

Brasil 6G

Projeto Brasil 6G

Contribuições para a Arquitetura da Rede 6G: Visões Evolucionária e a Disruptiva



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO



Histórico de Atualizações:

Versão	Data	Autor(es)	Notas
1	01/12/2021	Antonia Vanessa Dias Araujo (UFG) Antonio Oliveira-Jr (UFG) Antonio Marcos Alberti (Inatel) Carlos Filipe M. Silva (UFC) Daniel Ricardo Cunha Oliveira (UFU) Diego Gabriel Soares Pivoto (Inatel) Eduardo Melão (cpqd) Fernando Farias (RNP) Flávio de Oliveira Silva (UFU) Gustavo Araújo (RNP) Heitor Scalco Neto (UFG/IFMS) Jorge Seki (cpqd) Kleber Cardoso (UFG) Maurício Amaral Gonçalves (UFU) Nathália Figueiredo (cpqd) Rodrigo Moreira (UFU) Rogério S. Silva (UFG/IFG) Sand Luz Correa (UFG) Tibério Tavares Rezende (Inatel)	Elaboração de conteúdo
2	03/02/2022		Revisão de texto

Lista de Tabelas

1	Casos de uso encontrados na literatura por família.	5
2	Lista de requisitos chave para as famílias de caso de uso das Redes Sexta Geração de Rede Móvel Celular (6G).	9
3	Sumários dos escopos relacionados a arquitetura 6G.	10
4	Classificação dos fundamentos importantes para 6G.	11
5	Tabela de Análise de Fundamentos em relação aos Escopos.	12
6	Parte 1: Análise dos habilitadores importantes para 6G. Notas no intervalo 0-10.	42
7	Parte 2: Análise dos habilitadores importantes para 6G. Notas no intervalo 0-10.	43
8	Escala de pesos utilizados na determinação da importância relativa dos critérios considerados.	49
9	Análise da importância relativa dos critérios considerados.	50
10	Análise da importância relativa dos sub-critérios relacionados à Aderência. . . .	51

Acrônimos

3GPP *3rd Generation Partnership Project*

5G *Quinta Geração de Rede Móvel Celular*

5GC *5G Core*

5G NR *Fifth Generation New Radio*

6G *Sexta Geração de Rede Móvel Celular*

ACLR *Adjacent Channel Leakage Ratio*

AHP *Analytic Hierarchy Process*

AI *Artificial Intelligence*

AR *Augmented Reality*

AR/VR *Augmented and Virtual Realities*

BS *Base Station*

BSS *Business Support System*

C-RAN *Cloud-RAN*

CBDC *Central Bank Digital Currency*

CDBC *Central Bank Digital Coin*

CDN *Content Distribution Network*

CFN *Compute First Networking*

CoCoCo Convergence *Communication, Computing, Control Convergence*

CoMP *Coordinated Multi-Point*

CPU *Central Process Unit*

CSP *Communication Service Provider*

D2D *Device-to-Device*

DeFi *Decentralized Finance*

DLT *Distributed Ledger Technologies*

DN *Decentralized Networking*

DSA *Dynamic Spectrum Access*

DT *Digital Twin*

DTs *Digital Twins*

DTN *Delay Tolerant Network*

E-RAN *Elastic RAN*

feUMBB *further enhance Ultra-Mobile Broadband*

FIT *Future Internet of Things*

FPGA *Field-Programmable Gate Array*

GEO *Geostationary Orbit*

HAP *High Altitude Platform*

HTCU *Human-Type Communication User*

IA *Inteligencia Artificial*

IaaS *Infrastructure as a Service*

IBN *Intent-Based Network*

ICN *Information Centric Networking*

ICT *Information Communications Technology*

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IIBS *Internet Information Broadcast Storage*

IIoT *Industrial Internet of Things*

INC *In-Network Computing*

iOFDMA *Intelligent Orthogonal Frequency Division Multiple Access*

IoHT *Internet of Healthcare Things*

IoT *Internet of Things*

ISCP *IOTA Smart Contracts Protocol*

IP *Internet Protocol*

IRS *Intelligent Reflecting Surface*

IRTF *Internet Research Task Force*

LEO *Low Earth Orbit*

LiDAR *Light Detection and Ranging*

LTE *Long Term Evolution*

M2M *Machine-To-Machine*

MCTIC *Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações*

MEC *Multi-access Edge Computing*

MEO *Medium Earth Orbit*

MIMO *Multiple-Input and Multiple-Output*

ML *Machine Learning*

mMTC *Massive Machine Type Communications*

mmWave *Ondas Milimétricas*

MR *Mixed Reality*

MTC *Machine Type Communication*

Multi-RAT *Multiple Radio Access Technology*

NIP *Network Infrastructure Provider*

NBR *Name-Based Routing*

NETCONF/YANG *Network Configuration Protocol/Yet Another Next Generation*

NFV *Network Functions Virtualization*

NIC *Network Interface Card*

NOMA *Non-Orthogonal Multiple Access*

NRS *Name Resolution Service*

NRTC *Name Resolution and Temporary Caching*

NS *Network Slicing*

NTN *Non-Terrestrial Network*

OFDM *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

OFDMA *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*

O-RAN *Open RAN*

O-RAN *Open RAN*

OSS *Operations Support System*

OWC *Optical Wireless Communications*

P2P *peer-to-peer*

PaaS *Platform as a Service*

PHY *Physical Layer*

QAC *Quantum-Assisted Communication*

QC *Quantum Computing*

QI *Quantum Internet*

QML *Quantum Machine Learning*

QoS *Quality of Service*

QR *Quick Response*

RAN *Radio Access Network*

RF *Radio Frequency*

RFID *Radio Frequency Identification*

RIS *Reconfigurable Intelligent Surface*

RT-RIC *Real-Time RAN Intelligent Controller*

SATSI *Space-Air-Terrestrial-Sea Integrated Networks*

SBA *Service-based Architecture*

SCEF *Service Capability Exposure Function*

SD-RAN *Software Defined RAN*

SDN *Software Defined Networking*

SDR *Software Defined Radio*

SD-RAN *(Software Defined RAN)*

SDWN *Software Defined Wireless Network*

SEN *Self-Evolving Network*

SLA *Service Level Agreement*
SNMP *Simple Network Management Protocol*
SmartNIC *Smart Network Interface Controller*
SOA *Service-Oriented Architecture*
SON *Self-Organizing Network*
SVN *Self-Verifying Naming*
switch-ASIC *Switch-Application Specific Integrated Circuits*
TCP *Transmission Control Protocol*
TIC *Tecnologia da Informação e Comunicações*
TS-SDN *Temporospatial SDN*
UAV *Unmanned Aerial Vehicle*
UDN *Ultra-Dense Networks*
UM-MIMO *Ultra-Massive MIMO*
uHDD *ultra-High Density Data*
uHEE *ultra-High Energy Efficiency*
uHRS *ultra-High Reliability and Sensing*
uHRUx *ultra-High Reliability and User experience*
uHS *ultra-High Security*
uHSLLC *ultra-High Speed with Low Latency Communication*
uHSLo *ultra-High Sensing and Localization*
uLLRS *ultra-Low Latency Reliability and Secure*
uMUB *universal Mobile Ultra-Broadband*
uRLLC *Ultra Reliable Low Latency Communications*
VIM *Virtualized Infrastructure Manager*
VLC *Visible Light Communications*
VMs *Virtual Machines*
VNFs *Virtual Network Functions*
VR *Virtual Reality*
WET *Wireless Energy Transfer*
WPT *Wireless Power Transmission*
XR *Extended Reality*

Sumário

1	Introdução	1
2	Análise de Casos de Uso, Requisitos e Escopos	3
2.1	Casos de Uso	3
2.2	Requisitos	6
2.2.1	Requisitos Funcionais	6
2.2.2	Requisitos Não-Funcionais	7
2.3	Escopos	10
3	Análise de Habilitadores	12
3.1	Energia	14
3.1.1	<i>Energy Harvesting</i>	14
3.1.2	<i>Wireless Power Transferring</i>	14
3.1.3	<i>Green Technology</i>	14
3.2	Sensoriamento e Atuação	15
3.2.1	<i>Ubiquitous Sensing</i>	15
3.2.2	<i>IoT-based Sensing</i>	15
3.3	Comunicação	16
3.3.1	<i>Unmanned Aerial Vehicle (UAV)</i>	16
3.3.2	<i>THz Communications</i>	16
3.3.3	<i>Visible Light Communications (VLCs)</i>	16
3.3.4	<i>Ultra-Massive MIMO</i>	17
3.3.5	<i>Intelligent Reflecting Surface (IRS)/Reconfigurable Intelligent Surface (RIS)</i>	17
3.3.6	<i>Optical Wireless Communications (OWCs)</i>	18
3.3.7	<i>Space-Air-Terrestrial-Sea Integrated Networks (SATSI)</i>	18
3.3.8	<i>Device-to-Device (D2D)</i>	18
3.3.9	<i>Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)</i>	19
3.3.10	<i>Fast Accurate Beamforming (FAB)</i>	19
3.3.11	<i>Haptic Protocols</i>	19
3.3.12	<i>Ultra-Dense Networks</i>	20
3.3.13	<i>Internet Information Broadcast Storage (IIBS)</i>	20
3.3.14	<i>Coordinated Multi-Point (CoMP)</i>	20
3.3.15	<i>Intelligent OFDMA</i>	21
3.3.16	<i>High Altitude Platforms (HAPs)</i>	21
3.3.17	<i>Disruptive Waveforms</i>	21
3.3.18	<i>Delay-awareness, Delay Tolerant Network (DTN) e Intermittent Connectivity</i>	22
3.3.19	<i>Communication, Computing, Control Convergence (CoCoCo)</i>	22
3.3.20	<i>Predictive Resource Allocation (PRA)</i>	23
3.3.21	<i>Dynamic Spectrum Allocation (DSA)</i>	23
3.3.22	<i>Cognitive Radio (CR)</i>	23
3.3.23	<i>Redes 3D (3D Nets)</i>	24
3.3.24	<i>Elastic-RAN (E-RAN)</i>	24
3.3.25	<i>Holographic Radio (HR)</i>	25
3.3.26	<i>Cell-Free Networking (CFN)</i>	25
3.3.27	<i>Molecular Communications</i>	25

3.4	Softwarização	26
3.4.1	<i>Software Defined Networking</i> (SDN)	26
3.4.2	<i>Temporospatial SDN</i>	26
3.4.3	<i>Network Function Virtualisation</i> (NFV)	26
3.4.4	<i>Multi-access Edge Computing</i> (MEC)	27
3.4.5	<i>Network Slicing</i> (NS)	27
3.4.6	<i>Open RAN</i>	27
3.4.7	<i>Digital Twins</i> (DTs)	28
3.4.8	<i>Avatares</i>	28
3.4.9	<i>Data Orientation e Information-Centric Networking</i> (ICN)	29
3.4.10	<i>Service Orientation e Service Oriented Architecture</i> (SOA)	29
3.4.11	<i>Compute First Networking</i> (CFN)	29
3.4.12	<i>In-Network Computing</i> (INC)	30
3.4.13	<i>Network Caching</i> (NC)	30
3.4.14	<i>Intent-Based Networking</i> (IBN)	31
3.4.15	<i>Augmented/Virtual Realities</i> (AR/VR)	31
3.4.16	<i>Cloud Elasticity</i>	32
3.5	Imutabilidade	32
3.5.1	<i>Distributed Ledger Technologies</i> (DLTs)	32
3.5.2	Blockchain: Ethereum, DFINITY, Cardano	32
3.5.3	Tangle: IOTA	33
3.5.4	<i>Smart Contracts</i> (SCs) e <i>Tokenização</i>	33
3.5.5	Micropagamentos	34
3.5.6	Mercado de Dados	34
3.5.7	Mercado de Coisas Conectadas ou <i>Things Economy</i>	34
3.5.8	Mercado de Espectro Eletromagnético	35
3.5.9	Mercado de Funções Virtuais de Rede	35
3.5.10	Mercado de Infraestrutura e Fatias	35
3.6	Inteligência	36
3.6.1	Inteligência Artificial (IA)	36
3.6.2	Computação Neuromórfica	36
3.6.3	<i>Zero-Touch Management</i> (ZTM)	36
3.6.4	Aprendizado de Máquina ou Machine Learning (ML)	37
3.6.5	<i>Self-Organizing Network</i> (SON)	37
3.6.6	<i>Self-Evolving Network</i> (SEN)	38
3.7	Segurança	38
3.7.1	Encriptação Homomórfica	38
3.7.2	Tecnologias de Privacidade	39
3.7.3	Tecnologias de Confiança/Reputação	39
3.7.4	Tecnologias de Identificação	39
3.8	Tecnologia Quântica	40
3.8.1	<i>Quantum Computing</i> (QC)	40
3.8.2	<i>Quantum-Assisted Communications</i> (QAC) e <i>Quantum Internet</i> (QI)	40
3.8.3	<i>Quantum Machine Learning</i> (QML)	41
3.8.4	<i>Post-Quantum Security</i>	41
3.9	Relevância dos Habilitadores	44
3.9.1	Análise pela Média Aritmética	44

3.9.2	Análise por AHP	48
4	Síntese de Arquiteturas 6G	55
4.1	Princípios de Projeto	55
4.2	Arquitetura Evolucionária	64
4.3	Arquitetura Disruptiva	70
5	Conclusão	80

1 Introdução

A arquitetura de um sistema de redes móveis define a forma como ele é organizado e abrange as funções e requisitos necessários para caracterizar os serviços oferecidos por esse sistema. O cenário vivido atualmente pelas comunicações móveis retrata o início da implantação de sua Quinta Geração de Rede Móvel Celular (5G) e representa uma nova arquitetura que deve comportar maior flexibilidade, além de suportar requisitos de baixa latência e aumento na largura de banda e vazão de dados [1, 2]. 5G está introduzindo uma arquitetura baseada em ambientes de nuvens híbridas, públicas e privadas. Ademais, novos sistemas de orquestração de rede, serviços que exploram inteligência artificial e aprendizagem de máquina resultarão em um nível de automação de rede sem precedentes [3].

Apesar das implantações do 5G ainda estarem em curso, as discussões sobre 6G já foram iniciadas em diversos países do mundo. Nesse cenário, o Brasil também iniciou esforços para o desenvolvimento desta nova tecnologia. O projeto Brasil 6G é um exemplo de uma iniciativa, financiada pelo *Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações* (MCTIC). Este relatório é resultado de um trabalho realizado pelos membros deste projeto e apresenta modelos de arquitetura para o 6G, avaliando casos de uso, requisitos e escopos que a envolvem.

A comunicação 6G será embasada em uma arquitetura com múltiplos elementos capazes de abranger diferentes famílias de casos de uso [4]. Os temas abrangidos por essas famílias são apontados neste relatório e se classificam em seis (6) modalidades, as quais envolvem temas como a demanda de comunicação em diferentes locais do planeta, a importância da agropecuária do futuro, interação entre o mundo físico e virtual, interações remotas avançadas, zonas seguras invisíveis e comunicação espacial. Esses casos de uso serão associados aos requisitos necessários para seu funcionamento.

Uma lista de técnicas que, de acordo com a nossa análise, deverá fazer parte do futuro 6G foi obtida por meio da pesquisa dos trabalhos relacionados no Relatório 2.3 [5]. Foram considerados cento e vinte e três (123) trabalhos, divididos em quatro (4) escopos, sendo eles: Universal (E1), Telecomunicações (E2), Computação (E3) e Especializada (E4). Dentro desses escopos, foram identificadas tecnologias habilitadoras que se relacionam aos requisitos definidos para os casos de uso das redes futuras. Para o desenho da arquitetura proposta por este trabalho, são necessárias medidas para avaliação desses habilitadores, as quais foram concebidas a partir dos seguintes aspectos: aderência, popularidade, inovação, impacto sinérgico, requisitos e relevância. São utilizados dois métodos para análise: O primeiro utiliza a média aritmética de notas alcançadas pelos habilitadores para os aspectos citados acima, e o segundo método utiliza uma técnica hierárquica, denominada *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Essas medidas permitem classificar a importância dos habilitadores e então determinar os princípios que regem o desenho da arquitetura 6G.

Os modelos de arquitetura apresentados neste relatório seguem duas abordagens: arquitetura evolucionária e arquitetura disruptiva. Para o primeiro caso, leva-se em consideração a necessidade de incluir novos conceitos para garantir o suporte de serviços fim-a-fim do 6G. No segundo caso, foram integrados os habilitadores definidos neste relatório, contudo, sem a preocupação de manter compatibilidade com as atuais gerações de comunicações móveis.

Este relatório, portanto, busca abordar todos os elementos relevantes de uma arquitetura 6G. O processo de estudo e busca é definido em seções subsequentes, conforme se segue: Na Seção 2, são definidos os casos de uso, requisitos e escopos do 6G. Na Seção 3, os habilitadores são elencados em termos dos fundamentos importantes para o 6G e são avaliadas suas relevâncias para o sistema. Os desenhos da arquitetura do 6G proposto por nossa equipe são apresentados

na Seção 4. Por fim, temos as considerações finais na Seção 5.

2 Análise de Casos de Uso, Requisitos e Escopos

Para a elaboração das propostas de arquiteturas deste relatório são pré-definidos conceitos de casos de uso, requisitos e escopos que devem reger o 6G. Os casos de uso são agrupados em diferentes famílias envolvendo demandas que ainda não foram cobertas pelas gerações antecedentes, além de desafios encontrados com o avanço da tecnologia para a chegada de um mundo cada vez mais virtualizado. Ademais, os requisitos funcionais e não funcionais são listados. E por fim, revisitamos os escopos estabelecidos em [5] após a avaliação de diferentes trabalhos sobre a arquitetura 6G.

2.1 Casos de Uso

Conforme descrito em [4], é possível agrupar os casos de uso de 6G em seis famílias, a saber:

1. Cobertura Mundial Extrema – Esta família envolve os casos de uso que tratam a demanda por comunicação em qualquer lugar do planeta, inclusive áreas remotas e de difícil acesso. Essa demanda surge por vários motivos, tais como a necessidade de obtenção de informações úteis ou até mesmo críticas para a sobrevivência, atividades científicas realizadas em regiões remotas, atividades econômicas realizadas em regiões desassistidas, monitoramento de biomas, monitoramento de animais silvestres, dentre outros. Dada a sua abrangência, esta família também inclui os casos de uso que lidam com sustentabilidade, tais como eficiência energética e hídrica e redução das emissões de Carbono. Casos de uso descritos: Conectividade Global, Monitoramento Global e Redução da Emissão de Carbono.
2. Agropecuária do Futuro – Dada a sua importância nacional e também global, esta família representa um caso de uso com múltiplas aplicações, tais como: pecuária de altíssima precisão, agricultura de altíssima precisão e logística de altíssima precisão. Aumentar a produtividade e qualidade de plantações e criações, reduzir custos, aperfeiçoar a rastreabilidade de todo o processo, reduzir tempo de entrega e a necessidade de armazenamento são exemplos de alguns objetivos desta família de casos de uso.
3. Gêmeos Digitais em Larga Escala – Esta família se concentra na demanda por uma integração mais próxima entre mundo virtual e físico com o intuito de melhorar o último (i.e., o mundo físico) com o auxílio do primeiro (i.e., mundo virtual). Com modelos virtuais interativos de larga escala, é possível assistir a tomada de decisão com informações, acurácia e temporalidade sem precedentes. Além do monitoramento, os gêmeos digitais em larga escala permitem que a atuação no mundo físico seja praticamente instantânea, mas também simples. Naturalmente, dados o tamanho e a complexidade, modelos de simulação e Inteligência Artificial são fundamentais para o sucesso desta família de casos de uso. Casos de uso descritos: Cidades Dinamicamente Inteligentes e Indústria 5.0.
4. Interações Remotas Avançadas – As novas formas de interação e as novas experiências imersivas compõem as aplicações dessa família. São descritos os seguintes casos de uso: Comunicação Tátil Imersiva, Telemedicina Imersiva, Eventos Imersivos, e Robôs Móveis Cooperativos e Interativos. A comunicação tátil imersiva envolve a capacidade de interagir com pessoas e objetos em ambientes virtuais com percepções de temperatura, peso, pressão do toque, entre outras sensações. Aplicações de telemedicina imersiva, manipulação de elementos perigosos (radioativos, químicos e biológicos), entre outras, farão parte

do rol das comunicações táteis imersivas. As experiências imersivas são apresentadas para ampliar as formas de comunicação, interação e consumo de conteúdos (mídias, esportes, games, etc.), tornando-as mais naturais. *Extended Reality* (XR) denota o conjunto das diversas tecnologias imersivas que fazem a ponte entre o mundo real e o simulado digitalmente e inclui *Augmented Reality* (AR), *Virtual Reality* (VR) e *Mixed Reality* (MR).

5. Zonas Seguras Invisíveis – Problemas como criminalidade, violência, furtos, acesso a áreas não autorizadas, terrorismo e similares ainda são relevantes em todo o planeta, especialmente em países em desenvolvimento. Embora as soluções de vigilância tenham evoluído de maneira significativa, ainda há abordagens invasivas e estressantes, por exemplo, em bancos, aeroportos e estádios. Esta família se foca em casos de uso que abordam esses cenários, oferecendo soluções mais adequadas utilizando evoluções previstas para redes 6G como sensoriamento avançado e alta flexibilidade da infraestrutura de comunicação e computação. Casos de uso descritos: Segurança em Espaços Públicos, Controle Transparente de Multidões e Redes Sem Infraestrutura e Redes Embarcadas.
6. Comunicação Espacial – Esta família se concentra nos desafios apresentados pela comunicação da Terra para a Lua e também na própria superfície da Lua. A importância desta família está na retomada de interesse recente em investimentos em projetos espaciais, incluindo voos sub-orbitais, orbitais, lunares e outros. A longa distância e a interferência sob ausência de atmosfera são algumas das questões relevantes nesse contexto, sobretudo para suportar aplicações sofisticadas. Casos de uso descritos: Comunicação Terra-Lua e Comunicação na Superfície da Lua.

A Tabela 1 apresenta um resumo sobre os artigos da literatura avaliados, identificando qual família de caso de uso cada trabalho descreve. A tabela também lista o nome dado a cada caso de uso no trabalho em questão. Para agrupar casos de uso que não se enquadraram em nenhuma das famílias identificadas no projeto, foi criada a família *Outros*.

Tabela 1: Casos de uso encontrados na literatura por família.

