSE¹⁶ é um projeto financiado pelo programa de inovação e pesquisa da União Europeia *Horizon 2020* e busca uma integração, para pequenas e médias empresas, de sistemas robóticos integrados e inteligentes controlados por processos de fabricação dinâmicos baseados em IoT. Nele, é proposto um novo modelo de manufatura inteligente envolvendo a colaboração de humanos, robôs, veículos autônomos e maquinário. Apesar de toda a evolução em sistemas físico-cibernéticos, IoT e robótica, as linhas de produção ainda não são flexíveis. Questões de segurança não permitem a integração completa entre homens e máquinas e o processo de controle robótico ainda é isolado, não permitindo uma integração com o processo fim-a-fim de fabricação. Para resolver essas questões, o HORSE foca em múltiplas áreas de maneira a criar linhas de produção extremamente flexíveis e reconfiguráveis. Foi criado um pilar técnico buscando uma arquitetura de referência para um sistema físico cibernético que combina o processo de produção no espaço cibernético com agentes humanos em um ambiente de produção integrado. Alguns casos piloto que podem ser destacados são:

1. Experimento para inspeção visual robótica com co-manipulação humana e robótica em uma fábrica da BOSCH na Espanha.
2. Aplicações de trabalho compartilhando entre homens e robôs para controle híbrido de posicionamento em uma fábrica da Odlewnie Polskie SA na Polônia.
3. Montagem flexível com robôs móveis em uma fábrica da Thomas Regout International na Holanda.

Financiado pelo programa de inovação e pesquisa da União Europeia o 5G-Drones¹⁷ busca testar vários casos de uso de veículos aéreos não tripulados envolvendo todos as categorias de uso definidas para o 5G (eMBB, uRLLC e mMTC), validando os KPIs para suportar essas aplicações. A ideia principal é demonstrar que o 5G garante as necessidades básicas para o uso dos UAV e provar que também suportam os casos de uso

¹⁴Disponível em: <http://www.parkinson-manager.eu/>

¹⁵Disponível em: <https://d-lab.tech/mjn/>

¹⁶HORSE project - Disponível em: <http://www.horse-project.eu/>

¹⁷Disponível em: <https://5gdrones.eu/>

desafiadores e que exigem o máximo dos recursos da rede, como latência, confiabilidade, grande quantidade de conexões e alta taxa de dados. O projeto atenderá aos diferentes cenários através do fatiamento de uma mesma infraestrutura de rede que compartilha os mesmos recursos. São definidos 4 casos de uso: gerenciamento de tráfego de UAV; segurança contra desastres; consciência situacional e conectividade durante grandes eventos.

A organização norte americana Aliança para Soluções Industriais de Telecomunicações *Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS)* ¹⁸ é composta por várias companhias com o objetivos de novas soluções tecnológicas para a indústria de tecnologia da informação e telecomunicações. Entre as tecnologias pesquisadas estão a evolução da rede 5G, comunicações e infraestruturas críticas, carros conectados, IoT, UAV, NFV, satélites e redes de 6ª geração.

O Comitê de Tecnologia de Telecomunicações (TTC) é uma organização de desenvolvimento de padrões no Japão ¹⁹. O TTC está ligado ao ministério de comunicações japonês e representando o país em todas as discussões junto ao ITU. No campo das aplicações críticas, o TTC possui grupos de trabalho relacionados a IoV, *e-Health*, IoT, SDN e comunicações de emergência.

4.4.6. Caminho para o 6G

Com a implantação das redes 5G por todo o mundo, várias aplicações e casos de uso são criados utilizando todas as vantagens e recursos oferecidos por essas redes e desafiando os seus limites. Esse fato impulsiona os pesquisadores a trabalhar na próxima geração de redes móveis celulares, buscando uma grande evolução para suprir as demandas futuras da sociedade. Apesar dos avanços e qualidades das redes 5G, espera-se que as redes 6G sejam mais inteligentes, confiáveis, escaláveis, energeticamente eficientes, de forma a atender aplicações emergentes e atuais que estão em constante evolução e que não poderão ser atendidas pelas redes 5G. Os requisitos de taxa de dados ultra-altas, acesso em tempo real a recursos de computação, latências extremamente baixas, localização precisa, alta confiabilidade são muito mais estritos e superam em larga margem os das redes 5G. Essas aplicações (chamadas holográficas –*Holographic Telepresence (HT)*), UAV, realidade estendida –XR, *smart grid 2.0*, Indústria 5.0 e Internet de Tudo –*Internet of Everything (IoE)*) demandarão o uso e implementação de novas tecnologias habilitadoras como: *Edge Intelligence (EI)*, comunicação em frequências na casa dos THz, *Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)*, *Large Intelligent Surfaces (LIS)*, *Self-Sustaining Networks (SSN)* entre outras [De Alwis et al., 2021].

