Projeto Brasil 6G

Casos de Uso e Requisitos para as Redes 6G

31/08/2021

Histórico de Atualizações:

Versão	Data	Autor(es)	Notas
1	20/07/2021	Antonio Carlos de Oliveira Júnior Cristiano Bonato Both Flávio de Oliveira Silva Kleber Vieira Cardoso Luciano Leonel Mendes Rogério Sousa e Silva Sand Luz Correa Fco. Rodrigo Porto Cavalcanti Ciro José Almeida Macedo Carlos Filipe Moreira e Silva	Elaboração de conteúdo
2	31/08/2021	Cristiano Bonato Both Kleber Vieira Cardoso Luciano Leonel Mendes	Revisão de texto

Lista de Figuras

1 Cobertura Global Extrema. 4
2 Monitoramento global. 6
3 População urbana com cobertura 4G por Unidade da Federação, fevereiro de 2021[1]. 7
4 População rural com cobertura 4G por Unidade da Federação, fevereiro de 2021[1]. 8
5 Série histórica da produção de soja e área cultivada. 14
6 Produtividade no cultivo da soja no Brasil. 15
7 Série histórica da produção de cana de açúcar e área cultivada. Produtividade da cana de açúcar no Brasil. 15
8 Casos de uso para o cenário de agricultura do futuro. 19
9 Cidade física e seu gêmeo digital correspondente. 22
10 Caso de uso de comunicação tátil imersiva. 27
11 Caso de uso robôs móveis cooperativos e interativos. 34
12 Segurança em espaços públicos para prevenir, por exemplo, “Arrastão” em praia e vigilância massiva para controle de epidemias. 38
13 Controle transparente no acesso e no ambiente de um aeroporto. 39
14 Estágios de uma operação de busca e salvamento assistidas por Veículos Aéreos Não Tripuladoss (VANTs). 41

Lista de Acrônimos

2G Segunda Geração

3GPP *3rd Generation Partnership Project*

4G Quarta Geração

5G Quinta Geração

5GNR 5G *New Radio*

5G-RANGE *Remote Area Access Network for the 5th Generation*

6G Sexta Geração

ABC Agricultura de Baixo Carbono

ACLR *Adjacent Channel Leakage Power Ratio*

AM Aprendizado de Máquina

ANATEL Agência Nacional de Telecomunicações

AR *Augmented Reality*

ARQ Automatic Repeat Request

BCI *Brain-Computer Interface*

BS *Base Station*

CDN *Content Delivery Network*

Conab Companhia Nacional de Abastecimento

CPU Central Processing Unit

DNN *Deep Neural Network*

DSN *Deep Space network*

eMBB *enhanced Mobile Broadband*

eRAC *Enhanced Remote Area Communications*

ERB Estação Radiobase

GEE Gases de Efeito de Estufa

GEO *Geostationary Earth Orbit*

GPS *Global Positioning System*

GPU Graphics Processing Unit

HAPS *High Altitude Plataform Stations*

H2H *Human to Human*

H2M *Human to Machine*

HMD *Head-Mount-Device*

HTC *Holographic-Type Communications*

IA Inteligência Artificial

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IIoT *Industrial Internet of Things*

IMT-2020 *International Mobile Telecommunications-2020*

IoT *Internet of Things*

ISM *Industrial Sientific and Medical*

LEO *Low Earth Orbit*

LTE *Long Term Evolution*

M2M *Machine to Machine*

MEO *Medium Earth Orbit*

MR *Mixed Reality*

MEC *Multi-access Edge Computing*

mMTC *Massive Machine-Type Communications*

NASA *National Aeronautics and Space Administration*

NDC Contribuição Nacionalmente Determinada

NR *New Radio*

NS *Network Slicing*

ODS Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU Organização das Nações Unidas

OTA *over the air*

PIB Produto Interno Bruto

QoE *Quality of Experience*

QoS *Quality of Service*

QoT *Quality of Experience*

RAT *Radio Access Technology*

RNT *Redes Não Terrestres*

SECEX Secretaria de Comércio Exterior

SIM *Subscriber Identity Module*

tacoder *tactile encoder*

TPU Tensor Processing Unit

TSN *Time Sensitive Communication*

TVWS *TV White Space*

UIT União Internacional de Telecomunicações

UNFCCC Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

URLLC *Ultra Reliable Low Latency Communications*

VANT Veículos Aéreos Não Tripulados

VNF *Virtualized Network Function*

vocoder *voice encoder*

VR *Virtual Reality*

XR *Extended Reality*

Sumário

1 Introdução **1**

2 Cobertura Mundial Extrema **3**
2.1 Conectividade Global . . . 3
2.2 Monitoramento global . . . 5
2.2.1 Redes 6G não terrestres . . . 7
2.2.2 Micro-redes 6G para zonas remotas . . . 9
2.3 Redução da Emissão de Carbono . . . 10
2.3.1 Aumento da eficiência energética e hídrica . . . 10
2.3.2 Redução das Emissões de Carbono . . . 11
2.3.3 Agricultura de baixo carbono . . . 12
2.3.4 Redução de carbono no treinamento de algoritmos IA . . . 13

3 Agropecuária do Futuro **14**

4 Gêmeos Digitais em Larga Escala **21**
4.1 Cidades dinamicamente inteligentes . . . 21
4.2 Indústria 5.0 . . . 24

5 Interações Remotas Avançadas **26**
5.1 Comunicação Tátil Imersiva . . . 26
5.2 Eventos Imersivos . . . 30
5.3 Telemedicina Imersiva . . . 32
5.4 Robôs móveis cooperativos e interativos . . . 33

6 Zonas Seguras Invisíveis **37**
6.1 Segurança em espaços públicos . . . 37
6.2 Controle Transparente de Multidões . . . 39
6.3 Redes sem infraestrutura e redes embarcadas . . . 40

7 Comunicação espacial **43**
7.1 Comunicação Terra-Lua . . . 44
7.2 Comunicação na Superfície da Lua . . . 45

8 Requisitos para Redes 6G **47**

9 Conclusão **50**

1 Introdução

Luciano Leonel Mendes
luciano@inatel.br

Durante a concepção das Redes Móveis de Quinta Geração (5G), o *International Mobile Telecommunications-2020* (IMT-2020) apresentou um conjunto de casos de uso e requisitos bastante desafiadores para a futura rede móvel [2] que eram baseados em demandas que iam além do aumento da vazão em redes de comunicação móvel. Com base nos requisitos chaves levantados, três cenários de casos de uso para redes 5G foram definidos. O *enhanced Mobile Broadband* (eMBB) [3], endereçado pelo *Release* 15 do *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), focou na oferta de maiores taxas de dados para os usuários, visando atingir até 1 Gbps por usuário. Já o *Ultra Reliable Low Latency Communications* (URLLC) [4] teve como objetivo principal oferecer baixa latência e elevada robustez para viabilizar o uso de redes móveis em ambientes industriais, sendo especificado pelo *Release* 16 do 3GPP. Finalmente, o cenário denominado de *Massive Machine-Type Communications* (mMTC) [5], que será apresentado no *Release* 17, ainda em desenvolvimento pelo 3GPP, foi concebido para permitir a conexão de uma multitude de dispositivos, viabilizando a *Internet of Things* (IoT) massiva sobre a rede móvel.

Essa segmentação da rede 5G em três grandes grupos de casos de uso trouxe uma flexibilidade jamais vista em redes de comunicações, abrindo caminho para a oferta de uma ampla gama de novos serviços e a criação de novas aplicações que sequer foram concebidas até o momento. No entanto, essa divisão também trouxe limitações e diversas aplicações vislumbradas pelo IMT-2020 não poderão ser implementadas em sua plena magnitude empregando as redes 5G. Uma das principais limitações impostas pelos três modos de operação previstos nas redes 5G é a capacidade de se atender a apenas um requisito chave em cada cenário. É possível obter alta vazão com o eMBB ou baixa latência com o URLLC ou atender a uma elevada quantidade de dispositivos usando o mMTC. No entanto, diversas aplicações listadas pelo IMT-2020 demandam que requisitos chaves sejam atendidos simultaneamente. Um exemplo é a telemedicina, onde é preciso ter elevada vazão para a transmissão de dados e imagens e baixa latência para a transmissão de comandos e informações de realimentação de movimento. Outros exemplos que podem ser mencionados são os carros autônomos, comunicações hápticas, gêmeos digitais e eventos virtuais imersivos.

O 3GPP também foi criticado por não considerar a participação ativa de outras verticais no processo de padronização do 5G *New Radio* (5GNR), o que fez com que diversas demandas provenientes de setores como automobilístico, saúde, agronegócio, transporte, etc., não fossem plenamente suportadas pela nova interface aérea proposta pelo 3GPP. Ao desenvolver um padrão de rede de acesso sem fio baseando-se nas demandas das operadoras e fabricantes de equipamentos de telecomunicações, o 3GPP acabou por limitar o escopo de atuação das redes 5G. É fato que medidas corretivas foram tomadas durante o desenvolvimento do *Release* 16 para adequar o 5GNR ao cenário industrial, permitindo o uso da rede móvel privada como solução de comunicação em processos industriais. Além disso, o *Release* 17, em desenvolvimento, irá prever um novo modo de operação do 5GNR que seja adequado para a cobertura em áreas remotas e rurais. Apesar desses esforços, decisões tomadas para acomodar interesses de fabricantes de equipamentos de infraestrutura de telecomunicações (como o uso de dois códigos corretores de erro distintos e com desempenho similar) acabaram por limitar a flexibilidade das redes 5G em atender todas as visões apresentadas pelo IMT-2020.

Além dessas restrições, novas aplicações ainda mais desafiadoras estão sendo propostas para as redes móveis além do 5G. Para atender a essa futura demanda, as redes móveis devem

transcender as comunicações e englobar novas funções como o sensoriamento do ambiente, o posicionamento e mapeamento de objetos e pessoas no meio físico, a utilização de imagens como um serviço nativo da rede e a utilização de Inteligência Artificial (IA) de forma transversal em toda a estrutura da rede, bem como a oferta de IA como um serviço da rede móvel. Os novos casos de uso também irão demandar uma interface mais intuitiva e amigável com a rede, a qual não pode ser limitada por gestos aplicados a uma tela sensível ao toque, mas que permita a transmissão de comandos complexos e a captura de informações como textura, temperatura, sinais biomédicos e até mesmo sensações e sentimentos. O desenvolvimento de uma interface entre o cérebro humano e unidades de processamento inteligentes, denominada de *Brain-Computer Interface* (BCI) [6], é visto como fator fundamental para viabilizar diversas aplicações que estão sendo vislumbradas. Assim, pode-se dizer que a futura infraestrutura de comunicação móvel, denominada de Redes de Sexta Geração (6G) [7], será o vetor de integração dos mundos físico, virtual e biológico, rompendo com as barreiras de conectividade e com as limitações apresentadas pelas redes 5G.

O novo escopo de aplicações para as Redes 6G está sendo proposto por projetos de pesquisas [8] [9] e associações de empresas e entidades científicas [10]. Até o momento, neste documento, essas aplicações estão sendo organizadas em sete categorias de casos de uso, em função das similaridades de cenários e requisitos. O objetivo deste relatório consiste em descrever as motivações e aplicações previstas para essas famílias de casos de uso, vislumbrando a sua importância e aplicabilidade para o Brasil. Além disso, esse relatório apresenta os principais requisitos para cada família de casos de uso, permitindo avaliar os seus impactos nas camadas da futura infraestrutura de comunicação móvel e motivando o estudo pelas diversas tecnologias habilitadoras que serão necessárias para tornar as Redes 6G uma realidade.

2 Cobertura Mundial Extrema

Flávio de Oliveira Silva, Luciano Leonel Mendes, Rogério S. Silva, Fco. Rodrigo Porto Cavalcanti, Carlos Filipe Moreira e Silva
flavio@ufu.br, luciano@inatel.br, rogerio.sousa@ifg.edu.br, rodrigo@gtel.ufc.br, cfms@gtel.ufc.br

O ser humano possui uma natureza expansionista, que impulsiona a exploração de novos ambientes em busca de novas oportunidades. Este fato fica evidente em um país com dimensões continentais como o Brasil, onde há ocupação humana em praticamente todos os ecossistemas. O avanço tecnológico está impulsionando essa expansão e hoje a presença do homem vai muito além dos limites dos centros metropolitanos e atividades econômicas são desenvolvidas nas mais remotas regiões do globo. Suportar o desenvolvimento humano em uma escala global será um dos grande desafios das Redes 6G [11] [12], que deverá atender a um conjunto de aplicações e casos de uso agrupados na família denominada de Cobertura Mundial Extrema.

A Figura 1 ilustra uma visão da cobertura mundial extrema envolvendo toda a terra e oceanos, onde a infraestrutura de comunicação terrestre é combinada com as redes satelitais *Low Earth Orbit* (LEO), *Medium Earth Orbit* (MEO) e *Geostationary Earth Orbit* (GEO) para dar suporte às aplicações em qualquer ponto do globo terrestre.

2.1 Conectividade Global

Cada vez mais pessoas, sistemas e dispositivos estão conectados à Internet. Entretanto, a realidade de uma sociedade plenamente conectada da melhor forma o tempo todo, em todo o globo, ainda é um desafio. Diversos casos de uso e utilizações demandam uma cobertura global extrema [13] [14] que leva em conta uma continuidade da cobertura acima e abaixo da terra e acima e abaixo da linha dos oceanos. A cobertura global extrema permitirá a criação de redes de comunicação globais que estarão presentes de forma ubíqua em todo o globo [15], permitindo expandir diversos casos de uso e abrindo o caminho para novos serviços e aplicações [14]. Esse objetivo está alinhado com as metas de desenvolvimento sustentável propostas pela Organização das Nações Unidas (ONU) [16] para criação de uma infraestrutura resiliente, capaz de promover uma industrialização inclusiva e sustentável, que fomente a inovação [17] em qualquer lugar do globo terrestre, ou seja, através deste caso de uso o acesso à Internet será uma possibilidade universal para qualquer pessoa ou dispositivo em qualquer lugar.

Para se atingir a cobertura global, tal como descrito acima, é necessário vencer desafios que envolvem questões técnicas, políticas e de negócio. Do ponto de vista técnico, questões de arquitetura e de integração com outras tecnologias começaram a ser tratadas na concepção das Redes 5G [15], mas as demandas pela cobertura global irá além das definições atuais dos *Releases* 15, 16 e 17 e somente serão atendidas com a concepção das Redes 6G [14]. A cobertura global extrema envolve a capacidade de cobrir de forma integrada áreas internas, espaço terrestre com estações rádio base e ainda áreas de floresta, espaços remotos, desertos e oceanos. Do ponto de vista terrestre, a cobertura envolve não apenas estações fixas internas e externas, mas também trens, navios e aviões [13]. Para a cobertura global extrema, o uso de redes áreas é algo fundamental. Logo, as redes satelitais compostas por satélites LEO, MEO e GEO precisará se integrar de forma simbiótica e completamente transparentes nas Redes 6G [15], ou seja, essa intefração deve envolver a rede de acesso, de transporte e o núcleo, com um gerenciamento comum. Efetivamente, os satélites serão elementos da Rede 6G que poderão assumir o papel de *gateway*, *relay* ou até mesmo de Estação Radiobase (ERB). Além de satélites, as redes aéreas

Figura 1: Cobertura Global Extrema.

irão contar com o uso de VANT, drones, balões e aviões, que irão atuar de forma integrada. A viabilidade desta rede enfrenta diversos desafios que vão desde o desenvolvimento de modelos de propagação, passando por economia de energia, latência e alta mobilidade dos terminais e ERBs [18].

Do ponto de vista de políticas, a implantação de uma cobertura global diz respeito a adoção de diferentes estratégias envolvendo governo, agências reguladoras e operadoras de telecomunicações, a fim de viabilizar os investimentos, os retornos, a estabilidade jurídica e o desenvolvimento de um ambiente adequado para o desenvolvimento de um ecossistema ao redor das Redes 6G. Para isso, é importante levar em consideração o conjunto de ações assertivas aprendidas durante a concepção e implantação das Redes de Quarta Geração (4G) e 5G, bem como os erros que impactaram negativamente na abrangência destas tecnologias [19].

Do ponto de vista de negócios, é necessário encontrar equilíbrio entre investimento, custo para clientes e remuneração das operadoras, a fim de permitir viabilidade econômica e motivar o investimento no desenvolvimento desta tecnologia. Mas uma vez, é importante destacar o papel

das políticas públicas neste ecossistema, com participação especialmente na fase da pesquisa, através de financiamento e estímulo ao fomento [20]. Apenas com o alinhamento deste conjunto de fatores é que será possível fazer com que a cobertura global extrema se torne uma realidade que viabilize diversos casos de uso importantes, como a banda larga mundial, vista como a solução definitiva para o acesso universal à Internet e ponte para permitir o fim da segregação digital. Esse caso de uso será uma ferramenta importante para a inclusão social através de acessos a serviços como e-gov, saúde à distância, educação à distância, entretenimento, acesso à informação, entre outros.

2.2 Monitoramento global

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU foram introduzidos no ano de 2015 como agenda para 2030. A agenda e suas metas formam um plano de ação para enfrentamento aos desafios globais, que incluem mudanças climáticas, desigualdades e pobreza [21]. ODS servem como guia para que governos e empresas planejem suas estratégias futuras com foco na construção de atitudes sustentáveis. Além disso, destaca-se que cenários catastróficos decorrentes de desastres ambientais, sejam eles naturais ou por intervenções humanas, estão cada dia mais frequentes. Enchentes, secas, rompimento de barragens, derramamento de petróleo, entre outros, têm ocorrido com maior intensidade. O avanço do desmatamento em terras amazônicas e no cerrado, a coleta irregular de recursos naturais (madeira, minérios, etc.), e o contrabando de animais e plantas causam prejuízos imensuráveis à sociedade. Acompanhar estas ocorrências e tomar decisões de enfrentamento em tempo hábil é fundamental. Entretanto, faz-se necessário o uso de recursos de comunicação que viabilize o monitoramento, a identificação e o combate à essas ameaças.

As Redes 5G estão sendo implantadas primordialmente para atender casos de usos com ênfase nos centros urbanos [22], onde os cenário denominado de eMBB visa o consumo de informações e mídias de alta densidade, o cenário de mMTC é voltado para viabilizar o uso de IoT e *Industrial Internet of Things* (IIoT) e o cenário URLLC é voltado para reduzir a latência da rede para aplicações industriais em redes privativas. Há ainda mais um cenário sendo desenvolvido, denominado de *Enhanced Remote Area Communications* (eRAC), que visa o atendimento de áreas rurais povoadas, com aplicações de IoT para agricultura e pecuária.

Aplicações para atender as necessidades de áreas totalmente remotas demandam estratégias e recursos que não estão previstos ou que não serão completamente supridos com as redes 5G. A rede de comunicação móvel de próxima geração deverá ser concebida como uma plataforma flexível, eficiente e que ofereça recursos avançados que formarão a base para aplicações futuras e novas oportunidades de negócios. As novas aplicações dependerão principalmente da conectividade com as novas redes que forneçam ampla largura de banda, altíssima confiabilidade e baixa latência, além de cobertura de alcance global. Para garantir a cobertura para todas as áreas não conectadas restantes no mundo, as redes 6G dependem da integração perfeita de diversas tecnologias de acesso em sistemas de comunicação celular. Novo hardware, novos dispositivos e novas interfaces de usuário entrarão em ação, explorando todos os tipos possíveis de energia renovável e transformando o modo de interação com o mundo digital [23]. A Figura 2 apresenta cenários de monitoramento nos quais são utilizadas tecnologias de comunicação para cobertura global no âmbito das redes de 6G às *Redes Não Terrestres* (RNT). As RNT são compostas pelas redes satelitais GEO, MEO e LEO, posicionadas nas suas respectivas altitudes para fornecer cobertura para toda a superfície terrestre, além das, *High Altitude Plataform Stations* (HAPS) e VANTs que complementam a cobertura e atuam de forma integrada. Os cenários cobertos

pelas redes 6G incluem, mas não se restringem, a zonas remotas de difícil acesso, florestas, cerrado, possibilitando monitorar a todo o tempo estes espaços. Outras aplicações importantes são aquelas relacionadas a proteção ou combate à eventos extremos, i.e. catástrofes, desmatamentos, queimadas, etc. Em um contexto de monitoramento global espera-se que as redes de 6G estabeleça condições para diminuir/evitar a destruição do meio-ambiente através da capacidade de monitorar em tempo real as localidades mais remotas, e de fornecer condições para acesso à rede em qualquer local no globo terrestre.

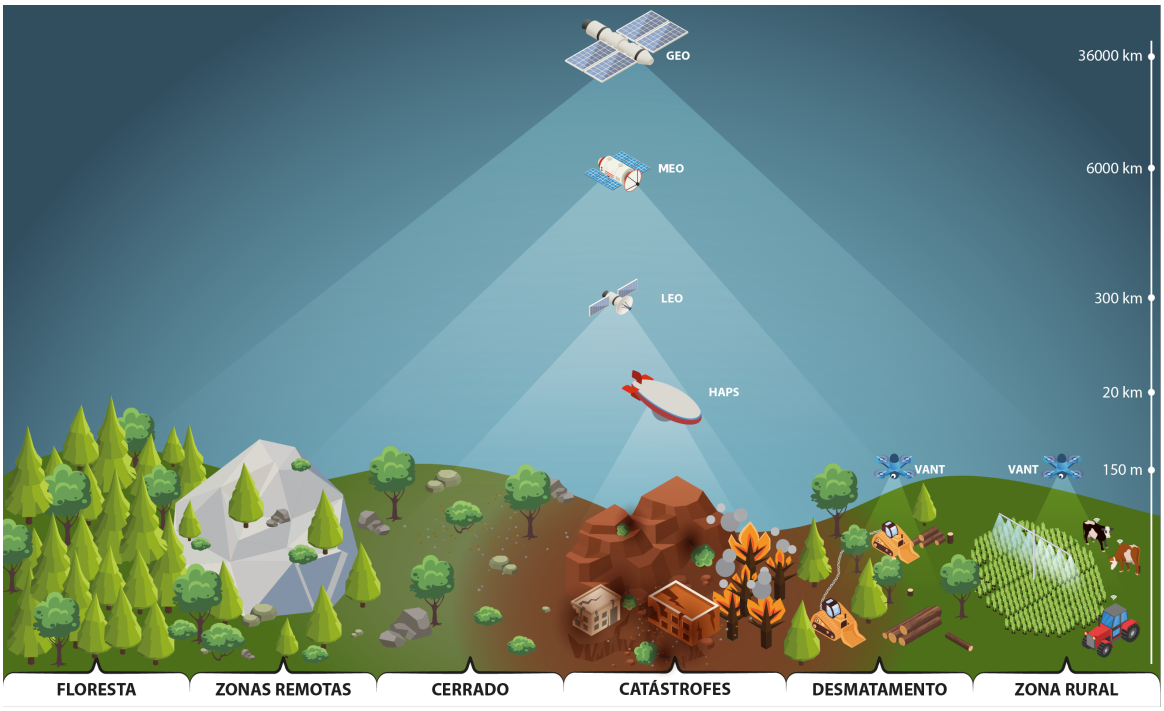

Figura 2: Monitoramento global.

Segundo [24], 40% das regiões da Terra ainda estão sem cobertura de rede. O desafio de ampliar a cobertura da rede 6G para o monitoramento de todo o globo terrestre demanda a utilização de novas tecnologias de acesso. A densificação da rede em áreas remotas é dificultada pelas longas distâncias, por terrenos acidentados, florestas densas, recursos energéticos escassos, entre outros desafios encontrados para a instalação de uma rede de comunicação. Para resolver esse problema, diferentemente das redes 5G bidimensionais atuais, o 6G prevê a implantação das arquiteturas heterogêneas tridimensionais, nas quais a infraestrutura terrestre é complementada por estações não terrestres, que incluem plataformas aéreas/espaciais, como por exemplo, os VANT, as HAPS e os satélites [25]. As RNT podem oferecer uma solução de rede autônoma robusta para preservar a conectividade na ausência de outras infraestruturas de rede, ou quando as torres terrestres estão fora de serviço, por exemplo, após desastres naturais [26].