Família	Referências	Casos de Uso
Cobertura Mundial Extrema	[6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39]	Banda larga móvel melhorada, <i>Ultra Reliable Low Latency Communications</i> (uRLLC), aprendizagem profunda para comunicações, comunicações assistidas por <i>Quantum Computing</i> (QC), localização interna quântica assistida para <i>Ondas Milimétricas</i> (mmWave) e <i>Visible Light Communications</i> (VLC), roteamento e balanceamento de carga conjuntos e assistidos por Quantum, <i>Open RAN</i> (O-RAN), <i>Software Defined Networking</i> (SDN), <i>Network Functions Virtualization</i> (NFV) para 5G, <i>further enhance Ultra-Mobile Broadband</i> (feUMBB), <i>ultra-High Speed with Low Latency Communication</i> (uHSLLC), comunicação subaquática ou submarina, conservação da vida selvagem, inclusão digital e acesso à informação em tempo real, acesso não terrestre e <i>cross-haul</i> com plataformas de grande altitude, Integração global-local com colocação inteligente de dados, rede de cobertura global, cobertura ou conectividade de áreas remotas, tráfego nas estradas, procura e resgate, monitoramento e proteção ambiental contínuos, medidor inteligente, rastreador, segurança e controle de tráfego, <i>smartphones</i> para banda larga móvel aprimorada, acesso a áreas remotas ou áreas geograficamente isoladas, conectividade generalizada, conectividade ambiente, passeios turísticos em alto mar, <i>Massive uRLLC</i> , previsão de mobilidade, acomodação de tráfego assimétrica, conectividade em áreas remotas, banda de pelo menos 10 Mbps para todas as localizações do planeta, sensoriamento ambiental, <i>Unmanned Aerial Vehicle</i> (UAV)s, acesso de banda larga para passageiros em um avião, mobilidade não tripulada, mobilidade ferroviária inteligente, banda larga móvel tradicional, redes assistidas por veículos aéreos, sociedade superinteligente, Internet de tudo, <i>universal Mobile Ultra-Broadband</i> (uMUB), uHSLLC, <i>ultra-High Density Data</i> (uHDD), <i>Internet of Things</i> (IoT) de energia zero, acesso e <i>backhaul</i> integrados, comunicações de longa distância e alta mobilidade, redes integradas espaço-ar-solo, previsão de mobilidade, utilização de mmWave- <i>Non-Orthogonal Multiple Access</i> (NOMA) para uma potencial solução para a disponibilização de enormes larguras de banda disponíveis nas frequências entre 28GHz a 60GHz, conectividade pervasiva, sistema de economia de energia de cooperação <i>Multiple Radio Access Technology</i> (Multi-RAT)
Agropecuária do Futuro	[6, 7, 40, 41, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 42, 23, 24, 43, 29, 30, 31, 32, 44, 37]	Comunicação massiva do tipo máquina <i>Massive Machine Type Communications</i> (mMTC), transmissão multiusuário com ajuda quântica, cobre o <i>testbed Future Internet of Things</i> (FIT), <i>Elastic Radio Access Network</i> (RAN) para atender a demanda surtuosa de tráfego em escala, identificadores desacoplados de localizadores, RAN totalmente desacoplado, funções de rede habilitadas por gêmeos cibernéticos, sistema operacional de rede em nuvem, uHDD, <i>ultra-High Energy Efficiency</i> (uHEE), <i>ultra-High Reliability and Sensing</i> (uHRS), tráfego de estrada, agricultura de precisão, circular e autossustentável com automação <i>zero touch</i> e pegada de emissão zero, agricultura inteligente, agricultura inteligente com tecnologia de gêmeo digital, Nano-Internet das coisas, Bio-Internet das coisas, inclusão rural, acesso de banda larga rural, rastreamento da cadeia de suprimentos e aplicativos de envio de mercadorias, controle remoto de veículo baseado em vídeo, conservação da vida selvagem, jogos em campo
Gêmeos Digitais em Larga Escala	[41, 9, 45, 10, 11, 46, 12, 13, 47, 14, 48, 15, 49, 50, 16, 17, 18, 51, 52, 53, 42, 21, 54, 22, 55, 56, 24, 57, 58, 43, 59, 27, 28, 60, 29, 30, 31, 32, 61, 45, 37, 38, 62, 63]	Gêmeos cibernéticos para representar nós finais, privacidade e mercado de dados por meio de gêmeos cibernéticos, cidade inteligente, planejamento urbano, ambientes inteligentes, automação, automação industrial, automação robótica previsão em nanoescala, automação de fábrica de missão crítica, assistência virtual e controle cognitivo humano avançado, monitoramento de áreas urbanas, alocação de recursos de um sistema <i>Light Detection and Ranging</i> (LiDAR) na automação de fábricas, aplicações industriais para além da Indústria 4.0, gestão da qualidade na indústria, redesenho de produtos industriais, planejamento de sistema industrial, planejamento logístico e desenvolvimento de produtos industriais, gerenciamento de frota para comunicação de tipo de máquina massiva, manufatura remota para comunicação de tipo de máquina crítica, cenário de manufatura com IoT e Indústria 4.0, Gêmeos Digitais cognitivos para seres humanos no auxílio à saúde e educação, sinestesia na Internet, interação inteligente, serviços de saúde prestados eletronicamente através da Internet (<i>e-health</i>), monitoramento de saúde e prevenção de doenças primárias, integração homem-cérebro e máquina para direção assistida e manufatura inteligente, direção autônoma, direção inteligente, Internet-de-tudo, verticais holográficas e sociedade, Internet de bio-nano-coisas, serviços centrados no ser humano, mercado de dados <i>Machine-To-Machine</i> (M2M), economia compartilhada, contratos sociais, manufatura definida por software, manufatura distribuída, redes de suprimento cognitivo, produção fluída, <i>smart grids</i> , saúde inteligente, educação, Indústria 5.0, IoT inteligente, espaços inteligentes, veículo autônomo, UAV controlado remotamente, montador robótico em fábrica inteligente, exame de UAVs controlados remotamente, mobilidade de veículos autônomos, cidades superinteligentes integradas, suporte de <i>Artificial Intelligence</i> (AI) centrado no ser humano, conectividade sustentável e suporte de Inteligência Artificial (IA), Sociedade 5.0, manufatura de alta precisão, previsão inteligente de desastres, ambientes inteligentes assistidos por digitais gêmeos, inteligência bidirecional entrelaçada (natural e/ou artificial), autenticação em IoT, negócio seguro e privado, sistema de tráfego inteligente, robótica conectada, sistemas autônomos, uMUB, uHSLLC, uHDD, controle industrial de alta precisão, indústrias conectadas, rede de enxame (<i>swarm networking</i>), gêmeos digitais dinâmicos, mundos virtuais, conectividade pervasiva, mobilidade não tripulada, autenticação em IoT, aplicações na indústria, latência em uma rede virtualizada

Família	Referências	Casos de Uso
Interações Remotas Avançadas	[6, 8, 9, 45, 64, 65, 66, 67, 10, 11, 12, 13, 14, 48, 15, 68, 49, 16, 17, 18, 53, 42, 19, 20, 21, 54, 22, 55, 56, 69, 24, 70, 25, 43, 71, 26, 27, 28, 72, 60, 29, 30, 31, 32, 73, 74, 75, 61, 45, 76, 37, 38]	Internet tátil ou háptica, Internet das coisas tátil aplicações hápticas, <i>ultra-High Reliability and User experience</i> (uHRUx), <i>ultra-Low Latency Reliability and Secure</i> (uLLRS), jogos em campo, cuidados da saúde, redes de UAVs, serviços de saúde prestados eletronicamente através da Internet (<i>e-health</i>), comunicação holográfica, projeção holográfica, serviços baseados em comunicação holográfica, comunicações robóticas e sistemas autônomos, AR, VR, XR, MR, comunicações do tipo máquina críticas e massivas, redes de <i>Machine Type Communication</i> (MTC) heterogêneas, <i>Internet of Healthcare Things</i> (IoHT), localização e sensoriamento, jogos imersivos, monitoramento de saúde, sistema de monitoramento de saúde em tempo real, saúde inteligente, direção assistida, direção remota, direção autônoma, comunicação tátil ou háptica, tele-robótica, Computação de Borda sob demanda, Computação Industrial, <i>Blockchain</i> confiável de telecomunicações, teletransporte holográfico, sistemas de transporte e logística totalmente autônomos, serviços de UAVs, sensoriamento e realidade digitais totalmente sensoriais, direção totalmente automatizada, Internet Industrial, realidade digital, assistente pessoal, presença holográfica, sistemas cibernéticos, transumanismo, mobilidade ferroviária inteligente, realidade estendida móvel, integração ou interação cérebro-computador sem fio, jogos de multijogadores com realidade aumentada e virtual, percepções visuais táteis, cirurgia remota, robô de cirurgia remota, Internet de coisas nano-bio, Vida conectada, saúde digital personalizada e precisa, <i>Xhaul</i> de capacidade extrema, serviços multissensoriais, realidade estendida imersiva multissensorial e móvel, teletransporte holográfico multissensorial, comunicações hápticas multissensoriais para realidade virtual e aumentada, computação afetiva multissensorial, comunicação holográfica, telepresença, educação com XR remota, consumo de experiências digitais sobre produtos físicos, interações entre o cérebro e o computador, vídeo multivisualização ultra alta resolução (8K) para aplicativos de <i>Augmented and Virtual Realities</i> (AR/VR), comunicações dispositivo a dispositivo, <i>Industrial Internet of Things</i> (IIoT), IIoT inteligente de grande escala, casa inteligente, estímulos holográficos, robótica massiva, banda larga móvel, comunicação biomédica, transferência de informações dos cinco sentidos, uMUB, uHSLC, uHDD, banda larga ultra alta para novas mídias, transmissão multissensorial, Internet dos sentidos, rede de área corporal personalizada, uRLLC, <i>extreme</i> uRLLC, <i>massive</i> uRLLC, <i>Distributed Ledger Technologies</i> (DLT) e M2M, M2M em IoT
Zonas Seguras Invisíveis	[6, 7, 8, 9, 77, 78, 79, 67, 10, 11, 12, 13, 15, 53, 42, 21, 54, 24, 80, 58, 43, 29, 30, 31, 32, 73, 81, 37, 38, 82]	Deteção multiusuário assistida por Quantum, fonte aberta segura, <i>ultra-High Security</i> (uHS), <i>ultra-High Sensing and Localization</i> (uHSLo), jogos em campo, aplicação da lei, busca e resgate, aplicações IoT, sistemas ciber-físicos, <i>smart grids</i> , lares inteligentes, cidades inteligentes, Quantum Internet, localização e sensoriamento, imagem e deteção, deteção e tratamento de fraude aprimorados, situações de desastres naturais, rede sobre demanda (por exemplo, em eventos), planejamento urbano, infraestrutura e soluções de comunicações 6G descentralizadas e confiáveis, monitoramento de segurança em <i>hotspots</i> e cidade inteligente, socorro em desastres, espaços inteligentes, infraestrutura autônoma de missão crítica, robótica sem fio, <i>Trusted networks</i> , <i>Trust networking</i> (os casos de uso variam desde uma administração simples e única, que lida com toda a rede confiável com todos os seus dispositivos até casos em que os dispositivos são de propriedade de partes independentes e diferentes segmentos, camadas ou subsistemas da rede são de propriedade e gerenciados por várias partes interessadas diferentes com possíveis conflitos de interesse), negócio seguro e privado, casa inteligente, direção inteligente, ambiente inteligente, infraestrutura inteligente, negócio seguro e privado, sistema de tráfego inteligente, DLT, segurança pública, automação social, realidade aumentada, contratos inteligentes e <i>Blockchain</i> como plataformas de computação distribuídas
Comunicação Espacial	[6, 10, 17, 24, 83, 29, 30, 31, 32, 37]	Estimação e deteção de canais assistidos por Quantum, cobertura digital em todo o mundo e além, viagem espacial, <i>Non-Terrestrial Network</i> (NTN), satélites, UAVs, conectividade espacial
Outros	[84, 85, 61]	Pagamento de terceiro utilizando tecnologia <i>Blockchain</i> no provisionamento de <i>slices</i> 5G, proteção de <i>logs</i> de sistemas contendo informações de rastreamento de invasões ou ataques maliciosos, dispositivos de energia zero

2.2 Requisitos

Esta seção apresenta os requisitos funcionais e não-funcionais de uma arquitetura de sistema de comunicação de 6G. Tradicionalmente, os requisitos funcionais desse tipo de sistema dizem respeito a aspectos de comunicação, tais como vazão, latência e cobertura. No entanto, redes 6G incluem também aspectos relacionados a sensoriamento, segurança e mobilidade [4, 86].

2.2.1 Requisitos Funcionais

A Tabela 2, introduzida em [4], lista os requisitos funcionais identificados para um sistema 6G, assim como o que se espera de cada requisito considerando as famílias de casos de uso

descritas na seção anterior. A tabela apresenta requisitos tradicionais e informações associadas que não exigem considerações adicionais. Por outro lado, a tabela também apresenta requisitos e valores (ou informações associadas) que exigem comentários complementares, os quais são apresentados a seguir.

A cobertura por célula, para a família de Cobertura mundial extrema, possui dois valores porque foi identificado que ambos podem ser bastante representativos e são muito distintos. Em geral, a cobertura por célula se refere a uma estação rádio base, mas o valor de 3.000 km se refere a um satélite. A confiabilidade é um requisito que se tornou importante a partir de redes 5G, porém, em redes 6G, é esperado um novo patamar de confiabilidade, podendo chegar a 99,9999999% (ou $1-10^{-9}$, conforme mostrado na Tabela 2). A eficiência energética também se torna um requisito importante em redes 6G, com a intenção de superar em pelo menos dez vezes o que é obtido em rede 5G, mas podendo alcançar uma eficiência até cem vezes maior para a família de casos de Comunicação espacial. Essa demanda surge para comunicação na superfície lunar, dadas as restrições encontradas para produção e armazenamento de energia nesse ambiente.

Na Tabela 2, os requisitos mais diretamente associados a sensoriamento são a precisão espacial do posicionamento dos dispositivos móveis e a resolução de *Radio Frequency* (RF) e de imagem, a qual está relacionada às aplicações que demandam o uso da rede móvel para captura de imagens através de sinais de RF ou câmeras multiespectrais. O termo “Nominal” se refere a uma resolução de RF/Imagem equivalente a 1920 x 1080 pixels e o termo “Crítico” se refere a resoluções 4K ou 8K. Nesse contexto, vale destacar a exigência de precisão espacial de algumas famílias, como Gêmeos digitais em larga escala e Interações remotas avançadas, com valor de 1 cm, além da família Comunicação espacial que pode exigir menos de 0,1 cm. A justificativa para um valor tão baixo na família Comunicação espacial está relacionada com algumas tarefas críticas que precisam eventualmente ser realizadas à distância, como a acoplagem de módulos espaciais ou lunares.

Com relação aos requisitos segurança e privacidade, as redes 5G são utilizadas como referência. Assim o termo “Nominal” significa que o requisito deve ser no mesmo nível dessas redes, enquanto o termo “Crítico” indica que o nível deve ser superior. Algumas famílias, como Gêmeos digitais em larga escala, Interações remotas avançadas e Zonas seguras invisíveis, lidam com alto volume de dados muito sensíveis aos usuários. Isso ocorre pela própria natureza das aplicações envolvidas, exigindo que a arquitetura de Redes 6G tenha atenção especial aos requisitos de segurança e privacidade. Nesse contexto, alguns conceitos começam a se consolidar, como Segurança Cibernética 360 (*360-Cybersecurity*) e Projeto de Privacidade-por-Engenharia (*Privacy-By-Engineering Design*), descritos em [86]. Segurança Cibernética 360 se refere a não focar apenas na segurança fim-a-fim, mas considerar também uma abordagem de cima (arquitetura e protocolos) para baixo (software embarcado). A principal motivação é que a maioria das vulnerabilidades de segurança se deve a códigos mal escritos. O Projeto de Privacidade-por-Engenharia visa garantir que mecanismos de privacidade sejam integrados de forma nativa nos protocolos e na arquitetura. Basicamente, o intuito é garantir o maior nível de privacidade por padrão, a menos que seja explicitamente informado algo diferente.

2.2.2 Requisitos Não-Funcionais

Para atender as famílias de casos e também para incorporar novas tecnologias habilitadoras, vários requisitos não-funcionais foram identificados para Redes 6G, os quais são descritos a seguir.

- Flexibilidade – conforme descrito anteriormente, os casos de uso identificados para redes 6G possuem requisitos funcionais bastante diversos. Por exemplo, a vazão por usuário pode variar de 100 Kbps até 1 Tbps, enquanto a precisão espacial varia de 0,1 a 100 cm, dependendo da família de caso de uso. Nesse contexto, é fundamental que redes 6G sejam altamente flexíveis, se adaptando de maneira eficiente às necessidades específicas de cada cenário.
- Modularidade – em redes 5G, os sistemas de telecomunicações já têm se mostrado extremamente complexos. Portanto, em redes 6G, não é previsto que seja diferente, uma vez que a expectativa é de evolução da infraestrutura com novos recursos e suportes a mais serviços e aplicações. Uma abordagem modular, na qual as funcionalidades necessárias são ativadas sob demanda, é essencial em redes 6G.
- Robustez – tradicionalmente, sistemas de telecomunicações são robustos, sobretudo graças a redundância em várias partes da infraestrutura. No entanto, a partir de redes 5G, a preocupação com esse requisito tem merecido atenção especial devido à intensa adoção de *softwarização*, *virtualização* e *cloudificação*. Além disso, para atender a demanda de aplicações muito sensíveis, como telemedicina, é necessária atenção especial a este requisito.
- Programabilidade – em redes 5G, programabilidade já aparece como um requisito, mas redes 6G leva sua demanda a um novo patamar, sobretudo em termos de escala e heterogeneidade. Para suportar casos de uso como Gêmeos Digitais em Larga Escala, é fundamental ter recursos para programar de maneira padronizada diversos tipos de equipamentos, em uma escala e velocidade sem precedentes.
- *AI/Machine Learning* (ML) como serviço – em redes 6G, é previsto um uso intensivo de AI/ML em diversas tarefas de operação e gerência dos sistemas de telecomunicações. Além disso, são também previstos novos serviços e aplicações que farão uso amplo de AI/ML, conforme ilustrados nos casos de uso de Interações Remotas Avançadas e Zonas Seguras Invisíveis. Assim, a disponibilização de AI/ML como serviço se torna um requisito importante em redes 6G, permitindo o compartilhamento de modelos, o uso de interfaces padronizadas, acesso compartilhado e controlado a dados, dentre outras vantagens.

Tabela 2: Lista de requisitos chave 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 Fifth Generation New Radio (5G NR))	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
<i>Adjacent Channel Leakage Ratio</i> (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 ($1/\text{km}^2$)	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

Os requisitos não-funcionais influenciam a arquitetura rede. Além de guiar os princípios utilizados no projeto, eles vão provocar consequências diretas no projeto da arquitetura da Rede 6G.

2.3 Escopos

Com o objetivo de avaliar os trabalhos do estado da arte sobre Arquiteturas 6G foram definidos 4 escopos (conforme apresentados na Tabela 3): *i)* E1, que engloba trabalhos abrangentes com visão em alto nível; *ii)* E2, que agrupa trabalhos focados em soluções para redes de telecomunicações; *iii)* E3, que consiste em trabalhos focados em redes de computadores; e por fim, *iv)* E4, que engloba trabalhos que focam em aspectos específicos da comunicação em rede com alto nível de profundidade.

Tabela 3: Sumários dos escopos relacionados a arquitetura 6G.

Tipo		Descrição
E1	Universal	Maior escopo possível no qual as prospecções para o 6G se aplicam. Foco em todas as infraestruturas físicas e virtuais para cobertura global e interplanetária. No geral as arquiteturas apresentam uma visão em largura da arquitetura, sem focar determinados aspectos. Apresentam ainda referências aos diversos casos de uso associados.
E2	Telecomunicações	Trata do escopo de sistemas e rede de telecomunicações para redes 6G. Ou seja, foco é nos aspectos relacionados a troca de informação entre terminais e nós. É o foco tradicional de redes, incluindo RAN e núcleo. Pode até abordar questões de computação, mas elas são apenas suporte. No geral estas arquiteturas possuem uma relação com arquiteturas existentes das redes móveis e apresentam componentes e conceitos já utilizados e vislumbram uma evolução da arquitetura atual.
E3	Computação	Trata do escopo de computação em data center, borda, distribuída, descentralizada na rede. Ou seja, o foco é em aspectos relacionados ao processamento de informação na realização de uma arquitetura para rede 6G. Os aspectos de rede aparecem, mas não são o foco.
E4	Especializada	Estas arquiteturas apresentam algum aspecto relacionado com 6G que pode influenciar a sua arquitetura. No geral este aspecto é apresentado ou utilizado em profundidade na descrição. Entre os exemplos destes aspectos estão, entre outros, a segurança e a gestão.

Conforme pode ser observado na Figura 1, foram avaliados 123 trabalhos, dos quais 44% (54 artigos) foram selecionados e classificados por abordarem temas relacionados à concepção de uma Arquitetura 6G. Estes trabalhos foram divididos pelos escopos da seguinte maneira: E1, 12 publicações (22.22%); E2, 9 publicações (16.67%); E3, 10 publicações (18.52%); e, E4, 23 publicações (42.59%). Pela divisão, percebe-se que a maioria dos trabalhos pertence ao escopo E4, o que significa que grande parte das pesquisas tem focado em aspectos específicos, tais como segurança, experimentação e desempenho.

No curso da pesquisa foram identificadas tecnologias habilitadoras que despontam como respostas aos requisitos definidos pelas redes atuais e futuras (e.g. 6G). Essas tecnologias foram divididas como fundamentos (conforme detalhado na Tabela 4), que representam agrupamentos lógicos pelo enfoque, técnica ou assunto. Enquanto alguns fundamentos são amplamente abordados no estado da arte, tais como a ‘Softwarização’, outros são mais restritos à trabalhos específicos, normalmente caracterizados como pertencentes ao escopo E4, tais como o ‘Quantum’.