O lançamento do 6G está previsto para 2030 e ainda há muito a ser feito. A Figura 4.21 apresenta o cronograma previsto para implantação do 6G. Por conta desse ser um tema extremamente recente, ainda não há consenso na literatura sobre a nomenclatura das categorias de uso do 6G. De Alwis et al. [De Alwis et al., 2021] definem os 4 cenários de uso como sendo: *Further enhanced Mobile Broadband (FeMBB)*, *Ultra-massive Machine-Type Communication (umMTC)*, *Mobile BroadBand and Low-Latency (MBBLL)* e *massive Low-Latency Machine Type communication (mLLMT)*. Já Chowdhury et al [Chowdhury et al., 2020] definem os quatro cenários de uso como: *Ubi-*

¹⁸Disponível em: <https://www.atis.org/technologies/>

¹⁹Disponível em: <https://www.ttc.or.jp/e/org/workin-groups>

quitous mobile ultra-broadband (uMUB), Ultra-high-speed with low-latency communications (uHSLLC), mMTC e ultra-High Data Density (uHDD). Porém uma questão é exatamente igual: os KPIs das redes 6G serão muito mais estritos. Fala-se de taxas de pico acima de 1 Tbps, atraso fim a fim menor que 0,1 ms, tempo de processamento de 10 ns, disponibilidade maior que 99,99999%, densidade de conexão de 10^7 dispositivos/km², eficiência energética 5 vezes maior que no 5G e velocidades de deslocamento de até 1000 km/h.

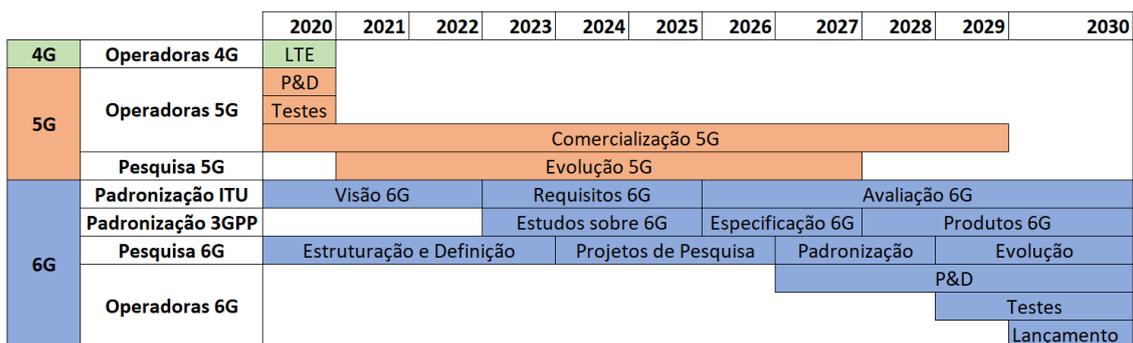


Figura 4.21. Cronograma Implantação 6G. Adaptado de [De Alwis et al., 2021]

A Figura 4.22 apresenta a evolução dos KPIs comparando-se as redes 4G, 5G e 6G.

4.5. Considerações Finais

As redes móveis têm se tornado um ponto de convergência de tecnologias de comunicação e computação. Desde a 1ª Geração, que tinha o núcleo da rede baseado em comutação por circuitos, à 5ª Geração, que implementa um núcleo orientado a serviços, as redes móveis têm alcançado cada vez mais destaque como principal meio de comunicação sem fio. As redes 4G já implementavam avanços significativos em relação à geração anterior. Pela primeira vez em uma rede móvel, a comutação era totalmente por pacotes e as chamadas de voz eram por comutação IP, através da VoLTE, além dos avanços que ocorreram durante a maturidade da 4ª Geração, como a agregação de portadora e o aumento das possibilidades de comunicação entre máquinas, consolidando o protagonismo destas redes no cenário mundial. Esse protagonismo impulsiona o surgimento de novos serviços, que exigem cada vez mais recursos e disponibilidade das redes móveis.

Como evolução natural, as redes 5G implementam tecnologias novas e tradicionais para atender e habilitar aplicações que necessitam de alta confiabilidade, disponibilidade e conectividade, que não podem ser oferecidas por gerações anteriores. Dentre estas aplicações, as aplicações críticas geram grande interesse na indústria e comunidade científica devido à rigidez dos seus requisitos de desempenho. Taxa de dados (pico e média), eficiência espectral e energética, latência, densidade de conexão, capacidade de tráfego por área e mobilidade são todos indicadores chave que foram extremamente melhorados, tornando o 5G capaz de atender às aplicações críticas.