Segundo os critérios de topografia e densidade populacional do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [27], os municípios brasileiros são divididos entre urbanos, intermediários e rurais. Segundo esse instituto, 60,4% dos municípios brasileiros são considerados predominantemente rurais. O relatório de acompanhamento do setor de telecomunicações da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) [1] apresenta os gráficos de cobertura das redes móveis 4G para setores urbanos e rurais. A Figura 3 traz a estimativa de cobertura para as áreas urbanas e a Figura 4 apresenta a estimava de cobertura para a área rural. Neste contexto observa-se que a cobertura móvel alcança apenas 39,12% da população em áreas rurais,

e em contraste, com alcance de 97,70% para população urbana. As Redes 5G devem trazer avanços neste cenário, principalmente com o advento do eRAC, porém uma cobertura irrestrita e com amplo e total alcance territorial somente será viável com as Redes 6G.

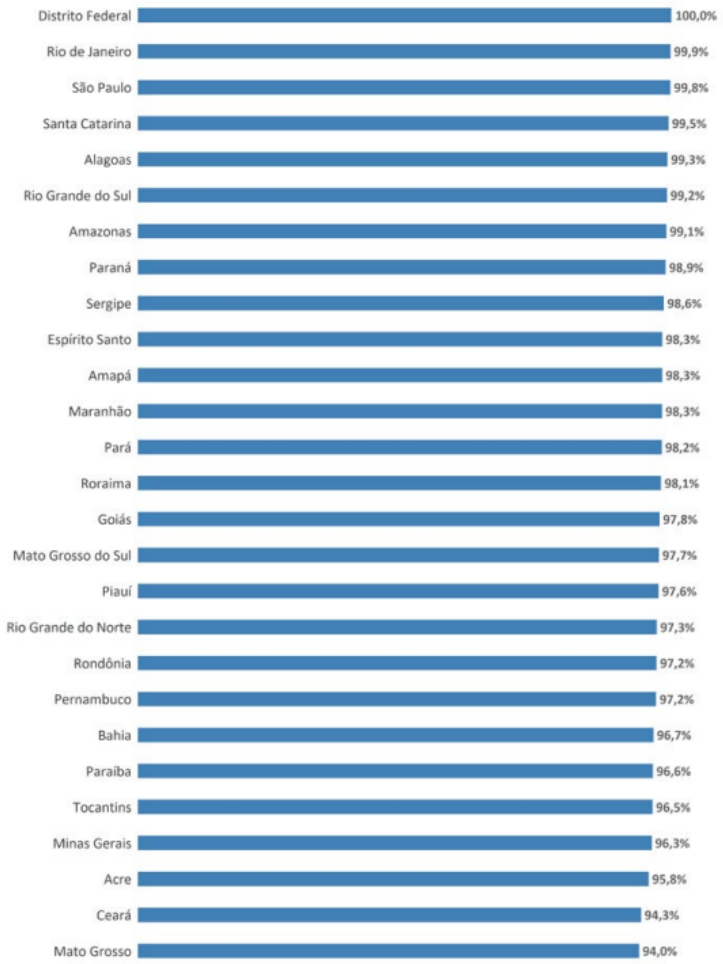

Figura 3: População urbana com cobertura 4G por Unidade da Federação, fevereiro de 2021[1].

A expansão da necessidade de acesso a comunicação é cada vez mais necessária nas zonas remotas. Aplicações para demandas do campo, por exemplo, produção agrícola e pecuária, monitoramento e conservação ambiental, entre outros, estão ocupando um lugar de extrema importância no cenário mundial nas últimas décadas. Organizações e governos tem buscado estratégias para possibilitar um aumento da produção de alimentos minimizando ou eliminando os impactos no meio ambiente [21]. Levar Internet para as zonas remotas é um grande desafio. Duas abordagens, apresentadas a seguir, estão sendo consideradas as mais promissoras para vencer esse desafio.

2.2.1 Redes 6G não terrestres

As RNT referem-se a segmentos de redes que operam por meio de um veículo aéreo/espacial para comunicação [25]. Apesar do fato que a integração de satélites para fornecer acesso no solo tenha sido introduzida no documento [28] do *Release* 15 do 3GPP, a definição de cenários, parâmetros de implantação e identificação dos principais impactos para o *New Radio* (NR) ficaram a cargo dos *Releases* 16 e 17 [29]. Aprimoramentos ainda são esperados para os *Releases* 18 e

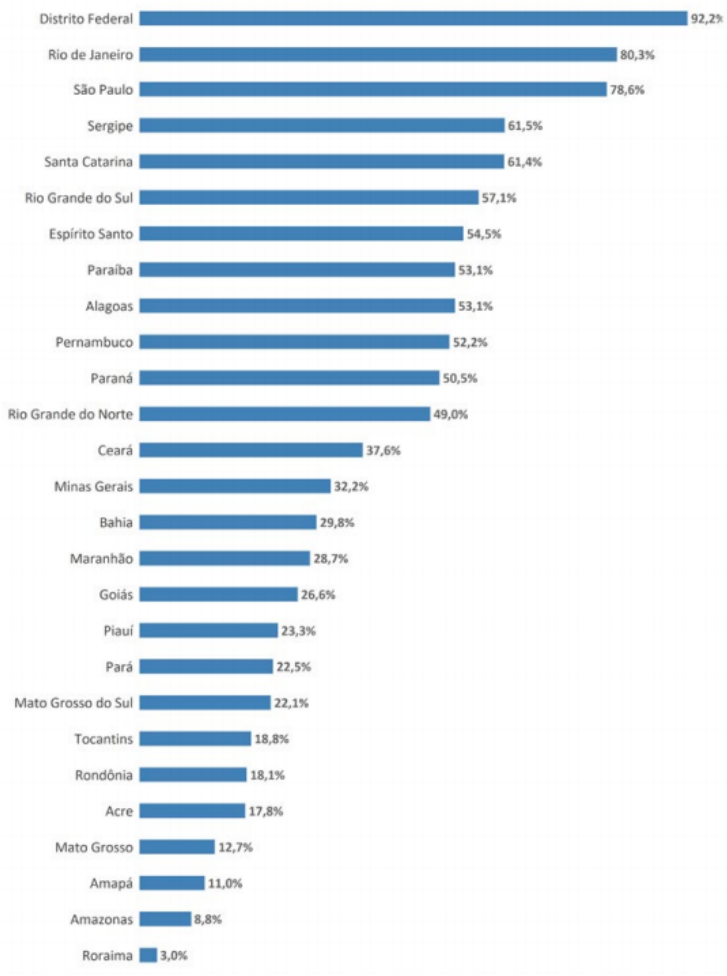

Figura 4: População rural com cobertura 4G por Unidade da Federação, fevereiro de 2021[1].

19 [25]. A arquitetura geral dos sistemas não terrestres é composta por um terminal terrestre, uma estação aérea/espacial que pode operar de forma semelhante a uma ERB terrestre, um canal de serviço entre o terminal e a estação e um *gateway* para conectar a rede de acesso não terrestre à rede central por meio de um enlace de *backhaul*. Diversos tipos de estações podem ser considerados nesta arquitetura, como por exemplo:

- VANT: voam em baixas altitudes (algumas centenas de metros) e podem fornecer conectividade sem fio de banda larga em larga escala durante desastres ou eventos temporários, e serviços de retransmissão para nós móveis terrestres.
- HAPS: operam na estratosfera a uma altitude de cerca de 20 km e podem fornecer cobertura geográfica de centenas de quilômetros.
- Satélites: são classificados de acordo com suas características de órbita.
  - Os satélites GEO orbitam no plano equatorial da Terra a uma altitude de cerca de 35.800 km e, apesar do significativo atraso de propagação do sinal e atenuação experimentada a uma distância tão longa, podem cobrir áreas geográficas muito grandes e são continuamente visíveis a partir de terminais terrestres.

- Os satélites LEO e MEO orbitam a uma altitude entre 200 km e 2.000 km e 2.000 km e 35.000 km, respectivamente, e garantem melhor intensidade de sinal e menor atraso de propagação em comparação com os satélites GEO. No entanto, esses satélites não são estacionários em relação à superfície da Terra e devem operar em uma constelação para manter a continuidade do serviço.

Os benefícios da RNT incluem [30]:

- Resiliência de comunicação: as plataformas não terrestres permitem uma ampla cobertura de conectividade e garantem a continuidade do serviço em áreas rurais e remotas ou quando as infraestruturas terrestres não estão disponíveis, como é o caso da cobertura oceânica.
- Conectividade com eficiência energética: nós não terrestres podem ser implantados sob demanda, implementando mecanismos de controle de ciclo de trabalho inteligente, reduzindo assim os custos operacionais e de gerenciamento de infraestruturas fixas.
- Otimização de recursos em enlaces de *backhaul* paralelos: plataformas não terrestres oferecem um canal adicional e robusto para operações de *backhaul*, economizando recursos terrestres para solicitações de tráfego de acesso. Isso também garante que os terminais terrestres possam encontrar uma rota alternativa para preservar a conexão se os enlaces terrestres não estiverem disponíveis.
- Aprimoramento de *Quality of Service* (QoS) por meio de computação de ponta: estações aéreas/espaciais, incluindo satélites, podem hospedar funcionalidades de nuvem de ponta móvel para oferecer suporte a operações de comunicação, computação e armazenamento para que usuários locais executem seus serviços de nuvem.
- Comunicação em movimento: os satélites fornecem conectividade de alta velocidade para terminais individuais em movimento que não podem se beneficiar da cobertura terrestre, como aviões ou navios.

Uma desvantagem dos sistemas de satélite existentes é o alto custo do terminal de usuário. As soluções futuras devem abordar esse problema e fornecer soluções economicamente acessíveis.
.

2.2.2 Micro-redes 6G para zonas remotas

O estabelecimento de redes locais sem um envolvimento direto das operadoras de cobertura nacional tornou-se cada vez mais importante para servir áreas onde estes atores não têm interesse econômico [30]. As micro-redes refere-se a uma porção isolada da rede, definida sob demanda para cobrir situações de aumento excessivo de usuários, como por exemplo em eventos que reúna um grande público por um pequeno período de tempo, cobertura de acesso a locais remotos ou em cenários de catástrofes por desastres naturais ou atentados. Essa solução também é interessante para prover acesso às zonas rurais em períodos de demanda específicas, como períodos de vacinação de animais, na verificação e combate a pragas na lavoura, na colheita, etc. Da perspectiva dos avanços da rede, fornecer conectividade onipresente a diversos tipos de dispositivos é um dos grandes desafios impostos às Redes 6G.

As micro-redes podem usufruir dos princípios de *Network Slicing* (NS) e das redes privadas no isolamento, segurança e definição de recursos no atendimento às demandas supracitadas.

Fatias de redes isoladas e configuradas, especificamente para o atendimento da demanda permitirá atender de forma precisa aos cenários apresentados [23]. Outra tecnologia habilitadora importante para a implantação de micro-redes é a utilização de VANTs, como provedor de infraestrutura de comunicação. Em comparação com as comunicações com infraestrutura fixa, VANTs têm atributos salientes, como implantação ágil que não pode ser suportada por infraestruturas *Base Station*s (BSs) fixas e em conjunto com mobilidade controlada. Os VANTs podem ser utilizados como estações base móveis no fornecimento de acesso em casos de demandas excessivas como apoio à infraestrutura existente, como *backup* de infraestrutura em casos de catástrofes, no atendimento a demandas em períodos específicos e ainda para a ativação da comunicação coleta de informações de redes de sensoriamento em florestas ou em regiões remotas. No âmbito das Redes 6G, a Internet baseada em VANTs será o novo paradigma no avanço das comunicações móveis, suportando vários serviços essenciais para o monitoramento global [31].

2.3 Redução da Emissão de Carbono

O aumento da eficiência energética e a redução de emissões de Gases de Efeito de Estufas (GEEs) são objetivos universais da sociedade moderna. O setor das telecomunicações tem grande potencial de contribuição para objetivos de sustentabilidade ambiental, seja viabilizando um melhor uso de recursos naturais existentes, facilitando a produção e distribuição de energias limpas e a redução da emissão de GEE. No que tange a redução de emissão de gases, o setor pode e deve propor uma meta de redução exequível, mas significativa dessas emissões a partir do ano de 2030, tendo a Rede 6G como tecnologia habilitadora. Vale ressaltar que essa redução deve levar em conta não só a componente direta associada ao aumento da eficiência energética dos equipamentos de telecomunicações, como também as reduções indiretas, viabilizadas pela tecnologia 6G, o que é o foco desta seção. As contribuições do setor das telecomunicações para a redução indireta dos GEE são agrupadas em quatro vertentes que são apresentadas na sequência:

1. Aumento da eficiência energética e hídrica viabilizada pela tecnologia 6G;
2. Redução da emissão de gases de efeito estufa viabilizada pela tecnologia 6G;
3. Agricultura de baixo carbono;
4. Treinamento de redes neurais.

2.3.1 Aumento da eficiência energética e hídrica

O aumento na eficiência no uso dos recursos hídricos passa por uma gestão fina através de comando e controle automáticos com sensores e atuadores inteligentes visando a distribuição eficiente de água para consumo humano, irrigação, pecuária, indústria e produção de energia. Isto inclui mecanismos para a detecção fina e automática de vazamentos na rede de distribuição de água, com informação de localização, inclusive a nível subterrâneo, situação na qual sistemas de localização baseados em satélite, como o *Global Positioning System* (GPS), não funcionam adequadamente e sistemas celulares tradicionais podem ter baixa cobertura. O monitoramento da qualidade da água também pode ser incluído neste cenário com o uso de sensores adequados detectando situações de poluição crônica ou a presença de contaminantes perigosos para a saúde humana. Em resumo, espera-se que a tecnologia 6G viabilize o desenvolvimento de

uma plataforma inteligente, baseada no uso massivo de sensores, para o monitoramento e atuação sobre todos os estágios da captação e distribuição de água visando a máxima eficiência e qualidade em seu uso. Esta plataforma deve ser integrada com o monitoramento e tarifação do consumo de água pelos consumidores em tempo real através de aplicativos, visando empoderar os consumidores, estimular o uso consciente e dar transparência ao processo de cobrança.

O aumento da eficiência no uso e distribuição de energia elétrica passa pela implantação ubíqua de conceitos como *smart grid* e *smart metering*. O primeiro consiste em uma rede de produção e distribuição capaz de direcionar o fluxo energético de acordo com a demanda, enquanto que o segundo significa medir e visualizar o consumo de energia para poder detectar os potenciais de economia e as opções de ações correspondentes. Uma medida típica é a instalação de visores nas unidades consumidoras que ofereçam visibilidade em tempo real sobre o consumo individual de energia. Além disso, com a instalação de medidores inteligentes é possível cobrar taxas variáveis com base na demanda. Isso irá permitir que o consumidores domésticos possam optar por transferir sua carga de consumo para os horários de menor demanda e, consequentemente, de menor custo. O *smart grid* também irá viabilizar que as unidades consumidoras possam ser produtoras de energia, como por exemplo, através de painéis solares, decentralizando a produção. Obviamente, o direcionamento eficiente da produção de energia doméstica irá requerer uma rede de distribuição elétrica inteligente para o seu melhor aproveitamento.

Estas aplicações irão, provavelmente, se disseminar ainda nesta década utilizando tecnologia 5G que atende, a princípio, o requisito de suporte ao uso massificado de sensores através do mMTC. Uma massificação plena do uso destas abordagens eficientes passa fundamentalmente pelo teste da segurança cibernética. Acredita-se que a disseminação destas aplicações, utilizando inicialmente tecnologia 5G, irá expor vulnerabilidades que serão gradativamente endereçadas e consolidadas em uma futura tecnologia 6G à prova de invasões e com elevada confiabilidade, sendo a segurança de camada física um fator de grande importante neste cenário.

2.3.2 Redução das Emissões de Carbono

A pandemia de COVID-19 acelerou a tendência de desmaterialização da sociedade, isto é, a substituição de produtos e serviços físicos por suas versões eletrônicas ou virtuais. São exemplos de desmaterialização da sociedade:

- E-comércio;
- E-governo;
- Livros eletrônicos;
- Telepresença;
- Ensino a distância;
- Teletrabalho;
- Telemedicina.

A oferta destes serviços e produtos depende fortemente de uma infraestrutura de telecomunicações que tenha alta capacidade e alta qualidade. Isto inclui uma rede de acesso moderna (5G e posteriormente 6G) assim como a disseminação de *data centers* e/ou *testbeds* que viabilizem a operação em nuvem da maioria deles. O conceito de telepresença em futuras redes

6G deve ser visto como imersivo, permitindo uma simulação em tempo real e com alto grau de realismo da presença física das pessoas reunidas, por exemplo, em uma rodada de negócios ou em um simpósio. A telepresença imersiva impõe altíssimos graus de demanda de requisitos de vazão e latência para a futura rede 6G. Estes requisitos se estendem para outras aplicações em que há presença virtual de pessoas, tais como o ensino a distância e o teletrabalho.

A telemedicina no contexto da Rede 6G deve incluir não somente teleconsultas, algo plenamente viável hoje com a Rede 4G), e a realização de exames à distância, que deve se popularizar nos próximos anos graças às Redes 5G, mas também procedimentos mais invasivos, como as cirurgias remotas, que requerem altíssimos graus de confiabilidade e baixíssima latência que apenas a tecnologia desenvolvida para as Redes 6G será capaz de oferecer. Esse processo de desmaterialização implica em reduções de emissão de GEEs de variadas formas. Um exemplo bem claro vem da redução da produção de artefatos físicos, tais como o papel. Entretanto, a maior redução de GEE será dada pela redução do uso de transportes físicos propriamente ditos. O uso ubíquo destes serviços digitais irá reduzir deslocamentos urbanos longos e viagens de negócio contribuindo para uma significativa redução da emissão dos GEEs de automóveis, transportes coletivos e de cargas e transportes aéreos. Este fenômeno já foi observado durante a pandemia de COVID-19 [32], assim como o benefício adicional de uma a provável redução de vítimas em acidentes automobilísticos [33]. Mesmo uma desmaterialização parcial, com uso de um sistema de transportes inteligente e eficiente (com redução da quilometragem global dispendida e aumento da eficiência energética nos trajetos selecionados), ou com a massificação de drones inteligentes para realizar serviços de entrega, contribuirá substancialmente nesta direção.

Para o desenvolvimento pleno dessas aplicações, deve-se acrescentar aos requisitos já mencionados acima, um nível elevado de segurança cibernética para que a confiança dos consumidores seja plena. Em outras palavras, que as pessoas e organizações confiem em depender de tais serviços (*dependable services*).

2.3.3 Agricultura de baixo carbono

Em 8 de dezembro de 2020 foi transmitido à ONU, nomeadamente à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), a nova Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) ao acordo de Paris. Na NDC, o Brasil reafirma o compromisso de reduzir as emissões de GEEs em 43% até 2030, em relação as emissões observadas em 2005. Entre as metas para esse compromisso, no setor agrícola, figura o fortalecimento do programa de Agricultura de Baixo Carbono (ABC) como a principal estratégia para o desenvolvimento da agricultura sustentável, incluindo a restauração de mais de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas e a ampliação de 5 milhões de hectares de sistemas integrados de lavoura-pecuária-floresta até o ano de 2030 [34, 35].

Outro ponto relevante de impacto na redução da emissão de GEEs está associado à redução do desperdício no ciclo plantio-consumo de alimentos. Segundo [36], cerca de 1/3 dos alimentos produzidos são descartados. A redução do desperdício está diretamente associada a redução da necessidade de produção de novos alimentos e, desta forma, diretamente associada aos seu impacto no geração de GEE. A introdução de tecnologias massivas de comunicação e dos sistemas de telemetria com acesso em tempo real e com alcance global para sensoriamento e atuação na conservação dos alimentos, desde a fase de colheita, processamento e transporte podem reduzir drasticamente essas perdas, bem como a possibilidade de rastreamento e visualização em tempo real durante todo o ciclo produção-consumo.

2.3.4 Redução de carbono no treinamento de algoritmos IA

IA é um código de computador que permite a uma máquina fazer aquilo que normalmente necessitaria de um cérebro humano [37]. Por exemplo, IA serve para providenciar resultados úteis em cada nova pesquisa no Google; ou então, assistentes virtuais como a Siri, Cortana, Alexa ou ainda Google Assistente, são cada vez mais comuns em aplicações computorizadas de domótica (do francês *Domotique*, da junção *Domus*, que significa casa, com *Immotique*, que significa automático) ou outras.

Contudo, a utilidade ou assertividade das respostas e ações destes mecanismos de IA depende sobretudo do treinamento que lhes é dado pelos pesquisadores. Pelo que um bom treinamento depende da técnica que é aplicada e, sobretudo, de uma grande quantidade de dados.

Assim, por um lado, a IA permite obter resultados mais rápidos, certos, e de sobre-maneira adequados à dinâmica da realidade, já que está inerente um mecanismo de aprendizagem de máquina. Por outro lado, essa aprendizagem necessita de treinamento, o que demanda o processamento de uma ampla quantidade de informação (por Central Processing Units (CPUs), Graphics Processing Units (GPUs) ou Tensor Processing Units (TPUs)) e, consequentemente, um grande gasto de energia elétrica.

Atualmente, as redes de energia elétrica dependem ainda em grande parte de combustíveis fósseis que, como é sabido, contribuem para a emissão de GEE e, consequentemente, para o acelerar do aquecimento global do planeta [38, 39], com todas as consequências que já conhecidas pela ciência.

Assim, a questão da pegada de carbono no treinamento de algoritmos de IA é uma questão sensível, que cada vez mais tem atraindo a atenção da comunidade cientifica. Nomeadamente, o que era antes um entusiasmo sobre a IA tornou-se agora em um alarme [39], questionando-se cada vez mais o ganho marginal que é obtido pela utilização destas técnicas a troco do claro impacto no equilíbrio ambiental, sendo que toda a cadeia, desde o software ao hardware, deve ser repensada atendendo a uma maior eficiência ou adoção de novas tecnologias.

Caso as redes neurais normalmente empregadas em algoritmos baseados em IA sejam adotadas de maneira massiva pelas Redes 6G, as emissões de carbono podem chegar a níveis proibitivos. Um estudo recente mostrou que o treinamento de uma única rede neural para fins linguísticos emite uma quantidade de carbono 5 vezes maior que um veículo ao longo de sua vida útil [40]. Esse é um dos maiores desafios para o desenvolvimento sustentável das redes de 6G, uma vez que se prevê que estas sejam altamente dependente dos algoritmos baseados em IA.

Essa família de casos de uso abriga as aplicações voltadas para universalização da conectividade, permitindo que todas as pessoas tenham condições de acessar a Internet em qualquer local do globo; monitoramento e gerenciamento dos recursos naturais e das atividades econômicas em qualquer região da Terra, através de uma rede de sensores global que permita avaliar as condições do meio ambiente e os impactos ambientais das ações humanas; e utilização da 6G como ferramenta para reduzir as emissões de gases estufas. Esse conjunto de aplicações permitirá não só o fim da segregação digital de bilhões de pessoas e o monitoramento do meio ambiente, mas permitirá o acompanhamento do desenvolvimento humano em qualquer lugar do globo. Esse é um cenário bastante desafiador para a Rede 6G e que será detalhado nas subseções a seguir.