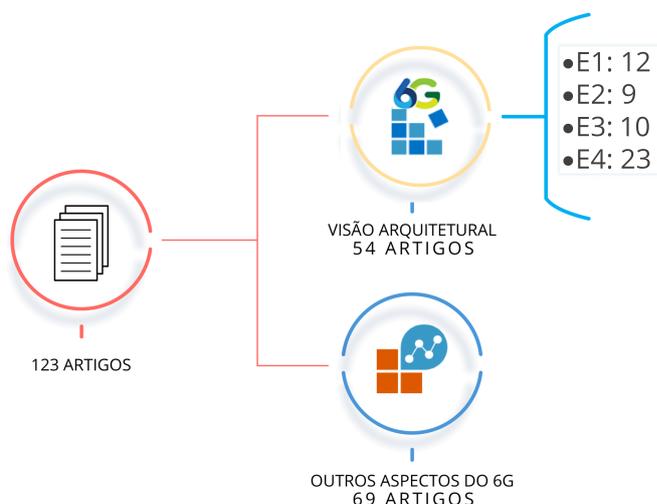


Figura 1: Organização e Classificação dos Trabalhos Avaliados.

Tabela 4: Classificação dos fundamentos importantes para 6G.

Fundamento	Descrição
Energia	Oferta, gasto e transferência de energia que alimenta os sistemas.
Sensoriamento e Atuação	Sensoriamento do mundo físico. Programabilidade das coisas conectadas.
Comunicação	Conectividade entre componentes da arquitetura, incluindo aspectos de camada física, enlace, rede. Sistemas e redes digitais. Inclui novas tecnologias de comunicação.
Softwarização	Papel do software no 6G. Inclui aspectos relacionados a virtualização, servitização, representação (gêmeos digitais), fatiamento e fragmentação funcional. Inclui habilitadores relacionadas a novas realidades, virtuais ou aumentadas.
Imutabilidade	Cobre os fundamentos associados ao registro imutável de informações e a computação determinística descentralizada. Inclui as chamadas DLTs. Como consequência, cobre as questões relacionadas a micropagamentos, tokenização, <i>smart contracts</i> e criptoativos.
Inteligência	Suporte a tomada de decisão via técnicas de AI, ML, <i>Self-Organizing Network</i> (SON), pilotos automáticos. Inclui o hardware de AI, como por exemplo computação neuromórfica.
Segurança	Cobre os pilares clássicos da segurança: sigilo, integridade, autenticação, disponibilidade, autorização, confiança, transparência, identidade, identificação, rastreabilidade, reputação.
Quantum	Tecnologia quânticas como computação, comunicações, segurança, aprendizado de máquina, etc.

A Tabela 5 apresenta uma análise sobre o percentual de trabalhos de cada escopo que citam habilitadores tecnológicos de cada fundamento. Pode-se perceber, que certos fundamentos são amplamente abordados na literatura correlata, notadamente Comunicação, Softwarização e Inteligência. Percebe-se também que o escopo E1 engloba os trabalhos que contemplam os fundamentos definidos nesta pesquisa de maneira mais completa.

Tabela 5: Tabela de Análise de Fundamentos em relação aos Escopos.

Fundamentos	Escopos			
	E1	E2	E3	E4
Energia	50%	44.44%	20%	21.7%
Sensoriamento	33.3%	11.1%	10%	17.4%
Comunicação	91.7%	77.8%	70%	78.3%
Softwarização	91.7%	100%	90%	78.3%
Imutabilidade	25%	11.1%	20%	69.6%
Inteligência	83.3%	88.9%	80%	65.2%
Segurança	41.7%	11.1%	10%	17.4%
Quântica	50%	0%	0%	21.7%

3 Análise de Habilitadores

A Tabela 4 apresenta uma classificação dos fundamentos importantes para o 6G. Na Atividade 2.3 [5], elencamos um total de 72 habilitadores tecnológicos, divididos de acordo com essa classificação. Nesta seção, faremos uma avaliação dos habilitadores considerando os seguintes aspectos:

- **Aderência:** Será determinado o nível de aderência com relação a cada um dos escopos E1, E2, E3 e E4. A pergunta aqui é: o quanto esse habilitador é aderente ao cenário E1, por exemplo? Nesse contexto, 0 significa pouco aderente, enquanto 10 significa totalmente aderente. Totalmente aderente significa que ele se ajusta perfeitamente a esse escopo, podendo ser empregado imediatamente. Nota 0 significa que um habilitador não se encaixa em um escopo, não podendo ser aplicado nele.
- **Popularidade:** Trata-se do nível de popularidade determinado a partir da revisão bibliográfica feita na Atividade 2.3. Deseja-se atribuir um valor à resposta da seguinte pergunta: Esse habilitador é popular na literatura revisada? Utilizaremos os resultados do relatório anterior [5] para determinar o nível de popularidade.
- **Inovação:** Será atribuído um ponto na régua que tem como origem a nota 0, significando conservador (i.e., já existe em 4G/5G); e a nota final 10, significando totalmente disruptivo (em relação a 5G padronizado pelo *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*). A pergunta aqui é: esse habilitador é inovador? A intenção é avaliar qualitativamente o nível de inovação do habilitador.
- **Impacto Sinérgico:** Será atribuído um valor relativo ao grau de impacto sinérgico do habilitador em todo o projeto de 6G. Quanto maior o impacto sinérgico, mais outros habilitadores podem se aproveitar desse habilitador no seu próprio desenho. Por exemplo, DLT é um habilitador de alto impacto sinérgico, pois pode impactar em muitas funcionalidades da camada de *software* e de rede. Por outro lado, superfícies inteligentes impactam relativamente menos nos demais habilitadores. Pouco impacto (nota 0) significa que nenhum outro habilitador tira proveito desse diretamente. Por outro lado, muito impacto (nota 10) significa que todos os outros tiram vantagem direta desse.
- **Requisitos:** Será atribuído um valor relativo à importância do habilitador em relação aos requisitos do 6G. Portanto, a maior nota é para os habilitadores com maior importância no atendimento aos requisitos do 6G. A pergunta aqui é: o quanto esse habilitador ajuda no atendimento aos requisitos do 6G? A nota 10 indica que ele extremamente importante para atender os requisitos do 6G. A nota 0 significa que 6G pode prescindir desse habilitador em termos de atendimento de requisitos.

- **Relevância:** Será atribuído um nível de relevância do habilitador com relação ao desenho do 6G. O nível de relevância será obtido de duas maneiras: *i*) a partir da média aritmética dos itens anteriores (i.e., Aderência, Popularidade, Inovação, Impacto Sinérgico e Suporte a Requisitos) e *ii*) usando um método de comparação em pares, denominado AHP [87].

Para realizar a avaliação dos habilitadores em relação aos aspectos de Aderência, Popularidade, Inovação, Impacto Sinérgico e Suporte a Requisitos, desenvolvemos a metodologia ilustrada na Figura 2. Ela inicia com uma análise de aderência do habilitador (H) em termos dos escopos E4, E3, E2 e E1, ou seja, iniciando a análise de aderência do escopo especializado e indo para o escopo global. Em seguida, é feita uma análise da frequência relativa de H com relação às Tabelas 8-12 do relatório da Atividade 2.3 [5]. Continuando, avalia-se o grau de inovação de H, seguido do impacto sinérgico. Por fim, verifica-se com que grau H contribui para atender os requisitos do 6G tal qual mostrado na Tabela 2.

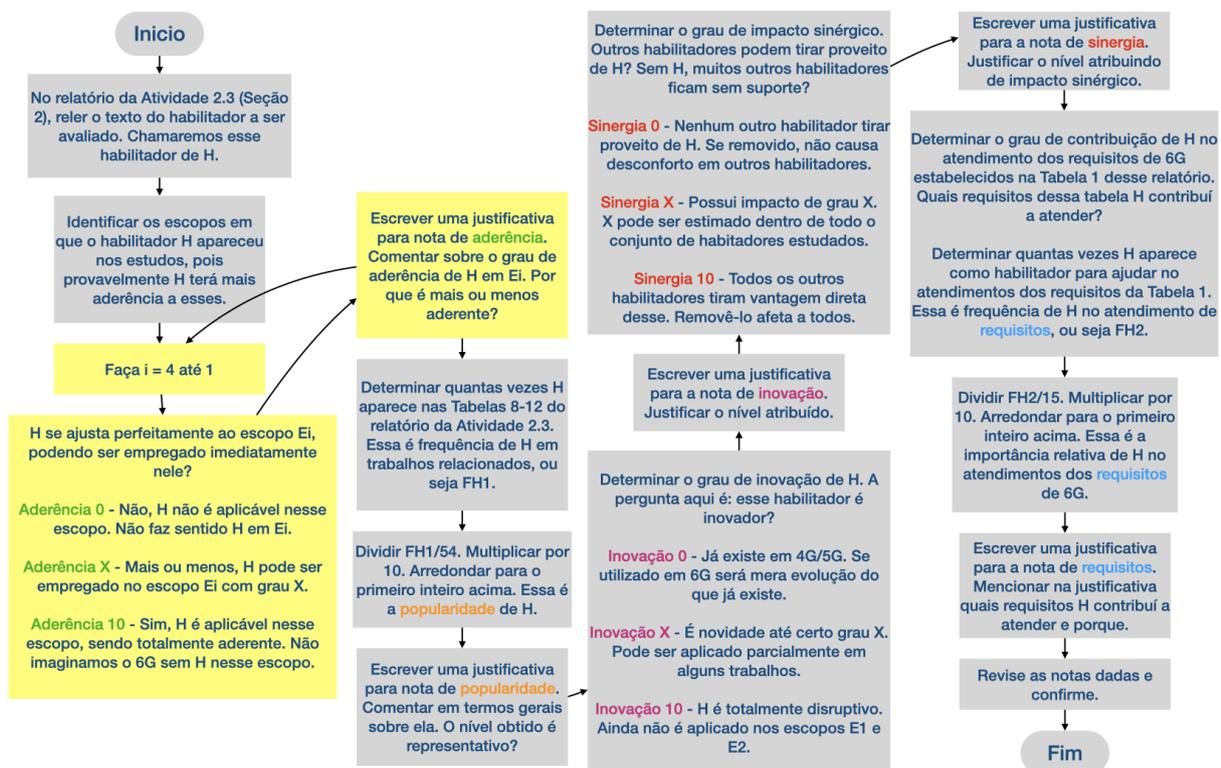


Figura 2: Metodologia desenvolvida para análise de mérito de habilitadores para o 6G. Concepção e desenho: Antônio M. Alberti

Após a avaliação dos habilitadores em relação aos aspectos ilustrados na Figura 2, analisamos, para cada fundamento, a relevância dos habilitadores com relação ao desenho do 6G. Como mencionado anteriormente, essa análise é conduzida utilizando-se dois métodos. No primeiro, a relevância de um habilitador H é obtida como a média aritmética das notas por ele alcançadas nos demais aspectos. Portanto, essa avaliação considera todos os aspectos igualmente relevantes para o desenho do 6G. Na segunda abordagem (i.e., AHP), a relevância de um habilitador H em um aspecto Q é obtida de forma relativa ao desempenho dos demais habilitadores no mesmo aspecto. Adicionalmente, cada aspecto Q recebe um peso que reflete sua importância para o desenho do 6G. Nas seções a seguir, primeiramente apresentamos a avaliação dos habilitadores

em relação aos aspectos Aderência, Popularidade, Inovação, Impacto Sinérgico e Suporte a Requisitos (Seções 3.1 a 3.8). A análise da relevância de cada habilitador em seu fundamento é apresentada na Seção 3.9.

3.1 Energia

Nesta seção, são analisados os habilitadores relacionados ao fundamento de energia. Ou seja, oferta, gasto e transferência de energia em 6G.

3.1.1 *Energy Harvesting*

É um habilitador muito dependente de um cenário de aplicação e, portanto, bastante especializado, o que tem alta aderência ao escopo E4 (nota 10). Apesar disso, verifica-se um certo nível de aderência também em relação aos demais escopos (nota 7) por se tratar de um habilitador que já pode ser aplicado. É um habilitador pouco popular (nota 2), entretanto, quando se refere a energia, grande parte dos trabalhos da literatura o citam. Este habilitador é pouco inovador (nota 3), pois a viabilidade, utilização e aplicação são bem conhecidas a muito tempo, mesmo que ainda requeira avanços tecnológicos para massificação do uso. A sinergia é baixa pois, ainda que vários cenários possam considerar este habilitador, não influencia diretamente outros habilitadores. *Energy harvesting* pode contribuir com um requisito da Tabela 2, por isso a nota 1.

3.1.2 *Wireless Power Transferring*

Também conhecida como *Wireless Energy Transfer* (WET) ou *Wireless Power Transmission* (WPT), consiste na transmissão de energia utilizando a comunicação sem fio como canal de conexão entre uma fonte de energia e um dispositivo [88]. Este habilitador não possui aderência aos escopos E1 e E3 visto que nestas famílias de arquiteturas este tipo de comunicação não está diretamente relacionado com os usos e aplicações vislumbradas. Por outro lado, há certa aderência no uso deste habilitador para os escopos E2 e E4 e neste caso a nota atribuída foi igual a 4. No Relatório da Atividade 2.3 [5], há 2 citações diretas em um total de 54 trabalhos avaliados, logo, a sua popularidade será de 0,37 e, neste caso, arredondada para 1. No que diz respeito à inovação, este habilitador é disruptivo para o 6G pois ainda não é utilizado na arquitetura e, portanto, recebeu nota 7. Há uma grande sinergia entre este habilitador e *Energy Harvesting* que aparece em muitos outros trabalhos da literatura e assim o habilitador recebeu a nota 5. Este habilitador está diretamente ligado com o requisito eficiência energética, ou seja, um em 15, e por isso recebeu nota 1.

3.1.3 *Green Technology*

A demanda por tecnologias limpas só aumenta à medida que a sociedade percebe os impactos da atividade humana no meio ambiente. Por se tratar da seleção de tecnologias com menor impacto ambiental, destacam-se as tecnologias fotônicas, computação neuromórfica, dentre outras que quando comparadas com as gerações anteriores possuem menor impacto. Consideramos que as tecnologias verdes podem ser aplicadas em todos os escopos, em maior ou menor grau, dependendo de qual tecnologia está sendo aplicada. Nesse contexto, consideramos sua aplicabilidade homogênea em 70% desde E4 até E1. Dos artigos estudados, 3 mencionam a importância

da seleção de tecnologias de menor impacto no desenho do 6G. Portanto, tem-se que esse habilitador é pouco popular, com nota 1. Desenhar considerando sustentabilidade não é novidade, entretanto, algumas tecnologias que permitem reduzir a pegada energética e outros impactos são inovadores. Por esse motivo, determinamos uma nota 7. A sinergia com outros habilitadores depende de como as tecnologias verdes se integram às demais. De forma geral, versões menos impactantes de algumas tecnologias podem ser introduzidas com pouca dependência. Por isso, consideramos o grau de sinergia com outros habilitadores como sendo baixo (nota 4). Com relação ao suporte de requisitos do 6G, consideramos que as tecnologias verdes podem auxiliar nos seguintes requisitos: acesso ao espectro, densidade de terminais, precisão espacial, eficiência espectral e energética (i.e., 33% dos requisitos).

3.2 Sensoriamento e Atuação

Nesta seção, são analisados os habilitadores relacionados ao fundamento de sensoriamento.

3.2.1 *Ubiquitous Sensing*

Ubiquitous Sensing representa a capacidade de sensores no mundo físico de forma onipresente. Apesar de ser inegável a densidade de dispositivos que devem promover essa ubiquidade, o tema apresenta baixa popularidade na literatura analisada (cerca de 7,41%). Com aderência significativa aos escopos E1 (90%) e E4 (80%), integrada à infraestrutura 6G a discussão de serviços de personalização orientados por AI para recursos virtuais confiáveis de IoT a partir da conectividade ubíqua, ampliando a ubiquidade de sensoriamento do mundo físico. Há baixa aderência ao escopo E2 (20%) e E3 (20%), integrando parte da arquitetura de plano de usuário e, geralmente, associada à computação de borda. Há sinergia de 80% relativa aos habilitadores que promovem a abstração da infraestrutura de *Information Communications Technology* (ICT), como coisas conectadas que podem ser sensorizadas, representadas por gêmeos digitais e *softwarizadas*. Este habilitador apresenta nível médio de inovação, pois já é explorado a bastante tempo em aplicações diversas, muito embora impacte na arquitetura de redes de sexta geração em relação a 46,67% dos requisitos listados na Tabela 2, a saber: Latência, Eficiência energética, Privacidade, Segurança, Densidade, Precisão espacial e Resolução RF/Imagem.

3.2.2 *IoT-based Sensing*

IoT-based Sensing está concentrado na interconexão de pequenos dispositivos IoT que possam trabalhar de forma colaborativa com um propósito comum. É um habilitador com baixa popularidade, uma vez que é citado por cerca de 14,81% dos 54 trabalhos analisados. A literatura atribui alta aderência ao escopo E1 (90%), ao apontar o fundamento de sensoriamento e detecção como tarefa primitiva para as redes 6G (por exemplo, o sensoriamento espectral), e também ao escopo E4 (80%), ao promover, por exemplo, a implementação de IoT massiva e a integração de redes de sensores uHSL. Há baixa aderência ao escopo E2 (20%) e E3 (20%), nos quais o habilitador é abordado, geralmente, como *end device*. Este habilitador é bastante sinérgico (80%) com habilitadores como Bio sensoriamento e Nano sensoriamento, os quais promovem a interação do mundo físico, digital e biológico. Este habilitador não representa uma inovação, haja vista a gama de aplicações já disponíveis com sensoriamento baseado em IoT. Contudo, este habilitador contribui com cerca de 53,33% dos 15 requisitos previstos na Tabela

2, para redes de sexta geração, a saber: Latência, Eficiência energética, Privacidade, Segurança, Densidade, Acesso ao espectro, Precisão espacial e Resolução RF/Imagem.

3.3 Comunicação

Esta seção apresenta uma análise dos habilitadores relacionados ao fundamento de comunicação digital, dentre eles os associados à conectividade entre componentes da arquitetura, incluindo aspectos de camada física, enlace e rede.

3.3.1 *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*

UAVs possuem uma alta taxa de aderência aos escopos E1 e E2, devido à sua responsabilidade na comunicação para atender à característica 6G de conectividade global. Além disso, este habilitador se destaca no escopo E4 para aplicações específicas. Possui um fator de popularidade considerável, estando presente em 20 dos 54 artigos pesquisados. Por se tratar de uma tecnologia há tempos disseminada e usada em diversos casos, este habilitador tem um grau mínimo de inovação. Em contrapartida, possui um alto grau de sinergia com os demais habilitadores, já que seu uso como Estação Base em conjunto com os demais habilitadores é essencial para fornecer comunicação sem fio e cobertura global em Redes 6G. Além disso, contribui em 7 dos 15 requisitos listados na Tabela 2, alcançando nota 5.

3.3.2 *THz Communications*

Devido à escassez de espectro, comunicações em THz são uma das abordagens mais promissoras para oferecer enlaces sem fio de Tbps. É um habilitador com baixa aderência aos escopos E4 e E3 porque se foca na comunicação sem fio em frequências na ordem de THz. Assim, há uma aderência completa ao escopo E2, sendo identificado como um dos símbolos de Redes 6G, pelo menos em termos de camada física e comunicação sem fio. Também tem forte aderência com E1, contribuindo para a comunicação global em vários tipos de enlace, por exemplo, em redes não terrestres e com dispositivos de usuários. Apesar de altamente especializado, é um tema razoavelmente popular, aparecendo em 21 dos 54 trabalhos analisados no Relatório da Atividade 2.3 [5], ou seja, aproximadamente 39% de popularidade. A sugestão para o uso comercial em larga escala surge nas Redes 6G e, portanto, comunicações em THz podem ser consideradas um habilitador inovador. Com relação à sinergia, comunicações em THz tem um grande impacto, uma vez que sua capacidade de oferecer altas taxas de comunicação de dados influencia vários habilitadores. De fato, outras características de comunicações em THz, como a propagação de sinal nessas bandas, acabam influenciando outros habilitadores que utilizem esse tipo de enlace sem fio. Este habilitador pode contribuir em 12 dos 15 requisitos listados na Tabela 2, ou seja, comunicações em THz alcançam nota 8 com relação a requisitos.

3.3.3 *Visible Light Communications (VLCs)*

Visible Light Communications (VLCs) se baseia na modulação de ondas de luz do espectro visível, ou seja, no uso de luz não guiada para comunicação. Por ser um habilitador relacionado a comunicação, mais especificamente às camadas de enlace e física, ele tem fraca aderência aos escopos E4 e E3. Naturalmente, é um habilitador fortemente aderente ao escopo E2 e também pode ser considerado muito aderente ao escopo E1, pois tem sido proposto para uso em vários cenários, incluindo ambiente interno (*indoor*), Sistemas de Transporte Inteligentes

e comunicação subaquática. VLC aparece em 15 dos 54 trabalhos analisados no Relatório da Atividade 2.3 [5], ou seja, este habilitador tem uma popularidade próxima a 28%. A viabilidade do habilitador VLC já é conhecida a pelo menos uma década, sobretudo para uso *indoor*. Assim, este habilitador é considerado pouco inovador, embora sua eventual adoção em massa e o uso em cenários externos possam ser considerados novidades. VLC tem um alto impacto em termos de sinergia, pois sua adoção influencia diversos outros habilitadores que dependem deste tipo de enlace de comunicação. O impacto ocorre na comunicação de dados propriamente dita, como também em termos de cobertura e imunidade a interferência eletromagnética. VLC pode contribuir em 12 dos 15 requisitos listados na Tabela 2, ou seja, VLC alcança nota 8 com relação a requisitos.

3.3.4 *Ultra-Massive MIMO*

Ultra-Massive MIMO (UM-MIMO) é um conceito que envolve técnicas com múltiplas antenas de entrada e saída. Esses sistemas são de grande importância para a sexta geração de redes móveis e possuem mais aderência ao escopo E2, se tratando de uma tecnologia de rede de acesso. Arquiteturas especializadas tendem a considerar este habilitador, o que explica aderência ao escopo E4. Por se tratar de um escopo universal, os cenários em E1, muitas vezes, retratam comunicação de longas distâncias, além de panoramas mais comuns de comunicação móvel e cabeada. Este habilitador possui pouca aderência ao escopo E3 por se tratar de uma tecnologia de camada física. Em termos de popularidade, este habilitador possui 18 aparições em 54 trabalhos, resultando em uma popularidade de 33%. Apesar de já ter sido avaliado em trabalhos no 5G, pode ser considerado inovador, pois ainda não foi amplamente utilizado. Relacionado à sinergia, pode ser considerado de bastante impacto em outros habilitadores, pois pode possibilitar a elevação da taxa de comunicação para unidades de Tbps e a utilização de faixas de frequência da ordem de THz. Este habilitador também possui impacto considerável nos requisitos da Tabela 2, contribuindo em 10 dos 15 requisitos e, portanto, alcançando nota 7 nesse quesito.