Para proporcionar essa evolução nos indicadores chave de desempenho, a arquitetura da RAN e do CN passa a ser orientada a serviços, implementando tecnologias que

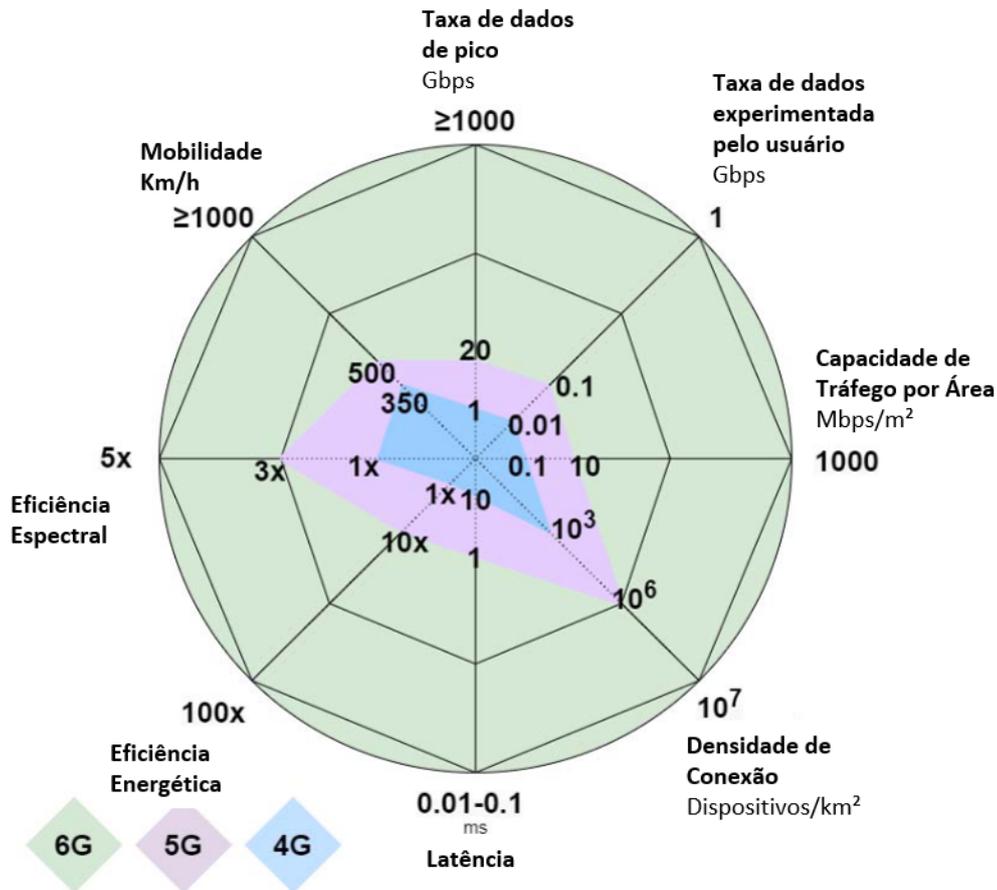


Figura 4.22. Evolução requisitos 4G x 5G x 6G. Adaptado de [De Alwis et al., 2021]

permitem fácil gerenciamento e que utilizam de maneira eficiente os recursos disponíveis. Em especial, o uso das SDNs aliadas à NFV proporciona um controle completo da rede, reduzindo o tempo de configuração de novas aplicações e o custo de CAPEX e OPEX. A implementação da MEC traz para perto do usuário o poder computacional e de armazenamento que antes era alocado somente no núcleo da rede, reduzindo o latência das aplicações. Todas essas tecnologias possibilitam o uso do Fatiamento da Rede, que permite um isolamento e customização das aplicações e o uso eficiente dos recursos, uma vez que somente a parcela necessária de recursos que atenda à aplicação é alocada. Além disso, em caso de falhas, uma nova fatia pode ser rapidamente configurada, garantindo a disponibilidade da aplicação.

Entretanto, problemas relacionados à escalabilidade das aplicações, privacidade dos dados e mobilidade das VNFs movimentam as pesquisas dos setores industriais e acadêmicos. Com aplicações extremamente complexas, o gerenciamento destas fatias e do ciclo de vida das VNFs passa de simples e eficiente para complexo e computacionalmente custoso. Neste mesmo sentido, o uso de redes comuns para aplicações heterogêneas com políticas de segurança distintas pode expor dados sensíveis dos usuários. A mobilidade dos usuários, característica evidente das redes móveis, impõe mobilidade também para as VNFs, aumentando demasiadamente o número de *handovers* na rede.

As aplicações críticas irão diferir em relação as características do 5G das quais usufruem e que atendem melhor aos seus requisitos. Dentre os 3 cenários de uso, o eMBB será o utilizado pelas aplicações que necessitam de uma maior taxa de dados transmitido. Um grupo de aplicações como, por exemplo, UAV, IoV e *smart grid* depende de conexões extremamente confiáveis, baixas latências e possuem como cenário predominante o uRLLC. Por último, tem-se as aplicações que possuem como característica mais marcante a necessidade de uma grande quantidade de dispositivos conectados, como as voltadas para indústria (manufatura inteligente e gêmeos digitais).