3 Agropecuária do Futuro

Luciano Leonel Mendes
luciano@inatel.br

O crescimento da população mundial e a melhoria da qualidade de vida em diversos países emergentes com elevada população têm causado um constante aumento pela demanda de alimentos. O Brasil tem um papel de destaque neste mercado mundial e atualmente é visto como um importante ator no suprimento de produtos agropecuários para todo o mundo. Essa relevância se reflete na importância do setor agropecuário na balança comercial e no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. No entanto, o setor de agronegócios tem grandes desafios para atender a demanda mundial e manter-se competitivo neste mercado. O primeiro desafio é o aumento da produtividade que, até recentemente, vinha acompanhado do crescimento da área explorada para esta vertical. Isto vem causando uma maior pressão sobre o meio ambiente, com o aumento do desmatamento para abertura de pastos e áreas cultiváveis. Tomando como exemplo a produção de soja, a Figura 5 mostra a evolução da produção e o aumento da área empregada nesta cultura no Brasil entre os anos de 1976 e 2018 [41]. A correlação entre as curvas apresentadas na Figura 5 mostra que o aumento da produção se deve, principalmente ao aumento da área cultivada.

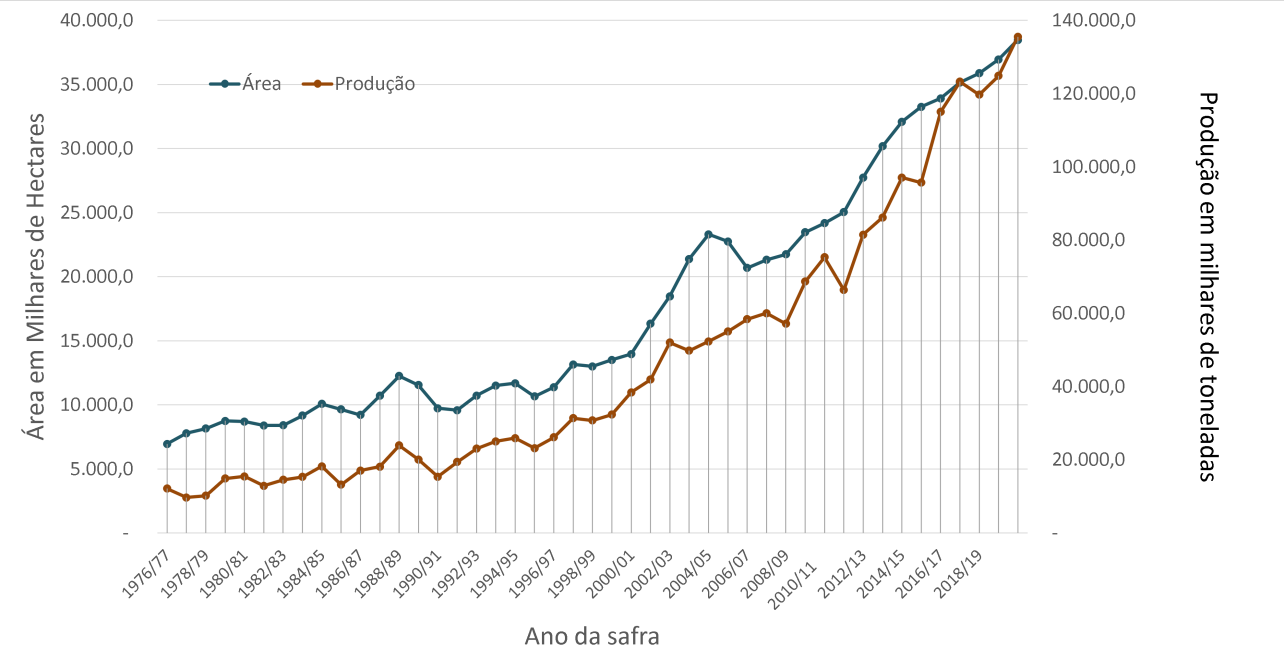

Figura 5: Série histórica da produção de soja e área cultivada.

A Figura 6 apresenta a produtividade de soja no Brasil por hectare cultivado, onde fica claro que, embora tenha ocorrido um ganho de eficiência, o mesmo não pode ser considerado expressivo, tendo girado em torno de 2,7 toneladas por hectare cultivado ao longo da série histórica levantada pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). O exemplo da soja é emblemático devido ao volume desse grão produzido pelo Brasil, mas não é o único. A Figura 7 mostra as curvas da produção e da área cultivada para a produção de cana-de-açúcar e a produtividade desta cultura no Brasil entre os anos de 2006 e 2020 [41]. Mais uma vez, a

estagnação da produtividade é evidente, variando em torno de 75 toneladas por hectare ao longo da série histórica.

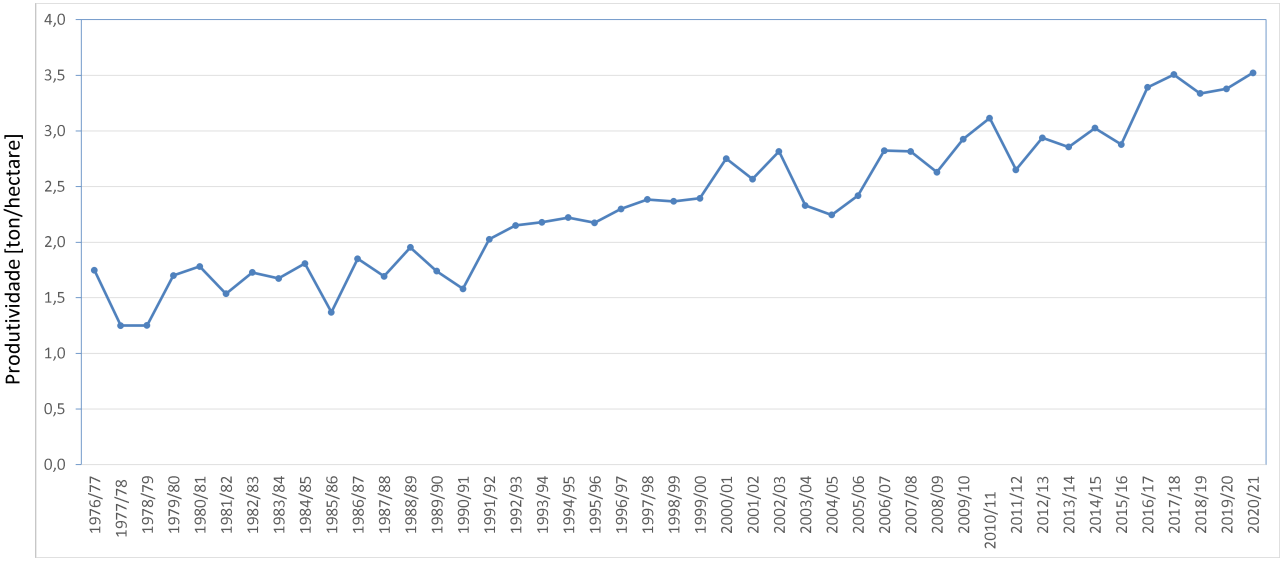

Figura 6: Produtividade no cultivo da soja no Brasil.

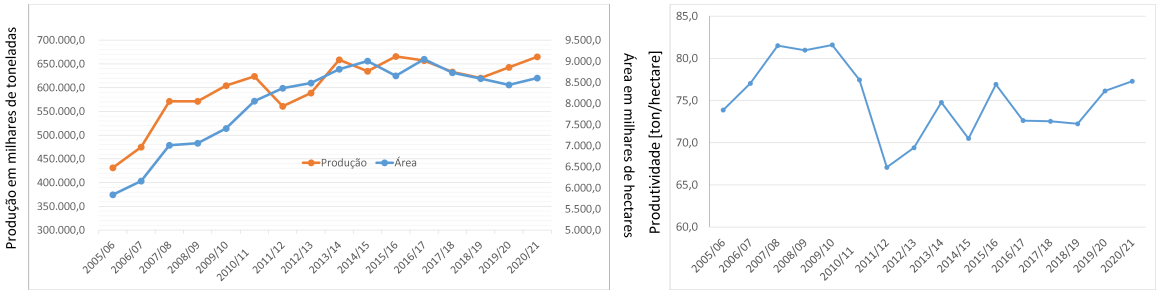

Figura 7: Série histórica da produção de cana de açúcar e área cultivada. Produtividade da cana de açúcar no Brasil.

As pressões nacionais e internacionais para a preservação do meio-ambiente e o constante aumento pela produção de alimentos por si só tornam crucial o aumento da produtividade do setor agropecuário nacional. Além disso, há outros fatores que apontam para a necessidade da produtividade da vertical de agronegócios no Brasil. Pode-se considerar, por exemplo, a diversificação que a China está desenvolvendo para o fornecimento de produtos agropecuários. Fortes investimentos chineses em projetos agrícolas no continente africano mostram o interesse deste importante parceiro comercial do Brasil em desenvolver outros fornecedores, em busca de diversidade e custos mais baixos. Segundo a Secretaria de Comércio Exterior (SECEX), a China é o principal mercado consumidor da soja brasileira e este país tem colaborado com diferentes parceiros africanos para a produção deste grão o que, para médio e longo prazos, pode representar um risco elevado para este setor no Brasil.

Em relação à pecuária, os índices mostram que a produtividade do setor tem crescido nas últimas décadas [42]. No entanto, o uso da tecnologia da informação aplicada à produção de proteína animal pode aumentar a derivada desta curva e também permitir uma maior lucratividade dos produtores através do uso mais eficiente de insumos e detecção/prevenção de doenças.

A utilização de tecnologia e a melhoria da infraestrutura para coleta de dados é a principal solução que pode ser empregada para o aumento da produtividade e redução dos custos da vertical de agronegócios no Brasil. A automatização dos processos, acesso imediato às informações do campo, monitoramento do uso de insumos, tomadas de decisão de forma autônoma e maior eficiência dos processos de logísticas são alguns dos pontos que podem ser beneficiados com o uso das Redes 6G no campo. A seguir são apresentadas algumas aplicações que podem revolucionar a vertical de agronegócios no Brasil.

- **Pecuária de altíssima precisão:** o aumento da produtividade da pecuária pode ser atingido com o uso de informações em tempo real sobre a saúde e comportamentos dos animais. Sensores biológicos integrados aos animais e os avanços em nanotecnologia permitem a coleta de dados de diferentes naturezas [43]. Sensores *wearables* permitem a análise do suor dos animais, detectando feromônios, hormônios e minerais presentes nesse líquido. Além disso, esses sensores são capazes de medir a temperatura corporal, o comportamento e a movimentação, detectar o estresse e analisar os sons emitidos pelos animais. Detectores químicos implantados nos animais podem ser usados para analisar o pH e colher dados sobre a composição de analitos na corrente sanguínea. Sensores biológicos podem detectar a presença de agentes patológicos em animais, permitindo a detecção de doenças provocadas por bactérias e vírus antes mesmo que os sintomas se manifestem, reduzindo as chances da proliferação de doenças e da incidência de embargos para produtos pecuários. Além disso, os sensores biológicos e químicos têm um papel importante no controle de insumos usados para a manutenção da saúde e estimulantes para o crescimento dos animais. O controle de dois medicamentos está recebendo atenção especial de diversas agências de regulamentação ao redor do mundo. O primeiro ponto de atenção é o uso de antibióticos para o controle de infecções, prática que é amplamente difundida nas diversas atividades de criação de animais. Essa prática permite reduzir a incidência de doenças no gado, mas o risco de surgimento de patógenos super-resistentes ao tratamento com antibióticos é uma preocupação real, com grandes consequências para a saúde humana. As agências de controle sanitárias europeias estabeleceram limites na quantidade de antibiótico a ser ministrada em animais, visando evitar este risco. Os sensores implantados podem detectar o nível desse medicamento na corrente sanguínea dos animais e informar a necessidade de aplicação de novas doses em tempo real. A disponibilidade dessa informação permite inclusive usar aplicadores implantados que liberam os antibióticos sobre demanda, em função das medidas disponibilizadas pelos sensores. Além de reduzir os riscos para a saúde humana, esta abordagem permite que os produtores evitem o desperdiço de insumos, empregando apenas a quantidade efetivamente necessária para a manutenção da saúde dos animais. O segundo ponto de atenção consiste no monitoramento do uso de hormônios para estimular o crescimento e aumentar a produtividade, em especial o uso de anabolizantes, cujo uso no Brasil é considerado um crime hediondo. A fiscalização quanto ao uso de anabolizantes é realizada principalmente através da análise de amostras de urina e fezes dos animais [44]. No entanto, o desenvolvimento de anabolizantes sintéticos tem permitido um aumento no uso dessas substâncias, com acúmulos nas partes comestíveis e menor índice de resíduos nos materiais coletados para análise dos fiscais. Além disso, a injeção de anabolizantes através de aplicadores implantados também dificulta a detecção do uso dessa substância, mas não minimiza os impactos na saúde dos consumidores dos alimentos contaminados. Novamente, sensores biológicos e químicos implantados nos animais podem detectar a presença dessas substâncias proibidas, inclusive gerando alarmes automáticos para as autoridades competentes quando anabolizantes forem encontrados

em animais. As Redes 6G devem ser capaz de prover a conectividade para todos os sensores e atuadores necessários para garantir o monitoramento adequado da produção de proteína animal em todos os cenários observados.

- **Agricultura de altíssima precisão:** O aumento da produtividade em atividades agrícolas é um desafio de grande importância para a economia e a preservação do meio ambiente no Brasil e o uso de informações em tempo real sobre os processos agropecuários é apontado como o principal fator para a melhoria destes indicadores. As tecnologias de comunicação, sensoriamento, localização e imagem previstas paras as Redes 6G irão permitir um maior controle e monitoramento dos processos agrícolas, permitindo tanto o aumento da produção por área explorada quanto no uso mais eficiente de insumos agrícolas. Sistemas de monitoramento de variáveis climáticas podem ser empregados para coletar as informações necessárias para criação de modelos de microescala, viabilizando que os produtores tenham condições de tomar as decisões que dependam das condições climáticas de forma precisa, tornando possível inclusive a tomada de decisões autônomas por agentes de IA. Sensores de solo capazes de medir parâmetros como condutividade, umidade e pH irão complementar o leque de informações dos modelos climáticos, melhorando a qualidade das decisões que possam afetar a produtividade. VANTs equipados com câmeras multiespectrais [45] também terão um papel importante na vertical de agronegócios. Esses equipamentos podem realizar voos autônomos sobre as plantações, coletando imagens através de câmeras sensíveis a diferentes comprimentos de onda (como infravermelho, luz visível e ultravioleta) e transmitindo em tempo real para o processamento e identificação de ameaças. As imagens coletadas em infravermelho, por exemplo, podem ser úteis para identificar a presença de áreas sobre estresse hídrico e também a presença de animais que possam ser uma ameaça na produção, como o javaporco [46]. Já as câmeras operando em ultravioleta podem identificar pontos de infestação de pragas, como larvas de insetos, gafanhotos e outras atividades biológicas que deixem assinaturas específicas nesta gama espectral. Após o tratamento desse novo conjunto de dados, algoritmos inteligentes online podem acionar agentes para atuarem de forma precisa e específica sobre os pontos de problemas em potencial. Por exemplo, as informações sobre o microclima e estresse hídrico podem ser usadas para o acionamento do sistema de irrigação apenas nas localidades onde o consumo de água é efetivamente necessário. VANTs podem ser acionados de forma autônoma para aplicação de agrotóxicos apenas nas áreas em que haja a incidência de insetos, reduzindo o consumo de insumos e diminuindo os níveis de contaminação do solo e da água. Além disso, o uso abrangente de dispositivos IoT viabilizará o monitoramento constante de maquinário agrícola, permitindo que a posição, velocidade, rota, quantidade de insumos usados e condições de cada máquina sejam conhecidas em qualquer instante de tempo. Essas informações poderão ser utilizadas para analisar a efetividade do uso de fertilizantes e pesticidas, garantir a qualidade de aplicação de insumos nas lavouras e analisar as condições de operação do maquinário, de modo que ações de manutenção preventivas que reduzam a chance de falhas e de inoperância do equipamento no campo.

- **Logística de altíssima precisão**: as perdas de produção agrícola em atividades logísticas têm um elevado impacto econômico, ambiental e social. Segundo os autores em [47], as perdas financeiras na logística de soja e milho em 2015 resultaram em um prejuízo de R$2,04 bilhões, referente a 2,4 milhões de toneladas. Isso corresponde a cerca de 1,3% da produção do período. As perdas com procedimentos logísticos acontecem em três setores

distintos: a) no transporte; b) nos terminais e; c) no armazenamento. Ainda segundo [47], as perdas no transporte dependem das condições das estradas. Em rodovias bem pavimentadas, as perdas típicas são de 0,13%, enquanto que esse índice sobe para 0,27% para os casos de escoamento de produção por rodovias com pavimentação ruim. Já no caso do armazenamento, o impacto deste setor corresponde a 45,53% da perda total, sendo que 38,81% correspondem à armazenagem externa e 6,72% correspondem à armazenagem na fazenda. Além do impacto financeiro e do aumento da eficiência, a redução das perdas de produtos agrícolas também traz benefícios para o meio ambiente. A emissão de CO_2 correspondente à produção de soja e milho desperdiçada em 2015 equivale a mais de 39 mil toneladas [47]. O uso massivo de dispositivos IoT em trens, caminhões, barcaças, terminais e silos pode minimizar as perdas relacionadas à logística de transporte de grãos, fornecendo, em tempo real, as condições de eficiência do transporte e armazenagem. Essas informações permitirão a tomada de decisão sobre rotas, disposição da frota, demanda por espaço de armazenagem e uso dos terminais de distribuição. O monitoramento da distribuição da produção dos diferentes gêneros agrícolas, juntamente com a análise contínua das quantidades armazenadas para atendimento de cada centro de consumo, permitirá que a logística de distribuição seja realizada de forma a garantir o melhor atendimento da demanda. Essa abordagem irá aumentar a eficiência do processo de atendimento ao mercado, melhorando a liquidez da produção e contribuindo para a estabilidade dos preços de produtos agrícolas nas diferentes regiões do país.

A Figura 8 ilustra os casos de uso apresentados para este cenário. Existem diversos desafios para que o cenário descrito nesta seção possa ser viabilizado e atinja o objetivo de aumentar a produtividade do setor agropecuário brasileiro. Um dos primeiros pontos a ser abordado é a metodologia empregada pela ANATEL para permitir o uso de espectro. O modelo baseado em bandas licenciadas é oneroso, pois este procedimento requer a participação em leilões que tipicamente aumenta o custo pelo direito de exploração comercial do espectro de frequências. Normalmente, o investimento necessário para obter uma licença de uso do espectro resulta em um tempo de retorno inviável para as operadoras de telecomunicações e impede que pequenos provedores locais entrem nesse mercado. Outro problema que reduz a atratividade econômica de redes móveis em áreas remotas e rurais é a pequena cobertura ofertada pelas atuais soluções tecnológicas. Tipicamente, uma rede *Long Term Evolution* (LTE) consegue ofertar rede móvel banda larga a distâncias da ordem de 5 km a 10 km de raio. Embora a cobertura para serviços de IoT possa chagar a 40 km de raio, aplicações que demandam alta vazão, como a captura de imagens de VANTs, não podem ser atendidas nestas situações. Como a densidade populacional em regiões afastadas dos grandes centros é baixa, um pequeno raio de cobertura significa poucos assinantes em potencial atendidos por uma célula, elevando o custo per capta a patamares proibitivos.

O projeto *Remote Area Access Network for the 5th Generation* (5G-RANGE) [48], desenvolvido no âmbito da 4ª Chamada Brasil-Europa, teve como objetivo desenvolver uma rede móvel para atender as demandas de conectividade em áreas remotas e rurais. Este projeto propôs o uso de rádio cognitivo associado com novas formas de onda e uma estrutura de grade tempo-frequência que prioriza a propagação por longas distâncias. As baixas emissões fora da faixa, garantidas pelo uso de uma forma de onda flexível e inovadora, permitem que ERB e terminais móveis coexistam com sistemas legados sem a necessidade de filtros de RF. Isso significa que a rede proposta neste projeto de pesquisa pode mudar de frequência de operação de forma autônoma e sem a necessidade de intervenção humana. Além disso, a camada física da rede 5G-RANGE foi projetada para viabilizar células com 50 km de raio, permitindo taxas de até

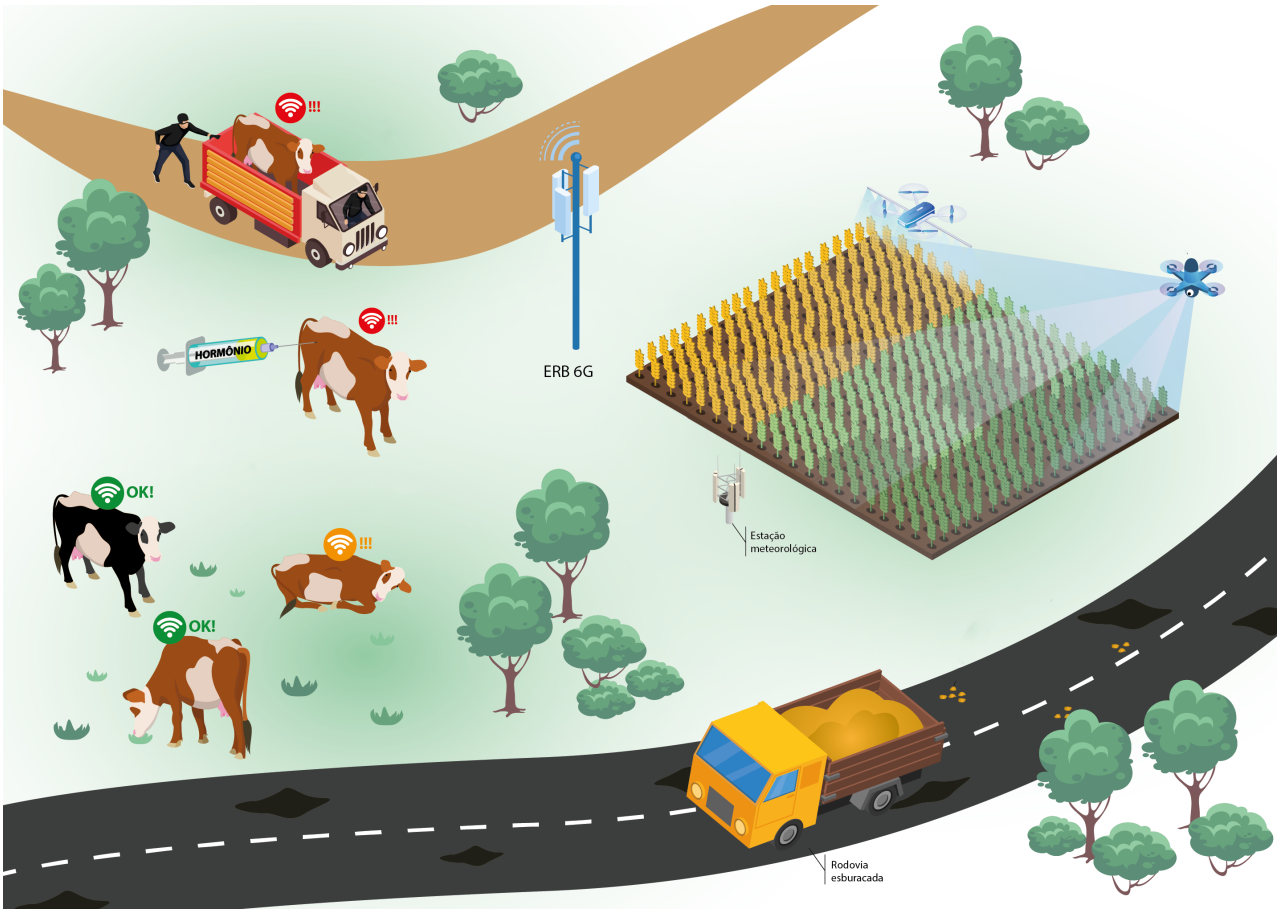

Figura 8: Casos de uso para o cenário de agricultura do futuro.