3.3.5 *Intelligent Reflecting Surface (IRS)/Reconfigurable Intelligent Surface (RIS)*

Intelligent Reflecting Surface (IRS) ou *Reconfigurable Intelligent Surface* (RIS) consiste no uso de um grande número de elementos reflexivos passivos de baixo custo integrados em uma superfície plana com o objetivo de refletir, de forma independente, o sinal incidente, controlando a formação de feixe passivo 3D de alta precisão tanto para aumento, quanto para anulação de sinal direcional. É um habilitador relacionado ao meio de comunicação sem fio, sobretudo na camada física, e, portanto, tem pouca aderência aos escopos E4 e E3. Dadas suas características, este habilitador é muito aderente ao escopo E2 e também ao escopo E1, pois é esperada uma ampla adoção tanto para melhorar a capacidade do canal quanto para segurança e transferência de energia (para dispositivos IoT). IRS/RIS é um habilitador referenciado em 2 dos 54 trabalhos analisados no Relatório da Atividade 2.3 [5], ou seja, este habilitador é pouco popular, aparecendo apenas em menos de 4% dos trabalhos. Este habilitador é inovador, tendo sua viabilidade demonstrada recentemente, mas atraindo muita atenção e investimento, o que tem permitido uma evolução rápida. IRS/RIS apresenta alto impacto sinérgico, uma vez que poderá estar presente em uma porção significativa dos canais de comunicação usados por diversos outros habilitadores. Este habilitador pode contribuir em 12 dos 15 requisitos listados na Tabela 2, ou seja, IRS/RIS alcança nota 8 com relação a requisitos.

3.3.6 *Optical Wireless Communications (OWCs)*

Optical Wireless Communications (OWC) é uma estratégia de comunicação por meio não guiado que se baseia no uso de sinais ópticos tanto no espectro visível (>380 nm e < 750 nm), quanto no ultra-violeta (<380 nm) e no infra-vermelho (>750 nm). Por se tratar de um habilitador para a rede de acesso, percebe-se uma forte aderência ao Escopo E2 (90%). Em relação aos Escopos E3 (20%) e E4 (40%) existe uma aderência fraca, o que se justifica ao considerar que o tema é restrito às camadas física e de enlace e, por isso, são pouco abordados por trabalhos com escopo de computação ou especializado. O Escopo E1 (60%) é um escopo amplo, por isso percebe-se um grau de aderência médio em relação a este habilitador, especialmente em cenários *indoor* e comunicações de longa distância através dos oceanos ou espaço. Percebe-se que as técnicas de OWC possuem um fator médio de inovação (nota 5) por se basearem em de tecnologias concebidas há mais de uma década mas que ainda não foram devidamente empregadas. Isso também se reflete no nível de popularidade que embora tenha aumentado com as discussões sobre a nova geração de redes móveis, ainda permanece em níveis relativamente baixos. OWC tem um impacto sinérgico alto pois viabiliza a aplicação de outros outros habilitadores de camadas superiores. Percebe-se também um alto impacto nos requisitos da Tabela 2, alcançando nota 8, uma vez que este habilitador amplia o escopo da comunicação para cenários de difícil acesso.

3.3.7 *Space-Air-Terrestrial-Sea Integrated Networks (SATSI)*

Space-Air-Terrestrial-Sea Integrated Networks (SATSI) são sistemas que integram redes terrestres, aéreas, espaciais e marítimas. Essa tecnologia contém quatro partes: uma rede espacial composta por satélites interconectados com órbitas distintas, uma rede aérea contendo uma plataforma de alta atitude, uma rede terrestre ultradensa heterogênea, e uma rede de apoio à área subaquática e ao mar. Em termos de aderência, SATSI se adere principalmente aos escopos E1 (80%) e E4 (80%), uma vez que se trata de uma arquitetura especializada de integração entre as diversas redes e que abrange a infraestrutura universal de redes. Este habilitador possui menos aderência ao escopo E2 (20%) por não tratar diretamente da rede de acesso e também possui menos aderência ao escopo E3 (10%) por não abordar aspectos computacionais de tratamento de informação. Possui um fator baixo de popularidade, aparecendo em 12 das 54 literaturas analisadas. Contudo, é importante salientar que, para todos os escopos, este habilitador aparece em diferentes trabalhos, o que reforça sua importância para a rede 6G. É inovador, possui alto impacto sinérgico considerando que viabiliza comunicações heterogêneas em espaço aberto tal como UAV, e Redes 3D. Este habilitador contribui para 5 dos 15 requisitos da Tabela 2, tendo nota 4 em termos de Requisitos.

3.3.8 *Device-to-Device (D2D)*

Device-to-Device (D2D), ou mais recentemente *sidelink communications*, permite que haja comunicação direta entre os dispositivos, sem a necessidade de comunicação com a infraestrutura da rede. O D2D possui alta aderência ao escopo E2, devido à necessidade de troca massiva de informações para a formação de uma estrutura dinâmica que permite conectividade e gerenciamento de todos os nós. Este habilitador também é aderente ao escopo E3, porém em menor nível por que são necessários módulos de processamento de informações para as tomadas de decisão e definição de arquiteturas para redes 6G. Este habilitador possui uma popularidade razoável, visto que o termo aparece em 12 das 54 publicações analisadas por este estudo. Em

relação aos requisitos para uma arquitetura 6G, a comunicação D2D tem um papel importante na sua constituição, uma vez que contribui para a redução da latência, aumento da vazão, confiabilidade e densidade de terminais.

3.3.9 *Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)*

É uma técnica de múltiplo acesso não ortogonal que possui vantagens em relação à técnica ortogonal. Dentre essas vantagens, podemos citar: otimização da eficiência espectral, latência reduzida, alta confiabilidade e conectividade massiva. O NOMA possui alta aderência ao escopo E2, por se tratar de uma técnica de múltiplo acesso para a rede de acesso. Possui certa aderência ao escopo E1 por ser uma técnica que visa a universalização da rede móvel. Por ser uma técnica de camada física e de enlace, este habilitador tem baixa aderência aos escopos E3 e E4. Tem baixa popularidade, apenas 5%, com 3 aparições em 54 trabalhos. Seu efeito em termos de inovação é baixo, pois já vem sendo estudado há algum tempo. Sua sinergia é mediana, pois as vantagens do NOMA podem ser aproveitadas em outros habilitadores. Por exemplo, habilitadores associados a sensoriamento e atuação podem tirar proveito da conectividade massiva do NOMA, assim como a latência reduzida possibilitada pelo NOMA é importante para *haptic protocols*. Este habilitador possui nota 2 em termos de Requisitos, impactando 3 dos 15 requisitos da Tabela 2.

3.3.10 *Fast Accurate Beamforming (FAB)*

É um conceito importante de *Beamforming* mais rápido e preciso. *Beamforming*, por sua vez, é uma técnica que enfoca um feixe de sinal em um receptor específico, em vez de espalhar o sinal em todas as direções a partir de um transmissor, resultando em uma conexão mais rápida e confiável. Tem alta aderência ao escopo E2 por ser uma técnica de melhoria para a rede de acesso. Este habilitador possui aderência mediana ao escopo E4 porque algumas arquiteturas especializadas dependem de técnicas como *beamforming* para atingir as taxas desejadas. Possui baixa aderência ao escopo E3 por não se relacionar ao escopo de computação. Este habilitador também possui baixa aderência ao escopo E1 e sua popularidade é baixa, de apenas 3%. Possui grau baixo em termos de inovação porque é uma evolução do *beamforming*, o qual já está presente em redes móveis desde o 4G. Este habilitador tem impacto sinérgico em outros habilitadores que envolvem alta taxa de dados, tendo assim nota 5 em Sinergia. Tem relação com 9 dos 15 requisitos da Tabela 2, possuindo nota 6 neste quesito.

3.3.11 *Haptic Protocols*

Os protocolos hápticos estão ligados ao conceito do sensor de toque ou da percepção e manipulação de objetos reais e são um requisito para as aplicações da Internet Tátil [89]. No escopo E1, que considera as arquiteturas de escopo universal, este habilitador possui uma boa aderência. Se considerarmos que a Internet tátil é um conceito anterior o 5G, há uma tendência deste habilitador estar mais aderente ao 6G e, portanto, a nota 6. Por outro lado, há também certa aderência ao escopo E2, também em cenários envolvendo a Internet tátil e portanto a nota de aderência foi atribuída como 4. Para os escopos E3, que possui um foco em computação, e para o escopo E4 com arquiteturas especializadas não é vislumbrada aderência este habilitador. No Relatório da Atividade 2.3 [5], há 7 citações diretas em um total de 54 trabalhos avaliados, logo, a sua popularidade será de 12,96%, e então sua nota será 2. O seu uso no 6G permitirá a criação de casos de uso inovadores e, portanto, sua nota no quesito inovação é 8. Há uma boa

sinergia destes protocolos com outros habilitadores em casos de uso que envolvem a Internet tática, por exemplo, e, portanto, sua nota para sinergia será 6. Os protocolos hápticos possuem relação direta com 2 dos 15 requisitos fundamentais do 6G conforme Tabela 2, assim sua nota será 1 (13,33%).

3.3.12 *Ultra-Dense Networks*

Ultra-Dense Networks (UDN) se baseia na distribuição de um grande número de *small cells*, conhecidas como micro, pico e *femtocells*, onde o número de células é muito maior que o número de *Human-Type Communication Users* (HTCUs). UDN é um habilitador com média popularidade, aparecendo em 16,67% dos 54 trabalhos analisados. Com aderência principalmente ao escopo E1 (80%), enfatizado pela necessidade de suportar uma densidade ainda maior de nós conectados para redes de sexta geração, e E2 (90%) com a otimização do rendimento da rede pela redução na perda de caminho entre *Base Station* (BS)s e usuários, além do aumento do sinal efetivamente recebido. Este habilitador apresenta baixa aderência ao escopo E3 (20%), considerando o fundamento de *softwarização* da rede, e nenhuma aderência ao escopo E4. Possui uma sinergia (70%) com habilitadores como SDN, NFV e *Multi-access Edge Computing* (MEC), sendo considerado uma solução eficaz para descarregar a rede e melhorar a alocação de recursos, visando a otimização geral do sistema. Este habilitador não representa uma inovação, mas contribui de forma significativa com a implementação de 46,7% dos requisitos de desempenho para redes de sexta geração descritos na Tabela 2, a saber: Vazão/usuário, Vazão de pico, Latência, Cobertura por célula, Eficiência energética, Densidade, Precisão.

3.3.13 *Internet Information Broadcast Storage (IIBS)*

O *Internet Information Broadcast Storage* (IIBS) é focado no escopo do tipo E2 (nota 10) em alto nível. Pode fazer parte de uma arquitetura mais ampla para o ecossistema 6G, sendo encontrado em nível médio no escopo E1 (nota 7). No IIBS, as informações são agregadas, selecionadas e enviadas a um satélite periodicamente. Depois, as informações são transmitidas aos servidores distribuídos que são servidos pelo satélite e, finalmente, as informações enviadas aos usuários finais pelos servidores. O sistema IIBS pode aproveitar a transmissão por satélite, o armazenamento de informações e a função de aceleração de aplicativos para fornecer informações aos usuários finais diretamente, reduzindo significativamente o atraso em relação às redes celulares convencionais. O IIBS possui baixa aderência nos escopos E3 (nota 2) e E4 (nota 2). Esse habilitador apresenta certo grau de popularidade entre os trabalhos analisados (nota 2) e inovação (nota 4) e também apresenta alta sinergia com outras tecnologias habilitadoras (nota 7). A questão de armazenamento em *cache* já é explorada em diversos casos de uso, mas o método de empacotar as informações da Internet e enviá-las ao satélite periodicamente, para transmiti-las a vários servidores de armazenamento local do satélite ainda poderá ser melhor utilizada em conjunto com outras tecnologias como *Information Centric Networking* (ICN) e MEC.

3.3.14 *Coordinated Multi-Point (CoMP)*

Coordinated Multi-Point (CoMP) refere-se a diferentes técnicas que permitem a coordenação de transmissão e recepção de um sistema com antenas separadas geograficamente. O objetivo do CoMP é gerenciar a interferência para melhorar o desempenho de usuários para otimizar a qualidade do serviço para esses usuários. Sendo, desta forma, visto como um potencializador

da Indústria 4.0, especialmente em áreas que requerem baixa latência e alta confiabilidade. O CoMP possui alta aderência ao escopo E2, por se tratar de uma abordagem que lida com a rede de acesso. Uma aderência mediana é observada com relação ao escopo E1, uma vez que a melhoria na rede de acesso pode promover um avanço na cobertura universal da rede. Este habilitador possui baixa aderência ao escopo E3, sendo apenas um cliente desse escopo. São escassas CoMP, justificando a baixa aderência ao escopo E4. Além disso, tem baixa popularidade, de apenas 6%. Não é inovador, visto que esse conceito foi apresentado no *Long Term Evolution* (LTE), i.e., no 4G. Possui baixo impacto sinérgico, pois não impacta significativamente outros habilitadores. Este habilitador contribui para 4 dos 15 requisitos da Tabela 2, recebendo nota 3 nesse quesito.

3.3.15 *Intelligent OFDMA*

Intelligent Orthogonal Frequency Division Multiple Access (iOFDMA) é um padrão relacionado ao *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 802.11ax, o qual estende o *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) para o suporte a múltiplos usuários, habilitando comunicação a pontos de acesso de modo concorrente (*uplink* e *downlink*) a múltiplos clientes com largura de banda variável, simultaneamente. O iOFDMA é uma tecnologia específica e pouco necessária a outros escopos. Sua necessidade é fundamentada para ligar pontos específicos da arquitetura, por isso a alta aderência aos escopos E2 e E4, o que minimiza a popularidade em relação à arquitetura 6G global, mas amplifica a sua necessidade nos requisitos e sinergia. Por isso, apesar da pouca popularidade (10%), este habilitador é considerado uma técnica importante para os requisitos da arquitetura 6G, contribuindo para atender 90% deles

3.3.16 *High Altitude Platforms (HAPs)*

HAPs são estações de rádio localizadas a uma altitude de 20-50 km e em um ponto fixo em relação à Terra. Elas podem ser potencialmente usadas para fornecer conectividade de banda larga fixa para usuários. Os tipos de aplicações *High Altitude Platforms* (HAPs) permitiriam, por exemplo, a implantação de banda larga sem fio em áreas remotas, incluindo áreas montanhosas, costeiras e desérticas. Este habilitador tem alta aderência aos escopos E1 e E2 por tratar de uma rede de acesso que visa prover conectividade universal. Também tem considerável aderência ao escopo E4 por aparecer em arquiteturas especializadas e aderência baixa ao escopo E3 por não envolver elementos de computação. Tem baixa popularidade, de 9% com 5 aparições em 54 trabalhos. Seu efeito em termos de inovação é baixo, uma vez que esta tecnologia vem sendo discutida desde o 3G. Sua sinergia, por outro lado, pode ser considerado alta, principalmente por impactar outros habilitadores do escopo E2. Possui nota 3 em Requisitos, atendendo a 4 dos 15 requisitos da Tabela 2.

3.3.17 *Disruptive Waveforms*

Este habilitador possui uma alta taxa de aderência aos escopos E1 e E2 (notas 8 e 10, respectivamente), devido a sua capacidade de atender às características de conectividade das redes 6G. Para os contextos mais específicos dos escopos E3 e E4, sua relevância é mais baixa, recebendo notas menores (notas 5 e 6, respectivamente). Entretanto, este habilitador não possui popularidade alguma dentre os habilitadores selecionados, não aparecendo em nenhuma referência nas Tabelas de 8 a 12. Este habilitador pode apresentar um grande grau de inovação,

podendo ser utilizado por outros habilitadores, principalmente os das categorias de Energia e Comunicação. *Disruptive waveforms* podem contribuir com 4 requisitos da Tabela 2, a saber: Vazão de pico, Latência, Eficiência espectral e Acesso ao espectro. Portanto, este habilitador recebe nota 2,6 nesse quesito.

3.3.18 *Delay-awareness, DTN e Intermittent Connectivity*

Delay-awareness refere-se à capacidade de um sistema de lidar com variações de latência, o que é particularmente comum em redes móveis. Por outro lado, *Intermittent Connectivity* refere-se à capacidade de um sistema suportar a perda de conectividade temporária de um nó sem afetar a comunicação. Nota-se uma alta aderência em relação ao escopo E2 (80%) que já aborda amplamente temas de computação móvel e ubíqua. Também observa-se uma aderência expressiva em relação ao escopo E4 (60%), no qual este habilitador poderia ser usado prontamente. Acredita-se também que este habilitador tenha boa aderência com todos os demais escopos, E1 (50%) e E3 (50%), por se tratar de um tema com alto nível de aplicabilidade. Apesar da relevância incontestável destes assuntos, nota-se uma baixa popularidade no estado da arte e baixo nível de inovação deste habilitador. Pode-se observar também que há um nível considerável de sinergia entre este habilitador e os demais, mas deve-se atentar para o fato de que ao conceber um sistema *delay-aware* com suporte a *intermittent connectivity*, deve-se considerar esses requisitos em todos os níveis de abstração, o que pode causar grande impacto na solução e na escolha de habilitadores. A capacidade de impactar nos requisitos definidos na Tabela 2 é média (50%), especialmente em relação a confiabilidade, disponibilidade e eficiência.

3.3.19 *Communication, Computing, Control Convergence (CoCoCo)*

Communication, Computing, Control Convergence (CoCoCo Convergence) é um habilitador que tem aderência alta ao escopo E3 (nota 10) devido à sua abordagem ligada a conceitos de engenharia de computação para *data center*, borda, distribuída, nuvem e descentralizada na rede. Este habilitador possui foco em aspectos relacionados ao processamento de informação na realização de uma arquitetura para rede 6G. A CoCoCo Convergence representa um habilitador padrão para resolver problemas de conexão e resiliência em relação a intermitência de conectividade, devido ao acoplamento entre comunicação, computação e sistemas de controle. Sendo assim, a CoCoCo Convergence também se enquadra bem aos escopos E2 (nota 7) e E4 (nota 4), com foco nos aspectos relacionados à troca de informação entre terminais e nós. A CoCoCo Convergence pode se adequar a uma arquitetura especializada quando os sistemas de controle são inseridos nos conceitos de comunicação e computação. A visão geral para o conceito de CoCoCo Convergence é interligar tecnologias, plataformas, ferramentas e outros aspectos ligados ao controle, à comunicação e à computação na rede, então, a CoCoCo Convergence pode completar uma arquitetura global para 6G (obtendo nota 2 para o escopo E1). Em relação à inovação (nota 7), levando em consideração a convergência das tecnologias de informação, comunicação e controle, uma arquitetura de rede móvel lógica com CoCoCo Convergence é proposta para resolver requisitos não preenchidos no projeto de rede 5G, tais como, confiabilidade ainda mais alta, integração de redes móveis, IA, *Blockchain*, gêmeo digital e qualquer requisito que envolva recursos de computação-comunicação. Dessa forma, outras áreas podem ser acrescentadas à sinergia (nota 7), em que outros habilitadores podem aproveitar os conceitos de CoCoCo Convergence, como, OWC, *Fixed-Mobile Convergence*, *Cell-Free Networking*, O-RAN e *Network Slicing* (NS). Apesar desse habilitador apresentar nota baixa para popularidade (nota 2), o conceito de CoCoCo Convergence se mostra como um requisito importante

(com nota 4) para a futura arquitetura 6G em relação cobertura mundial extrema e interações remotas avançadas.

3.3.20 *Predictive Resource Allocation (PRA)*

A alocação preditiva de recursos (*Predictive Resource Allocation*) utiliza o histórico comportamental do usuário para otimizar a QoS do sistema. A taxa média nas redes pode ser prevista de diferentes maneiras: diretamente, a partir do histórico das taxas médias, ou indiretamente, prevendo a carga de tráfego e a trajetória do usuário. A partir dessa previsão de taxa, a alocação de recursos determina quais estações de rádio, ao longo da trajetória de um usuário, o servem e com quantos recursos. Este habilitador tem alta aderência aos escopos E2 e E4, sendo uma técnica para melhoria da alocação de recursos na rede de acesso e fazendo parte de arquiteturas especializadas que têm tal melhoria como requisito. Possui aderência mediana a baixa ao escopo E3, sendo um cliente desse escopo, pois parte das funções de predição podem ser executadas de forma descentralizada por algoritmos de inteligência artificial. Possui baixa aderência ao escopo E1 porque visa a melhoria de QoS para os usuários já cobertos, não necessariamente contribuindo para comunicação global. A taxa de popularidade é baixa, visto que este habilitador aparece em 3 dos 54 trabalhos da Atividade 2.3 [5], obtendo popularidade de 5,56%, ou nota 1. Este habilitador possui inovação mediana, pois já é discutido há certo tempo, mas não foi implementado efetivamente nos padrões de redes móveis. Tem baixo grau de sinergia, impactando poucos habilitadores. Este habilitador contribui para 4 dos 15 requisitos da Tabela 2, obtendo nota 3 em Requisitos.

3.3.21 *Dynamic Spectrum Allocation (DSA)*

A *Dynamic Spectrum Access* (DSA) é uma solução que visa mitigar a escassez de espectro de RF por meio da utilização de faixas de frequência licenciadas por redes secundárias não licenciadas. O objetivo é otimizar o uso do espectro permitindo que os usuários secundários possam utilizar faixas de espectro licenciadas de usuários primários que estejam livres. Este habilitador possui alta aderência ao escopo E2 por se tratar de uma técnica de alocação de recursos para rede de acesso. Tem alta aderência ao escopo E1, por contribuir com a democratização do acesso ao espectro e, conseqüentemente, com a cobertura universal. Este habilitador também tem aderência mediana ao escopo E4, fazendo parte de arquiteturas especializadas. DSA possui aderência mediana ao escopo E3, podendo fazer uso de bancos de dados descentralizado com informação de canais de usuários primários que possam estar livres. Possui baixa taxa de popularidade, estado presente em 2 dos 54 trabalhos (3,7%) analisados na Atividade 2.3 [5], tendo nota 1 em popularidade. Este habilitador traz pouca inovação, pois foi estudado também para o 5G, e implementado em contextos específicos. Tem médio impacto sinérgico, impactando outros habilitadores que dependem do acesso dinâmico ao espectro. Podemos considerá-lo de pouca a média importância para os requisitos da Tabela 2, contribuindo para 5 dos 15 requisitos e alcançando nota 4 (33,33%) neste quesito.