Apesar dos desenvolvimentos previstos, as redes 5G não terão capacidade de atender à demanda futura de aplicações e serviços. O rápido desenvolvimento de aplicações emergentes como, inteligência artificial, realidade virtual e chamadas holográficas, além do aumento do volume de tráfego oriundo de redes móveis (era de 7,462 EB/mês em 2010 e é esperado que chegue a 5016 EB/mês em 2030 [ITU-R, 2015a]) apontam para a constante necessidade de evolução das redes móveis. Os estudos para a padronização e desenvolvimento das redes de 6ª geração ainda estão no começo (a previsão de lançamento é no ano de 2030), mas já começam a ser desenhados os requisitos para essas redes, assim como as novas tecnologias habilitadoras (EI, NOMA, entre outras). Aqui, fala-se, por exemplo, de taxas acima de 1 Tbps e atraso fim a fim de 0,1 ms [Chowdhury et al., 2020].

Com isso, conclui-se que ainda existe muitos campos de estudo nas redes 5G, em especial no que diz respeito ao planejamento das VNFs, gestão inteligente da rede, integração com tecnologias como a de satélite, entre diversos outros. Além disso, a aplicação dessas novas tecnologias dentro dos casos de uso específicos de cada aplicação crítica também requer estudos de viabilidade e custos. Por fim, a definição dos cenários não atendidos pelo 5G, mas que potencialmente serão demandados por novas versões de aplicações, gera insumos para novas proposições tecnológicas a serem avaliadas para o 6G.

Referências

- [3GPP, 2017] 3GPP (2017). System architecture milestone of 5G phase 1 is achieved.
- [3GPP, 2020a] 3GPP (2020a). Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks. Relatório técnico, 3GPP.
- [3GPP, 2020b] 3GPP (2020b). Study on using satellite access in 5G. Relatório técnico, 3GPP.
- [3GPP, 2021] 3GPP (2021). Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN). Relatório técnico, 3GPP.
- [3GPP, 2016] 3GPP (2016). Feasibility study on new services and markets technology enablers; stage 1 (release 14). Relatório Técnico TR 22.891, Third Generation Partnership Project.
- [Adrah et al., 2022] Adrah, C. M., Palma, D., Kure, O. e Heegaard, P. E. (2022). Deploying 5G architecture for protection systems in smart distribution grids. Em *2022 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, p. 1–5.

- [Agarwal et al., 2019] Agarwal, S., Malandrino, F., Chiasserini, C. F. e De, S. (2019). VNF placement and resource allocation for the support of vertical services in 5G networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 27(1):433–446.
- [Agbaje et al., 2022] Agbaje, P., Anjum, A., Mitra, A., Oseghale, E., Bloom, G. e Olu-fowobi, H. (2022). Survey of interoperability challenges in the Internet of Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(12):22838–22861.
- [Ahvar et al., 2021] Ahvar, E., Ahvar, S., Raza, S. M., Manuel Sanchez Vilchez, J. e Lee, G. M. (2021). Next generation of SDN in cloud-fog for 5G and beyond-enabled applications: Opportunities and challenges. *Network*, 1(1):28–49.
- [Alenoghena et al., 2022] Alenoghena, C. O., Onumanyi, A. J., Ohize, H. O., Adejo, A. O., Oligbi, M., Ali, S. I. e Okoh, S. A. (2022). ehealth: A survey of architectures, developments in mhealth, security concerns and solutions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20):13071.
- [Arshad et al., 2019] Arshad, Q. K. U. D., Kashif, A. U. e Quershi, I. M. (2019). A review on the evolution of cellular technologies. Em *2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*, p. 989–993. IEEE.
- [Azari et al., 2022] Azari, M. M., Solanki, S., Chatzinotas, S., Kodheli, O., Sallouha, H., Colpaert, A., Mendoza Montoya, J. F., Pollin, S., Haqiqatnejad, A., Mostaani, A., Lagunas, E. e Ottersten, B. (2022). Evolution of non-terrestrial networks from 5G to 6G: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(4):2633–2672.
- [Barakabitze et al., 2020] Barakabitze, A. A., Ahmad, A., Mijumbi, R. e Hines, A. (2020). 5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges. *Computer Networks*, 167:106984.
- [Bazzi et al., 2021] Bazzi, A., Berthet, A. O., Campolo, C., Masini, B. M., Molinaro, A. e Zanella, A. (2021). On the design of sidelink for cellular V2X: A literature review and outlook for future. *IEEE Access*, 9:97953–97980.
- [Carrillo et al., 2022] Carrillo, D., Kalalas, C., Raussi, P., Michalopoulos, D. S., Rodriguez, D. Z., Kokkonen-Tarkkanen, H., Ahola, K., Nardelli, P. H. J., Fraidenraich, G. e Popovski, P. (2022). Boosting 5G on smart grid communication: A smart ran slicing approach. *IEEE Wireless Communications*, p. 1–8.
- [Cavalcante et al., 2021] Cavalcante, A. M., Marquezini, M. V., Mendes, L. e Moreno, C. S. (2021). 5G for remote areas: Challenges, opportunities and business modeling for brazil. *IEEE Access*, 9:10829–10843.
- [Ceriotti et al., 2012] Ceriotti, M., Diedrich, B. L. e McInnes, C. R. (2012). Novel mission concepts for polar coverage: An overview of recent developments and possible future applications. *Acta Astronautica*, 80:89–104.
- [Chowdhury et al., 2020] Chowdhury, M. Z., Shahjalal, M., Ahmed, S. e Jang, Y. M. (2020). 6G wireless communication systems: Applications, requirements, technologies, challenges, and research directions. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 1:957–975.
- [Cox, 2020] Cox, C. (2020). *An introduction to 5G: the new radio, 5G network and beyond*. John Wiley & Sons, 1 edição.
- [Darwish et al., 2022] Darwish, T., Kurt, G. K., Yanikomeroğlu, H., Bellemare, M. e Lamontagne, G. (2022). LEO satellites in 5G and beyond networks: A review from a standardization perspective. *IEEE Access*, 10:35040–35060.