100 Mbps na borda. Já o projeto *Rural First*, coordenado pela Universidade de Strathclyde, visa explorar as frequências definidas pelo 3GPP não utilizadas nas áreas remoras e rurais, de forma que pequenos provedores de Internet possam ofertar os serviços de comunicação móvel em regiões em que as operadoras detentoras do espectro não queiram operar. Essa abordagem pode ser expandida para o conceito de micro operador rural [49], onde pequenos provedores são responsáveis por instalar a infraestrutura de rede móvel, enquanto que operadoras de grande porte fornecem o *Subscriber Identity Module* (SIM) *card* e o *backhaul*, e fazem a interface com o cliente.

Essas iniciativas apontam para evoluções importantes para o atendimento das demandas de aplicações voltadas para as áreas remotas e rurais, mas ainda há diversos desafios que não serão atendidos pelas Redes 5G. As Redes 5G foram concebidas para serem flexíveis, oferendo alta vazão, baixa latência ou suporte para a comunicação entre máquinas. Mas as aplicações previstas para atender o setor de agronegócios irão demandar o atendimento simultâneo de requisitos conflitantes, como alta vazão e baixa latência, por exemplo, para viabilizar a coordenação de conjuntos de VANTs de captura de imagens e de pulverização. Aquisição de imagens em tempo real e navegação de maquinários autônomos, uso de sistemas de RF como sensores e a utilização de ondas em THz para detecção de insetos e geração de imagens para inspeções em cenários agrícolas [50] são outros exemplos que vão demandar futuras evoluções das redes móveis para áreas rurais. Atender a esses requisitos simultaneamente irá demandar o uso de diferentes *Radio Access Technologys* (RATs) de forma coordenada e transparente para a apli-

cação. O primeiro passo para a utilização de outras redes de forma integrada ao núcleo da rede móvel foi dado na concepção das Redes 5G e a evolução das redes móveis apontam que a integração de múltiplas tecnologias de acesso será um fato nas futuras versões apresentadas pelo 3GPP [51]. Compreender as demandas da vertical de agronegócios e atuar junto com a academia, indústria, operadoras, agências de padronização e regulamentação, bem como com os produtores são passos fundamentais para garantir que as futuras redes móveis atendam as demandas desse importante setor da economia nacional.

4 Gêmeos Digitais em Larga Escala

Kleber Vieira Cardoso, Luciano Leonel Mendes
kleber@ufg.br, luciano@inatel.br

Basicamente, um gêmeo digital é um modelo virtualizado e uma representação em tempo real de um elemento do mundo físico, ou seja, uma representação digital da estrutura, função e comportamento do elemento físico. Gêmeos digitais possuem várias aplicações e podem trazer diversos benefícios em termos de visualização de elementos complexos, tomada de decisão, planejamento, previsão, dentre outros. No entanto, o suporte adequado para um gêmeo digital envolve recursos de comunicação e computação intensos. Até o momento, as tecnologias de comunicação atuais, como as redes 5G, apenas são capazes de atender uma pequena quantidade de gêmeos digitais em uma determinada região ou infraestrutura. Assim, para usufruir do potencial de gêmeos digitais em larga escala, é fundamental que redes 6G estejam disponíveis. As subseções que seguem apresentam dois casos de uso relacionados a cidades inteligentes e indústria do futuro, que ilustram os benefícios oferecidos pelo uso maciço de gêmeos digitais, assim como a intensa demanda por comunicação e computação que eles apresentam.

4.1 Cidades dinamicamente inteligentes

O ambiente urbano é importante para o desenvolvimento do Brasil, uma vez que 85% da população vive em zonas urbanas. O país possui um percentual consideravelmente maior que outros emergentes. Por exemplo, a Rússia tem menos de 80% de sua população vivendo nas cidades, enquanto que a China possui menos de 60% e a Índia pouco mais de 30%. Embora seja densamente urbanizado, esse processo de migração do campo para a cidade aconteceu de forma muito rápida no Brasil e não foi acompanhado de um planejamento urbano eficaz. Isso acarretou em grandes desafios para os habitantes habitantes das grandes cidades brasileiras. A infraestrutura dos centros urbanos não tem conseguido absorver as várias demandas por produtos e serviços, falhando, portanto, em oferecer qualidade de vida adequada aos seus cidadãos. Além do fator social e humano, há importantes aspectos econômicos envolvidos. Por exemplo, conforme descrito em [52], no mundo, o potencial ganho econômico que a IoT pode trazer ao ambiente de cidades é de cerca de US$ 1,6 trilhão em 2025. Apenas no Brasil, esse ganho econômico é estimado em US$ 27 bilhões.

IoT e redes 5G são vistas como sendo as principais tecnologias viabilizadoras para o conceito de cidades inteligentes. Monitoramento de níveis de poluição, ruído, trânsito, dentre vários outros tem permitido o planejamento e a tomada de decisão para melhorar a qualidade de vida em grandes centros urbanos. Adicionalmente, IoT e redes 5G têm oferecido a possibilidade de atuar dinamicamente sobre vários elementos físicos das cidades como iluminação, controle de tráfego, painéis de informação, gerenciamento de transporte públicos e outros serviços com o intuito de tornar o ambiente urbano mais eficiente, seguro e confortável para seus habitantes. Apesar dos grandes avanços que estão sendo alcançados com as redes 5G, há um atraso significativo entre a coleta de informações, a tomada de decisão e atuação sobre o mundo físico. Além disso, as capacidades de monitoramento e atuação ainda possuem limitações significativas, em parte devido à carência de sensores e atuadores, mas também devido a restrições de comunicação.

Nas redes 6G, cobertura e capacidade não devem oferecer limitações nas cidades. Adicionalmente, a infraestrutura será complementada por uma ampla capacidade de computação espalhada por toda a rede, desde a ERB até a nuvem, passando por toda a rede de acesso

e transporte. Essa capacidade computacional virá acompanhada de IA/Aprendizado de Máquina (AM) ofertada como um serviço que pode ser consumido de maneira tão simples quanto a própria comunicação de dados. Assim como a capacidade computacional, esse serviço de IA/AM estará disponível ao longo de toda infraestrutura, atendendo não apenas requisitos funcionais, tais como reconhecimento de padrões, previsão e otimização, mas também importantes requisitos não-funcionais, como confidencialidade, disponibilidade e eficiência.

Nesse contexto, será possível criar gêmeos digitais de cidades inteiras [23, 53], permitindo acompanhar, em tempo real, vários elementos que afetam a vida de seus habitantes, conforme ilustrado na Figura 9. Vias públicas, galerias pluviais, iluminação pública, grandes espaços urbanos e transporte coletivo são alguns exemplos de ambientes físicos que poderão ser recriados em um ambiente virtual. Esse ambiente virtual permitirá identificar problemas, tomar decisões e avaliar seu impacto antes de efetivamente atuar sobre o ambiente físico. Por exemplo, será possível simular o impacto no trânsito de uma obra, ou de um grande evento, e avaliar diferentes ações. Além disso, a própria aplicação das decisões é facilitada uma vez que consiste em manter sincronizados os elementos físicos e seus avatares digitais. Todo o processo será assistido por um serviço de IA/AM funcionando de maneira distribuída, mas operando de maneira coordenada para alcançar os objetivos definidos (os quais podem variar) e garantir propriedades fundamentais como anonimidade e segurança dos cidadãos. Gêmeos digitais de cidades também oferecerão a possibilidade analisar e planejar a evolução desses complexos ecossistemas em diferentes escalas de tempo, permitindo investir os recursos de maneira mais eficiente.

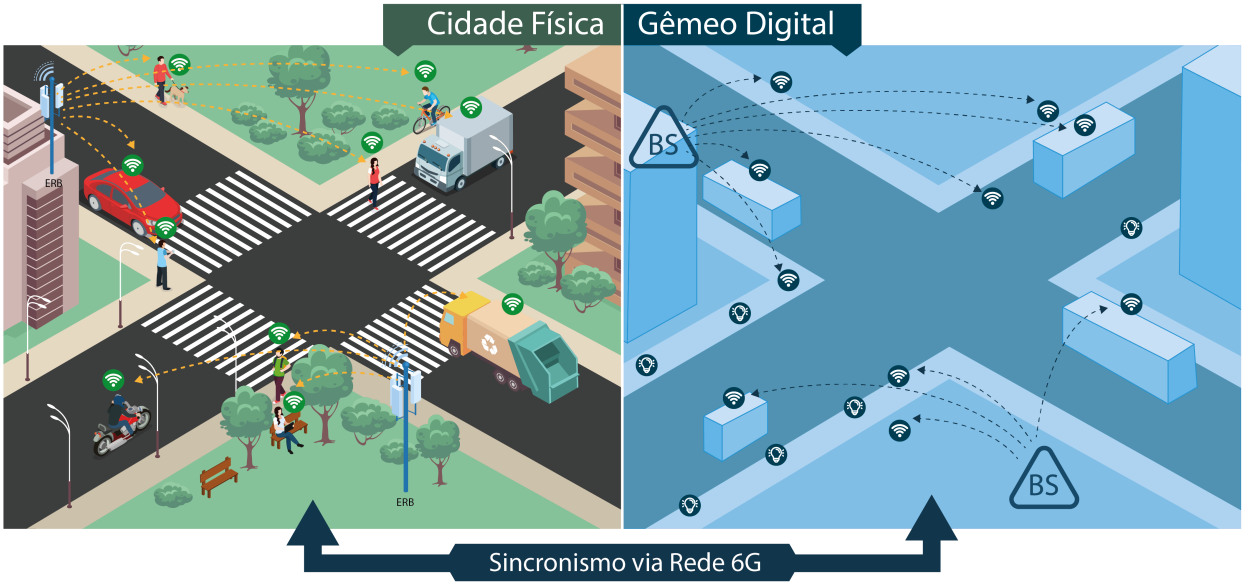

Figura 9: Cidade física e seu gêmeo digital correspondente.

As ideias gerais sobre gêmeo digital vêm do século passado, embora o interesse tenha crescido bastante no início deste século, quando o conceito foi inicialmente estruturado no trabalho de Grieves sobre o ideal conceitual para gerenciamento do ciclo de vida do produto em 2003 e, posteriormente, com a consolidação do termo em 2011 [54]. A partir de 2012, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) [53] contribuiu com a popularização do termo (e do conceito) ao utilizá-lo em seus projetos de veículos espaciais. Antes de discutir os desafios que envolvem gêmeos digitais em larga escala (como o gêmeo digital de uma cidade), é importante definir conceitos que são comumente confundidos com gêmeos digitais. Modelo digital é uma

versão digital de uma entidade física pré-existente ou planejada, não existindo troca automática de dados entre o modelo físico e o modelo digital. Sombra digital é uma representação digital de uma entidade física que tem um fluxo unilateral entre essa entidade e sua contraparte digital, ou seja, uma mudança no estado da entidade física leva a uma mudança na sua versão digital e não vice-versa. Gêmeo digital mantém um fluxo bidirecional de dados com a entidade física, isto é, ambas influenciam e sofrem influência de sua contraparte. É também comum na literatura associar gêmeo digital apenas à representação gráfica tridimensional da entidade física. Embora algumas vezes essa representação seja importante (por exemplo, para descrever um prédio) na maioria das vezes, ela não é a única propriedade importante a ser sincronizada e, muitas vezes, a representação gráfica tridimensional nem sequer é relevante (por exemplo, para representar pessoas).

Nos últimos anos, gêmeos digitais de cidades se tornou um tema de interesse para academia e indústria, gerando várias iniciativas como as reportadas nas cidades de Viena [55], Zurique [56], Roterdã, Boston, Nova York, Singapura, dentre outras [57]. No entanto, mesmo nas versões avançadas, essas iniciativas ainda não oferecem um único gêmeo digital para uma cidade inteira, mas sim uma agregação de gêmeos digitais específicos de domínios diferentes, por exemplo, para edifícios inteligentes, infraestrutura de tráfego, redes de energia e gerenciamento de água. Em parte, gêmeos digitais de cidades estão limitados, porque o estado-da-arte ainda considera redes 5G como a infraestrutura de comunicação mais avançada [58, 59]. Ou seja, é assumido que a rede pode atender de uma grande densidade de dispositivos através do mMTC, e também baixa latência com confiabilidade através dp URLLC, porém não simultaneamente. Isso limita a quantidade de sensores e atuadores de alta precisão que estarão em uso na cidade. Além disso, é assumido que computação de borda estará amplamente disponível e integrada à rede, mas que IA/AM é um serviço à parte, em geral, ofertado predominantemente na nuvem. Portanto, a capacidade de atender as demandas por IA/AM na borda é limitada e não integrada à comunicação oferecida pela rede. Redes 5G também não foram projetadas para atuar como parte ativa do sensoriamento, ofertando apenas informações sobre localização com alta precisão. Em resumo, antes que as Redes 6G se tornem disponíveis, gêmeos digitais de cidades não poderão ser explorados em sua plenitude, limitando, em especial, a capacidade de acompanhar a dinamicidade natural de um ambiente urbano. Em outras palavras, cidades *dinamicamente* inteligentes dependem das evoluções a serem introduzidas pelas Redes 6G.

Esse caso de uso demanda alta densidade de dispositivos e, para alguns tipos de sensores (como câmeras e sistemas de varredura a laser), também demanda alta vazão. Além disso, para garantir a sincronização adequada entre ambiente físicos e virtuais, determinados tipos de elementos físicos exigem baixa latência e alta confiabilidade, como por exemplo, veículos de emergência como ambulâncias e carros de bombeiros. Devido à imensa quantidade de dados gerados e a necessidade de manter os ambientes físico e virtual sincronizados em baixas escalas de tempo, é importante ter capacidade computacional e serviços de IA/AM na borda rede. Essa distribuição da IA/AM criará uma demanda por uso eficiente de recursos de comunicação e computação de forma a garantir que os diversos agentes inteligentes possam se coordenar para entregar uma visão consolidada de toda a cidade virtualizada [60, 61]. Essa visão é importante para que seres humanos possam interagir com a versão virtualizada da cidade e, assim, possam entender o seu comportamento e influenciar o seu funcionamento.

4.2 Indústria 5.0

A Indústria 4.0 foi uma iniciativa do Governo Alemão com o foco em "Manufatura Inteligente para o Futuro", ou seja, seu objetivo é semelhante às revoluções industriais anteriores: aumentar a produtividade e alcançar a produção em massa usando tecnologias inovadoras [62]. Várias tecnologias vêm impulsionando a Indústria 4.0, tais como IoT, robótica, impressão 3D, inteligência artificial, *big data*, realidade virtual e aumentada, computação em nuvem e, mais recentemente, Redes 5G. Embora a Indústria 4.0 seja uma revolução no que tange o processo produtivo, essa é uma revolução que visa o aumento da produtividade e da eficiência com o foco nos acionistas.

A Indústria 5.0 [62, 63, 64] é um conceito que transcende a produção de bens, produtos ou serviços com foco na lucratividade. A motivação por trás da Indústria 5.0 é a mudança de foco do acionista para todas as partes interessadas no processo produtivo, comumente definido como *stakeholders*. A Indústria 5.0 considera a reinserção do papel do ser humano na planta fabril, atuando de forma harmoniosa com robôs e sistemas autônomos de forma cooperativa e segura, resgatando, assim, o papel relevante da indústria para a sociedade moderna. Além disso, a Indústria 5.0 irá integrar a economia circular de forma sistêmica e nativa nos processos produtivos, reduzindo os impactos negativos da produção industrial no meio ambiente. Nos modelos atuais, a indústria atua, na maioria dos casos, na transformação da matéria prima obtida da extração do meio ambiente (vegetal ou mineral), sendo que os produtos que chegam ao final de sua vida útil são descartados sem que os materiais utilizados em sua construção sejam reintroduzidos no mercado. A Indústria 5.0 irá promover uma mudança de paradigma no processo de reciclagem, de tal forma que os insumos empregados em produtos novos sejam majoritariamente vindos de produtos descartados.

A utilização consciente de energia é outro fator de destaque na Indústria 5.0. Além de se preocupar com a eficiência energética, as indústrias de 2030 deverão se preocupar com os impactos ambientais das fontes de energia empregadas no processo de manufatura. Integrada à *Smart Grid* [65], a Indústria 5.0 deve dar ênfase para fontes de energia renováveis, contratando energia preferencialmente de empresas que empregam métodos limpos para a produção energética ao invés de buscar sempre a matriz energética de menor custo.

Todos esses esforços mostram que a Indústria 5.0 será desenhada para considerar as demandas humanas, sociais e ambientais, assim como eficiência, produtividade e lucratividade como os seus pilares fundamentais, integrando esses diversos interesses nos vetores que impulsionam o desenvolvimento tecnológico. Para isso, diversas tecnologias estão sendo apontadas como suporte para a Indústria 5.0 [66]. A interação homem-máquina precisa agregar tecnologias que combinam as habilidades humanas e das máquinas de forma simbiótica e transparente, além de permitir a coexistência harmoniosa e segura de humanos e robôs autônomos. Para isso, a BCI será essencial. Os materiais inteligentes também precisam evoluir para permitir a reciclagem eficiente, a integração biotecnológica e a rastreabilidade intrínseca aos materiais empregados pela indústria. O emprego do conceito de gêmeos digitais será fundamental para a viabilização da indústria 5.0, permitindo: i) o maior acompanhamento da produção, simulação de novos processos com uso de dados em tempo real e a correspondente implantação dos processos validados e; ii) a realização de manutenção baseada na predição inteligente de falhas a partir dos dados coletados da planta. O sistema de comunicação sem fio também será uma parte inerente da Indústria 5.0. O fluxo de informação constante para *big data*, monitoramento, sistemas de controle, segurança, rastreabilidade e escalabilidade precisarão evoluir para incluir as demandas centradas na sociedade previstas para a nova fase industrial. Por fim, a IA deverá permear a

indústria para permitir a melhor utilização dos recursos, controle dos agentes autônomos colaborativos, tomadas de decisão levando-se em conta os pilares da indústria 5.0, complementação das habilidades humanas, efetividade nas comunicações baseadas em BCI, gerenciamento das informações de *big data*, gerenciamento energético e avaliação de riscos de convivência com humanos.

A viabilidade da indústria 5.0 está estritamente conectada com as capacidades previstas para as Redes 6G. O uso das Redes 6G para sensoriamento e imagem permitirá o mapeamento de objetos, pessoas e robôs nas plantas industriais em tempo real, viabilizando inclusive a alimentação da modelagem de seu gêmeo digital e permitindo que os algoritmos de IA distribuídos garantam a segurança e convivência de pessoas e máquinas. As novas interfaces de interação entre homem e a rede previstas para as Redes 6G também irão viabilizar a integração das habilidades humanas e computacionais, essenciais para se atingir os objetivos da Indústria 5.0. A possibilidade de suportar serviços de baixa latência e alta vazão simultaneamente fará com que sistemas autônomos possam empregar informações de banda larga, como imagens e hologramas, nas tomadas de decisão e nos ciclos de controle. A diversidade de RATs previstas para as Redes 6G dará suporte para uma ampla gama de comunicações entre máquinas, variando desde a transmissão de dados esporádicos de sensores IoT até o controle inteligente distribuídos de robôs colaborativos. Além disso, o monitoramento global suportado pelas Redes 6G permitirá que os impactos das ações produtivas de uma planta Industrial 5.0 na sociedade e no meio ambiente sejam medidos em tempo real, de modo que a sua produção e distribuição sejam otimizadas para atender as demandas, enquanto que as decisões sobre fornecedores de matéria-prima e fornecimento energéticos sejam tomadas de acordo com as diretrizes da Indústria 5.0.

5 Interações Remotas Avançadas

Kleber Vieira Cardoso, Luciano Leonel Mendes, Sand Luz Correa, Ciro José Almeida Macedo
kleber@ufg.br, luciano@inatel.br, sandluz@ufg.br, ciro.macedo@ifg.edu.br

A pandemia de COVID-19 mostrou a importância da sociedade estar pronta para viver pelo menos parte das experiências diárias através de interações remotas. Durante essa crise, atividades como aulas, consultas médicas, compras e trabalho, passaram a ter suas versões remotas amplificadas intensamente. Essa experiência também mostrou o quanto a tecnologia de comunicação precisa ser revolucionada para atender plenamente essa demanda. Humanos são seres sociais que evoluíram através de interações envolvendo sinais visuais tridimensionais, auditivos e táteis e as redes atuais limitam o espectro de sentidos que podem ser utilizados nas interações remotas. O advento da telefonia permitiu a interação à distância através da troca de mensagens de sinais sonoros. A introdução das redes multimídia permitiu evoluir para sistemas de comunicação audiovisuais, onde tanto imagens e sons são transmitidos para melhorar a troca de informações entre os interlocutores. Hoje, as interações através das redes de comunicação são dominadas por imagens bidimensionais e áudio, os quais têm se mostrado inadequados para substituir a interação física. As dificuldades de aprendizagem de crianças, a insatisfação de idosos e a baixa produtividade de determinados profissionais são alguns exemplos do impacto negativo gerado pelas limitadas interações remotas atuais. De fato, essas interações remotas são também afetadas por outros aspectos como as interfaces baseadas em telas sensíveis ao toque, teclado ou mouse, necessidade de permanecer sentado ou posicionado de maneira adequada para a câmera, dentre outros que tornam a experiência não natural e, na maioria das vezes, cansativa. Em geral, a situação tende a piorar quando a interação remota precisa ocorrer em um ambiente externo, onde os equipamentos e a comunicação tendem a ser mais restritas. Os casos de uso descritos a seguir mostram como as Redes 6G poderão viabilizar novas formas de interação e novas experiências para os usuários das futuras redes móveis.

5.1 Comunicação Tátil Imersiva

Uma das principais limitações dos atuais sistemas de comunicações é que esses não englobam a possibilidade de interação física ou a manipulação de objetos. Permitir que as pessoas entrem em contato, literalmente, entre si e com objetos é o próximo passo para viabilizar experiências de comunicação realmente imersivas. O contato tátil é de extrema importância para os seres humanos transmitirem emoções e também para adquirirem maior compreensão sobre objetos que são manipulados, como sensação de textura, peso, forma, movimento, vibração e temperatura. As comunicações hápticas [67, 68, 69, 70] são apontadas como o próximo passo na evolução de sistemas de comunicações móveis, devido ao seu potencial de complementar as experiências de comunicações audiovisuais, assim como pela possibilidade de permitir uma nova forma de interação entre homem e máquinas em ambientes virtuais e a manipulação de objetos à distância. São muitas as aplicações que podem se beneficiar dessa nova forma de comunicação, como e-health, controle de veículos à distância, operação de maquinários em ambientes hostis, manipulação de elementos perigosos (radioativos, químicos e biológicos), realidades aumentada, virtual, mista e estendida.

Como as comunicações hápticas visam complementar as comunicações audiovisuais, tal como ilustra a Figura 10, as informações referentes às características físicas dos objetos e pessoas precisam ser transmitidas de forma coerente com as imagens e sons capturados. Isso impõe uma série de novos desafios, pois os requisitos em termos de vazão, latência e confiabilidade

para as informações referentes às comunicações hápticas diferem dos requisitos normalmente atendidos pelas redes de telecomunicações. A falta de sincronismo e erros nas transmissões das informações hápticas podem resultar em experiências desagradáveis (como enjoo virtual – *cybersickness*) ou erros de manipulação de objetos que podem até mesmo resultar em acidentes. Apesar da comunicação dessas informações requerer baixa latência, a forma como elas são entregues para as pessoas deve se adequar à resposta de percepção humana, o que é um grande desafio e há considerável variação entre os indivíduos. IA e AM podem ser usadas para descrever esses comportamentos individuais e, assim, auxiliar na entrega adequada das informações aos usuários.