3.3.22 *Cognitive Radio (CR)*

O conceito de rádio cognitivo (*Cognitive Radio*) parte do princípio de que o rádio é capaz de perceber qual banda de rádio frequência está sendo utilizada e usar o espectro disponível sem interferir nas comunicações de outros usuários [90]. Não é um conceito recente, porém seu uso na prática está ligado à necessidade de outras tecnologias como a capacidade de adaptar o rádio

ao ambiente de forma eficiente. Este habilitador possui uma boa aderência nos escopos E1, E3 e E3 porém ainda existem desafios para seu uso. Sendo assim, aderência para o escopo E1 foi atribuída em 4 e tanto para o escopo E2 quanto E3 foi atribuída como sendo 3. Considerando o escopo E4, que trata com aspectos mais específicos do 6G, a aderência foi atribuída como zero. No Relatório da Atividade 2.3 [5], há 4 citações diretas em um total de 54 trabalhos avaliados, logo, a sua popularidade será de 7,41%, e então sua nota será 1. Como não é ainda aplicado, o seu uso é uma inovação para o 6G e por isto a nota neste quesito foi 7. Há uma grande sinergia deste habilitador com outros que podem viabilizar o 6G e a nota de sinergia foi atribuída igual a 8. O *Cognitive Radio* possui relação direta com 3 dos 15 requisitos fundamentais do 6G conforme Tabela 2, assim sua nota será atribuída 2 (20%).

3.3.23 Redes 3D (3D Nets)

É um conceito que explora tecnologias heterogêneas, como satélite, submarino, UAV e conectividade marítima, para coexistir com as tecnologias terrestres, melhorar a taxa de dados e abranger os requisitos impostos pelas redes futuras. Este habilitador possui alta aderência ao escopo E1 por tratar de redes heterogêneas e universais. Também se adere ao escopo E2, por envolver a rede de transporte na integração com outras redes, e ao escopo E4, uma vez que se trata de uma arquitetura especializada de integração de redes. Este habilitador possui menor aderência ao escopo E3 por não abordar aspectos computacionais de tratamento de informação. Apesar de todas as vantagens observadas com Redes 3D, este foi um habilitador pouco citado nas referências, possuindo baixa popularidade, com valor de 18%. Ainda assim, é um conceito com grau considerável de inovação, levando em conta a coexistência de diversas redes futuras com tecnologias heterogêneas. Este habilitador tem grau médio em termos de sinergia, impactando habilitadores que trabalham com redes heterogêneas integradas. Por fim, Redes 3D contribuem para 7 dos 15 requisitos de 6G estabelecidos na Tabela 2, obtendo nota 5 nesse quesito.

3.3.24 *Elastic-RAN* (E-RAN)

Elastic RAN (E-RAN) consiste em suportar tanto a elasticidade horizontal, ou seja, aumentar ou reduzir a quantidade de máquinas físicas, quanto a quantidade de máquinas virtuais ou contêineres [40]. Devido à importância da *softwarização*, a elasticidade de *Cloud-RAN* (C-RAN) tem forte aderência no escopo E4. Por se tratar de RAN, acreditamos que tem grande aderência também ao E2, e por conseguinte ao E1, dado que não teremos cobertura global sem RAN. O escopo E3 tem relação de acordo com dois pontos de vista: (i) como infraestrutura física e virtual da RAN virtualizada e (ii) como cliente da RAN elástica. E-RAN é um habilitador pouco popular. Considerando que O-RAN e *cloud elasticity* tem relação com E-RAN, determinamos uma popularidade de 16 aparições em 54 trabalhos analisados no Relatório da Atividade 2.3 [5]. Ou seja, 29,62 %, o que dá uma nota 3 para esse quesito. Consideramos que E-RAN é uma inovação importante no contexto de RAN. Dado que a solução de elasticidade pode ser aplicada em outros contextos, como no núcleo do 6G, e imaginando que outros habilitadores de software irão tirar proveito disso, consideramos um impacto sinérgico importante. E-RAN tem relação com 9 dos 15 requisitos chave para 6G conforme Tabela 2, ou seja, pode ajudar em relação a 60% desses. Muitos desses requisitos podem ser melhor atendidos se E-RAN estiver disponível. Portanto, acreditamos que a nota relacionada a requisitos seja 6.

3.3.25 *Holographic Radio (HR)*

Holographic Radio é um habilitador com alta aderência em E2, pois pode ser aplicado na comunicação das redes 6G ao explorar completamente as características oferecidas por diferentes regimes de propagação eletromagnéticos. Além disso, também contribui bastante para o escopo E1 e E3, devido à sua contribuição de melhoria no sistema de comunicações através de ondas eletromagnéticas propagadas no espaço que impulsionam a conectividade global e à computação necessária para que estes rádios holográficos sejam desenvolvidos. Este habilitador possui um baixo grau de popularidade, sendo citada a comunicação holográfica em apenas 1 dos 54 artigos da revisão literária. Entretanto, o fato de se tratar de um habilitador novo, com muitas frentes a serem exploradas, contribui para que o mesmo adquira um alto grau de inovação. Sua sinergia é relevante, já que a participação de um *Holographic Radio* na melhoria da transcepção de dados propagados através do espaço afeta os demais habilitadores envolvidos no processo de comunicação. Em relação ao grau de requisitos, este habilitador possui nota 3, devido à sua relevância em 5 dos 15 requisitos detalhados na Tabela 2.

3.3.26 *Cell-Free Networking (CFN)*

Uma rede livre de células (*Cell-Free Networking*) é um tipo de implementação de um sistema MIMO maciço distribuído, que utiliza comunicação bidirecional por divisão de tempo (*Time-Division Duplex*) e um grande número de antenas de serviço geograficamente distribuídas operando em conjunto para servir a um número menor de dispositivos de usuários. Rede livre de células é um habilitador relacionado ao meio de comunicação sem fio, especialmente da camada física, tendo, portanto, pouca aderência ao escopo E4 (nota 4). Rede livre de células depende bastante de computação na borda da rede para processamento de sinais e alocação de recursos de rádio e, portanto, possui boa aderência com o escopo E3 (nota 7). Devido às suas características, rede livre de células é muito aderente ao escopo E2 (nota 10). Há uma boa aderência ao escopo E1 (nota 7), sobretudo para ambientes internos (*indoor*) e cenários densos, como em grandes centros urbanos. Este habilitador foi referenciado em 4 dos 54 trabalhos analisados no Relatório da Atividade 2.3 [5], ou seja, ele é pouco popular, aparecendo em menos de 8% dos trabalhos. Apesar de utilizar conceitos e tecnologias tradicionais, rede livre de células pode ser considerado um habilitador inovador porque altera o funcionamento convencional de redes móveis “celulares”. Rede livre de células apresenta bom impacto sinérgico, influenciando outros habilitadores tanto em termos de comunicação, quanto de computação (na borda da rede). Este habilitador pode contribuir em 12 dos 15 requisitos listados na Tabela 2, ou seja, rede livre de células alcança nota 8 com relação a requisitos.

3.3.27 *Molecular Communications*

Comunicação molecular (*Molecular Communications*) pode ser definida como o uso de moléculas para viabilizar o transporte de informações entre dois pontos. É apoiada em nanotecnologia [91]. Trata-se de um habilitador de IoT estando na ponta final da rede. Como tal, visa suportar novas aplicações em implantes. Assim sendo, suporta novo modelo de comunicação, tendo aderência principal aos escopos E2 e E4. Com relação a E1, este habilitador pode ser interessante para suportar novas aplicações globalmente. Com relação a E3, vemos pouca aderência nesse momento. Este habilitador tem uma popularidade dada por 4 ocorrências em 54 trabalhos analisados no Relatório da Atividade 2.3 [5]. Ou seja, sua popularidade é bem baixa, da ordem de 7,4%, portanto a nota de popularidade foi 1. Não resta dúvida do grau

de inovação. Em termos de sinergia com outros habilitadores, potencializa novos modelos de comunicação em E2, sendo portanto bastante específico em termos de impacto sinérgico para o 6G. Pouco ajuda nos requisitos da Tabela 2, logo recebe nota 0.

3.4 Softwarização

Esta seção traz uma análise dos habilitadores relacionados ao fundamento de *softwarização*, incluindo aspectos relacionados a virtualização, *servitização*, representação (gêmeos digitais), fatiamento e fragmentação funcional.

3.4.1 *Software Defined Networking* (SDN)

SDN é um paradigma que traz programabilidade às redes, promovendo o desacoplamento físico entre o plano de controle da rede e o plano de encaminhamento, de forma que um plano de controle possa gerenciar diversos dispositivos. Trata-se de um habilitador de *softwarização*, podendo ser aplicado imediatamente em praticamente todos os escopos, i.e., E1, E2, E3 e E4. Este habilitador tem uma grande popularidade, sendo mencionado em 29 dos 54 trabalhos analisados no Relatório da Atividade 2.3 [5], resultando em uma popularidade da ordem de 54% e nota de popularidade igual a 6. Apesar de sua popularidade e relevância, SDN é um conceito consolidado na comunidade de Redes de Computadores e Telecomunicações. Dessa forma, seu grau de inovação é baixo. Por se trata de um dos primeiros paradigmas a introduzir a noção de *softwarização* nas redes, outros habilitadores de software exploram as propriedades de SDN, como NFV, MEC e NS. Vários habilitadores de energia, sensoriamento e comunicação também tiram proveito deste habilitador. Portanto, SDN tem impacto sinérgico importante. SDN pode potencializar 7 dos 15 requisitos descritos na Tabela 2. Atribuímos, portanto, a nota 5 em relação a requisitos.

3.4.2 *Temporospatial SDN*

A *Temporospatial SDN* (TS-SDN) é a extensão do paradigma SDN/*Software Defined Wireless Network* (SDWN) para habilitar aplicações SDN a tomarem decisões na rede baseadas em localização, movimento e orientação dos dispositivos ou ativos no espaço, ou seja, sua posição vetorial, velocidade vetorial e altitude. Por mais que seja um caso específico de atuação de SDN, a TS-SDN, possui uma alta aderência nos escopos E1 e E2, por se tratar de uma extensão da tecnologia SDN por levar em consideração ações baseadas em ativos no espaço, que são uns dos requisitos da tecnologia 6G. No entanto, a sua popularidade é baixa, de 1,8% com 1 aparição em 54 trabalhos. No entanto em termos de inovação ela se torna necessária, logo neste escopo ele é alto para a arquitetura. Por fim, pode-se considerá-lo importante para a contribuição dos requisitos de 6G estabelecidos na Tabela 2, justificando a atribuição da nota 4.

3.4.3 *Network Function Virtualisation* (NFV)

NFV é um paradigma que promove a consolidação de funções de rede, originalmente baseadas em hardware proprietário, em servidores comerciais de propósito geral, usando tecnologias de virtualização comuns em ambientes de computação em nuvem. Como SDN, NFV tem aderência em praticamente todos os escopos estudados, sendo mencionado em vários trabalhos nos diferentes escopos. De fato, o habilitador NFV é mencionado em 29 dos 54 trabalhos analisados no Relatório da Atividade 2.3 [5], resultando em uma popularidade da ordem de 54% e nota

de popularidade igual a 6. Proposto originalmente em 2012, NFV é um habilitador pouco inovador. Contudo, seu impacto sinérgico é alto, oferecendo suporte para a construção de outros habilitadores como MEC, NS, E-RAN, O-RAN, *Cloud Elasticity*, *IoT-based Sensing*, *Digital Twins* (DTs), *Green Technology*, dentre outros. NFV contribui com 7 dos 15 requisitos de 6G conforme Tabela 2, ou seja, atribuímos a nota 5 em relação a requisitos.

3.4.4 *Multi-access Edge Computing* (MEC)

MEC é um paradigma que tem se tornado essencial para as redes móveis. O conceito possibilita estender a RAN, permitindo processamento na borda de grandes volumes de dados, reduzindo o tráfego no núcleo e *backhaul* da rede, fornecendo uma solução para superar os desafios relacionados à latência, inerentes a ambientes de computação em nuvem centralizados. MEC é aderente a todos os escopos analisados, tendo maior uso nos escopos E3 e E2. O habilitador é também bastante popular: o termo MEC ocorre em 56% dos trabalhos (30 de 54). Apesar de ter surgido no contexto das redes 5G, algumas questões relacionadas a MEC ainda estão em aberto. Desta forma, determinamos a nota 6 no quesito inovação. DTs, *Haptic Protocols*, O-RAN, *Augmented/Virtual Reality*, dentre outros, são fortemente impactados por MEC. Assim, atribuímos 7 como fator de impacto para esse habilitador. Dos 15 requisitos relacionados para 6G de acordo com a Tabela 2, MEC pode contribuir com cerca de 87%, o que corresponde a uma nota 9 para esse quesito.

3.4.5 *Network Slicing* (NS)

NS foi introduzido para representar redes lógicas fim-a-fim executando em uma infraestrutura (física ou virtual) subjacente comum, porém isoladas uma das outras, com controle e gestão independentes, podendo ser criadas sob demanda. NS tem aderência em praticamente todos os escopos estudados, podendo ser aplicado imediatamente em praticamente todos os escopos, i.e., E1, E2, E3 e E4. Este habilitador é mencionado em 52% dos trabalhos analisados no Relatório da Atividade 2.3 [5], resultando em uma nota de popularidade igual a 6. Como MEC, o termo NS foi proposto no contexto das redes 5G e vem sendo bastante estudado nos últimos anos. No entanto, alguns problemas ainda estão em aberto, especialmente em relação ao fatiamento da RAN e ao desempenho das *Virtual Network Functions* (VNFs). Portanto, atribuímos a nota 5 no quesito inovação. Habilitadores de sensoriamento e atuação, SATSI, MEC, O-RAN, DTs, *Augmented/Virtual Reality* são alguns habilitadores cuja implementação pode ser facilitada com o uso de NS. Atribuímos, portanto, a nota 8 como fator de sinergia deste habilitador. NS tem relação com 7 dos 15 requisitos de 6G conforme Tabela 2, ou seja, atribuímos a nota 5 em relação a requisitos.

3.4.6 *Open RAN*

O-RAN é um consórcio da indústria que promove a definição de um padrão aberto para programabilidade e virtualização da rede de acesso de rádio [7]. Devido à importância da *softwarização* e da virtualização da RAN, O-RAN tem forte aderência ao escopo E4. Por se tratar de RAN, acreditamos que tem grande aderência também ao E2 e, por conseguinte, ao E1, dado que não teremos cobertura global sem RAN e a abertura das redes é outra tendência para o 6G. O escopo E3 oferece a infraestrutura física e virtual da RAN virtualizada. Considerando a relação que O-RAN tem com E-RAN e elasticidade de *cloud*, determinamos uma popularidade de 16 aparições em 54 trabalhos analisados no Relatório da Atividade 2.3 [5]. Ou seja, 29,62%,

o que dá uma nota 3 para esse quesito. Assim como E-RAN, O-RAN é uma inovação bastante relevante no contexto de RAN, sendo O-RAN muito mais conhecida. Consideramos o impacto sinérgico de O-RAN também importante, tanto pela revolução que causa na RAN, quanto pela importância da RAN no 6G. RAN tem relação com 9 dos 15 requisitos de 6G conforme Tabela 2, ou seja, pode ajudar em relação a 60% desses. Portanto, acreditamos que a nota relacionada a requisitos seja 6.

3.4.7 *Digital Twins (DTs)*

Digital Twin (DT) é uma tecnologia com alto grau de aderência ao E3 e E4 (nota 8 em ambos), devido ao seu uso na área de computação para a representação digital das coisas, sendo mais explorado em aplicações específicas. Muitos argumentam que os gêmeos digitais serão integrados em E2 para representar os equipamentos não virtualizados da infraestrutura, bem como de IoT, e nada impede de serem aplicados em E1. Porém, o baixo grau de aderência em ambos os escopos (nota 3) se justifica pelo fato do foco desta tecnologia estar atrelada ao processo de complexidade de computação necessária para representar fielmente algo físico, bem como aplicações específicas em que a mesma é utilizada. Assim sendo, o fator de cobertura onipresente e comunicação à distância não são o foco de pesquisa dos DTs. Possui um baixo grau de popularidade, estando presente em 4 dos 54 artigos pesquisados. Em relação ao grau de inovação, este habilitador possui nota 6, pois apesar de já ser um habilitador bastante conhecido, ainda há margem para melhoria e soluções inovadoras. DT possui um alto grau de sinergia, pois todas as iterações realizadas no dispositivo físico digitalizado afeta o mundo virtual e vice-versa. Portanto, um habilitador que desempenha uma mudança real em determinado ponto da rede consequentemente influencia no seu gêmeo virtual, sendo extremamente impactante para o 6G. Além disso, seu grau de suporte aos requisitos é 5, contribuindo em 7 dos 15 requisitos listados na Tabela 2.

3.4.8 *Avatares*

Avatar é um habilitador de alta aderência em E2, E3 e E4. Em relação ao escopo E2, há a necessidade de baixa latência e alta velocidade de transmissão de dados para que o Avatar realize uma interação com o ambiente de forma ideal. Para o escopo E3, existe a preocupação relacionada à complexidade computacional necessária para o seu desenvolvimento. Por fim, sua alta aderência em E4 se justifica pelo grande potencial da tecnologia ser explorada em casos específicos. Este habilitador possui um baixo grau de popularidade, estando presente em 1 dos 54 artigos pesquisados. Possui um grau máximo de inovação devido à necessidade de reestruturação de toda a rede para suportar esta nova tecnologia, sendo necessárias pesquisas em todos os escopos previamente descritos, especialmente em telecomunicações e computação, onde também há um alto grau de aderência, para que um novo modelo de arquitetura seja proposto de modo a viabilizar o uso dos Avatares. Possui um grau de sinergia mediano, já que é necessário um trabalho conjunto entre diversos habilitadores para a criação dos Avatares, especialmente aqueles voltados para a área de computação e telecomunicações para garantir uma interação mais próxima da realidade, através de tecnologias capazes de suportar uma integração do mundo virtual com o real de forma rápida e segura. A nota para contribuição nos requisitos de 6G deste habilitador é 7, contribuindo em 10 dos 15 requisitos listados na Tabela 2.

3.4.9 *Data Orientation e Information-Centric Networking (ICN)*

É um habilitador muito aderente (nota 10) ao escopo E2, pois está relacionado com a troca de informações entre os nós, ou seja, tem influência nesse tipo de decisão considerando o fundamento de *softwarização*. A aderência ao escopo E1 é baixa (nota 2) e relativamente alta (nota 8) para o escopo E3, pois tem influência nos aspectos computacionais e pode afetar algum tipo de arquitetura especializada e que teria aderência (nota 8) ao escopo E4. É um habilitador com popularidade mediana (nota 5), é muito citado em trabalhos que envolvem o escopo de telecomunicações e arquiteturas especializadas, entretanto, pouco citado no restante. Este habilitador é pouco inovador, pois a viabilidade, uso e aplicação são conhecidos a muito tempo, mesmo que ainda requeira avanços para sua implementação. A sinergia é baixa, apesar que vários cenários possam considerar este habilitador, não influencia diretamente outros habilitadores. *Data Orientation* não contribui diretamente com os requisitos listados na Tabela 2. A orientação a dados também conhecida pelo nome de ICN [92].

3.4.10 *Service Orientation e Service Oriented Architecture (SOA)*

A orientação a serviços (*Service Orientation*) é um paradigma oriundo dos fundamentos de sistemas modulares em projeto de software, o qual é muito importante para a computação em nuvem. Neste contexto, os recursos da nuvem são vendidos como serviços para aplicativos, por exemplo, infraestrutura de rede (*Infrastructure as a Service (IaaS)*), plataformas (*Platform as a Service (PaaS)*), entre outros. A arquitetura orientada a serviços ou em inglês *Service-Oriented Architecture (SOA)* está consolidada na engenharia de software e contribui significativamente para a *softwarização* das redes. A *softwarização* também está alcançando os diversos sub-sistemas do 5G, por exemplo, C-RAN, *Core Service-based Architecture (SBA)*, etc., e há a expectativa que ocupe ainda mais espaço nas redes 6G. A orientação a serviços apresenta nota 8 de aderência ao escopo E1, 10 para E3, 8 ao escopo E4, e aderência 4 para E2, devido à aderência do habilitador com C-RANs [74, 34] e vRANs [93]. Este habilitador possui 13% de popularidade, sendo citado em 7 dos 54 trabalhos relacionados. Sendo totalmente disruptiva para 5G, SOA não apresenta altos índices de inovação/disrupção para 6G, assim atribuímos 3 a esse quesito. Este habilitador compõe a base para a *softwarização* das redes e, desta forma, oferece suporte para maioria dos requisitos elencados na Tabela 2. Nesse contexto, foi atribuída nota 7 para a importância de SOA aos requisitos do 6G. Ao quesito sinergia foi atribuída nota 9, pois contribui diretamente com todos os habilitadores associados a *softwarização* e de forma bastante significativa com os demais habilitadores.

3.4.11 *Compute First Networking (CFN)*

O *Compute First Networking (CFN)* é um ambiente de computação distribuído que fornece uma plataforma de programação para vários casos de uso em arquiteturas de troca, processamento e armazenamento de informação. Este habilitador tem alta aderência ao escopo E3 (nota 10), sendo muito relevante ao empregar uma abordagem para alocação de recursos descentralizada. Utiliza o conceito de otimização conjunta de recursos de computação e rede. CFN pode traçar gráficos de desempenho sobre as plataformas de computação disponíveis em uma rede para executar gerenciamento de carga flexível e otimizações, levando em conta a localização de dados e os usuários. Os recursos de CFN são explorados aproveitando uma arquitetura ICN e a estrutura *Remote Method Invocation for ICN (RICE)* para executar funções como encaminhamento de solicitação, armazenamento em *cache* e gerenciamento de carga sem a necessidade de

mecanismos adicionais sobrepostos. CFN apresenta potencial de inovação (nota 7) por permitir o desenvolvimento de plataformas de computação distribuída que são aplicáveis a uma ampla gama de cenários, desde computação móvel até computação distribuída e programabilidade de rede para *data centers*. Dessa forma, CFN é pouco aderente aos escopos E2 (nota 4) e E4 (nota 4). Os requisitos de 6G que podem ser abordados por CFN são: (i) cobertura por célula, densidade de terminais e velocidade (para computação móvel) e (ii) vazão/usuário, vazão de pico, latência e confiabilidade (para computação distribuída e programabilidade de rede para *data centers*). Ou seja, 7 de 15 requisitos de acordo com a Tabela 2.