- [De Alwis et al., 2021] De Alwis, C., Kalla, A., Pham, Q.-V., Kumar, P., Dev, K., Hwang, W.-J. e Liyanage, M. (2021). Survey on 6G frontiers: Trends, applications, requirements, technologies and future research. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2:836–886.
- [de Souza Lopes et al., 2020] de Souza Lopes, C. H., Lima, E. S., Pereira, L. A. M., Borges, R. M., Ferreira, A. C., Abreu, M., Dias, W. D., Spadoti, D. H., Mendes, L. L. e Junior, A. C. S. (2020). Non-standalone 5G NR fiber-wireless system using FSO and fiber-optics fronthauls. *Journal of Lightwave Technology*, 39(2):406–417.
- [Esenogho et al., 2022] Esenogho, E., Djouani, K. e Kurien, A. M. (2022). Integrating artificial intelligence Internet of Things and 5G for next-generation smartgrid: A survey of trends challenges and prospect. *IEEE Access*, 10:4794–4831.
- [ETSI, 2022] ETSI (2022). Technical specification 5G: Unmanned aerial system (UAS) support in 3GPP (3GPP TS 22.125 version 17.6.0 release 17). Relatório Técnico ETSI TS 122 125 V17.6.0, ETSI, França.
- [Fernandes et al., 2011] Fernandes, N. C., Moreira, M. D., Moraes, I. M., Ferraz, L. H. G., Couto, R. S., Carvalho, H. E., Campista, M. E. M., Costa, L. H. M. e Duarte, O. C. M. (2011). Virtual networks: Isolation, performance, and trends. *Annals of Telecommunications*, 66:339–355.
- [Fotouhi et al., 2019] Fotouhi, A., Qiang, H., Ding, M., Hassan, M., Giordano, L. G., Garcia-Rodriguez, A. e Yuan, J. (2019). Survey on UAV cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges. *IEEE Communications surveys & tutorials*, 21(4):3417–3442.
- [Geraci et al., 2022] Geraci, G., Garcia-Rodriguez, A., Azari, M. M., Lozano, A., Mezzavilla, M., Chatzinotas, S., Chen, Y., Rangan, S. e Di Renzo, M. (2022). What will the future of UAV cellular communications be? A flight from 5G to 6G. *IEEE communications surveys & tutorials*, 24(3):1304–1335.
- [Ghosh et al., 2019] Ghosh, A., Maeder, A., Baker, M. e Chandramouli, D. (2019). 5G evolution: A view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15. *IEEE access*, 7:127639–127651.
- [Guidotti et al., 2019] Guidotti, A., Vanelli-Coralli, A., Conti, M., Andrenacci, S., Chatzinotas, S., Maturo, N., Evans, B., Awoseyila, A., Ugolini, A., Foggi, T. et al. (2019). Architectures and key technical challenges for 5G systems incorporating satellites. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(3):2624–2639.
- [Gupta e Jha, 2015] Gupta, A. e Jha, R. K. (2015). A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies. *IEEE access*, 3:1206–1232.
- [Gupta et al., 2019] Gupta, R., Tanwar, S., Tyagi, S. e Kumar, N. (2019). Tactile Internet and its applications in 5G era: A comprehensive review. *International Journal of Communication Systems*, 32(14):e3981.
- [Hosseinian et al., 2021] Hosseinian, M., Choi, J. P., Chang, S.-H. e Lee, J. (2021). Review of 5G NTN standards development and technical challenges for satellite integration with the 5G network. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 36(8):22–31.
- [Huawei, 2020] Huawei (2020). Huawei launches industry’s first site digital twins based 5G digital engineering solution. <https://www.huawei.com/en/news/2020/2/site-digital-twins-based-5g-digital-engineering-solution>. Acessado em 23.04.2023.