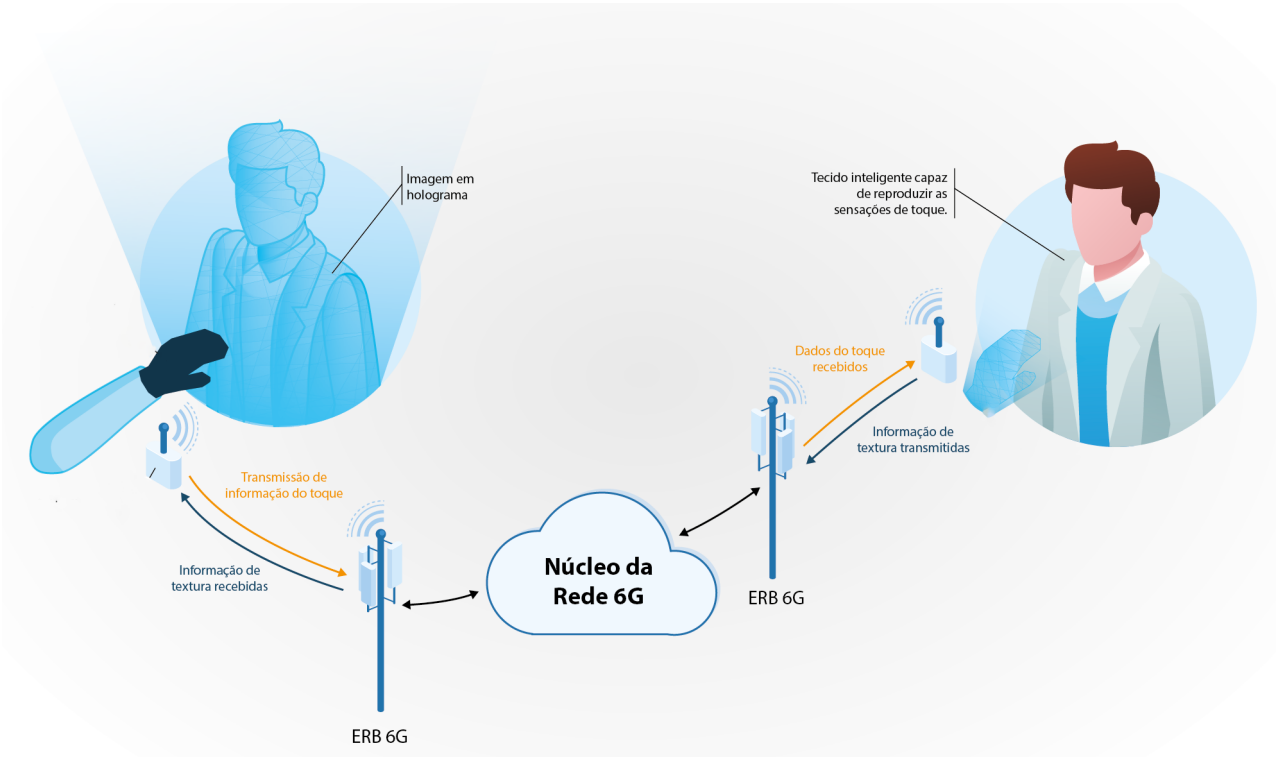

Figura 10: Caso de uso de comunicação tátil imersiva.

Além do desafio de transmitir os dados referentes às comunicações hápticas, esse novo sistema deve lidar com as dificuldades de coletar e reproduzir essas informações, ou seja, com os sensores e atuadores responsáveis por imitar as sensações táteis. Esse conjunto sistêmico formado pelos dispositivos de captura, rede de comunicação e atuadores é uma evolução de IoT, a qual vem sendo denominada de comunicação tátil. Tipicamente, as tecnologias utilizadas para capturar as informações táteis são sensores capacitivos, piezo-resistivos, piezoelétricos e ópticos. Atualmente, as poucas aplicações que empregam o uso de informação táteis são baseadas em sensores pontuais, tipicamente localizados nas pontas dos dedos em luvas, e amostram as variações de pressão com uma taxa de amostragem de 1 kHz. No entanto, as futuras aplicações de comunicação tátil irão demandar a coleta de dados e estímulos de áreas corporais maiores, como toda a palma da mão, pés, dorso e face, com uma elevada resolução espacial. A tendência é que sensores e atuadores sejam integrados em vestimentas e calçados, resultando em uma rede de captura e reprodução de informações táteis ao redor de cada pessoa. Essa densa rede de sensores e atuadores não irão se limitar à coleta de pressão, pois informações como temperatura e umidade também serão capturadas e transmitidas para uma perfeita experiência de toque.

Isso significa que a demanda por vazão será elevada, podendo chegar a centenas de Mbps por usuário. Acomodar a alta vazão de dados, robustez contra erros e a baixa latência é um dos grandes desafios para a implementação da comunicação tátil. Não basta atender a um dos requisitos individualmente. Todos esses três requisitos devem ser suportados simultaneamente pela rede.

A transmissão dessa miscelânea de dados táteis irá demandar uma nova forma de codificação de fonte, uma vez que as técnicas de compressão atualmente utilizadas foram desenvolvidas principalmente para atender os requisitos de comunicações audiovisuais. Assim como foi feito para compressão de sinais de voz na digitalização das comunicações móveis na Segunda Geração (2G) e na compressão de vídeo para os serviços de radiodifusão e *streaming*, um estudo meticuloso sobre a forma de comprimir as informações táteis visando a redução controlada da entropia das fontes sem causar perda de *Quality of Experience* (QoE) será fundamental. Os codificadores táteis, essencialmente diferentes dos codificadores de áudio de vídeo, deverão levar em consideração o sistema de resposta do tato humano a fim de definir quais informações podem ser suprimidas e comprimidas para viabilizar a transmissão eficiente de dados entre a fonte e o destino. Modelos parametrizáveis de objetos e de pessoas podem ser empregados para reduzir a quantidade de dados necessários para replicar as sensações de tato. O princípio é semelhante ao empregado nos *voice encoder*s (vocoders), mas agora aplicado ao sentido do tato, resultando em um *tactile encoder* (tacoder) [71].

E não são apenas os codificadores de dados que devem ser modificados. A própria forma como a rede deve responder às entradas de informações táteis deve ser completamente diferente das comunicações audiovisuais, que constituiu na maior motivação para o desenvolvimento das arquiteturas de redes atuais. A arquitetura das redes atuais não foi concebida para viabilizar um *loop* de controle necessário para as aplicações de comunicação tátil. Considere o cenário no qual a comunicação de um toque deve ser viabilizada. Informações como pressão, temperatura, deslocamento, velocidade e movimento devem ser coletadas do lado da pessoa que está realizando o toque para ser reproduzida no lado da pessoa que está sendo tocada. Ao mesmo tempo, informações de textura, vibração, temperatura, umidade e movimento devem ser coletadas da pessoa tocada e transmitidas para serem reproduzidas para a pessoa que está tocando, com uma latência que seja imperceptível para o ser humano. Essa demanda por um *loop* cinético requer que a rede responda de forma bidirecional, o que não é compatível com os atuais protocolos empregados nas redes de comunicações móveis. As diferentes demandas da comunicação tátil irão impor a utilização de diferentes RATs nas futuras redes móveis, enquanto que o núcleo da rede deve ser capaz de coordenar a entregar as informações hápticas sincronizadas com as informações audiovisuais, viabilizando o *loop* de controle cinético dentro de uma janela de tempo de resposta que seja imperceptível para as pessoas. A camada de rede também deve ser capaz de garantir a QoE mediante à possibilidade de perda e atrasos variáveis (*jitter*) dos pacotes em função de congestionamentos e mudanças de rotas, erros introduzidos pelo canal de comunicação ou mudança de RAT.

Viabilizar as aplicações para a comunicação tátil irá demandar a superação de diversos desafios técnicos. A lista a seguir sintetiza os principais desafios e apresenta algumas considerações sobre os requisitos para suportar aplicações de comunicação tátil.

- **Arquitetura de rede**: prover mecanismos de resposta bidirecional às entradas de informações táteis, com baixa latência fim-a-fim na ordem de 1 ms e um *loop* de controle cinético em tempo real.

- **Múltiplos RATs**: comutação transparente entre diferentes tecnologias de rádio, geren-

ciamento de recursos de forma dinâmica e coexistências com outras aplicações através do uso de estruturas de quadros de camada física e de enlace independentes. Garantia de entrega de pacotes através dos múltiplos RATs dentro do tempo de vida das informações táteis.

- **Latência**: a latência fim-a-fim em comunicações hápticas deve ser da ordem de grandeza de 1 ms, o que significa que a distância máxima entre a origem e o destino será limitada pelo tempo de resposta da rede e pelo tempo de propagação dos sinais. O uso de *Multi-access Edge Computing* (MEC) e modelos táteis parametrizados por tacoders pode minimizar o volume de informações e o tempo de resposta da rede. Inteligência distribuída na borda também pode ser utilizada para prever as ações humanas e alimentar os modelos hápticos para aumentar a eficiência e também controlar os sensores e atuadores para redução da latência e melhoria da QoE.

- **Confiabilidade**: as aplicações de comunicação tátil não permitem retransmissões e são mais susceptíveis a erros do que as aplicações audiovisuais. Isso significa que a confiabilidade da rede deve ser mais elevada, sendo que as estimativas atuais apontam para uma confiabilidade de $1 - 10^{-9}$. Uma forma de atingir esse requisito consiste em empregar múltiplas rotas no núcleo da rede e uso de diversidade na rede acesso.

- **Segurança e Privacidade**: um dos grandes desafios na comunicação tátil consiste em manter a segurança e a privacidade das informações hápticas em enlaces que demandam alta confiabilidade e baixa latência. Usuários devem ser autenticados e suas informações protegidas sem que isso resulte em aumento do tempo de resposta da rede. Técnicas convencionais de segurança e autenticação não poderão ser empregadas e soluções a nível de camada física e de enlace devem ser consideradas.

- **Alocação de Recursos**: a rede deve ser capaz de compartilhar os recursos entre os diferentes serviços de forma inteligente. IA deverá ser empregada para o fatiamento e alocação de recursos, levando-se em consideração a natureza bidirecional das informações hápticas.

- **Métricas de Qualidade**: a qualidade de comunicações hápticas não pode ser avaliada utilizando-se os conceitos tradicionais de QoS e QoE. Esses conceitos devem ser expandidos para incluir a transparência na comunicação háptica. A QoE deve ser medida em função da diferença entre tocar um objeto ou pessoa ao vivo e tocar o mesmo objeto ou pessoa através da rede de comunicação tátil. Outro conceito que precisa ser introduzido é o *Quality of Experience* (QoT), onde é necessário medir a precisão com que uma pessoa consegue realizar uma tarefa, como manipular um objeto, através da comunicação tátil.

A comunicação tátil vai revolucionar a forma como humanos interagem. As comunicações *Human to Human* (H2H) irão assumir um nível de imersão jamais visto antes em comunicação à distância. Mas isso não é tudo. As implicações para as interações *Human to Machine* (H2M) e *Machine to Machine* (M2M) também são imensas. A possibilidade de transmitir sensações como vibração permitirá que pessoas controlando máquinas à distância, num típico cenário de H2M, consigam identificar falhas ou comportamentos não convencionais do sistema sob controle. Já num cenário de M2M, a comunicação tátil pode ser usada para viabilizar controles de segurança avançados em veículos através de controles de estabilidade que levem em consideração as informações de balanceamento, vibração e temperatura de diversas partes móveis em carros,

trens, aviões e navios. O acesso remoto a essas informações será de grande importância nas aplicações de veículos autônomos.

Naturalmente, as condições para a implementação das comunicações hápticas devem melhorar já quando as redes redes 5G estiverem amplamente disponíveis, pois tecnologias como ondas milimétricas, que podem oferecer até dezenas de Gbps para um usuário, irão permitir a introdução das formas mais simples de interação tátil. Computação de borda, com sua integração com a infraestrutura da rede, conforme proposto na abordagem MEC, também deve contribuir para a evolução das interações remotas, trazendo novas funcionalidades como capacidade computacional para próximo dos dispositivos, informações de contexto e uma integração mais adequada dos serviços à infraestrutura de computação e comunicação. Esse cenário tende a motivar a adoção de tecnologias que vão melhorar as interações remotas, motivando a adoção de realidade estendida (por exemplo, virtual, aumentada e mista), além de permitir o uso de gestos, fala e até pensamentos. No entanto, essa evolução vai expor também as limitações das redes 5G nesse contexto, como por exemplo, o foco limitado em comunicação com pouco ou nenhum suporte nativo da rede para sensoriamento. Embora redes 5G sejam projetadas para atender a realidade estendida, uma eventual adoção maciça de aplicações para comunicação tátil através de um sistema capaz de atender alta vazão com o eMBB, baixa latência e confiabilidade com o URLLC ou quantidade massiva de conexões com o mMTC não será suficiente para uma boa QoE e QoT. Para suportar as comunicações hápticas, a rede móvel não pode atender um requisito ou outro. A rede deve atender a todos os requisitos simultaneamente para que a comunicação tátil seja viável. Redes 5G também não oferecem um suporte amplo a IA e AM, mas apenas os recursos básicos para sua implementação. O uso intenso de IA e AM nas bordas da rede será fundamental para que a comunicação tátil possa desenvolver todo o seu potencial.

Desta forma, a completa implantação da comunicação tátil depende do advento de uma nova rede de comunicações móveis que possa integrar funcionalidades para a captura, transmissão e reprodução de informações hápticas com elevada QoE e QoT, onde o aumento de capacidade de transmissão com atendimento simultâneo de baixa latência e robustez, e uso de IA/AM distribuída na rede para processamento dos sinais e geração de modelos serão algumas das características fundamentais para permitir a próxima revolução nas comunicações pessoais.

5.2 Eventos Imersivos

O termo *Extended Reality* (XR) é usado para denotar diversas tecnologias imersivas que fazem a ponte entre o mundo real e o simulado digitalmente, incluindo tecnologias como *Augmented Reality* (AR), *Virtual Reality* (VR) e *Mixed Reality* (MR) [72]. Tipicamente, tecnologias de VR permitem a imersão completa do usuário em um ambiente virtual. AR, por sua vez, mistura elementos do mundo real com conteúdo digital interativo provido geralmente por dispositivos móveis ou *wearables* (dispositivos de vestuário inteligentes). O termo MR é usado para denotar uma versão avançada de aplicações de AR, onde dispositivos do tipo *Head-Mount-Device* (HMD) fornecem imagens em tempo real dos arredores do usuário, tornando sua experiência mais realista.

Tecnologias de XR formam a base para uma indústria global de mídias imersivas em franco crescimento, as quais podem ser aplicadas em diferentes segmentos da sociedade, incluindo entretenimento, telemedicina, educação, cultura e projetos de produtos. Com o início da implantação das redes 5G, o consumo desse tipo de mídia tende a crescer. Estimativas mostram que o mercado de tecnologias voltadas para XR atingiu o valor de US$ 18,6 bilhões em 2019

e um aumento de 48,3% é esperado durante o período compreendido entre 2020 e 2030 [73]. No entanto, o mercado de mídias voltadas para XR está apenas no seu estágio inicial. A pandemia de COVID-19 demonstrou a necessidade de formas de telepresença e interações remotas mais convincentes e naturais, não apenas para o indivíduo, mas também para todos os tipos de organizações. Neste contexto, serviços de XR devem evoluir para aplicações completamente imersivas e multissensoriais, onde comunicações hápticas e mídias holográficas serão essenciais [74].

Dentre as possíveis aplicações de XR, a exibição holográfica, que é uma técnica de reconstrução tridimensional de objetos, vem ganhando destaque. Contudo, diferentemente da exibição de um conteúdo 3D, onde a imagem é sempre a mesma, independentemente da posição do observador, a holografia usa paralaxe, ou seja, o observador pode interagir com a imagem, a qual muda dependendo da posição do visualizador. O termo *Holographic-Type Communications* (HTC) é usado para a transmissão de mídias holográficas através de uma rede, que envolve a captura, renderização e transmissão, recepção e reprodução em holograma de um objeto alvo. Para atingir esse objetivo, primeiramente, câmeras capturam o objeto alvo a partir de diferentes ângulos. Em seguida, as imagens são combinadas e renderizadas em um holograma, o qual é então codificado e enviado pela rede. Do lado do receptor, um cliente recebe o fluxo holográfico, o decodifica e o renderiza para um exibidor holográfico [75].

Para que HTC se torne uma realidade, as redes móveis de próxima geração deverão superar vários desafios [76], como os apresentados a seguir.

- **Largura de banda muito alta**: a transmissão de hologramas com alta qualidade exige altas taxas de transmissão. Isso ocorre porque a representação de objetos holográficos envolvem não apenas profundidade de cor, resolução e taxa de quadros por segundo (como a representação de video), mas também dados volumétricos de várias perspectivas dos objetos para considerar mudanças na inclinação, ângulo e posição do observador em relação aos hologramas (os chamados "Seis Graus de Liberdade"[77]). A transmissão de objetos holográficos demanda taxas entre 100 Gbps e 1 Tbps.

- **Latência ultra baixa**: latências abaixo de 1 ms são essenciais para evitar que uma experiência completamente imersiva provoque enjoo virtual, especialmente quando HMDs são utilizados. Além disso, esse requisito é necessário para garantir a interatividade do usuário com os objetos holográficos quando emprega-se a comunicação háptica.

- **Sincronização de vários fluxos**: a transmissão de dados volumétricos e matrizes de imagens impõe requisitos de sincronização adicionais para garantir transições de visualização suaves para o usuário. Além disso, quando a transmissão de dados envolve múltiplas fontes (video, áudio, tato), os vários fluxos devem ser sincronizados dentro de intervalos estritos.

- **Habilidade de prever movimentos do usuário**: o uso de técnicas de IA/AM para prever movimentos do usuário é essencial para ajustar os dados, ângulos e qualidade da representação holográfica do objeto que será transmitida. A antecipação dos movimentos do usuário pode ser usada para reduzir a demanda por taxa de transmissão e possibilitar o uso massivo de tecnologias holográficas de alta qualidade.

- **Computação na borda**: HTC exige a renderização e codificação/decodificação de um grande volume de dados. Para economizar energia nos dispositivos do usuário, essas atividades podem ser delegadas para a rede, especialmente para a infraestrutura MEC.

Por estar perto do usuário, a infraestrutura MEC pode executar essas atividades sem comprometer o requisito de baixa latência.

De fato, a tecnologia de XR aliada às mídias holográficas e às comunicações hápticas levarão as aplicações de telepresença para outro nível de realismo, permitindo, por exemplo, que participantes remotos sejam projetados como presenças holográficas em uma sala de reuniões, onde os mesmos poderão também ter experiências sensoriais envolvendo o tato. O setor de entretenimento e esportes será outro grande provedor de conteúdo baseado em XR completamente imersivas e multissensoriais. Numa transmissão de um evento esportivo, por exemplo, será possível capturar, em tempo real, movimentos da competição através de diversos ângulos, inclusive imagens capturadas por câmeras 3D. Espectadores poderão interagir em tempo real com um espaço holográfico da partida. Assim, os usuários poderão escolher entre interagir com as imagens clássicas, 3D ou holográficas, dependendo do cenário. Experiências completamente imersivas, multissensoriais e interativas, como as citadas acima, dependem do advento de uma nova rede de comunicações móveis, que possa integrar funcionalidades de tecnologias de XR, comunicações hápticas e HTC.

5.3 Telemedicina Imersiva

O acesso a um sistema de saúde de qualidade é um direito básico de todos os seres humanos, em qualquer lugar. Até hoje, isso é uma utopia e a disponibilidade de serviços de saúde avançados está presente primordialmente em centros urbanos. Isso faz com que pacientes que vivem em cidades menores ou em áreas mais remotas tenham que se deslocar para receberem tratamentos mais complexos, o que nem sempre é viável.

O IMT-2020 previu o cenário de telemedicina como um caso de relevância para Redes 5G [78]. No entanto, as restrições impostas pela segmentação dos modos de operação do 5G em eMBB, URLLC e mMTC inviabilizou a telemedicina, pois esse sistema requer mais do que o atendimento de um requisito chave em cada momento. Para se obter os benefícios da telemedicina imersiva [79], a rede de comunicação móvel deve ser capaz de atender múltiplos requisitos chaves ao mesmo tempo. Por exemplo, para que o cirurgião possa realizar um procedimento à distância, é essencial que ele tenha acesso às informações táteis do paciente, ou seja, o cirurgião precisa receber as sensações de toque. Isso torna a comunicação háptica essencial para este cenário. Além disso, o cirurgião precisa ter plena capacidade de avaliar profundidade, o que demanda visão 3D de alta qualidade. Por fim, o médico precisa ter acesso a todos os sinais biológicos em tempo real para avaliar as consequências de suas ações tão logo elas sejam realizadas. Todas essas demandas deixam claro que as Redes 5G, embora deem um passo positivo na direção de viabilizar aplicações de telemedicina, ainda não são capazes de atender a este caso de uso desafiador. Apenas com o advento das Redes 6G é que a infraestrutura de telecomunicações estará apta para suportar aplicações voltadas para telemedicina imersiva [80].

Os diversos avanços nos sensores biológicos e nos dispositivos definidos como *wearables* serão capazes de medir vários sinais vitais em tempo real, viabilizando um acompanhamento do estado de saúde das pessoas de forma contínua. A medição e transmissão de informações referentes a níveis de colesterol, glicose, hormônios e substâncias ligadas ao estresse, além de outros componentes químicos e agentes patológicos, permitirá que tanto os pacientes quanto os centros de saúde sejam alertados precocemente sobre eventuais problemas de saúde. Em um primeiro momento, esse monitoramento permitirá que o paciente tenha tempo suficiente para se deslocar até uma unidade de tratamento adequada para lidar uma doença potencialmente

grave, diminuindo a ocorrência de emergências e de mortes causadas por falta de tempo para o atendimento. Além disso, essa rede de sensores implantados terá um papel fundamental na localização de ponto zero de epidemias, permitindo que as autoridades tomem as medidas necessárias para evitar a proliferação da doença.

Viabilizar essas aplicações irá demandar uma completa reformulação das redes móveis. Os pontos a seguir representam os principais desafios.

- **Arquitetura de rede**: conforme visto anteriormente, a transmissão de dados táteis requer uma mudança da arquitetura de rede para a transmissão bi-direcional de informação. Neste caso, ao mesmo tempo que o cirurgião envia informações de como os instrumentos devem se mover, ele deve receber informações de textura, resistência, etc. durante a realização de um procedimento cirúrgico.

- **Multitude de conexões**: o volume de conexões de sensores biológicos implantados será muito elevado, com diversos sensores por pessoa. Dispositivos extracorpóreos, como um relógio inteligente ou um *smartphone*, poderão ser usados para centralizar as informações, atuando como *gateways* para coleta de dados biológicos de uma pessoa. Isso significa que a telemedicina imersiva é um exemplo onde a Rede 6G poderá ser vistas como uma rede de redes.

- **Latência e alta vazão**: o atendimento da baixa latência e da alta vazão para cirurgias remotas será um dos grandes desafios para este cenário. O uso de múltiplos RATs coordenados será essencial para prover imagens 3D e informações hápticas ao mesmo tempo.

- **Confiabilidade**: este é outro requisito crítico que deve ser atendido em conjunto com alta vazão e baixa latência para o caso de cirurgia remotas. Como não será possível contar com retransmissões através de esquemas do tipo Automatic Repeat Request (ARQ), a camada física deverá prover elevada robustez e alta confiabilidade para os enlaces de comunicação empregados neste cenário.