3.4.12 *In-Network Computing* (INC)

O conceito de *In-Network Computing* (INC) se concentra na computação incorporada à rede através da utilização de dispositivos que já existem no ambiente de Tecnologia da Informação e Comunicações (TIC) e que já são usados para encaminhar tráfego. Portanto, o escopo mais aderente é o E3 (nota 10). INC vem com a perspectiva de implantar a funcionalidade de processamento em dispositivos de rede, como *switches* e placas de interface de rede, ou *Network Interface Card* (NIC). Na INC, os dados gerados pelo usuário são processados antes de chegarem ao destino, economizando ciclos de *Central Process Unit* (CPU) e liberando recursos. O conceito de INC difere da computação em rede, a qual se refere a sistemas em rede ou a computadores localizados na rede. A razão para escolher a definição de *In-Network Computing* são as implicações da perspectiva de um sistema, significando que não serão adicionados novos dispositivos à rede, mas serão aproveitados os já instalados. Como consequência, a sobrecarga da computação na rede é mínima, pois nenhum espaço extra, custo ou energia ociosa são necessários. Além disso, INC reduz a carga na rede, em vez de aumentá-la, encerrando as transações entre transmissor e receptor à medida que atravessam os enlaces. Os escopos menos aderentes para este habilitador são E1 (nota 1), E2 (nota 4) e E4 (nota 4). Até o momento, INC foi implementada em três classes de dispositivos, sendo eles: *Field-Programmable Gate Array* (FPGA), *Smart Network Interface Controller* (SmartNIC) e *Switch-Application Specific Integrated Circuits* (switch-ASIC). INC pode ser aplicada a uma variedade de funções de rede, incluindo *caching*, medições, servidor com protocolo http, servidor de arquivos, *Proxy*, sistemas distribuídos e aprendizado de máquina. Este habilitador apresenta bons impactos para inovação (nota 7) e requisitos (nota 5). INC apresenta certo grau de sinergia entre os outros habilitadores (nota 4), mas não mostra grande popularidade entre os trabalhos analisados nessa pesquisa (nota 2).

3.4.13 *Network Caching* (NC)

O *cache* de rede é um mecanismo que fornece armazenamento temporário para reduzir a largura de banda, a carga do servidor e o tempo de resposta. Este habilitador apresenta alta aderência ao escopo E3 (nota 10), sendo considerado de muita importância. Como o desempenho do *cache* cooperativo foi estudado no contexto de vários sistemas, dentre eles na *World Wide Web*, em sistemas de armazenamento ponto-a-ponto e em redes de sistemas de arquivo, ele também se adéqua, como nível médio, aos escopos E2 (nota 7) e E4 (nota 7). O *cache* cooperativo foi usado para melhorar o desempenho de um sistema de arquivos em rede, coordenando *caches* de vários clientes distribuídos em uma LAN. O *cache* da Web evita que os servidores de origem travem, armazenando arquivos de dispositivos de mídia. Quando um usuário acessa um novo *site* pela primeira vez, arquivos como imagens são armazenados em *cache*. No próximo acesso, os arquivos em *cache* serão carregados. O *cache* da Internet é

muito útil, pois acelera o tempo de carregamento de uma página. Isso está se tornando ainda mais necessário em um mundo de conteúdo móvel e páginas da Web com grande quantidade de mídia. Os dados armazenados em *cache* são alternados conforme a demanda. Os navegadores comparam continuamente o conteúdo entre seus dados em *cache* e o conteúdo ao vivo no *site*. Se os conteúdos mudarem, novos arquivos de Internet serão baixados e entrarão no *cache* do navegador. Entre as técnicas de *caching*, destaca-se a *Content Distribution Network* (CDN) que apresenta servidores *proxy* localizados em vários locais para entrega de conteúdo mais rápida. As CDNs usam vários servidores para reter cópias de mídia avançada e conteúdo. Quando um usuário envia uma solicitação, essa é enviada ao servidor CDN mais próximo geograficamente. Isso significa que os arquivos de mídia carregam mais rapidamente e reduzem a carga na rede primária. Outra técnica trata-se de um sistema de armazenamento global *peer-to-peer* (P2P) que replica várias cópias de um arquivo para melhorar a disponibilidade e oferece suporte ao gerenciamento de *cache*, visando minimizar as latências de acesso. O armazenamento em *cache* na rede é um componente-chave na rede centrada em informações. Esse habilitador apresenta níveis consideráveis de popularidade (nota 4) e inovação (nota 4), e se destaca em relação aos requisitos (nota 7) para o 6G e na sinergia (nota 7) com outros habilitadores. Os *caches* de rede são essenciais para as ICNs, a evolução da CDN, e deverá fazer parte da arquitetura global do 6G cobrindo parte do escopo do tipo E1 (nota 4).

3.4.14 *Intent-Based Networking* (IBN)

Em uma rede baseada em intenção ou em inglês *Intent-Based Network* (IBN), a intenção ou política de quem administra/opera (a rede) é expressa de forma abstrata e prescritiva. IBN tem sido motivada para abstrair o gerenciamento de alto nível sobre redes complexas, heterogêneas e distribuídas, além das evoluções recentes em AI e ML, especialmente em tópicos como processamento de linguagem natural (*Natural Language Processing*) e entendimento de linguagem natural (*Natural Language Understanding*). Como IBN está fortemente relacionado ao gerenciamento da infraestrutura, este habilitador possui alta aderência ao escopo E4. Como tanto recursos de comunicação, quanto de computação podem estar abrangidos por IBN, também há boa aderência com os escopos E3 e E2. Há também forte aderência ao escopo E1, dado que IBN tem como um dos focos auxiliar no gerenciamento fim-a-fim da rede. Este habilitador não foi referenciado em nenhum dos 54 trabalhos analisados no Relatório da Atividade 2.3 [5]. IBN vem sendo utilizado em tecnologias propostas para 5G e, portanto, é um habilitador de pouca inovação. Na direção de cima para baixo (*top-down*), IBN pode ser considerado um habilitador com alto impacto sinérgico, gerando as condições que levam AI/ML e SON a configurar habilitadores de baixo nível. Este habilitador pode contribuir em 3 dos 15 requisitos listados na Tabela 2, ou seja, IBN alcança nota 2 com relação a requisitos.

3.4.15 *Augmented/Virtual Realities* (AR/VR)

As realidades Aumentada/Virtual serão altamente impulsionadas pelas 5^a e 6^a gerações de redes móveis, possuindo características altamente especializadas e sendo enquadradas como aplicações que demandam muitos recursos da rede. Aplicações para AR/VR, por exemplo, interações remotas avançadas, produzem uma enorme quantidade de dados e demandam confiabilidade e taxas de dados extremas. Nesse contexto, possui alta aderência ao escopo universal (E1) definida com 70% (nota 7), apresenta grau máximo de aderência para E3 (100%) e boa aderência (60%) ao escopo E4. Apesar de ser aderente ao escopo de telecomunicações (E2), sua nota para esse escopo foi atribuída em 30%. Este habilitador possui popularidade de 2%, pois

ocorre em apenas um dos 54 trabalhos relacionados. AR/VR apresenta várias inovações para 6G, por exemplo, ambientes mais sofisticados de realidades cruzadas, experiências no multiverso, dentre outras. Desta forma, foi atribuída nota 8 para esse quesito. Representações dos mundos físico e virtual podem contribuir significativamente com os demais habilitadores, assim atribuiu-se nota 9 para sinergia. Sobre sua importância em relação aos requisitos elencados na Tabela 2, atribuiu-se nota 8, ou seja, este habilitador contribui para a maioria dos requisitos elencados.

3.4.16 *Cloud Elasticity*

Cloud Elasticity se refere à capacidade de adicionar e remover recursos “*on the fly*” para lidar com as variações de demanda em uma infraestrutura de nuvem. Percebe-se uma alta aderência deste habilitador em relação a todos os escopos (E1 - 80%, E2 - 60%, E3 - 90% e E4 - 70%), pois a escalabilidade e plasticidade provida pela computação em nuvem são características essenciais para a próxima geração de redes móveis. Embora nem sempre o termo *Cloud Elasticity* seja utilizado, nota-se que a essência deste habilitador é bastante popular, especialmente em trabalhos do escopo E3. Este habilitador não é tão inovador hoje em dia, mas considerando que os problemas de elasticidade continuam em aberto, acredita-se que ainda exista um grau de inovação médio em relação à aplicação dessas técnicas na concepção de arquiteturas de redes. Nota-se um alto grau de sinergia deste habilitador com os demais, visto que a computação em nuvem, bem como a capacidade de elasticidade facilitam o provisionamento de componentes de maneira escalável, o que é recorrentemente um requisito para a utilização dessas tecnologias. Por fim, percebe-se também um alto grau de relevância em relação aos requisitos (nota 9), especialmente os que se referem à escalabilidade e eficiência elencados na Tabela 2.

3.5 Imutabilidade

Nesta seção, são analisados os habilitadores relacionados ao fundamento de imutabilidade.

3.5.1 *Distributed Ledger Technologies (DLTs)*

Apesar de apresentar baixa popularidade, principalmente nos escopos E1, E2 e E3, sendo citadas em apenas em 7,41% das publicações analisadas, DLTs são um habilitador com alta aderência, sobretudo aos escopos E1, E3 e E4. Estando associado à evolução da *softwarização* da rede e à integração/evolução da NFV em nível de microfunções, no escopo E1. Já no escopo E3 e E4, este habilitador deve fomentar a integração de novos mercados, com requisitos de computação determinística descentralizada e registro imutável de informações, à estrutura 6G. Não é uma tecnologia inovadora, ainda que não massificada, mas seu uso e viabilidade já são conhecidas a muito tempo. Este é um habilitador chave para a evolução das arquiteturas com alto impacto sinérgico, principalmente com relação aos habilitadores de mercados digitais, com significativa contribuição em relação aos requisitos de confiabilidade, segurança e privacidade listados na Tabela 2, ou seja, 20% dos requisitos listados.

3.5.2 **Blockchain: Ethereum, DFINITY, Cardano**

Blockchain é uma tecnologia com grau máximo de aderência ao escopo E4, sendo bastante implementada em casos de uso específicos. Além disso, também possui um alto nível de aderência ao E3, estando presente em boa parte de trabalhos cuja computação é o foco da arquitetura,

e ao E2, onde pode ser empregado para resolver problemas de forma descentralizada sem o uso de intermediários. Sua popularidade é considerável, sendo mencionada em 21 dos 54 artigos da revisão literária, porém seu grau de inovação é baixo, já que este habilitador vem sendo explorado há tempos em diversas aplicações. Este habilitador possui um alto grau de sinergia, visto que sua implementação na arquitetura cobre o registro imutável de informações trocadas entre diversos habilitadores trabalhando em conjunto para um melhor funcionamento. Este habilitador permite também a execução de computação determinística, o qual é um aspecto importante para o futuro de NFV. Em contrapartida, destaca-se sua relevância especialmente nos requisitos de confiabilidade, segurança e privacidade, sendo 3 dos 15 listados na Tabela 2 e, portanto, possui nota 2.

3.5.3 Tangle: IOTA

IOTA é um projeto de um ambiente para IoT que utiliza da solução Tangle para registro descentralizado, perene e imutável de transações sem custo, além do suporte a contratos inteligentes chamados de *IOTA Smart Contracts Protocol* (ISCP) [94]. Tangle é uma alternativa a Blockchain. Em termos de aderência, IOTA é mais aderente aos escopos E4 e E3, respectivamente. Embora esteja sendo usado em várias indústrias, IOTA em telecomunicações ainda é raridade, se é que existe. A aderência a um cenário global é similar à aderência ao mundo de telecomunicações. Por ser uma DLT, consideramos que IOTA pode ser aplicado em qualquer contexto que envolva *tokenização* e contratos inteligentes. Entretanto, no Relatório da Atividade 2.3 [5], IOTA não aparece diretamente em nenhum dos 54 trabalhos analisados. IOTA é uma proposta extremamente inovadora. Se estivesse presente em uma arquitetura, IOTA permitiria que muitos outros habilitadores fossem construídos nesse ambiente. Portanto, a sinergia com IOTA é entendida como alta. Em termos de requisitos, IOTA tem relação com os seguintes requisitos propostos na Tabela 2: confiabilidade, privacidade, segurança, acesso ao espectro (um mercado de espectro pode ser construído em IOTA) e eficiência energética (gasta menos energia que *Blockchain*), alcançando nota 4.

3.5.4 *Smart Contracts* (SCs) e *Tokenização*

Contratos inteligentes são programas executáveis que atuam nos termos e condições de um determinado contrato utilizando uma infraestrutura computacional [13]. Este habilitador possui pouca aderência aos escopos E1 e E2, porém pode ser utilizado em aspectos localizados em uma futura arquitetura para o 6G. Assim, para o escopo E1 e E2 a nota da aderência será igual a 2. O escopo E3, que possui uma forte componente de computação, a aderência foi considerada como 4, pois há mais espaço para o seu uso neste contexto. Para o escopo E4, este habilitador é muito aderente e pode contribuir para uma arquitetura neste escopo, assim sua nota foi estabelecida como 9. No Relatório da Atividade 2.3 [5], há 6 citações diretas em um total de 54 trabalhos avaliados, logo, a sua popularidade será 3. No que diz respeito à inovação, este habilitador é disruptivo para o 6G, e portanto recebeu nota 10. Como há uma forte sinergia com *Blockchain* e outros habilitadores ligados ao fundamento da imutabilidade, sua nota em sinergia foi 10. Este habilitador contribui para o requisito de segurança (listado na Tabela 4) e assim recebeu nota 2.

3.5.5 Micropagamentos

Entendemos que micropagamentos tem relação com *tokenização*, ou seja, a utilização de habilitadores para monetizar transações, acesso a dados, computação, etc. em uma arquitetura de informação. A maioria dos trabalhos relacionados a micropagamentos se encontra nos escopos E4 e E3. DLTs podem ser aplicadas de imediato no suporte a pagamentos digitais, embora muitas delas tenham custo de transação considerável. É claro que existem muitas DLTs com custo baixo e ainda aquelas sem custo. Existem também as *Central Bank Digital Currency* (CBDC)es que estão em desenvolvimento mundo afora e no Brasil (evolução do PIX), bem como as já tradicionais soluções de cartão de crédito (10% de custo de transação). *Decentralized Finance* (DeFi) é outro exemplo. Micropagamentos em telecomunicações (E2) não apareceram nos trabalhos revisados nesse projeto. Entretanto, eles já existem. O mesmo ocorre no escopo E1. Acreditamos, portanto, que pagamentos digitais e micropagamentos estão sendo aprimorados para uso em todos os escopos. Nos escopos E1 e E2, não foram encontradas ocorrências deste habilitador. Com base nessas informações, determinamos uma popularidade de 10%. Com relação ao grau de inovação, acreditamos que os pagamentos digitais já estão criando uma onda de inovação disruptiva. Como a infraestrutura e os serviços são possíveis clientes dos pagamentos digitais, incluindo funções de rede virtualizadas, acreditamos que este habilitador tem grande potencial sinérgico, impactando consideravelmente todo o 6G. Quanto ao atendimento aos requisitos do 6G, temos avaliação semelhante a feita em Tangle: IOTA, ou seja, foi atribuída nota 4 a este habilitador.

3.5.6 Mercado de Dados

O mercado de dados é viabilizado por pagamentos digitais associados a muitas outras tecnologias, como orientação a serviços, bancos de dados, tecnologias de privacidade, reputação, segurança, randomização, contextualização, etc. O grau de aderência do mercado de dados é semelhante ao de micropagamentos e DLTs. Ou seja, há maior aderência aos escopos E4 e E3, mas já podendo ser empregado em todos. Com relação a popularidade, o habilitador não aparece explicitamente nas Tabelas 8-12 do relatório da Atividade 2.3 [5]. O mercado de dados digital é algo novo, em construção. No entanto, já existem várias *tokens* e soluções técnicas para isso. Consideramos fomentar um mercado de dados sem ferir a privacidade das pessoas será uma demanda importante para treinar as inteligências artificiais. O grau de inovação deste habilitador é considerado alto. Como todos os componentes do 6G são clientes de dados de outros, enxergamos este habilitador como tendo alto grau de impacto sinérgico. Em termos de atendimento aos requisitos da Tabela 2, entendemos que o mercado de dados pode contribuir para atender os requisitos confiabilidade, acesso ao espectro, segurança e privacidade, alcançando nota 3.

3.5.7 Mercado de Coisas Conectadas ou *Things Economy*

Bastante similar ao de dados, pois coisas conectadas também geram dados. O mercado de dados pode ser maior em um primeiro momento. Entretanto, à medida que a penetração de IoT aumenta, espera-se uma convergência maior entre ambos os mercados. O mercado de coisas tem naturalmente mais relação com E2 e E1 (nota 6), podendo ser também aderente ao E3 (infraestrutura e *sites* de computação sensoreada por sensores pagos), mas em menor grau (nota 4). Em E4, já existem casos de uso dessa ideia, alguns em IOTA, Ethereum, e outras DLTs (nota 10). Em termos de popularidade nos artigos estudados, não encontramos nenhuma ocor-

rência explícita, embora existam casos fora do mundo acadêmico. Quanto à inovação e impacto sinérgico, consideramos o mesmo do mercado de dados. Interessantemente, esse mercado pode contribuir para que dispositivos de controle conectados (sensores de diversos tipos associados a infraestrutura de telecomunicações, por exemplo) monetizem seu uso, oportunizado a chamada economia do compartilhamento de infraestrutura. Assim sendo, temos contribuição nos seguintes requisitos (da Tabela 2): sensoriamento de cobertura, eficiência espectral, precisão espacial e sensoriamento de espectro para acesso dinâmico, levando à nota 2 para este habilitador.

3.5.8 Mercado de Espectro Eletromagnético

Este habilitador é bastante semelhante aos outros mercados. Acreditamos que a aderência aos escopos E2 e E1 seja maior (com nota 8 em ambos), máxima em E4 (nota 10) e mínima em E3 (nota 0). As justificativas são as seguintes: a aplicabilidade do mercado de espectro do ponto de vista técnica é imediata nos escopos E1 e E2. Tecnicamente, nada impede a construção de um mercado nacional e global dinâmico de espectro eletromagnético. Rádio cognitivo já é uma solução madura e pode alimentar tal mercado, bem como a compra e venda oportunística de fatias de espectro de operadores licenciadas, o aluguel de bandas de frequência, incluindo inclusive faixa de frequência em uso pelos governos. No E4, a aplicabilidade é máxima, pois é mais fácil de ser viabilizada. Já no E3, a aplicabilidade de um mercado de espectro é fora de escopo, pois os operadores de cloud computing e infra-computacional não demandam por esse habilitador da mesma forma que os telecomunicações. Em termos de popularidade, temos apenas o trabalho de Maksymyuk et al. [9] que explora exatamente esse contexto. Por isso, a nota de popularidade foi 1. Inovação e impacto sinérgico são altos e semelhantes (com nota 9 em ambos), mas baixo atendimento aos requisitos da Tabela 2 (nota 2).

3.5.9 Mercado de Funções Virtuais de Rede

Novamente, este habilitador é semelhante aos demais relacionados a mercados. Esse mercado já faz parte de E3 e E4 (com nota 10 em ambos). E2 está adotando este habilitador no contexto de O-RAN, E-RAN, (*Software Defined RAN*) (SD-RAN), dentre outros, alcançando nota 8. E1 (com nota 7) é o próximo passo, pois a aplicabilidade global demanda por casos de sucesso em E2 primeiro visando romper as barreiras de aceitação existentes. Apenas um artigo foi analisado da literatura com este habilitador, o que torna sua popularidade bastante baixa. Este habilitador possui inovação e impacto sinérgico similar aos dos mercados anteriores (com nota 9 em ambos). Em termos de requisitos, contribuí para confiabilidade, eficiência energética, segurança e privacidade (obtendo nota 3).

3.5.10 Mercado de Infraestrutura e Fatias

Este habilitador corresponde a um mercado já existente, que inclusive já facilita o compartilhamento de infraestrutura no Brasil. A novidade fica pela venda de fatias de recursos dinamicamente. Ainda assim, a popularidade de um mercado dinâmico de infraestrutura e fatias foi baixa na nossa revisão bibliográfica. Encontramos apenas 2 artigos focados nesse tema. Em termos de inovação, consideramos que por já estar em uso, este habilitador tem grau de inovação menor (nota 8). Mas, não muito menor devido ao mercado de fatias. O impacto sinérgico é alto (nota 9). Em termos de requisitos, este habilitador (com nota 6) contribui para muitos deles, pois muitos requisitos apresentados na Tabela 2 dependem da infraestrutura disponível e da estratégia de fatiamento empregado. Em termos de aplicabilidade, temos as

seguintes notas e justificativas, respectivamente: (E1) nota 9, pois a criação de um mercado de infraestrutura e fatias global é mais aderente ao *status quo* do que o de espectro; (E2) nota 8, pois a aplicabilidade apesar de alta, ainda enfrenta barreiras em muitos operadores; (E3) nota 10, pois no contexto de *cloud computing* a aplicabilidade é mais aceita e imediata; (E4) idem ao E3.

3.6 Inteligência

Nesta seção, são analisados os habilitadores relacionados ao fundamento de inteligência artificial e aprendizado de máquina.

3.6.1 Inteligência Artificial (IA)

O suporte nativo de inteligência artificial é um dos habilitadores das redes 6G. Devido à alta capacidade de generalização e necessidade de resolução de problemas complexos na comunicação, organização e arquitetura das redes 6G, técnicas de inteligência artificial têm sido utilizadas. Desta forma, este habilitador pode ser classificado como popular no meio científico e tecnológico, bem como classificado com aderências altas para máxima nos escopos E1 (nota 7), E2 (nota 10), E3 (nota 10) e E4 (nota 8), visto que pode influenciar nas comunicações e tomadas de decisão da infraestrutura como um todo. Apesar deste habilitador ser conhecido a bastante tempo, as inovações recentes justificam uma boa capacidade de inovação (nota 6), bem como de sinergia (nota 7) com todos os componentes de redes 6G. Das publicações analisadas, 11 utilizam inteligência artificial para resolver problemas de arquitetura, organização, latência, mobilidade, confiabilidade, dentre outros. Com relação aos requisitos apresentados na Tabela 2, inteligência artificial contribui de maneira relevante, alcançando nota 7.