- [International Energy Agency - IEA, 2022] International Energy Agency - IEA (2022). World energy outlook 2022. Relatório técnico, International Energy Agency, Paris, França.
- [Isto et al., 2020] Isto, P., Heikkilä, T., Mämmelä, A., Uitto, M., Seppälä, T. e Ahola, J. M. (2020). 5G based machine remote operation development utilizing digital twin. *Open Engineering*, 10(1):265–272.
- [ITU-R, 2015a] ITU-R (2015a). IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030. Relatório Técnico M.2370, ITU, Geneva, Switzerland.
- [ITU-R, 2015b] ITU-R (2015b). IMT vision–framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Relatório Técnico ITU-R M.2083-0 - M Series, ITU, Geneva, Switzerland.
- [Iurii et al., 2022] Iurii, D., Carrillo, M. D., Antti, P., Liana, A., Jari, J. e Kirsi, L. (2022). *IEC-61850 Performance Evaluation in a 5G Cellular Network: UDP and TCP Analysis*. Springer, Cham, Switzerland.
- [Jiang et al., 2021] Jiang, T., Zhang, J., Tang, P., Tian, L., Zheng, Y., Dou, J., Asplund, H., Raschkowski, L., D’Errico, R. e Jämsä, T. (2021). 3GPP standardized 5G channel model for IIoT scenarios: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(11):8799–8815.
- [Khorsandroo et al., 2021] Khorsandroo, S., Sánchez, A. G., Tosun, A. S., Arco, J. M. e Doriguzzi-Corin, R. (2021). Hybrid SDN evolution: A comprehensive survey of the state-of-the-art. *Computer Networks*, 192:107981.
- [Li et al., 2018] Li, S., Zhang, N., Lin, S., Kong, L., Katangur, A., Khan, M. K., Ni, M. e Zhu, G. (2018). Joint admission control and resource allocation in edge computing for Internet of Things. *IEEE Network*, 32(1):72–79.
- [Lin et al., 2021] Lin, X., Rommer, S., Euler, S., Yavuz, E. A. e Karlsson, R. S. (2021). 5G from space: An overview of 3GPP non-terrestrial networks. *IEEE Communications Standards Magazine*, 5(4):147–153.
- [Liu et al., 2020a] Liu, G., Huang, Y., Chen, Z., Liu, L., Wang, Q. e Li, N. (2020a). 5G deployment: Standalone vs. non-standalone from the operator perspective. *IEEE Communications Magazine*, 58(11):83–89.
- [Liu et al., 2020b] Liu, G., Huang, Y., Chen, Z., Liu, L., Wang, Q. e Li, N. (2020b). 5G deployment: Standalone vs. non-standalone from the operator perspective. *IEEE Communications Magazine*, 58(11):83–89.
- [Liu et al., 2021] Liu, L., Guo, S., Liu, G. e Yang, Y. (2021). Joint dynamical VNF placement and SFC routing in NFV-enabled SDNs. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 18(4):4263–4276.
- [Lopes et al., 2016] Lopes, Y., Bornia, T., Farias, V., Fernandes, N. C. e Muchaluat-Saade, D. C. (2016). *Desafios de segurança e confiabilidade na comunicação para smart grids*, p. 142–186. SBC, Porto Alegre, Brasil.
- [Luo et al., 2020] Luo, C., Satpute, M. N., Li, D., Wang, Y., Chen, W. e Wu, W. (2020). Fine-grained trajectory optimization of multiple UAVs for efficient data gathering from WSNs. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 29(1):162–175.
- [Lyu et al., 2022] Lyu, Z., Zhu, G. e Xu, J. (2022). Joint maneuver and beamforming design for UAV-enabled integrated sensing and communication. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 22(4):2424 – 2440.