- **Segurança**: os dados biológicos de uma pessoa consistem no nível mais íntimo e individual das informações privadas. O acesso de dados biológicos de uma pessoa enquanto a mesma é submetida a uma experiência permite a criação de um perfil que pode ser utilizado para um nível jamais visto de manipulação. É fundamental impedir que esses dados sejam utilizados de forma inadequada, por exemplo, para *marketing*, ou de forma ilegal, como para crimes de falsidade ideológica ou extorsão. Em Redes 6G, a proteção desses dados pessoais deve ser realizada desde a camada física.

5.4 Robôs móveis cooperativos e interativos

Com os recentes avanços tecnológicos, a utilização de robôs como parceiros cooperativos, têm se tornado cada vez mais comum em atividades do dia a dia. Esta parceria, que até bem pouco tempo tinha seu escopo de utilização voltado para as grandes indústrias, agora passa a fazer parte da vida das pessoas, através da utilização de pequenos robôs auxiliares em atividades domésticas, ou como agentes inteligentes que auxiliam no controle e automação de atividades do dia a dia. O cenário projetado para os próximos anos, ilustrado na Figura 11, é o de crescimento considerável da presença destes dispositivos, tanto na indústria quanto na vida das pessoas. Em um ambiente contendo múltiplos robôs, estas máquinas vão precisar identificar

umas às outras, vão precisar se conectar para realizar um intercâmbio de intenções e negociar ações por meio de um processo de comunicação automatizado e seguro. Neste sentido, o sistema 6G terá a responsabilidade e a capacidade de fornecer a infraestrutura técnica para ir além do puro comando e controle de robôs individuais. Os requisitos estão associados à necessidade de prover mecanismos através dos quais estes robôs possam formar relações simbióticas entre si com o objetivo de cumprir tarefas complexas com eficiência ou, ainda, atender melhor às necessidades e demandas dos seres humanos em atividades diárias.

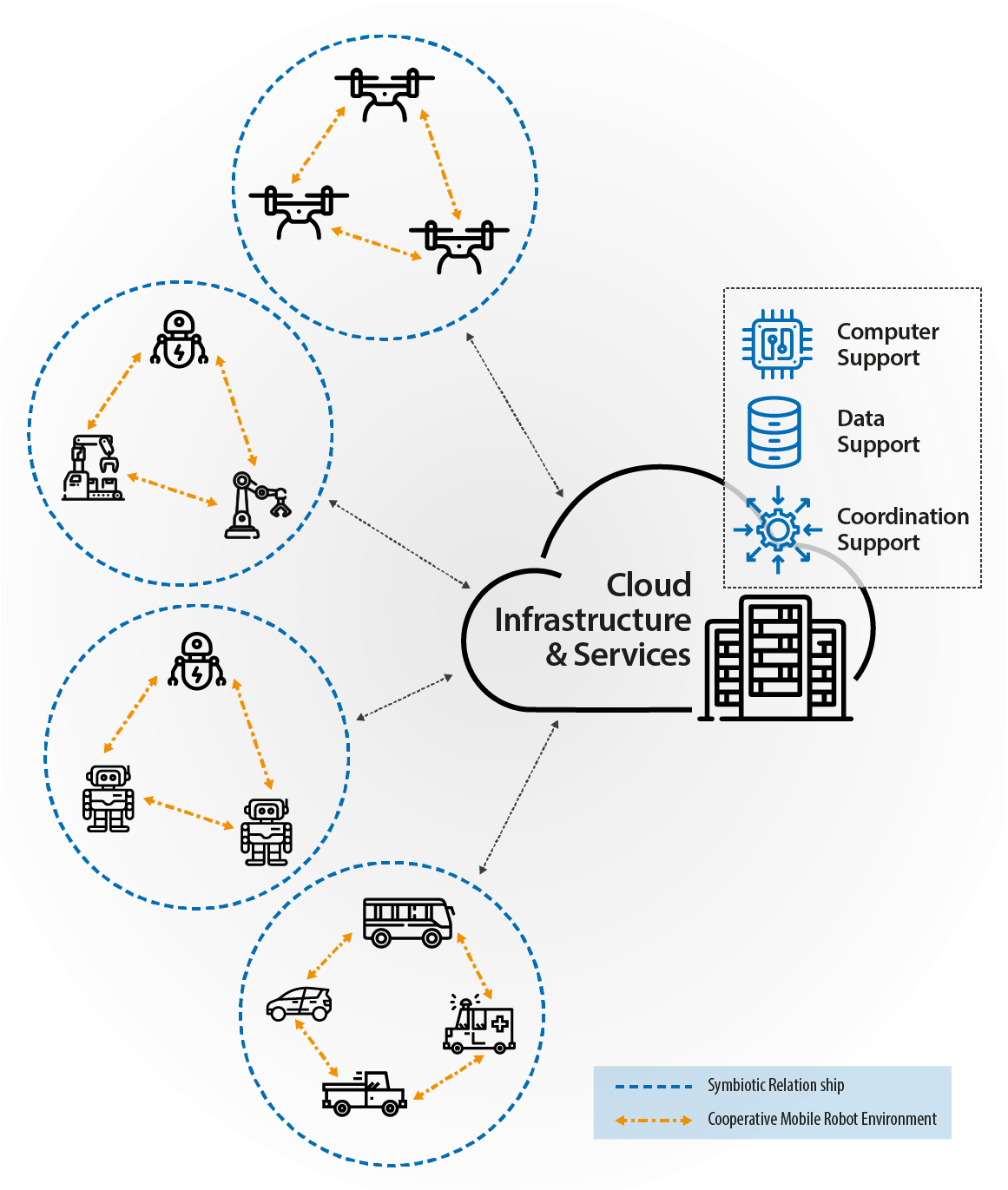

Figura 11: Caso de uso robôs móveis cooperativos e interativos.

A viabilização deste cenário está diretamente ligada a aspectos associados à confiabilidade

e à inclusão digital. Estes são valores fundamentais no processo de iteração homem-máquina e máquina-máquina. Quando estes elementos colaboram e formam relações simbióticas, algumas atividades complexas podem ser executadas de uma maneira sustentável, ou seja, inverte-se a lógica da necessidade de existência de máquinas cada vez mais sofisticadas, e consequentemente, que venham a consumir mais recursos para a execução de uma atividade complexa, e passa a explorar a capacidade de utilização inteligente e flexível das capacidades de máquinas já disponíveis em benefício da sociedade.

Essa perspectiva de relações simbióticas e colaboração homem-máquina e máquina-máquina, abre novas possibilidades em diversos áreas, como discutidos a seguir:

- **Modelos de negócio para verticais:** considerando-se os atuais modelos de negócio explorados por verticais [52], a perspectiva de colaboração e relações simbióticas torna possível explorar a flexibilidade no processo de produção e exploração de recursos, aliados à ideia de inteligência conectada. As máquinas passam a ter a possibilidade de realizar tarefas cada vez mais individualizadas em um cenário sob demanda. Isso possibilitaria por exemplo, a exploração de novos métodos de produção por parte da indústria, tais como produção em lote e manufatura aditiva [81].

- **VANTs colaborativos:** VANTs vem sendo cada vez mais utilizados em diferentes áreas, desempenhando as mais diversas atividades. Aspectos como o baixo custo de fabricação, trajetórias de voo com alta precisão e as recentes melhorias no que diz respeito à crescente capacidade de carga útil e eficiência energética tem feito destes dispositivos uma ferramenta para uso em potencial em aplicações civis e militares, especialmente em operações de busca e salvamento [82]. Estas operações podem ocorrer em áreas remotas, diante de uma a catástrofe natural. Nestas situações, dar início aos procedimentos de busca em um curto espaço de tempo pode significar salvar um maior número de vidas. Dadas as características flexíveis dos VANTs, pode-se considerar a utilização dos mesmos atuando como parceiros colaborativos nas operações do tipo busca e salvamento. VANTs podem trabalhar de forma colaborativa através de relações simbióticas do tipo homem-máquina e máquina-máquina, reduzindo de forma considerável à necessidade de intervenção humana.

- **Robôs pessoais:** robôs domésticos já começam a se fazerem presente na vida de parte da população. Aspiradores de pó automatizados e robôs cortadores de grama são exemplos de assistentes pessoais robóticos que já automatizam algumas residências. A expectativa é de que, ao longo dos próximos anos, será presenciado um aumento considerável no número destes dispositivos, impactando os requisitos associados à capacidade das redes domésticas, exigindo uma conectividade contínua entre a infraestrutura local e redes externas. Com o aumento do número de robôs, esses dispositivos podem assumir a forma de enxame, trabalhando de forma colaborativa/simbiótica na execução de atividades complexas. As Redes 6G são apontadas como sendo o elemento habilitador para este cenário. Os robôs pessoais podem, por exemplo, estarem equipados com câmeras de vídeo transmitindo para um servidor local, com objetivo de processamento em tempo real ou podem estar equipados com recursos avançados de detecção e posicionamento para interações intuitivas e contínuas entre humanos, outras máquinas e o próprio ambiente. Os recursos de IA providos pelas Redes 6G, vão servir de base para que os robôs pessoais possam estabelecer relações de cooperação e colaboração, com o objetivo de prestar assistência aos seres humanos, cientes da situação.

A expectativa do aumento considerável no número de robôs nas indústrias e nas residências, e as relações simbióticas e de colaboração homem-máquina e máquina-máquina demandadas por estes dispositivos, estende as funcionalidades existentes nas Redes 5G em direção a cenários mais desafiadores. Para que estas relações simbióticas ocorram de forma satisfatória e coerente, torna-se fundamental atender a requisitos relacionados ao posicionamento dos robôs e a detecção e mapeamento do ambiente onde estes robôs venham a atuar. Neste sentido, a utilização de elementos de IA, de forma distribuída e sob demanda, torna-se fundamental. As demandas associadas à latência e à confiabilidade de conexão são diretamente proporcionais ao nível de criticidade e importância da atividade que está sendo executada por estes robôs em uma operação simbiótica. Por exemplo, veículos autônomos em uma rodovia necessitam de um padrão de comunicação de altíssima confiabilidade e baixa latência para evitar colisões com os demais veículos. Por outro lado, relações entre robôs pessoais, como por exemplo um aspirador de pó executando uma atividade doméstica de forma autônoma e colaborativa ou um cortador de grama, podem apresentar um maior nível de tolerância à latência e confiabilidade do processo de comunicação.

Os cenários citados anteriormente são desafiadores, em especial, se considerar o aumento exponencial na quantidade de dispositivos conectados, demandando um alto compartilhamento da rede local. Tarefas de coordenação, que antes eram executadas de forma centralizada, passam a ficar cada vez mais sob a responsabilidade das próprias entidades de borda. Isso fica claro no *Release* 17 do 3GPP, em especial quando da especificação acerca das *Time Sensitive Communication*s (TSNs) [83], que vão permitir a comunicação determinística e de baixa latência nas fábricas do futuro.

6 Zonas Seguras Invisíveis

Antonio Carlos de Oliveira Júnior, Cristiano Bonato Both, Ciro José Almeida Macedo
antoniojr@ufg.br, cbboth@unisinos.br, ciro.macedo@ifg.edu.br

A segurança de locais públicos e privados é uma das grandes preocupações da sociedade moderna. Atentados terroristas, assaltos, sequestros e outros crimes sempre pressionam para o aumento da segurança. A forma atual de endereçar esse problema consiste em esquemas de seguranças invasivos e estressantes, que elevam o nível de estresse e reduzem a satisfação de utilização de certos serviços. Dois casos clássicos são o acesso à agências bancárias e o controle de segurança em aeroportos. É necessário que os sistemas de segurança evoluam para aumentar a sua eficácia ao mesmo tempo em que se tornam transparentes para os usuários, de forma que a identificação das pessoas e a análise de segurança seja feita de forma ubíqua e invisível. Esse novo esquema de segurança, denominado de Zonas Seguras Invisíveis, irá demandar todos os novos recursos das Redes 6G como sensoriamento, imagem, localização e comunicação.

Esta seção apresenta os requisitos das aplicações de zonas seguras invisíveis para as futuras redes 6G. Inicialmente, os requisitos de segurança em espaços públicos são discutidos e exemplificados. A seguir, é abordado o controle de acesso de multidões transparentes, discutindo a aplicação de IA. Por fim, são discutidos os desafios e oportunidades em cenários de missão crítica, onde redes sem infraestrutura e redes embarcadas se tornam relevantes.

6.1 Segurança em espaços públicos

Depois da desigualdade social, que acarreta vários outros problemas, um dos grandes e graves problemas do Brasil é a segurança pública. De acordo com o Fórum Brasileiro de Segurança Pública [84] em 19 de outubro de 2020

> "o Brasil perdeu-se em múltiplas narrativas políticas em disputa e a população, mais uma vez, está tendo que lidar com os efeitos deletérios e perversos de um modelo de segurança pública obsoleto e que até hoje não foi palco de grandes reformas, mesmo após a Constituição de 1988."

O Anuário Brasileiro de Segurança Pública [85] baseia-se em informações fornecidas pelas secretarias de segurança pública estaduais, pelo Tesouro Nacional, pelas polícias civil, militar e federal, dentre outras fontes oficiais da segurança pública. A publicação, que é anual, apresenta um amplo panorama de segurança no Brasil com diversos números e indicadores para consulta. Diversos serviços de segurança baseados no uso da IA, que serão habilitadas com as Redes 6G, devem contribuir muito com esta nova área. O "Arrastão" é um exemplo bastante inusitado e típico de algumas cidades brasileiras e que poderia ser impedido com o uso desta tecnologia. Esse evento criminoso, realizado por um grupo de indivíduos, consiste em realizar o assalto em série de diversas pessoas em um ambiente público. Conforme ilustrado na Figura 12, o uso de zonas de seguranças invisíveis pode prevenir e evitar este tipo de crime antes mesmo do mesmo começar, pois há certos comportamentos que podem ser identificados para ter uma reação rápida das forças de segurança. As estatísticas de órgão de segurança indicam que há localidades onde o número de ocorrências criminosas é mais elevado. Essa informação pode ser empregada para definir uma tática de vigilância mais intensa, com o uso de IA para o reconhecimento de ações suspeitas e de indivíduos com padrões de comportamento típicas de meliantes. Técnicas semelhantes podem ser utilizadas para prevenir o roubo de cargas nos sistemas de transporte,

assalto a carros fortes e à bancos. O sistema de zonas seguras invisíveis poderá detectar e prevenir estas ações criminosas e ao mesmo identificar os meliantes de forma rápida e em tempo real, o que será uma grande contribuição das Redes 6G para a sociedade.

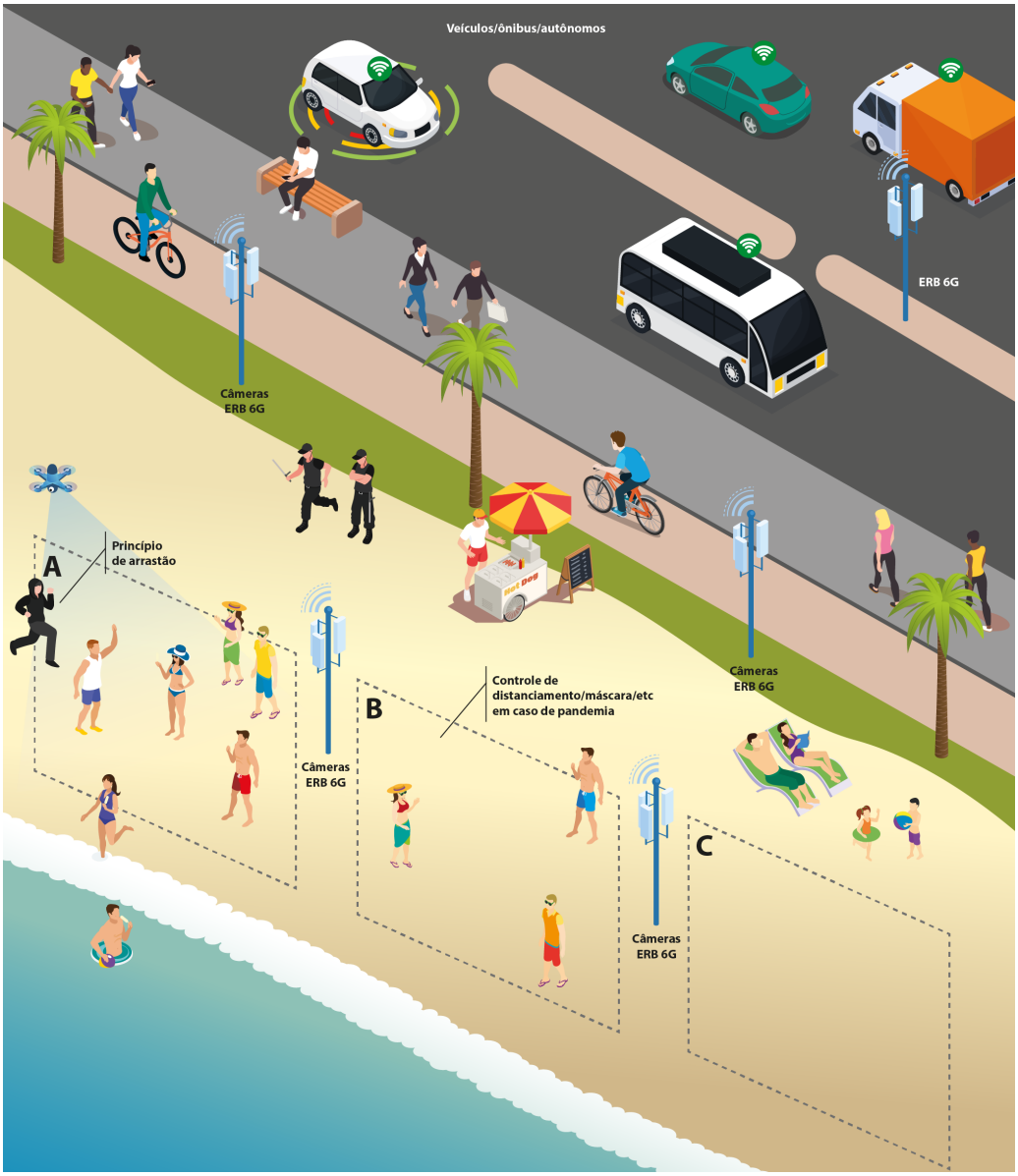

Figura 12: Segurança em espaços públicos para prevenir, por exemplo, "Arrastão" em praia e vigilância massiva para controle de epidemias.

As zonas de segurança invisíveis também poderão revolucionar o acesso a lugares públicos, como em estádios, estações de metrô, rodoviárias, aeroportos, entre outros. Através deste sistema, as pessoas poderão simplesmente se dirigir até os seus lugares sem ter que passar por uma catraca ou validar um bilhete. Tudo isso pode ser feito de forma transparente e invisível, sem intervenção invasiva de um ser humano ou o uso de controles ostensivos de pontos de segurança.

O uso deste inovador sistema de segurança irá demandar IA e AM distribuído em diversas camadas da arquitetura da rede, transferência de grandes volumes de informações, baixa latência, alta confiabilidade e capacidade de conexão que irão ultrapassar os limites das atuais redes

de comunicação. Será necessário prover mais capacidade, maior vazão e melhorias na eficiência, confiabilidade e segurança da informação. O campo da segurança de saúde também irá se beneficiar com as zonas seguras invisíveis. Considerando a pandemia de COVID-19, os autores em [86] propõem o uso da Rede 6G que utiliza a funcionalidade de baixa latência e alta vazão para detectar pessoas contaminadas através do uso de imagens. Esse sistema também pode ser empregado para realizar a vigilância em massa para monitorar o distanciamento social, uso de máscara e medição de temperatura corporal. Essas medidas poderão garantir a segurança de saúde pública mediantes as futuras ameças.

6.2 Controle Transparente de Multidões

As redes celulares incorporam cada vez mais suporte para serviços baseados em IA. Por exemplo, em Redes 6G será possível empregar IA, juntamente com dados de posicionamento, reconhecimento de imagem e sensoriamento para realizar o controle de acesso de multidões de forma completamente transparente. Além disso, considerando uma situação de pandemia, os operadores de rede podem usar soluções de detecção de anomalias para identificar aglomerações, reduzir filas em grandes eventos e apoiar ações governamentais para reduzir a propagação de doenças como ilustrado na Figura 13 um exemplo em aeroporto.

Figura 13: Controle transparente no acesso e no ambiente de um aeroporto.

Um dos grande desafios para as operadoras consiste em atender a demanda temporária causada por multidões. Falhas de rede e interrupções de serviços podem ser evitadas pela detecção oportuna de anomalias e ações responsivas da rede de forma transparente e eficiente. Por exemplo, VANTs estão sendo propostos para fornecimento de serviço móvel para lidar com pontos críticos de demanda em ambientes urbanos. Para detecção de anomalias, soluções baseadas em IA e AM e modelos estatísticos baseados em entropia devem ser incorporados às

Redes 6G. Atualmente, maioria das soluções são baseadas em modelos inferidos para prever a ocorrência de anomalias com base em procedimentos de treinamento e análise estatística de dados simulados ou traços de dados reais. No entanto, as redes móveis são sistemas complexos, tornando difícil o desenvolvimento de modelos preditivos eficazes, devido a vários fatores de influência incontroláveis, como mobilidade e comportamento do usuário e qualidade do canal.

AM tem sido usada para detectar comportamento anormal em redes móveis, contando com dados de registro de detalhes de chamadas dos usuários registrados pela operadora de rede para fins de faturamento. No entanto, a aplicação prática de soluções baseadas em IA é desafiadora, uma vez que geralmente assume-se que diferentes áreas observam padrões de tráfego semelhantes e que os dados rotulados estão sempre disponíveis para treinar o modelo. Infelizmente, essas suposições não são válidas em cenários de rede reais: os padrões de tráfego de regiões distintas variam significativamente e os dados geralmente não são rotulados. Além disso, as soluções baseadas em IA classificam as anomalias de forma binária, sem considerar que tais anomalias variam em grau. Considerando a perspectiva de das Redes 6G, gerentes e operadoras de rede devem empregar solução em tempo real para melhorar sua compreensão da demanda do usuário e aprimorar o desempenho de sua rede, por exemplo, reconfigurando sua rede para evitar a interrupção de serviços ou rastreamento de ataques cibernéticos potenciais (de acordo com as anomalias detectadas).

6.3 Redes sem infraestrutura e redes embarcadas

As operações de busca e salvamento são consideradas do tipo missão-critica pois, em geral, tem como objetivo principal localizar e resgatar pessoas diante de uma situação de desastre [82]. Esse tipo de operação pode ocorrer em diferentes lugares, tais como, em cavernas, na água, em montanhas, em zonas de guerra, entre outros. Tradicionalmente, operações de busca e salvamento têm alto custo e demandam tempo considerável para sua execução, especialmente em se tratando de áreas remotas. Nessas situações, VANTs podem ser inseridos no contexto das operações de busca e salvamento, com o objetivo de auxiliar as equipes envolvidas. Essa abordagem pode reduzir de forma considerável a necessidade de intervenção humana em alguns atividades. VANTs podem atuar de maneira colaborativa através de relações simbióticas, realizando o intercâmbio de dados em tempo real e reportando informações acerca da área de busca para as equipes envolvidas. Conforme ilustrado na Figura 14, VANTs podem contribuir de diferentes formas no contexto de uma operação de busca e salvamento. Eles podem executar uma atividade com o objetivo de detectar sobreviventes em potencial através de uma aplicação de visão computacional, ou ainda, escanear diferentes bandas do espectro eletromagnético com o objetivo de detectar sinalizações emitidas por algum tipo de dispositivo ou atuar no sentido de identificar ondas sonoras.

Uma outra possibilidade a ser explorada é a de se utilizar VANTs para que se possa estabelecer uma infraestrutura de comunicação temporária para uma determinada área. Em situações de desastre, ocorridas a partir de catástrofes naturais, a infraestrutura de comunicação terrestre pode sofrer danos, de modo a ficar parcialmente ou totalmente inoperante. Neste sentido, os VANTs podem atuar como ERBs através de redes embarcadas, com o objetivo de prover conectividade para as pessoas em situação de perigo ou para equipamentos e sensores utilizados pelas equipes de busca.