3.6.2 Computação Neuromórfica

Trata-se de uma tecnologia nova que acomoda algoritmos de inteligência artificial e aprendizado de máquina em hardware com um gasto energético muito menor que o atual. Vários *chips* neuromórficos já estão disponíveis para desenvolvimento. Entretanto, a sua chegada em massa ainda depende de muitos fatores. A aderência da computação neuromórfica diminui à medida que avançamos do escopo especializado (E4) para o global (E1), sendo que no E4 já poderia ser empregado em provas de conceito e, portanto, possui aderência máxima. Embora trata-se de uma inovação radical disruptiva (nota 10), sua popularidade nos trabalhos estudados é zero. É interessante comentar que a computação quântica é muito mais popular nos trabalhos estudados de 6G do que a computação neuromórfica. O quanto este habilitador pode impactar em outros habilitadores do 6G? Acreditamos que em grande parte daquilo que se relaciona com AI/ML, ou seja, nota 7 em sinergia. Já a respeito de atender os requisitos de projeto do 6G (Tabela 2), temos ampla relação (i.e., nota 10). Praticamente todos eles poderiam se beneficiar deste habilitador, caso ele fosse incorporado ao 6G.

3.6.3 Zero-Touch Management (ZTM)

Trata-se de um processo de gerenciamento em que todas as tarefas (e.g., planejamento, implantação, provisionamento, monitoramento, otimização e descomissionamento) são executadas automaticamente, sem qualquer intervenção humana. Um caso de uso utilizado com frequência para demonstrar as propriedades de um gerenciamento *zero-touch* consiste na gestão de

NS. Dessa forma, a aderência desse habilitador é maior no escopo E2. Também se adere ao escopo E4, devido ao uso em arquiteturas especializadas voltadas para o gerenciamento de rede. Tem baixa popularidade, com valor de apenas 4%. Ainda assim, é um habilitador com grau forte de inovação e médio em termos de impacto sinérgico. Com relação aos requisitos de 6G estabelecidos na Tabela 2, o habilitador contribui na construção de 7 dos 15 requisitos considerados.

3.6.4 Aprendizado de Máquina ou Machine Learning (ML)

Predominantemente, os trabalhos da literatura consideram a inteligência como um vetor no direcionamento das novas arquiteturas de redes móveis. Na análise que este relatório propõe, inteligência foi particionada em habilitadores tecnológicos específicos. Sendo assim, dentro de Inteligência Artificial verificou-se a aderência do habilitador tecnológico Aprendizado de Máquina nos escopos E1-E4.

Em E1, atribui-se a aderência do habilitador tecnológico aprendizado de máquina com grau 6. Essa atribuição, sustenta-se no fato de que nem todos os trabalhos do estudo valeram-se do habilitador em específico, sem prejuízo a possibilidade estarem utilizando outras tecnologias para inteligência. Também, registra-se maior ocorrência da exploração do aprendizado de máquina no Escopo Telecomunicações (E2), o que levou a atribuição do grau de aderência 8, porque grande parte dos trabalhos valeram-se da utilização do habilitador. Para E3, registra-se uma aderência com grau 7 da utilização do aprendizado de máquina em abordagens que foram classificadas no Escopo Computação. O aprendizado de máquina adere-se a E4, isto é, às arquiteturas de redes móveis de propósitos específicos, com grau 4. Essa atribuição de grau menor, pode ser sustentada no fato que as arquiteturas do escopo são específicas a um propósito e muitas vezes não incluem AI imediatamente.

Quanto a popularidade, neste relatório registra-se a ocorrência objetiva do habilitador aprendizado de máquina nos escopos discutidos acima. Em resumo a popularidade do habilitador Aprendizado de Máquina é de 4, considerando o total de trabalhos e os que registram sua ocorrência.

Quanto a graduação atribuída ao habilitador tecnológico aprendizado de máquina concede-se o grau dois (2), porque tecnologias de IA, sobretudo aprendizado de máquina já são consolidadas. A movimentação que se percebe é aplicação e seus desdobramentos das técnicas de aprendizado de máquina em atividades de gerenciamento e orquestração das redes, em diversos níveis conceituais.

Quanto a sinergia, isto é, o relacionamento do habilitador tecnológico com demais gradua-se o aprendizado de máquina como oito (8). Justifica-se essa graduação porque o aprendizado de máquina permeia e dá suporte direto a inúmeras outras tecnologias habilitadoras como energia, sensoriamento, comunicação, *softwarização*, imutabilidade e segurança.

Assim, de maneira geral, gradua-se a contribuição desse habilitador no requisito como sendo cinco (5). Registra-se a ocorrência de sete (7) requisitos que poderão ser potencialmente impactados pelo aprendizado de máquina.

3.6.5 *Self-Organizing Network* (SON)

Self-Organizing Network é um termo cunhado pelo 3GPP que propõe conceitos de computação autônoma empregados ao gerenciamento do rádio em redes móveis. Em termos de aderência percebe-se um grau mais elevado em relação aos trabalhos do E2 (90%), visto que

SON é uma técnica que vem sendo empregada às redes móveis desde o 3G. Percebe-se, também que tal conceito tem influenciado trabalhos do E1 (40%) e E3 (50%). Nota-se uma baixa aderência em relação ao Escopo E4 (30%), por se tratar de um assunto muito restrito ao plano de gerenciamento. Observa-se que a popularidade do SON está em declínio mesmo no escopo E2, o que se evidencia ao considerarmos que apenas 2 dos 54 trabalhos avaliados citam este habilitador (1 no escopo E1 e 1 no escopo E3). A proposta original do SON foi concebida há mais de duas décadas, e portanto, este habilitador não é considerado uma solução inovadora, porém seus conceitos podem ser expandidos para outros pontos da rede e isto representa uma inovação. Conclui-se que as soluções empregadas pelo SON carecem de aprofundamento em técnicas de inteligência artificial. Percebe-se um alto grau de sinergia entre o SON e os demais habilitadores, haja vista que SON é um habilitador que abrange o plano de gerência como um todo. Observa-se também que o SON tem a capacidade de impactar de maneira significativa nos requisitos da Tabela 2, obtendo nota 7. Por exemplo, SON pode ser utilizado para aplicação de políticas de QoS de maneira a diminuir a latência e aumentar a confiabilidade; ou para melhorar a eficiência (tanto energética quanto espectral); ou ainda, para aplicar políticas de garantia de segurança e privacidade.

3.6.6 *Self-Evolving Network (SEN)*

Self-Evolving Network (SEN) refere-se ao emprego de técnicas de inteligência artificial com o objetivo de criar redes não apenas com capacidade de tomada de decisão sem intervenção humana, mas também com capacidade de aprendizado e adaptação. Percebe-se que a aplicação de técnicas de inteligência artificial no gerenciamento de rede tem boa aderência em relação a todos os escopos E1 (70 %), E2 (80 %), E3 (80 %) e E4(60%), por representar um conceito passível de aplicação tanto em redes de computadores quanto de telecomunicações. Entretanto, fica evidente a baixa popularidade do tema ao considerarmos que nenhum dos trabalhos avaliados cita este habilitador. Embora a ideia ainda tenha bastante espaço para aplicação, conclui-se que o tema não é inovador, tal como o habilitador de Aprendizado de Máquina avaliado anteriormente. Assim como SON, percebe-se que SEN apresenta um um alto grau de sinergia em relação aos demais habilitadores, o que é justificado ao considerarmos o escopo amplo deste habilitador no que se refere ao plano de gerenciamento. Percebe-se também que SEN tem a capacidade de impactar de maneira significativa vários requisitos definidos na Tabela 2 (obtendo também nota 7), haja vista a capacidade de atender indicadores restritos tais como alta disponibilidade e eficiência energética.

3.7 Segurança

Nesta seção, são analisados os habilitadores relacionados ao fundamento de segurança.

3.7.1 *Encriptação Homomórfica*

Em um contexto mais geral, a aderência deste habilitador ao E1 pode não ser realidade para as redes 6G sendo preferível adoção de protocolos seguros já consolidados. Já para os E2 e E3, a relevância deste habilitador aumenta, mas ainda para aplicações específicas e contextos onde segurança de dados deve ser elevada. Já para o E4, pensando em redes em que segurança é o fator mais relevante, este habilitador apresenta um uso promissor. Este habilitador é pouco inovador, pois seu uso já é conhecido. Sua sinergia também é baixa, mas apresenta um grande

potencial para redes em que segurança é a principal métrica. Por fim, Encriptação Homomórfica pode contribuir em dois requisitos da Tabela 2, por isso a nota 2.

3.7.2 Tecnologias de Privacidade

É um habilitador que é aderente a todos os escopos. Nos escopos E1, E2 e E3, demandas de privacidade e segurança existem, mas não são o foco da proposta de valor. Entretanto, no escopo E4 a aderência e relevância é significativamente maior que a dos demais escopos, recebendo a nota máxima. Embora segurança e privacidade sejam tópicos importantes para tecnologias 6G, este habilitador não apresenta muita popularidade, aparecendo apenas em 5% dos artigos selecionados. Este habilitador possui um grande grau sinérgico com os outros habilitadores uma vez que os aspectos de segurança estão presentes em todos os outros habilitadores, recebendo nota 8. Por fim, Tecnologias de privacidade podem contribuir em dois requisitos da Tabela 2 (Segurança e Privacidade), por isso a nota 2.

3.7.3 Tecnologias de Confiança/Reputação

Habilitadores nessa área são muito importantes para todos os sistemas centralizados ou que dependem da ajuda de terceiros para fornecer confiança e reputação. A alternativa descentralizada é a DLT. Novamente, as arquiteturas especializadas (do escopo E4) são as que mais exploram essas tecnologias conforme nosso estudo. Em seguida, observamos maior aderência ao E3, dado que muitas das técnicas são computacionais. Em seguida tem-se E2, que passa a demandar maior preocupação com confiança e reputação à medida que a *softwarização* avança. Por fim, tem-se a demanda global. As técnicas para melhorar o nível de confiança e determinar o grau de reputação são relacionadas ao mundo dos serviços. Em geral, programas que avaliam o ciclo de vida dos serviços. Como tal, este habilitador tem aderência em todos os escopos, podendo ser empregado mais facilmente do E4 para o E1. Essas tecnologias evoluem à medida que novas arquiteturas de serviços são desenvolvidas, tendo nos estudos relacionados a 6G algumas novidades interessantes. Por isso, consideramos o nível de inovação médio. Já em termos de impacto sinérgico, tais técnicas têm impacto importante nas propostas de redes abertas (como O-RAN e SD-RAN) e eventuais núcleos também abertos que possam aparecer em 6G. SDN e NFV também podem se beneficiar deste habilitador na hora de estimar confiança e reputação de controladores e orquestradores em um ecossistema aberto. Quanto a contribuir com o atendimento dos requisitos da Tabela 2, enxergamos relação com os requisitos: privacidade, segurança e confiabilidade. Logo, este habilitador recebeu nota 2. A popularidade desse habilitador é baixa nos artigos estudados, aparecendo em apenas 1 trabalho (nota 1).

3.7.4 Tecnologias de Identificação

Tecnologias de identificação têm relação com os habilitadores de confiança e reputação. Entretanto, com o advento do IoT, técnicas de identificação de coisas (*Radio Frequency Identification* (RFID), *Quick Response* (QR) *codes*, outros identificadores únicos) avançaram até mesmo para o escopo global. Identificadores únicos globais podem ser atribuídos aleatoriamente, alocados por organismos de controle ou gerados a partir de função *hash*. Portanto, este habilitador pode ser aplicado de imediato em todos os escopos para identificar coisas da infraestrutura, o que é interessante para alimentar gêmeos digitais e outros serviços. Novas técnicas como a nomeação auto-verificável começa a ser considerada pelo 3GPP no contexto de ICN. Entretanto, não há limites de escopo para aplicação dessas técnicas de nomeação que

permitem identificar e localizar entidades de forma íntegra. Em termos de aderência, temos comportamento similar a do habilitador de reputação. A aderência às técnicas de identificação de coisas acaba contrabalançando com a aderência desconhecida dos nomes auto-verificáveis. Uma aplicabilidade crescente das tecnologias de identificação ocorre do escopo E4 (nota 10), passando pelo E3 (nota 8), pelo E2 (nota 6) e finalmente E1 (nota 4). Enxergamos que a aplicabilidade é maior em escopo especializado e no escopo de computação, do que de telecomunicações e global. O mesmo acontece em termos de inovação, pois enquanto muitas técnicas como RFID já amplamente utilizadas (baixa inovação), as novas técnicas estão no lado oposto da moeda (altamente inovadoras). O impacto sinérgico é alto de qualquer forma em 6G, pois essas técnicas permitem melhor identificar entidades físicas e virtuais. Requisitos como segurança e privacidade (da Tabela 2) podem ser melhor atendidos se entidades são identificadas apropriadamente, justificando a nota 2 para este habilitador.

3.8 Tecnologia Quântica

Nesta seção, são analisados os habilitadores relacionados à tecnologia quântica.

3.8.1 *Quantum Computing (QC)*

Quantum Computing se destaca pela sua aderência em computação, tendo como resultado grau máximo em E3. Além disso, possui um grau de aderência relevante para E4, visto seu uso no escopo especializado. Nos escopos E1 e E2, a computação quântica já poderia ser aplicada para solucionar problemas de minimização de uso de recursos ou outros de comunicação digital. Entretanto, a aderência deste habilitador bate de frente com as dificuldades inerentes de se introduzir essa nova técnica de otimização nesses escopos. Por esse motivo, consideramos a aplicação da computação quântica nos escopos E1 e E2 algo a ser pesquisado e desenvolvido, ainda muito preliminar. Devido à sua presença em 8 dos 54 artigos pesquisados, apresenta um baixo grau de popularidade. Em contrapartida, é uma tecnologia extremamente inovadora, com pesquisas e estudos em desenvolvimento para maior exploração da mesma, recebendo nota máxima para o grau de inovação. Além disso, possui um grau mediano de sinergia, vista a necessidade de se trabalhar com outros habilitadores em conjunto para tornar a computação quântica uma realidade em redes 6G. Em relação aos requisitos, contribui em 7 dos 15 listados na Tabela 2, recebendo nota 5 para tal.

3.8.2 *Quantum-Assisted Communications (QAC) e Quantum Internet (QI)*

Telecomunicações assistidas por computação quântica e Internet quântica são revoluções importantes para as arquiteturas futuras de informação, e podem já ter papel, ainda que pequeno, em 6G. A empregabilidade dessas tecnologias na prática é pequena, reduzindo de E4 para E1. Em termos de popularidade, esses habilitadores aparecem em 6 trabalhos dentre os 54 estudados. Ou seja, tem-se uma popularidade de 11,11%, o que nos dá uma nota 2, dado o arredondamento feito para cima. Este habilitador tem alto grau de inovação, podendo afetar o desenho do 6G desde a camada física até as mais altas. Assim como a computação neuromórfica, este habilitador pode contribuir para atender a maioria dos requisitos de projeto do 6G (descritos na Tabela 2, alcançando nota 8).

3.8.3 *Quantum Machine Learning (QML)*

Quantum Machine Learning (QML) é uma área de pesquisa que explora a interação de ideias da computação quântica e de ML. Este habilitador poderá auxiliar diferentes áreas, como a exploração espacial, nanopartículas, criação de novos materiais por meio de mapas moleculares e atômicos, pesquisas médicas, e segurança de conexão por meio da fusão de IoT e Blockchain. Este habilitador possui aderência mediana aos escopos E3 e E4 por ser base para arquiteturas especializadas e trazer novas ideias acerca de computação. A aderência decresce para o escopo E2 e depois para o escopo E1, uma vez que a empregabilidade ainda é limitada. Este habilitador possui baixa popularidade, estando presente em 3 dos 54 artigos pesquisados. Em contrapartida, é um habilitador altamente inovador, com grau máximo para nesse quesito. QML possui grau médio em sinergia, estando relacionado a outros habilitadores que envolvem computação quântica. Este habilitador contribui para 7 dos 15 requisitos da Tabela 2, recebendo nota 5 neste quesito.

3.8.4 *Post-Quantum Security*

A segurança, pós-quântica é uma área que envolve técnicas de segurança que podem suportar ataques de computadores quânticos [95]. Este habilitador possui uma certa aderência ao escopo E1 que aborda considera o uso de diversas tecnologias, como a computação quântica, e, portanto, sua aderência foi estabelecida como sendo 5. Para os escopos E2 e E3, não há aderência, pois, nestes escopos há apenas o foco na computação tradicional. Para o escopo E4, também há aderência, porém um pouco menor quando comparada a E1, e neste caso a nota será atribuída 4. No Relatório da Atividade 2.3 [5], há 7 citações diretas em um total de 54 trabalhos avaliados, logo, sua nota em popularidade é 1. A *Post-quantum Security* é muito inovadora e totalmente disruptiva para o 6G e, por isso, sua nota foi indicada como 9. Por outro lado há uma grande sinergia com a computação quântica em geral, porém há muita pouca sinergia com outros habilitadores e assim sua nota de impacto foi atribuída um valor 7. *Post-quantum Security* possui relação direta com 2 dos 15 requisitos fundamentais ao 6G conforme Tabela 2, assim sua nota é 1 (13,33%).

Tabela 6: Parte 1: Análise dos habilitadores importantes para 6G. Notas no intervalo 0-10.

	Habilitador		Aderência				Popularidade	Inovação	Sinergia	Requisitos	Relevância	
	#	Nome	E1	E2	E3	E4					Média ¹	AHP ²
Energia	1.1	Energy harvesting	7	7	7	10	2	3	3	1	5,000	0,291
	1.2	Wireless power transferring	0	4	0	4	1	7	5	1	2,750	0,317
	1.3	Green technology	7	7	7	7	1	7	4	4	5,500	0,392
Sens.	2.1	Ubiquitous sensing	9	2	2	8	1	5	8	5	5,000	0,500
	2.2	IoT-based sensing	9	2	2	8	1	5	8	5	5,000	0,500
Comunicação	3.1	Unmanned Aerial Vehicles	10	9	1	7	4	0	8	5	5,500	0,040
	3.2	THz Communications	9	10	3	4	4	9	9	8	7,000	0,051
	3.3	Visible Light Communications	9	10	3	4	3	5	9	8	6,375	0,049
	3.4	Ultra massive MIMO	6	10	3	8	4	7	9	7	6,750	0,049
	3.5	Intelligent Reflecting/Reconfigurable Intelligent Surfaces	9	10	3	4	1	10	9	8	6,750	0,050
	3.6	Optical Wireless Communications	6	9	2	4	3	5	9	8	5,750	0,048
	3.7	Space-Air-Terrestrial-Sea Integrated Networks	8	2	10	8	2	8	6	4	4,875	0,032
	3.8	Device-to-Device	5	10	8	3	6	5	6	8	6,375	0,045
	3.9	Non-Orthogonal Multiple Access	5	8	0	0	10	0	4	2	2,500	0,023
	3.10	Fast accurate beamforming	0	10	0	5	1	0	0	6	2,750	0,018
	3.11	Haptic Protocols	6	4	0	0	2	8	6	1	3,375	0,029
	3.12	Ultra-Dense Networks	8	9	2	0	2	0	7	5	4,130	0,037
	3.13	Internet Information Broadcast Storage	7	10	2	2	2	4	7	4	4,750	0,038
	3.14	Coordinated Multi-Point	5	8	0	0	1	0	2	3	2,375	0,019
	3.15	Intelligent OFDMA	1	9	0	9	1	1	9	9	4,875	0,045
	3.16	High Altitude Plataforms	8	8	0	7	1	2	7	3	4,500	0,034
	3.17	Disruptive waveforms	8	10	5	6	0	7	6	4	5,750	0,037
	3.18	Delay-awarenessIntermittent Conn	5	8	5	6	2	2	7	5	5,000	0,039
	3.19	Communication & Computing & Control Convergence	2	7	10	4	2	7	7	4	5,375	0,041
	3.20	Predictive Resource Allocation	3	8	4	7	1	5	2	3	4,125	0,023
	3.21	Dynamic Spectrum Allocation	7	8	4	6	1	3	5	4	4,750	0,032
	3.22	Cognitive Radio	4	3	3	0	1	7	8	2	3,500	0,035
	3.23	Redes 3D	7	6	2	6	2	7	5	5	5,000	0,033
	3.24	Elastic-RAN	7	8	8	10	3	8	7	6	5,125	0,045
	3.25	Holographic Radio	6	8	6	2	1	8	5	3	4,875	0,033
	3.26	Cell-Free Networking	7	10	7	4	1	7	9	8	6,625	0,051
	3.27	Molecular Communications	5	7	2	7	1	10	3	0	4,375	0,023

¹Média aritmética ²Método AHP (Porcentuais computados por família de habilitadores)

Tabela 7: Parte 2: Análise dos habilitadores importantes para 6G. Notas no intervalo 0-10.