- [Maddikunta et al., 2022] Maddikunta, P. K. R., Pham, Q.-V., Prabadevi, B., Deepa, N., Dev, K., Gadekallu, T. R., Ruby, R. e Liyanage, M. (2022). Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. *Journal of Industrial Information Integration*, 26:100257.
- [Mahmood et al., 2020] Mahmood, N. H., Marchenko, N., Gidlund, M. e Popovski, P. (2020). *Wireless Networks and Industrial IoT*. Springer, 1 edição.
- [Mallorquí e Zaballos, 2021] Mallorquí, A. e Zaballos, A. (2021). A heterogeneous layer-based trustworthiness model for long backhaul NVIS challenging networks and an IoT telemetry service for antarctica. *Sensors*, 21(3446).
- [Maroufkhani et al., 2022] Maroufkhani, P., Desouza, K. C., Perrons, R. K. e Iranmanesh, M. (2022). Digital transformation in the resource and energy sectors: A systematic review. *Resources Policy*, 76:102622.
- [Mendes et al., 2020] Mendes, L. L., Moreno, C. S., Marquezini, M. V., Cavalcante, A. M., Neuhaus, P., Seki, J., Aniceto, N. F. T., Karvonen, H., Vidal, I., Valera, F. et al. (2020). Enhanced remote areas communications: The missing scenario for 5G and beyond 5G networks. *IEEE Access*, 8:219859–219880.
- [Mihai et al., 2022] Mihai, S., Yaqoob, M., Hung, D. V., Davis, W., Towakel, P., Raza, M., Karamanoglu, M., Barn, B., Shetve, D., Prasad, R. V. et al. (2022). Digital twins: a survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(4).
- [Moglia et al., 2022] Moglia, A., Georgiou, K., Marinov, B., Georgiou, E., Berchiolli, R. N., Satava, R. M. e Cuschieri, A. (2022). 5G in healthcare: from COVID-19 to future challenges. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 26(8):4187–4196.
- [Mourtzis et al., 2021] Mourtzis, D., Angelopoulos, J. e Panopoulos, N. (2021). Smart manufacturing and tactile Internet based on 5G in Industry 4.0: challenges, applications and new trends. *Electronics*, 10(24):3175.
- [Nguyen et al., 2021] Nguyen, H. X., Trestian, R., To, D. e Tatipamula, M. (2021). Digital twin for 5G and beyond. *IEEE Communications Magazine*, 59(2):10–15.
- [Noor-A-Rahim et al., 2020] Noor-A-Rahim, M., Liu, Z., Lee, H., Ali, G. M. N., Pesch, D. e Xiao, P. (2020). A survey on resource allocation in vehicular networks. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 23(2):701–721.
- [O’Connell et al., 2020] O’Connell, E., Moore, D. e Newe, T. (2020). Challenges associated with implementing 5G in manufacturing. Em *Telecom*, p. 48–67. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [Petrobras, 2020] Petrobras (2020). O que são digital twins e como podem aumentar a eficiência operacional. <https://nossaenergia.petrobras.com.br/energia/22-digital-twins/>. Acessado em 23.04.2023.
- [Plachy et al., 2021a] Plachy, J., Becvar, Z., Strinati, E. C. e di Pietro, N. (2021a). Dynamic allocation of computing and communication resources in multi-access edge computing for mobile users. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 18(2):2089–2106.
- [Plachy et al., 2021b] Plachy, J., Becvar, Z., Strinati, E. C. e di Pietro, N. (2021b). Dynamic allocation of computing and communication resources in multi-access edge computing for mobile users. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 18(2):2089–2106.

- [Quang et al., 2019] Quang, P. T. A., Hadjadj-Aoul, Y. e Outtagarts, A. (2019). A deep reinforcement learning approach for VNF forwarding graph embedding. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 16(4):1318–1331.
- [Rahman et al., 2021] Rahman, I., Razavi, S. M., Liberg, O., Hoymann, C., Wiemann, H., Tidestav, C., Schliwa-Bertling, P., Persson, P. e Gerstenberger, D. (2021). 5G evolution toward 5G advanced: An overview of 3GPP releases 17 and 18. *Ericsson Technology Review*, 2021(14):2–12.
- [Ramirez et al., 2022] Ramirez, R., Huang, C.-Y. e Liang, S.-H. (2022). 5G digital twin: A study of enabling technologies. *Applied Sciences*, 12(15):7794.
- [Raussi et al., 2023] Raussi, P., Kokkonieni-Tarkkanen, H., Ahola, K., Heikkinen, A. e Uitto, M. (2023). Improving reliability of protection communication in a 5G slice. *Authorea*.
- [Rinaldi et al., 2020] Rinaldi, F., Maattanen, H.-L., Torsner, J., Pizzi, S., Andreev, S., Iera, A., Koucheryavy, Y. e Araniti, G. (2020). Non-terrestrial networks in 5G & beyond: A survey. *IEEE access*, 8:165178–165200.
- [Saba et al., 2020] Saba, T., Haseeb, K., Ahmed, I. e Rehman, A. (2020). Secure and energy-efficient framework using Internet of Medical Things for e-healthcare. *Journal of Infection and Public Health*, 13(10):1567–1575.
- [Saeed et al., 2020] Saeed, N., Elzanaty, A., Almorad, H., Dahrouj, H., Al-Naffouri, T. Y. e Alouini, M.-S. (2020). Cubesat communications: Recent advances and future challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(3):1839–1862.
- [Santos et al., 2020] Santos, A. C., Firmino, R. M., Soto, J. C., Medeiros, D. S., Mattos, D. M., Albuquerque, C. V., Seixas, F., Muchaluat-Saade, D. C. e Fernandes, N. C. (2020). Aplicações em redes de sensores na área da saúde e gerenciamento de dados médicos: tecnologias em ascensão. *Sociedade Brasileira de Computação*.
- [Sehla et al., 2022] Sehla, K., Nguyen, T. M. T., Pujolle, G. e Velloso, P. B. (2022). Resource allocation modes in C-V2X: from LTE-V2X to 5G-V2X. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(11):8291–8314.
- [Shah et al., 2021] Shah, S. D. A., Gregory, M. A. e Li, S. (2021). Cloud-native network slicing using software defined networking based multi-access edge computing: A survey. *IEEE Access*, 9:10903–10924.
- [Shaik e Malik, 2021] Shaik, N. e Malik, P. K. (2021). A comprehensive survey 5G wireless communication systems: open issues, research challenges, channel estimation, multi carrier modulation and 5G applications. *Multimedia Tools and Applications*, 80(19):28789–28827.
- [Song et al., 2019] Song, S., Lee, C., Cho, H., Lim, G. e Chung, J.-M. (2019). Clustered virtualized network functions resource allocation based on context-aware grouping in 5G edge networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 19(5):1072–1083.
- [Soto et al., 2022] Soto, I., Calderon, M., Amador, O. e Urueña, M. (2022). A survey on road safety and traffic efficiency vehicular applications based on C-V2X technologies. *Vehicular Communications*, 33:100428.
- [Spinelli e Mancuso, 2020] Spinelli, F. e Mancuso, V. (2020). Toward enabled industrial verticals in 5G: A survey on mec-based approaches to provisioning and flexibility. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(1):596–630.