A viabilidade de utilização de VANTs como parte da infraestrutura de comunicação está diretamente relacionada à superação de alguns desafios técnicos. As atuais infraestruturas das redes de comunicações regulares não suportam as demandas altamente dinâmicas de operações

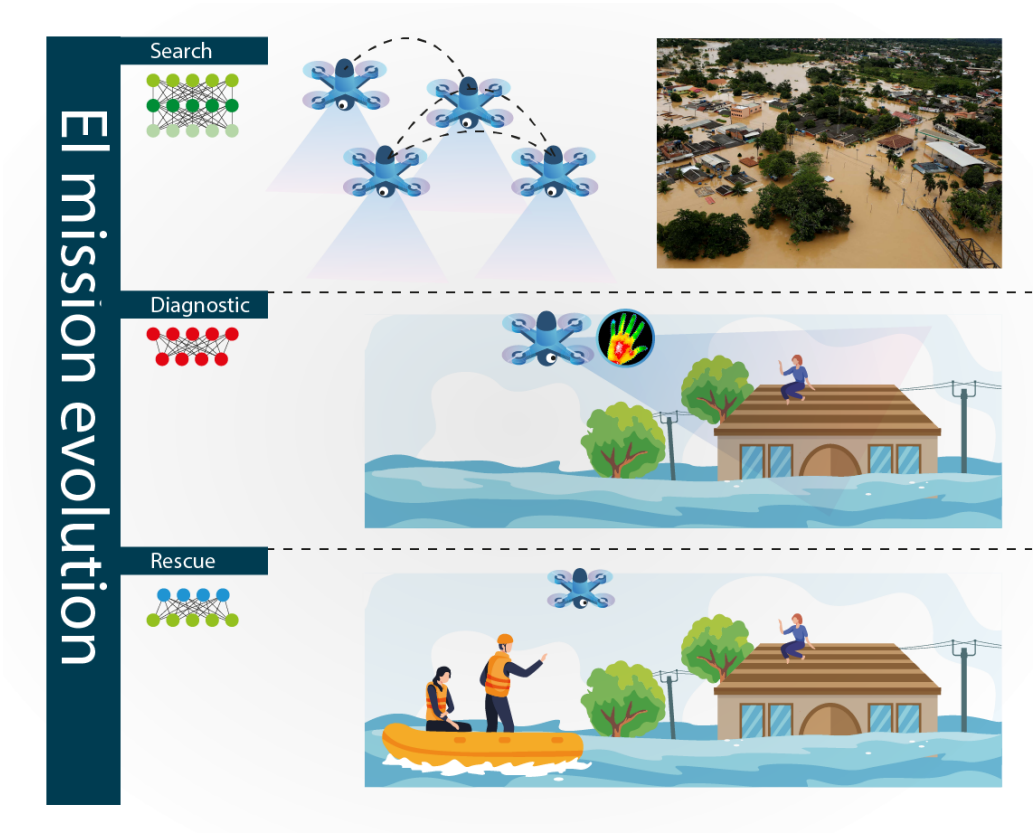

Figura 14: Estágios de uma operação de busca e salvamento assistidas por VANTs.

de busca e salvamento. Neste sentido, a flexibilidade e interoperabilidade dos componentes da rede estão sob intensa investigação e a Rede 6G pode atuar como elemento habilitador, especialmente em se tratando da necessidade de utilização de elementos de IA no contexto de operações de busca e salvamento assistidas por VANTs. Elementos de IA podem, por exemplo, ser incorporados ao fatiamento de recursos da rede [87] e, consequentemente, serem avaliados em um cenário de orquestração de dispositivos IoT [88].

Diversas frentes de investigação têm explorado as possibilidades da utilização de IA no contexto de redes virtualizadas [89]. Esses autores identificam como principais obstáculos, a ausência de conjuntos de dados para serem utilizados como fonte de treinamento para os modelos de IA e a falta de pesquisas experimentais no campo das telecomunicações. Destacam-se também algumas iniciativas de padronização de IA [90, 91] voltadas para redes de comunicação, considerando a interação entre as *Virtualized Network Functions* (VNFs) e a enorme diversidade de possíveis cenários, envolvendo as operações de busca e salvamento. Neste sentido, a flexibilidade extra fornecida pelas Redes 6G e pelos VANTs, combinados com a adoção de componentes de IA devidamente padronizados, poderia conceder os níveis de liberdade extra, que são necessários para se executar operações de busca e salvamento de forma eficiente, algo pouco explorado na literatura. Essa iniciativa poderia beneficiar as tarefas de visão computacional que constituem um conjunto de aplicações promissoras aplicadas às operações de busca e salvamento. Os recentes avanços incluíram a adoção de modelos de *Deep Neural Network* (DNN) no campo da visão computacional. Esses modelos são computacionalmente caros e demandam altas taxas de transferência de dados entre os elementos de borda e o núcleo da rede [92]. Isso se torna ainda mais desafiador em operações de busca e salvamento diante de catástrofes naturais,

onde a infraestrutura da rede pode ter sido afetada, comprometendo a comunicação contínua entre as equipes de busca. As condições da rede podem ser extremamente dinâmicas, bem como os requisitos da própria aplicação de IA, sujeita a modificações constantes nos objetivos da missão ao longo do tempo.

Para atender ao cenário descrito anteriormente, e conseguir prover cobertura através de uma infraestrutura embarcada em VANTs, as VNFs podem ser distribuídas entre os dispositivos. Podemos considerar também a distribuição da execução de algoritmos chave, entre os VANTs que compõem os elementos de borda e o núcleo da rede. O objetivo dessa divisão é o de compensar as demandas por processamento e de comunicação. Se considerarmos esse nível de granularidade em elementos de IA no âmbito das telecomunicações, podemos atingir novos patamares de melhorias no que diz respeito à otimização de recursos, tais como, redução no consumo de energia, redução da latência e melhorias em diversos aspectos associados à autonomia dos VANTs.

7 Comunicação espacial

Fco. Rodrigo Porto Cavalcanti
rodrigo@gtel.ufc.br

A comunicação de sondas e naves espaciais é tradicionalmente feita com soluções sob medida construídas de forma independente pelas agências espaciais responsáveis por cada missão[1]. Esta abordagem tem sido suficiente na medida que poucos países detinham tecnologia para o envio de pessoas e artefatos ao espaço, notadamente Estados Unidos (através da NASA) e Rússia. No que tange às telecomunicações, o que se tem até o momento são, portanto, transmissões dedicadas ponto-a-ponto diretamente dirigidas para a Terra ou utilizando algum tipo de estação repetidora.

Mais recentemente, porém, observa-se a disseminação do acesso ao espaço por diferentes países tais como China, Japão, Índia, União Europeia, dentre outros. O Brasil, através da Agência Espacial Brasileira e da Base de Lançamento de Alcântara, mantém pretensões de participar da cadeia global de exploração espacial [93]. Neste sentido, os subsistemas de telecomunicações componentes das missões espaciais são uma oportunidade interessante de engajamento tecnológico do Brasil nesse setor. Outra mudança estrutural no acesso e uso de recursos espaciais é a abertura para a atividade comercial privada. Estes fatos, em seu conjunto, sugerem que a abordagem de soluções sob medidas desenvolvidas de forma independente "caso-a-caso" não será mais adequada em pouco tempo.

Os anos de experiência em telecomunicações no espaço profundo das diversas agências espaciais (notadamente da NASA) permitiram o projeto de transceptores de comunicação ponto-a-ponto robustos a erros de comunicação (com forte uso de codificação de canal e compressão de dados, às expensas da taxa de transmissão de dados). Esta aprendizagem pode ser transferida para equipamentos de grau comercial até certo ponto, visto que dimensões como custo e qualidade de experiência, embora importantes, não são tão limitantes no empreendimento científico em comparação com o comercial.

O retorno de missões tripuladas para a Lua está previsto para o curto prazo (2024) motivadas, dentre outras razões, por indícios concretos da existência de água na forma de gelo [94]; a médio prazo (2030 em diante) está previsto o estabelecimento de presença humana prolongada em alguma espécie de base lunar [95]. A longo prazo, espera-se que o mesmo ocorra em Marte. Estas perspectivas criam a necessidade do estabelecimento de uma rede de comunicação espacial, de grau comercial, que dê suporte a todas as atividades dos astronautas e dos equipamentos autônomos previstos nas missões. Estas incluem as atividades que envolvem comando e controle remoto com baixa latência e alta confiabilidade, comunicação de voz e vídeo em alta definição, *upload* e *download* de massas de dados de telemetria e sensoriamento (*big data*), navegação georreferenciada, dentre outras. A longo prazo, com uma presença humana mais ampla, incluindo um eventual turismo espacial, as mesmas necessidades de telecomunicações existentes hoje na Terra serão demandadas na Lua e além.

Neste sentido, é necessário que a humanidade conceba uma rede de comunicação espacial comercial visando coordenar o uso do espectro de forma a atender o provável aumento por largura de banda originada da Lua. Isto poderá ser liderado por organismos de atuação global como a União Internacional de Telecomunicações (UIT).

A exemplo, um marco na telecomunicação espacial foi a contratação pela NASA de uma tradicional empresa de telecomunicações para elaborar um sistema de comunicação móvel para

[1] A referência feita ao termo "comunicação espacial" exclui os sistemas satelitais tradicionais em órbita da Terra em comunicação com estações terrestres visando serviços de telecomunicações tradicionais.

a superfície da Lua utilizando, inicialmente, a tecnologia 4G/LTE [96]. Este fato sugere que a humanidade está na era das telecomunicações do espaço profundo (além da órbita terrestre) e que deve-se considerar esta componente como parte integrante de uma Rede 6G de telecomunicações a ser implantado a partir de 2030. Esta iniciativa pode e deve ser feita de forma convergente com ações ainda incipientes das agências espaciais na mesma direção, a exemplo de uma arquitetura proposta para Internet do sistema solar [97], e aproveitando o valioso aprendizado acumulado dessas mesmas agências quanto ao ambiente físico do espaço profundo.

A seguir, propostas para a criação de uma infraestrutura de telecomunicações composta por estacões móveis, ERBs, estações terrestres fixas e satélites para viabilizar todas as situações de comunicação na Lua, seja em sua superfície, seja com a Terra, serão apresentadas. As considerações a seguir serão feitas tendo a Lua como ambiente espacial de interesse, mas a maioria delas podem ser estendidas para o caso de Marte e além.

7.1 Comunicação Terra-Lua

A comunicação ponto-a-ponto em enlaces de espaço profundo, incluindo enlaces Lua-Terra, é tecnologicamente madura em função do conhecimento acumulado em telecomunicações no espaço nos mais de 60 anos de exploração espacial. As questões fundamentais para o estabelecimento de transceptores na Lua e na Terra estão bem mapeadas, a princípio. O desafio aqui é um aumento substancial do tráfego em comparação com as atuais demandas de missões espaciais de caráter científico. Isto é esperado na medida que a presença humana se expanda por tempo prolongado e surja a necessidade natural de acesso a conteúdo localizado em servidores na Terra, assim como o estabelecimento de chamadas e envio de mensagens de áudio e vídeo para familiares e colegas de trabalho aqui localizados.

A princípio, a superação deste desafio se dá em cima da tríade: potência, ganho de antena e largura de banda, o que não apresenta dificuldades peculiares em vista do domínio da tecnologia de transceptores, seja em enlaces ponto-a-ponto, seja com repetidores via satélite. A principal questão que se colocará gradualmente será a coordenação do uso do espectro por diferentes países, sendo que a principal restrição se dará para as estações terrenas, tendo em vista a escassez de espectro que já existe nas comunicações terrestres. Nesse sentido, este desafio é de natureza regulatória.

O papel dos satélites em uma futura rede de telecomunicações na Lua é tão ou mais relevante que o papel já desempenhado atualmente nas comunicações terrestres. Há duas aplicações satelitais consideradas críticas em um primeiro momento. Primeiro, a utilização de satélites como repetidores de sinal para regiões de difícil comunicação com a Terra. Este é o caso do lado escuro da Lua, em que não é possível estabelecer linha de visada com a Terra. Um satélite repetidor adequadamente posicionado fará a triangulação do sinal. Esta solução já é tecnologicamente viável hoje.

Uma segunda aplicação dos satélites na Lua é a replicação do serviço de GPS na superfície lunar para auxílio à navegação. O desafio aqui é mais logístico (lançamento e posicionamento orbital) que tecnológico, tendo em vista que se trata de tecnologia já madura. Estas perspectivas, porém, sinalizam necessidade de planificação de alocação órbitas em torno da Lua a partir da próxima década. A contrapartida na Terra de estações transmissoras e receptoras com visada para a Lua deverá ser ampliada e integrada à rede 6G terrestre, expandindo, por exemplo, os conceitos já empregados pela NASA na *Deep Space network* (DSN) [98], a qual conta com estações instaladas em vários continentes, garantido visada constante com a Lua.

O aprendizado da indústria de satélites sobre sistemas e arquiteturas que reduzam latência

e aumentem a razão sinal ruído, tais como roteamento em órbita e focalização de feixes de antena [99] podem e devem ser aproveitadas nesse caso de uso. Ao mesmo tempo, a indústria deve ficar atenta às abordagens disruptivas, como por exemplo, a construção de satélites em órbita terrestre [100], visando redução de custos de lançamento e redução de do tempo para colocação em operação. Da mesma forma, tendências emergentes na implantação de sistemas satelitais massivos de baixa orbita, cuja operação já se inicia na Terra [101], devem ser consideradas como modelo para a implantação futura na Lua.

Por fim, algumas considerações sobre latência neste cenário. O atraso de propagação na comunicação com a Lua é de aproximadamente 2,5 s (considerando os enlaces de ida e volta do sinal, numa distância média da Terra de 384.000 km) e esta componente tende a dominar a latência total. Ainda assim, os equipamentos de telecomunicações devem buscar acrescentar pouca latência adicional devido a processamento e congestionamento (múltiplo acesso) de maneira que não se amplie a latência física (insuperável) para comunicações em tempo real.

7.2 Comunicação na Superfície da Lua

Como regra geral, pode-se partir do princípio que as mesmas aplicações de uma rede 6G desenvolvidas para a Terra serão, em algum momento, demandadas na superfície da Lua em missões tripuladas e, especialmente, a partir do momento que uma base de permanência humana prolongada seja estabelecida. No entanto, algumas especificidades do ambiente lunar e do risco intrínseco da presença de humanos na Lua, merecem atenção.

O primeiro aspecto diz respeito à própria característica construtiva dos equipamentos de telecomunicações. Estes devem apresentar resistência física e operacional à grande amplitude térmica de aproximadamente 400 °C (de aproximadamente −200 °C a 200 °C entre a noite e o dia lunar respectivamente) [102]. Além disso, deve haver resistência operacional à radiação ionizante de origem cósmica e de explosões solares, que tornam o nível típico de radiação na superfície da Lua mais de 200 vezes o seu correspondente na Terra [102]. Por fim, esses equipamentos precisarão atender restrições duras de peso e tamanho em função da limitação de carga de lançamento dos foguetes. A operação de lançamento também requer que os equipamentos sejam resistentes a vibrações intensas.

A segunda característica importante dos equipamentos de telecomunicações, especialmente das ERBs lunares, é que devem possuir alto grau de autonomia: autonomia energética e autonomia operacional. A autonomia energética significa que as ERBs funcionarão fundamentalmente à base de energia solar. Em função dos prolongados dias e noites lunares (ciclos de aproximadamente 23 dias terrestres [102]) haverá necessidade do uso de baterias. Tudo isto sugere a necessidade de altíssimo grau de eficiência energética. Eficiência energética, incluindo o conceito de *energy haversting* [103], é um tema pesquisado há bastante tempo pela comunidade acadêmica, mas que ainda não ganhou tração na indústria. Este caso de uso na Lua provavelmente tornará mandatório que se desenvolvam equipamentos práticos utilizando esses princípios.

A autonomia operacional das ERBs se dá no sentido que a manutenção física presencial por um humano é muito custosa. Neste sentido a ERB deve apresentar-se com as características de auto configuração, auto organização e auto reparação. Tais conceitos têm sido investigados pela academia há tempos [104] e já existem equipamentos com características de auto configuração para Redes 4G. Espera-se que a auto organização seja uma propriedade cada vez mais comum em equipamentos 5G em função da massificação inerente à Internet das Coisas. A auto reparação de software (em ERBs por exemplo) é uma tendência clara na medida que se empregam conceitos como rádio definido por software, redes definidas por software e vir-

tualização de funções de rede [105]. A utilização de um sistema operacional que disponha de mecanismos de *download over the air* (OTA) e instalação de *patches* e atualizações deve ser suficiente para tal. Deve-se, porém, considerar um mecanismo adicional com a habilidade de auto reparação de hardware, o que é bem mais desafiante, havendo mais de uma abordagem para tal: desde robôs autônomos, robôs controlados remotamente e utilização de peças sobressalentes pré-instaladas no equipamento que permitam o *hot swap*, ou seja, a mudança do *hardware* empregado enquanto o equipamento está operando. Todas essas situações caem no amplo tema da tolerância a falhas [106] já bastante estudado em outros campos da engenharia, cujo aprendizado cumulativo a indústria de telecomunicações pode se beneficiar.

O próximo aspecto a ser destacado diz respeito à propagação de ondas de rádio. A ausência de atmosfera na Lua favorece o alcance de sinal. Por outro lado, o terreno altamente acidentado e particularmente as crateras lunares representam grande desafio para a estação móvel, que pode estar montada em um veículo do tipo rover, com antena próxima ao solo. A própria antena da ERB não deverá ter uma altura considerável por razões de espaço e peso no transporte, pelo menos inicialmente. Desta forma, pode-se esperar ausência de linhas de visada, áreas de sombra e forte atenuação de sinal em muitas localidades em que a comunicação móvel for demandada.

Os aspectos de ultra confiabilidade, baixa latência e segurança também precisam ser considerados. O modo de operação URLLC [107] torna-se de extrema importância nas comunicações espaciais, considerando toda a criticidade da infraestrutura de apoio à sobrevivência humana e dificuldades práticas de realização de tarefas presenciais in loco por humanos. As metas de alta confiabilidade e baixa latência já definidas para o padrão 5G e que deverão ser ainda mais agressivas em um futuro padrão 6G devem ser adotadas integralmente nas comunicações na superfície da Lua, com um mínimo de *jitter*. A utilização de MEC e *Content Delivery Network* (CDN) [108], já prevista para as Redes 5G, serão muito relevantes para garantir acesso rápido a conteúdos populares da Internet (tendo em vista o considerável atraso de propagação Terra-Lua). Por fim, deve-se considerar o uso de mecanismos avançados de segurança em todas as situações de comunicação (Lua-Lua e Terra-Lua) tendo em vista a criticidade da infraestrutura lunar. Neste sentido, técnicas emergentes em outros campos de aplicação, como "blockchain" [109], devem ser empregadas para garantir a segurança e confiabilidade das comunicações espaciais.

8 Requisitos para Redes 6G

As diversas aplicações e casos de uso apontados ao longo deste relatório mostram que há vários desafios científicos para a concepção e implantação das Redes 6G. O objetivo desta seção é apresentar os principais requisitos que precisam ser atendidos para dar suporte adequado às famílias de casos de uso e aplicações listadas neste documento. A Tabela 1 apresenta os requisitos chaves levantados para as famílias de caso de uso estudadas, enquanto que a descrição desses requisitos são apresentadas a seguir:

Velocidade: velocidade máxima de deslocamento do terminal móvel em km/h.

Densidade de terminais: número máximo de terminais por km^2.

Privacidade: sensibilidade da aplicação quanto à privacidade dos dados transmitidos pela rede móvel. O termo "Nominal" ser refere a um nível de privacidade equivalente ao observado nas Redes 5G enquanto que o termo "Crítico" se refere a um nível de privacidade superior ao proposto para as Redes 5G.

Segurança: demanda por segurança e proteção dos dados transmitidos na rede móvel. O termo "Nominal" se refere a um nível de segurança equivalente ao observado nas Redes 5G enquanto que o termo "Crítico" se refere a um nível de segurança superior ao proposto para as Redes 5G, podendo incluir inclusive a segurança de camada física.

Acesso ao Espectro: forma de acesso ao espectro, podendo ser licenciado para exploração das bandas especificadas pelo 3GPP na forma de rede primária ou não licenciado para a exploração de bandas *Industrial Sientific and Medical* (ISM) ou *TV White Space* (TVWS).

ACLR sem filtro: necessidade de manter a conformidade espectral em termos de *Adjacent Channel Leakage Power Ratio* (ACLR) sem o uso de filtros de RF. O termo "Nominal" significa que a ACLR sem o filtro de RF pode assumir valores equivalentes aos observados nas redes 5G. Já o termo "Crítico" significa que o atendimento da ACLR deve ser obtido sem o uso de um filtro de RF.

Resolução de RF/Imagem: resolução de RF e de imagem para as aplicações que demandam o uso da rede móvel para captura de imagens através de sinais de RF ou câmeras multiespectrais. O termo "Nominal"refere-se a uma resolução de RF/Imagem equivalentes a 1920 x 1080 pixels e o termo "Crítico"refere-se à demanda por resoluções 4k e 8k.

Precisão espacial: precisão espacial do posicionamento dos terminais móveis.

Eficiência espectral: eficiência espectral em comparação com o padrão 5GNR em termos de bits/s/Hz.

Eficiência energética: eficiência energética em comparação com a Rede 5G em termos de bits transmitidos por Joule de energia consumida, levando-se em consideração os modos de operação eMBB ou mMTC.

Confiabilidade: resiliência do enlace de comunicação, ou probabilidade do enlace estar em operação e atendendo à QoS exigida pela aplicação. A probabilidade complementar à confiabilidade é a probabilidade de inoperância do enlace.

Cobertura: cobertura de uma célula, definida em termos do raio a partir da ERB.

Latência: atraso máximo fim-a-fim tolerável na resposta da rede.

Vazão de pico: valor mínimo para a vazão de pico de uma célula.

Vazão/Usuário: faixa de valores típicos de vazão demandada pelos usuários.

Tabela 1: Lista de requisitos chaves para as famílias de caso de uso das Redes 6G.

Requisitos	Famílias de casos de uso					
	Cobertura mundial extrema	Agricultura do futuro	Gêmeos digitais em larga escala	Interações remotas avançadas	Zonas seguras invisíveis	Comunicação espacial
Vazão/Usuário (Mbps)	10^{-1} à 10	10^{-1} à 10^2	10^{-1} à 10^3	10 à 10^6	10 à 10^2	10^2 à 10^3
Vazão de pico (Gbps)	> 1	> 1	> 100	$> 10^4$	> 100	> 10
Latência (ms)	< 20	< 1	< 1	< 1	< 20	< 10 / < 3.000 *
Cobertura por célula (km)	50 à 3000**	> 50	< 1	< 1	< 1	> 50
Confiabilidade	1-10^{-5}	1-10^{-5}	1-10^{-9}	1-10^{-9}	1-10^{-7}	1-10^{-5} / 1-10^{-9} *
Eficiência energética	10x mMTC	10x mMTC	10x eMBB	10x eMBB	10x eMBB	100x eMBB
Eficiência espectral (em relação a 5GNR)	1x	1x	10x	10x	10x	1x
Precisão espacial (cm)	< 100	< 10	< 1	< 1	< 10	$< 0{,}1$
Resolução RF/Imagem	Nominal	Crítica	Nominal	Nominal	Crítica	Crítica
ACLR sem filtro	Nominal	Crítico	Crítico	Nominal	Crítico	Nominal
Acesso ao espectro	Com e sem licença	Com e sem licença	Com e sem licença	Com licença	Com e sem licença	Com e sem licença
Segurança	Nominal	Nominal	Crítico	Crítico	Crítico	Crítico
Privacidade	Nominal	Nominal	Crítico	Crítico	Crítico	Nominal
Densidade de terminais (1/km^2)	100	100	10^4	10^4	10	10
Velocidade (km/h)	< 250	< 250	< 80	< 80	< 80	< 30

* Comunicação na superfície lunar / Comunicação Terra-Lua
** Considerando cobertura por satélite

9 Conclusão

A diversidade de aplicações previstas para as Redes 6G irão requerer uma flexibilidade jamais vista em nenhuma outra rede de telecomunicação, além de demandar um novo conjunto de funcionalidades que ultrapassa as fronteiras das comunicações, como o sensoriamento do ambiente através do uso de sinais de RF ou de imagens multiespectrais, o mapeamento preciso de objetos e pessoas do mundo físico para o mundo virtual, a coleta de dados biológicos em tempo real de pessoas e animais e a aplicação de IA de forma vertical em todas as camadas da futura rede móvel. Essa grande gama de aplicações foram agrupadas em famílias de caso de uso, com aplicações diretas em diversas verticais estabelecidas como prioritárias para o Brasil.

Observando a Tabela 1, onde os requisitos mapeados para cada família de casos de uso são apresentados, é possível concluir que em diversos cenários será necessário atender a diferentes requisitos chaves. Muitas vezes, esses requisitos chaves são conflitantes entre si, constituindo um grande desafio para as diferentes camadas das redes de acesso. Isso significa que as Redes 6G deverão atuar como uma plataforma de integração de diversas tecnologias, permitindo inclusive que múltiplas RATs sejam empregadas simultaneamente para suportar uma dada aplicação.

Logo, as Redes 6G irão permear por todas essas tecnologias, integrando satélites, VANTs, ERBs, pontos de acesso e *gateways* de diferentes tecnologias em um ambiente harmonioso e sinérgico que seja efetivamente capaz de integrar os mundos físico, biológico e virtual.

Referências

[1] ANATEL, "Relatório de Acompanhamento do Setor de Telecomunicações: Telefonia Móvel," https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100643.pdf, ANATEL, Agencia Nacional de Telecomunicações, Rio de Janeiro-RJ, Tech. Rep., 2020.

[2] ITU-R, "Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)," International Telecommunication Union (ITU), Report ITU-R M.2410-0, Nov. 2017.

[3] H. Kim, *Enhanced Mobile Broadband Communication Systems.* IEEE, 2020, pp. 239–302.

[4] M. A. Imran, S. Hussain, and Q. H. Abbasi, *Ultra Reliable Low Latency Communications as an Enabler For Industry Automation.* IEEE, 2020, pp. 89–107.

[5] D. Chandramouli, R. Liebhart, and J. Pirskanen, *Massive Machine Type Communication and the Internet of Things.* IEEE, 2019, pp. 377–439.

[6] R. R. Shrivastwa, V. Pudi, C. Duo, R. So, A. Chattopadhyay, and G. Cuntai, "A Brain–Computer Interface Framework Based on Compressive Sensing and Deep Learning," *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 9, no. 3, pp. 90–96, 2020.

[7] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems," *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134–142, 2020.

[8] Flagship 6G. (2021) Discover how 6G will change our lives. [Online]. Disponível em: https://www.oulu.fi/6gflagship/.

[9] Hexa-X Project. (2021) A flagship for 6G vision and intelligent fabric of technology enablers connecting human, physical, and digital worlds . [Online]. Disponível em: https://hexa-x.eu/.

[10] One 6G. (2021) Taking communications to the next level. [Online]. Disponível em: https://one6g.org/.

[11] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, and M.-S. Alouini, "What should 6G be?" *Nature Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 20–29, 2020, publisher: Nature Publishing Group. [Online]. Available: https://www.nature.com/articles/s41928-019-0355-6

[12] A. Chaoub, M. Giordani, B. Lall, V. Bhatia, A. Kliks, L. Mendes, K. Rabie, H. Saarnisaari, A. Singhal, N. Zhang, S. Dixit, and M. Zorzi, "6G for Bridging the Digital Divide: Wireless Connectivity to Remote Areas," *IEEE Wireless Communications*, pp. 1–9, 2021, conference Name: IEEE Wireless Communications.

[13] C.-X. Wang, J. Huang, H. Wang, X. Gao, X. You, and Y. Hao, "6G Wireless Channel Measurements and Models: Trends and Challenges," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 15, no. 4, pp. 22–32, Dec. 2020, conference Name: IEEE Vehicular Technology Magazine.

[14] C. D. Alwis, A. Kalla, Q.-V. Pham, P. Kumar, K. Dev, W.-J. Hwang, and M. Liyanage, "Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 836–886, 2021, conference Name: IEEE Open Journal of the Communications Society.

[15] S. Chen, Y.-C. Liang, S. Sun, S. Kang, W. Cheng, and M. Peng, "Vision, Requirements, and Technology Trend of 6G: How to Tackle the Challenges of System Coverage, Capacity, User Data-Rate and Movement Speed," *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 2, pp. 218–228, Apr. 2020, conference Name: IEEE Wireless Communications.

[16] M. Matinmikko-Blue and et al, "White Paper on 6G Drivers and the UN SDGs," *arXiv:2004.14695 [cs, eess]*, Apr. 2020, arXiv: 2004.14695. [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2004.14695

[17] D. Adshead, S. Thacker, L. I. Fuldauer, and J. W. Hall, "Delivering on the Sustainable Development Goals through long-term infrastructure planning," *Global Environmental Change*, vol. 59, p. 101975, Nov. 2019. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378019303383

[18] N.-N. Dao, Q.-V. Pham, N. H. Tu, T. T. Thanh, V. N. Q. Bao, D. S. Lakew, and S. Cho, "Survey on Aerial Radio Access Networks: Toward a Comprehensive 6G Access Infrastructure," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 1193–1225, 2021, conference Name: IEEE Communications Surveys Tutorials.

[19] E. J. Oughton and A. Jha, "Supportive 5G Infrastructure Policies are Essential for Universal 6G: Assessment using an Open-source Techno-economic Simulation Model utilizing Remote Sensing," *arXiv:2102.08086 [cs, econ, q-fin]*, Jun. 2021, arXiv: 2102.08086. [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2102.08086

[20] E. J. Oughton, N. Comini, V. Foster, and J. W. Hall, "Policy choices can help keep 4G and 5G universal broadband affordable," *arXiv:2101.07820 [cs, econ, q-fin]*, Feb. 2021, arXiv: 2101.07820. [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2101.07820

[21] United Nations, General Assembly. (2015, October) The Sustainable Development Goals Report: The 2030 Agenda for Sustainable Development. https://sdgs.un.org/publications/transforming-our-world-2030-agenda-sustainable-development-17981. Acessado em: 2021/05/21.

[22] D. Carrillo and J. Seki, "Rural area deployment of internet of things connectivity: Lte and lorawan case study," in *2017 IEEE XXIV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, 2017, pp. 1–4.

[23] G. D'Aria and et al, "Expanded 6G vision, use cases and societal values – including aspects of sustainability, security and spectrum," Hexa-X Project, Tech. Rep., 2021.

[24] K. Bahia and S. Suardi. (2019) Connected society: the state of mobile internet connectivity 2019. gsma.

[25] M. Giordani and M. Zorzi, "Non-terrestrial networks in the 6g era: Challenges and opportunities," *IEEE Network*, vol. 35, no. 2, pp. 244–251, 2021.

[26] A. Chaoub, M. Giordani, B. Lall, V. Bhatia, A. Kliks, L. Mendes, K. Rabie, H. Saarnisaari, A. Singhal, N. Zhang, S. Dixit, and M. Zorzi, "6g for bridging the digital divide: Wireless connectivity to remote areas," *IEEE Wireless Communications*, 05 2021.

[27] R. Cavararo, "Classificação e caracterização dos espaços rurais e urbanos do Brasil : Uma primeira aproximação." https://sei.anatel.gov.br/, IBGE, Coordenação de Geografia, Brasília - DF, Tech. Rep., 2017.

[28] N. Chuberre and S. Chenumolu, "Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks," https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.811, Third Generation Partnership Project (3GPP), Tech. Rep. 3GPP TR38.811 V15.4.0 (2020-10), 2020.

[29] N. Chuberre, "Solutions for NR to Support Non-Terrestrial Networks (NTN)," https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.821, Third Generation Partnership Project (3GPP), Tech. Rep. 3GPP TR38.821 V16.0.0 (2020-01), 2020.

[30] H. Saarnisaari and et al, "A 6G White Paper on Connectivity for Remote Areas," *6G Research Visions*, 04 2020.

[31] A. Pouttu and et al, "6G White Paper on Validation and Trials for Verticals towards 2030," *6G Research Visions*, 04 2020.

[32] C. Le Quéré *et al.*, "Temporary reduction in daily global CO_2 emissions during the COVID-19 forced confinement," *Nature Climate Change*, vol. 10, no. 7, pp. 647–653, Jul. 2020.

[33] O. Saladié, E. Bustamente, and A. Gutiérrez, "COVID-19 lockdown and reduction of traffic accidents in Tarragona province, Spain," *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 8, nov 2020.

[34] (2020, Dec.) Paris agreement: Brazil's nationally determined contribution (NDC). [Online]. Available: https://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/Party.aspx?party=BRA

[35] S. R. Piao, V. L. Silva, I. Navarro del Aguila, and J. de Burgos Jiménez, "Green growth and agriculture in Brazil," *Sustainability*, vol. 13, no. 1162, Jan. 2021.

[36] (2021, Apr.) Climate-smart agriculture (CSA). [Online]. Available: https://www.worldbank.org/en/topic/climate-smart-agriculture

[37] K. Hulick. (2021, Mar.) Training AI to be really smart poses risks to climate. [Online]. Available: https://www.sciencenewsforstudents.org/article/training-ai-energy-emissions-climate-risk

[38] E. Strubell, A. Ganesh, and A. McCallum, "Energy and policy considerations for deep learning in NLP," *ArXiv*, Jun. 2019. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/1906.02243.pdf

[39] K. Martineau. (2020, Aug.) Shrinking deep learning's carbon footprint. [Online]. Available: https://news.mit.edu/2020/shrinking-deep-learning-carbon-footprint-0807

[40] H. Cai, C. Gan, T. Wang, Z. Zhang, and S. Han, "Once for All: Train One Network and Specialize it for Efficient Deployment," in *8th International Conference on Learning Representations*, April 2020, pp. 1–15.

[41] CONAB. (2021) Série histórica das safras. [Online]. Available: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=30

[42] M. Nogueira, "Produtividade na Pecuária é Realidade ou Propaganda?" Athenagro Consultoria, Tech. Rep., 09 2020.

[43] S. Neethirajan, "Recent advances in wearable sensors for animal health management," *Sensing and Bio-Sensing Research*, vol. 12, pp. 15–29, 2017. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214180416301350

[44] R. L. de Sales, J. L. M. Rocha, and J. Bressan, "Utilização de hormônios e antibióticos em produtos alimentícios de origem animal: aspectos gerais e toxicológicos," *Nutrire*, vol. 40, pp. 409–420, 2015.

[45] J. Wijitdechakul, S. Sasaki, Y. Kiyoki, and C. Koopipat, "UAV-based multispectral image analysis system with semantic computing for agricultural health conditions monitoring and real-time management," in *2016 International Electronics Symposium (IES)*, 2016, pp. 459–464.

[46] F. Pedrosaa, R. Salernob, F. V. B. Padilhac, and M. Galettia, "Current distribution of invasive feral pigs in Brazil: economic impacts and ecological uncertainty," *Natureza & Conservação Brazilian Journal of Nature Conservation*, vol. 13, pp. 84–87, 2015.

[47] G. Pera, "Modelagem das perdas na agrologística de grãos no brasil: uma aplicação de programação matemática," Master's thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP, 2017.

[48] L. L. Mendes and et al, "Enhanced Remote Areas Communications: The Missing Scenario for 5G and Beyond 5G Networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 219 859–219 880, 2020.

[49] A. M. Cavalcante, M. V. Marquezini, L. Mendes, and C. S. Moreno, "5G for Remote Areas: Challenges, Opportunities and Business Modeling for Brazil," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 10 829–10 843, 2021.

[50] L. Afsah-Hejri, E. Akbari, A. Toudeshki, T. Homayouni, A. Alizadeh, and R. Ehsani, "Terahertz spectroscopy and imaging: A review on agricultural applications," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 177, p. 105628, 2020.

[51] A. Ghosh, A. Maeder, M. Baker, and D. Chandramouli, "5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127 639–127 651, 2019.

[52] BNDES, "Produto 7A: Aprofundamento de Verticais – Cidades," Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Tech. Rep., 2017.

[53] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108 952–108 971, 2020.

[54] M. Grieves and J. Vickers, *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*. Springer International Publishing, 2017, pp. 85–113.

[55] H. Lehner and L. Dorffner, "Digital geoTwin Vienna: Towards a Digital Twin City as Geodata Hub," *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, vol. 88, no. 1, pp. 63–75, 2020.

[56] G. Schrotter and C. Hürzeler, "The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning," *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, vol. 88, no. 1, pp. 99–112, 2020.

[57] "Transformative Urban Digital Twin and City Modeling Deployments to exceed 500 by 2025 ," https://www.abiresearch.com/press/transformative-urban-digital-twin-and-city-modeling-deployments-exceed-500-2025/, Último acesso: 16/05/2020.

[58] T. Deng, K. Zhang, and Z.-J. M. Shen, "A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities," *Journal of Management Science and Engineering*, pp. 1–10, 2021.

[59] L. Deren, Y. Wenbo, and S. Zhenfeng, "Smart city based on digital twins," *Computational Urban Science*, vol. 1, no. 1, pp. 1–11, 2021.

[60] M. M. Rathore, S. A. Shah, D. Shukla, E. Bentafat, and S. Bakiras, "The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic Literature Review, Challenges, and Opportunities," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 32 030–32 052, 2021.

[61] C. Fan, C. Zhang, A. Yahja, and A. Mostafavi, "Disaster City Digital Twin: A vision for integrating artificial and human intelligence for disaster management," *International Journal of Information Management*, vol. 56, pp. 1–10, 2021.

[62] K. A. Demir, G. Döven, and B. Sezen, "Industry 5.0 and Human-Robot Co-working," *Procedia Computer Science*, vol. 158, pp. 688–695, 2019.

[63] V. Özdemir and N. Hekim, "Birth of Industry 5.0: Making Sense of Big Data with Artificial Intelligence, "The Internet of Things" and Next-Generation Technology Policy," *OMICS: A Journal of Integrative Biology*, vol. 22, no. 1, pp. 65–76, 2018.

[64] S. Nahavandi, "Industry 5.0—A Human-Centric Solution," *Sustainability*, vol. 11, no. 16, pp. 1–13, 2019.

[65] T.-C. Chiu, Y.-Y. Shih, A.-C. Pang, and C.-W. Pai, "Optimized Day-Ahead Pricing With Renewable Energy Demand-Side Management for Smart Grids," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 374–383, 2017.

[66] J. Müller, "Enabling Technologies for Industry 5.0," Publications Office of the European Union, Tech. Rep., 2020.

[67] E. Steinbach, S. Hirche, M. Ernst, F. Brandi, R. Chaudhari, J. Kammerl, and I. Vittorias, "Haptic Communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 4, pp. 937–956, 2012.

[68] K. Antonakoglou, X. Xu, E. Steinbach, T. Mahmoodi, and M. Dohler, "Toward Haptic Communications Over the 5G Tactile Internet," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 3034–3059, 2018.

[69] D. Van Den Berg, R. Glans, D. De Koning, F. A. Kuipers, J. Lugtenburg, K. Polachan, P. T. Venkata, C. Singh, B. Turkovic, and B. Van Wijk, "Challenges in Haptic Communications Over the Tactile Internet," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23 502–23 518, 2017.

[70] S. K. Sharma, I. Woungang, A. Anpalagan, and S. Chatzinotas, "Toward Tactile Internet in Beyond 5G Era: Recent Advances, Current Issues, and Future Directions," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 56 948–56 991, 2020.

[71] M. Simsek, A. Aijaz, M. Dohler, J. Sachs, and G. Fettweis, "5G-Enabled Tactile Internet," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 460–473, 2016.

[72] 3GPP, "5G; Extended Reality (XR) in 5G. 3GPP TR 26.928 version 16.0.0 Release 16," 2020.

[73] P&S Intelligence, "Extended Reality (XR) Market Research Report: By Component (Hardware, Software, Services), Device Type (Mobile, Personal Computer, Headset), User (Single-User, Multi-User), Delivery Model (Consumer Engagement, Business Engagement), Application (Virtual Reality, Augmented Reality, Mixed Reality), Industry (Retail, Education, Industrial and Manufacturing, Healthcare, Media and Entertainment, Gaming, Aerospace and Defense) - Global Industry Analysis and Growth Forecast to 2030," 2020.

[74] A. L. Imoize, O. Adedeji, N. Tandiya, and S. Shetty, "6G Enabled Smart Infrastructure for Sustainable Society: Opportunities, Challenges, and Research Roadmap," *Sensors*, vol. 21, no. 5, 2021.

[75] R. Li, "Network 2030 a blueprint of technology, applications and market drivers towards the year 2030 and beyond," in *ITU-T*, 07 2019, p. 19.

[76] A. Clemm, M. T. Vega, H. K. Ravuri, T. Wauters, and F. D. Turck, "Toward Truly Immersive Holographic-Type Communication: Challenges and Solutions," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 1, pp. 93–99, 2020.

[77] J. v. d. Hooft, M. T. Vega, T. Wauters, C. Timmerer, A. C. Begen, F. D. Turck, and R. Schatz, "From capturing to rendering: Volumetric media delivery with six degrees of freedom," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 10, pp. 49–55, 2020.

[78] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. A. Uusitalo, B. Timus, and M. Fallgren, "Scenarios for 5g mobile and wireless communications: the vision of the metis project," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 26–35, 2014.

[79] S. Elmoghazy, E. Yaacoub, N. V. Navkar, A. Mohamed, and A. Erbad, "Survey of Immersive Techniques for Surgical Care Telemedicine Applications," in *2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, 2021, pp. 1–6.

[80] M. B. Janjua, A. E. Duranay, and H. Arslan, "Role of Wireless Communication in Healthcare System to Cater Disaster Situations Under 6G Vision," *Frontiers in Communications and Networks*, vol. 1, p. 6, 2020. [Online]. Available: https://www.frontiersin.org/article/10.3389/frcmn.2020.610879

[81] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, and M.Khorasani, "Design for additive manufacturing," in *Additive Manufacturing Technologies*, 2021.

[82] J. M. Roldan and F. Ordoñez, "Itu guidelines for national emergency telecommunication plans; itu-d emergency telecommunications – disaster response," International Telecommunication Union (ITU), Tech. Rep., 2019.

[83] "Release 17," https://www.3gpp.org/release-17, 2020, [*Online*; acessado em 29 de abril de 2020].

[84] "Fórum Brasileiro de Segurança Pública," https://forumseguranca.org.br/, [*Online*; acessado em 22 de maio de 2020].

[85] "Anuário Brasileiro de Segurança Pública," https://forumseguranca.org.br/publicacoes/, [*Online*; acessado em 22 de maio de 2020].

[86] M. S. Hossain, G. Muhammad, and N. Guizani, "Explainable AI and Mass Surveillance System-Based Healthcare Framework to Combat COVID-I9 Like Pandemics," *IEEE Network*, vol. 34, no. 4, pp. 126–132, 2020.

[87] X. Shen, J. Gao, W. Wu, K. Lyu, M. Li, W. Zhuang, X. Li, and J. Rao, "Ai-assisted network-slicing based next-generation wireless networks," *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 1, pp. 45–66, 2020.

[88] Y. Wu, "Cloud-edge orchestration for the internet-of-things: Architecture and ai-powered data processing," *IEEE Internet of Things Journal*, pp. 1–1, 2020.

[89] A. A. Gebremariam, M. Usman, and M. Qaraqe, "Applications of artificial intelligence and machine learning in the area of sdn and nfv: A survey," in *2019 16th International Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD)*, 2019, pp. 545–549.

[90] S. Kekki *et al.*, "ETSI White Paper No. 28 – MEC in 5G networks," European Telecommunications Standard Institute (ETSI), Tech. Rep., 2018.

[91] 3GPP-TR21.915, "Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 15 Description," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report, 2018-12, version 0.5.0.

[92] Z. Zhou, X. Chen, E. Li, L. Zeng, K. Luo, and J. Zhang, "Edge intelligence: Paving the last mile of artificial intelligence with edge computing," *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 8, pp. 1738–1762, 2019.

[93] (2021, Apr.) Empresas dos eua e canadá vão atuar no centro espacial de alcântara. [Online]. Available: https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-04/empresas-dos-eua-e-do-canada-vao-atuar-no-centro-espacial-de-alcantara

[94] NASA. (2021, May) Artemis. [Online]. Available: https://www.nasa.gov/artemisprogram

[95] ——. (2020, Apr.) NASA's plan for sustained lunar exploration and development. [Online]. Available: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/a_sustained_lunar_presence_nspc_report4220final.pdf

[96] Nokia. (2020, Oct.) Nokia selected by NASA to build first ever cellular network on the Moon. [Online]. Available: https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2020/10/19/nokia-selected-by-nasa-to-build-first-ever-cellular-network-on-the-moon/

[97] CCSDS, "Solar system internetwork (SSI) architecture, informal report," The Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS), Report Concerning Space Data System Standards CCSDS 730.1-G-1, Jul. 2014. [Online]. Available: https://public.ccsds.org/Pubs/730x1g1.pdf

[98] J. Taylor, Ed., *Deep Space Communications*. John Wiley & Sons, Inc, Jul. 2016.

[99] Q. Yu, Ed., *Space Information Networks*. Springer, Sep. 2019.

[100] ABRASAT. (2021, Apr.) Construção no espaço pode revolucionar mercado de satélites. [Online]. Available: https://abrasat.org.br/2021/04/15/construcao-no-espaco-pode-revolucionar-o-mercado-de-satelites/

[101] A. Marques. (2021, Apr.) Satélites da starlink poderão operar em órbitas ainda mais baixas. [Online]. Available: https://tecnoblog.net/437253/satelites-starlink-poderao-operar-em-orbitas-ainda-mais-baixas/

[102] H. Benaroya, *Building Habitats on the Moon*. Springer International Publishing, 2018.

[103] T. Ruan, Z. J. Chew, and M. Zhu, "Energy-aware approaches for energy harvesting powered wireless sensor nodes," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 7, pp. 2165–2173, Apr. 2017.

[104] O. G. Aliu, A. Imran, M. A. Imran, and B. Evans, "A survey of self organisation in future cellular networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 336–361, First Quarter 2013.

[105] M. Gharbaoui *et al.*, "Demonstration of latency-aware and self-adaptive service chaining in 5G/SDN/NFV infrastructures," in *IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN)*, Nov. 2018.

[106] K. Rahul, R. P. Behera, and Y. Varthamanan, "Fault tolerant processor based remote control unit design," in *International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, Dec. 2015, pp. 447–450.

[107] S. Mukherjee and C. Beard, "A framework for ultra-reliable low latency mission-critical communication," in *Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*, 2017.

[108] S. Wang, X. Zhang, Y. Zhang, L. Wang, J. Yang, and W. Wang, "A survey on mobile edge networks: Convergence of computing, caching and communications," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 6757–6779, Mar. 2017.

[109] Y. Sun, L. Zhang, G. Feng, B. Yang, B. Cao, and M. A. Imran, "Blockchain-enabled wireless internet of things: Performance analysis and optimal communication node deployment," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 5791–5802, Jun. 2019.