- [Wang et al., 2022] Wang, D., Zhou, F., Lin, W., Ding, Z. e Al-Dhahir, N. (2022). Co-operative hybrid nonorthogonal multiple access-based mobile-edge computing in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 8(2):1104–1117.
- [Wang et al., 2016] Wang, L., Lu, Z., Wen, X., Knopp, R. e Gupta, R. (2016). Joint optimization of service function chaining and resource allocation in network function virtualization. *IEEE Access*, 4:8084–8094.
- [Wang et al., 2019] Wang, M., Cheng, B., Feng, W. e Chen, J. (2019). An efficient service function chain placement algorithm in a MEC-NFV environment. *Em 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, p. 1–6. IEEE.
- [Wei et al., 2022] Wei, Z., Zhu, M., Zhang, N., Wang, L., Zou, Y., Meng, Z., Wu, H. e Feng, Z. (2022). UAV-assisted data collection for Internet of Things: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(17):15460–15483.
- [Wu et al., 2022] Wu, Y., Dai, H.-N., Wang, H., Xiong, Z. e Guo, S. (2022). A survey of intelligent network slicing management for industrial IoT: integrated approaches for smart transportation, smart energy, and smart factory. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(2):1175–1211.
- [Wu et al., 2021a] Wu, Y., Zhang, K. e Zhang, Y. (2021a). Digital twin networks: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(18):13789–13804.
- [Wu et al., 2021b] Wu, Y., Zheng, W., Zhang, Y. e Li, J. (2021b). Reliability-aware VNF placement using a probability-based approach. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 18(3):2478–2491.
- [Xie et al., 2021] Xie, Y., Huang, L., Kong, Y., Wang, S., Xu, S., Wang, X. e Ren, J. (2021). Virtualized network function forwarding graph placing in SDN and NFV-enabled IoT networks: A graph neural network assisted deep reinforcement learning method. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 19(1):524–537.
- [Xiong et al., 2020] Xiong, X., Zheng, K., Lei, L. e Hou, L. (2020). Resource allocation based on deep reinforcement learning in IoT edge computing. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38(6):1133–1146.
- [Xu et al., 2020a] Xu, S., Xia, Y. e Shen, H.-L. (2020a). Analysis of malware-induced cyber attacks in cyber-physical power systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 67(12):3482–3486.
- [Xu et al., 2020b] Xu, Z., Zhang, Z., Liang, W., Xia, Q., Rana, O. e Wu, G. (2020b). QoS-aware VNF placement and service chaining for IoT applications in multi-tier mobile edge networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 16(3):1–27.
- [Zhang et al., 2017] Zhang, P., Lu, J., Wang, Y. e Wang, Q. (2017). Cooperative localization in 5G networks: A survey. *Ict Express*, 3(1):27–32.
- [Zhang et al., 2021] Zhang, T., Wang, Z., Liu, Y., Xu, W. e Nallanathan, A. (2021). Joint resource, deployment, and caching optimization for AR applications in dynamic UAV NOMA networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(5):3409–3422.
- [Zhao et al., 2021] Zhao, C., Liu, J., Sheng, M., Teng, W., Zheng, Y. e Li, J. (2021). Multi-UAV trajectory planning for energy-efficient content coverage: A decentralized learning-based approach. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(10):3193–3207.

- [Zheng et al., 2018] Zheng, G., Tsiopoulos, A. e Friderikos, V. (2018). Optimal VNF chains management for proactive caching. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(10):6735–6748.
- [Zhou et al., 2021] Zhou, Z., Jia, Z., Liao, H., Lu, W., Mumtaz, S., Guizani, M. e Tariq, M. (2021). Secure and latency-aware digital twin assisted resource scheduling for 5G edge computing-empowered distribution grids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(7):4933–4943.