	Habilitador		Aderência				Popularidade	Inovação	Sinergia	Requisitos	Relevância	
	#	Nome	E1	E2	E3	E4					Média ¹	AHP ²
Softwarização	4.1	Software Defined Networking	7	7	6	6	6	1	9	5	5,875	0,072
	4.2	Temporospatial SDN	9	9	2	2	1	9	2	4	4,750	0,042
	4.3	Network Function Virtualisation	7	8	7	5	6	2	9	6	6,250	0,076
	4.4	Multi-access Edge Computing	5	6	9	4	6	6	7	9	6,500	0,073
	4.5	Network Slicing	6	7	6	6	6	5	8	5	6,125	0,070
	4.6	Open RAN	8	8	8	10	3	8	8	6	7,375	0,074
	4.7	Digital Twins	3	3	8	8	1	6	8	5	5,250	0,065
	4.8	Avatars	2	8	8	8	1	10	5	7	6,125	0,062
	4.9	Data Orientation	2	10	8	8	5	0	3	0	4,500	0,039
	4.10	Service Orientation	8	4	10	8	6	3	9	7	6,500	0,075
	4.11	Compute First Networking	1	4	10	4	2	7	4	5	4,625	0,049
	4.12	In-Network Computing	1	4	10	4	2	7	4	5	4,625	0,049
	4.13	Network Caching	4	7	10	7	4	4	7	7	6,250	0,069
	4.14	Intent-Based Networking	8	6	6	9	0	2	2	2	4,375	0,033
	4.15	Augmented Virtual Realities	7	3	10	8	2	8	7	8	6,606	0,068
	4.16	Cloud elasticity	8	6	9	7	9	6	9	9	7,875	0,084
Imutabilidade	5.1	Distributed Ledger Technologies	9	5	10	10	1	5	9	2	6,400	0,093
	5.2	Blockchain: Ethereum & DFINITY & Cardano	2	8	8	10	4	1	9	2	5,500	0,097
	5.3	Tangle: IOTA	6	6	10	10	0	10	9	4	6,875	0,104
	5.4	Smart Contracts e Tokenização	2	2	4	9	2	10	10	2	5,125	0,092
	5.5	Micropagamentos	7	7	10	10	1	10	9	4	7,250	0,108
	5.6	Mercado de dados	7	7	10	10	0	9	9	3	6,875	0,101
	5.7	Mercado de coisas	6	6	4	10	0	9	9	2	7,750	0,090
	5.8	Mercado de espectro	8	8	0	10	1	9	9	2	5,875	0,093
	5.9	Mercado de funções virtuais	7	8	10	10	0	9	9	3	7,000	0,103
	5.10	Mercado de infra e fatias	9	8	10	10	1	8	9	6	7,625	0,118
Inteligência	6.1	Inteligência Artificial	7	10	10	8	8	6	7	7	7,875	0,186
	6.2	Computação Neuromórfica	4	6	8	10	0	10	7	10	6,875	0,178
	6.3	Zero-Touch Management	2	8	0	6	1	7	5	5	4,250	0,126
	6.4	Aprendizado de Máquina	6	8	7	4	4	2	8	5	5,500	0,167
	6.5	Self-Organizing Network	4	9	5	3	1	4	8	7	5,125	0,171
	6.6	Self-Evolving Network	7	8	8	6	0	3	8	7	5,875	0,171
Segurança	7.1	Encriptação homomórfica	3	5	5	8	0	2	2	1	3,250	0,140
	7.2	Tecnologias privacidade	5	5	5	10	2	4	8	2	5,125	0,273
	7.3	Tecnologias confiança	4	6	8	10	1	5	8	2	5,500	0,282
	7.4	Tecnologias identificação	4	6	8	10	1	7	9	2	5,875	0,304
Quântica	8.1	Quantum Computing	2	2	10	6	2	10	5	5	5,250	0,238
	8.2	Quantum-Assisted Communication e Quantum Internet	2	3	4	6	2	9	9	8	5,375	0,323
	8.3	Quantum Machine Learning	3	4	5	5	1	10	5	5	4,750	0,241
	8.4	Post-Quantum Security	5	0	0	4	2	9	7	1	3,500	0,197

¹Média aritmética ²Método AHP (Percentuais computados por família de habilitadores)

3.9 Relevância dos Habilitadores

Nesta seção, analisamos a relevância dos 72 habilitadores considerados nas Seções 3.1-3.8 para o desenho do 6G. Essa análise é conduzida para cada fundamento ilustrado na Tabela 4. Inicialmente, na Seção 3.9.1, apresentamos uma análise dos habilitadores mais importantes, levando em consideração a média aritmética das notas obtidas pelo habilitador nos demais aspectos. Em seguida, na Seção 3.9.2, apresentamos uma análise dos habilitadores mais relevantes, levando em consideração o método AHP [87].

3.9.1 Análise pela Média Aritmética

As Figuras 3 a 7 ilustram os habilitadores mais relevantes para uma arquitetura 6G, para cada fundamento, de acordo com a avaliação apresentada nas Seções 3.1-3.8 e considerando a média aritmética das notas obtidas nos aspectos Aderência, Popularidade, Inovação, Sinergia e Suporte a Requisitos. Foi estipulada como nota de corte a nota 5. Ou seja, na análise pela média aritmética, somente habilitadores com nota maior ou igual a 5 foram selecionados.

De acordo com nossa avaliação, no fundamento Energia (Figura 3a), os habilitadores mais importantes para o projeto do 6G são *Green technology* (1.3) e *Energy harvesting* (1.1), sendo que o primeiro apresenta maior potencial de inovação, maior impacto sinérgico e maior suporte aos requisitos considerados quando comparado ao segundo. Ainda de acordo com a nossa análise de relevância, as tecnologias de sensoriamento *Ubiquitous sensing* (2.1) e *IoT-based sensing* (2.2) são igualmente relevantes, tendo ambas tecnologias atingido o mesmo desempenho, como mostrado na Figura 3b.

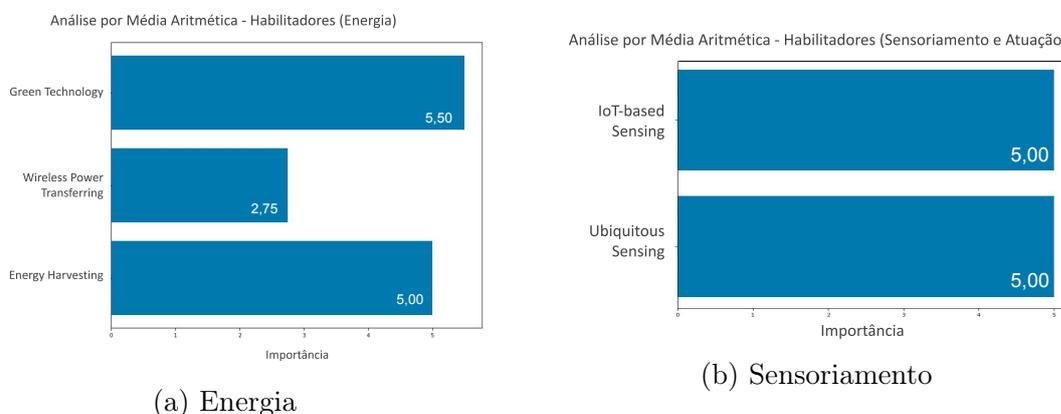


Figura 3: Desempenho dos habilitadores dos fundamentos Energia e Sensoriamento segundo a Média Aritmética.

Em relação ao fundamento Comunicação (Figura 4), nossa avaliação demonstra que E-RAN é o habilitador mais relevante neste grupo (3.24). Isso atesta que a elasticidade de recursos é amplamente desejada em 6G, tendo grande impacto sinérgico e se apresentando com grande potencial de atender diversos requisitos do 6G. O segundo habilitador fundamental é Comunicações THz (3.2), seguido de *ultra massive Multiple-Input and Multiple-Output* (MIMO) (3.4) e IRS/RIS (3.5). Logo em seguida, tem-se *cell free networks* (3.26), VLC (3.3) e D2D (3.8). Esse resultado mostra que existe margem para novidades no desenho do 6G, os quais incluem novos tipos de redes (3.18 e 3.23) e de comunicação, como a óptica em luz visível (3.3) e dispositivo a dispositivo sem células. Novas formas de onda também são habilitadores importantes (3.17).

Ainda, tem-se UAVs (3.1), redes intermitentes e cientes do atraso (3.18), redes 3D (3.23) e convergência de redes e computação (3.19). Por fim, a convergência óptico/sem fio também é indicada como necessária (3.6).

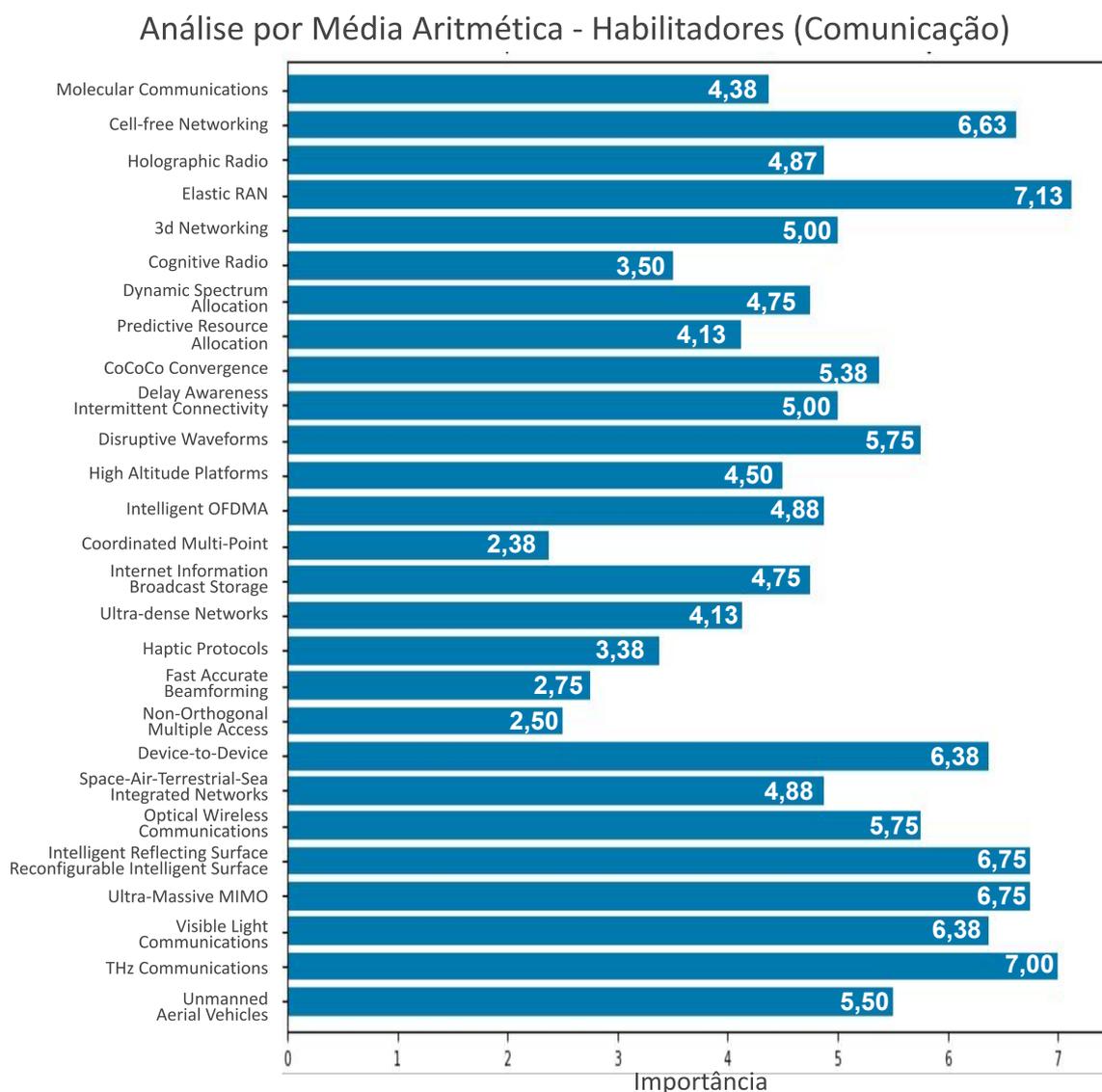


Figura 4: Desempenho dos habilitadores dos fundamentos Comunicação segundo a Média Aritmética.

No fundamento *Softwarização* (Figura 5), o habilitador *Cloud Elasticity* (4.16) obteve o melhor desempenho. Isso demonstra que elasticidade (vertical ou horizontal) deve ser provida para qualquer recurso computacional da arquitetura 6G, independente do escopo (E1-E4). O segundo habilitador mais relevante é O-RAN (4.6), demonstrando que elasticidade na RAN também é altamente desejável. O próximo habilitador que aparece com grande relevância nesse grupo é VR/AR (4.15), o qual é essencial para suportar diversas aplicações avançadas imersivas discutidas em [4]. Nossa análise demonstra que SDN (4.1), NFV (4.3) e MEC (4.4) ainda serão habilitadores importantes para o projeto do 6G, consolidando a ideia de um mercado aberto, multi-fornecedor, virtualizado (na borda e no núcleo), programável e desagregado de funções de rede. Habilitadores como SOA (4.10) e NS (4.5) também continuarão a ser importantes

para o projeto do 6G, sendo integrados com outros paradigmas modernos centrados em serviços como descrição de serviços, expressividade, intenção, coordenação, grafo de serviços, etc. Logo em seguida, tem-se o uso de armazenamento temporário em rede (4.13), o qual pode ser generalizado para o armazenamento em qualquer local da rede (núcleo, regional, borda, dispositivo). Finalmente, tem-se habilitadores relacionados a fusão de realidades, como Avatares (4.8), VR/AR (4.15) e Gêmeos Digitais (4.7).

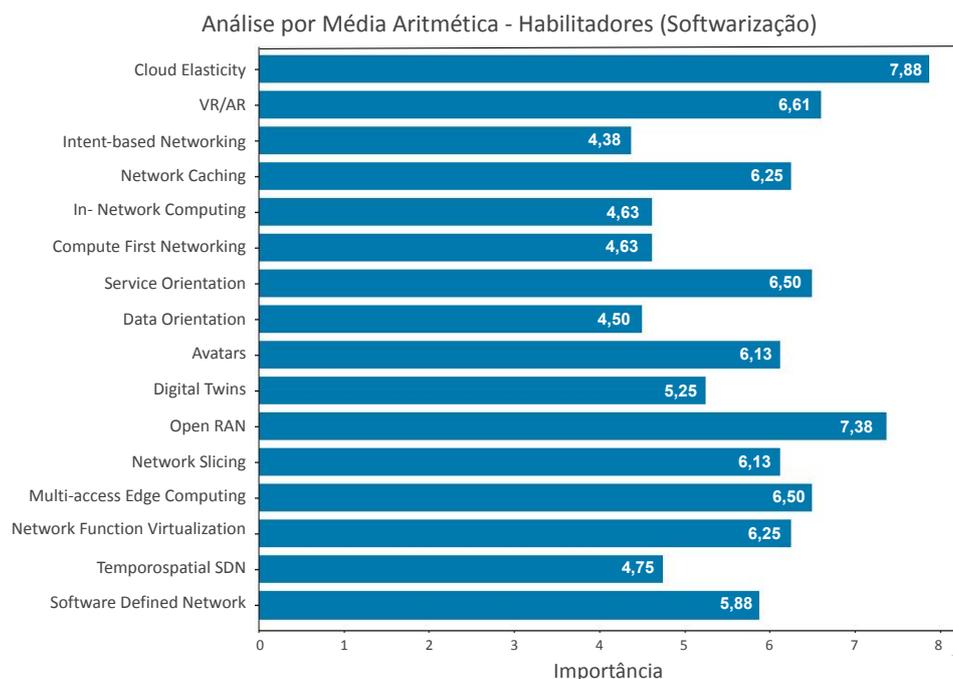


Figura 5: Desempenho dos habilitadores dos fundamentos Softwarização segundo a Média Aritmética.

Para o fundamento Imutabilidade (Figura 6a), o habilitador mais bem avaliado é o mercado de infraestrutura e fatias (5.10). Ou seja, tecnologias que permitam criar mercados de recursos do 6G. Em segundo lugar, ficou o habilitador que permite micropagamentos (5.5), enquanto em terceiro foi o mercado de funções virtuais de rede (5.9), ambos podendo ser integrados a novas RANs, O-RAN, E-RAN, etc. Em seguida tem-se Tangle (IOTA é uma alternativa a *Blockchain*)(5.3), o mercado de dados (5.6), DLTs (habilitador genérico para qualquer tecnologia de imutabilidade e registro de transações)(5.1). Por fim, tem-se mercado de espectro eletromagnético (5.8), mercado de coisas (5.7) e *Blockchain* (5.2). A importância relativa desses habilitadores mostra que imutabilidade e tecnologias para mercados digitais são necessários em 6G. A imutabilidade de transações não serve só ao mercado, mas também para o registro perene de controles onde não se pode ter adulteração. A imutabilidade dos programas de computador (via *smart contracts*) (5.4) oferece segurança ímpar e pode ser utilizada por todo tipo de serviços, dependendo dos requisitos de desempenho.

Em relação ao fundamento Inteligência (Figura 6b), AI (6.1) aparece como o habilitador mais importante de todos, ficando em primeiro lugar. O segundo habilitador mais importante foi de computação neuromórfica (6.2), ou seja, *chips* e dispositivos computacionais que mimetizam o cérebro humano. O terceiro habilitador mais importante desse fundamento foi o de redes auto-evolucionárias (6.6). Redes capazes de evoluir a partir do conhecimento/aprendizado registrado. Aprendizado de máquina (6.4) e redes auto-organizáveis (6.5) finalizam a lista de habilitadores

importantes, tendo aplicação direta na construção de pilotos automáticos capazes de otimizar a implantação, operação e gerência de redes.

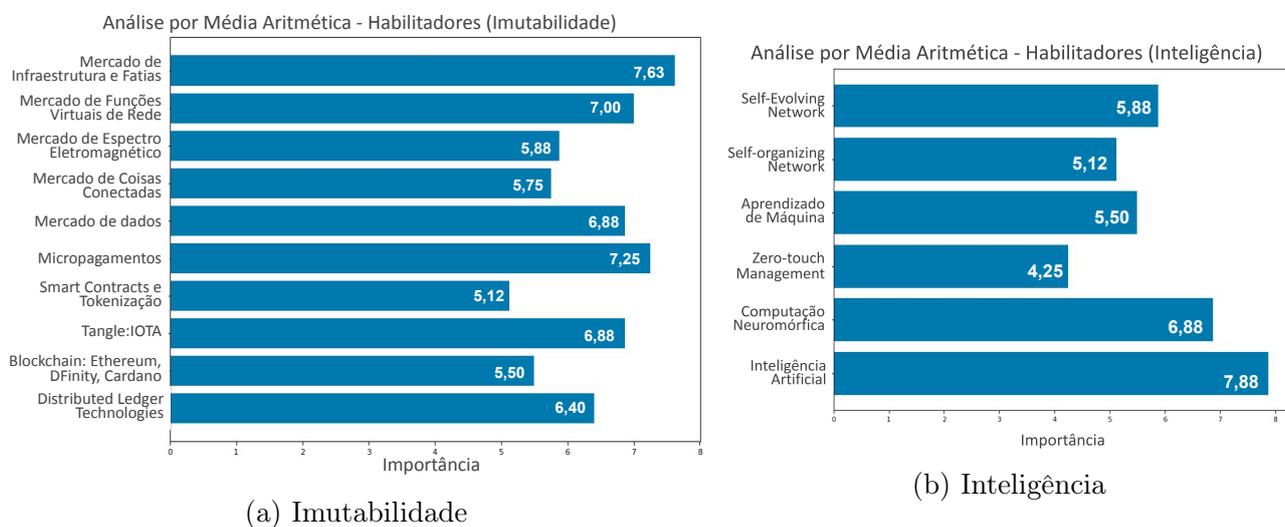


Figura 6: Desempenho dos habilitadores dos fundamentos Imutabilidade e Inteligência segundo a Média Aritmética.

No fundamento Segurança (Figura 7a), poucos habilitadores se destacaram. O mais importante deles foi o relacionado às tecnologias de identificação (7.4), como RFID, nomeação auto-verificável, etc. Em segundo lugar, ficaram as tecnologias de confiança e reputação (7.3), as quais são extremamente importante no contexto de orientação a serviços. O terceiro habilitador neste grupo são as tecnologias de privacidade (7.2). Na era da *softwarização*, segurança não pode ser relevada a segundo plano. Assim sendo, entendemos que 6G deve integrar habilitadores para identificação, confiança, reputação, privacidade, etc. com DLTs, *smart contracts* e tecnologias para mercado digital.

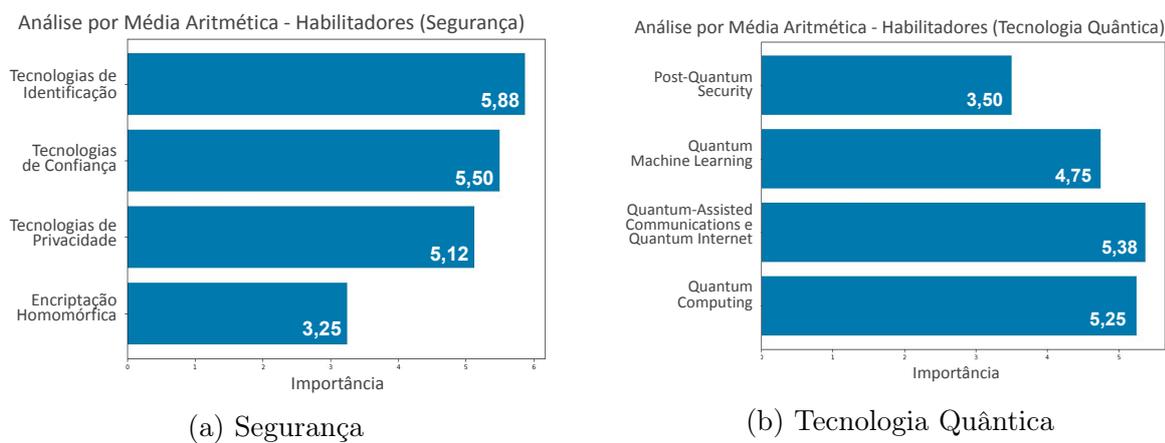


Figura 7: Desempenho dos habilitadores dos fundamentos Segurança e Tecnologia Quântica segundo a Média Aritmética

Por fim, no fundamento Tecnologia Quântica (Figura 7b), os principais habilitadores são *Quantum-Assisted Communication* (QAC), *Quantum Internet* (QI) (8.2) e QC (8.1). Ou seja, a utilização de tecnologias quânticas para otimizar/assistir comunicação digital. Tecnologias

advindas da Internet quântica também foram consideradas importantes para o 6G. Tem-se ainda a computação quântica de forma geral. QAC e QC podem ser integradas aos processos de tomada de decisão e inteligência artificial. Já os habilitadores de quantum Internet demandam mais estudo para serem integrados.

3.9.2 Análise por AHP

Nesta seção, apresentamos uma análise da relevância dos habilitadores avaliados nas Seções 3.1-3.8 segundo o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) [87]. AHP é frequentemente usado em problemas de ranqueamento de atributos envolvendo múltiplos critérios. Para atingir esse objetivo, o método AHP se baseia em comparações de pares de critérios de decisão, permitindo que o tomador de decisão determine compensações entre os diferentes critérios. De maneira geral, o método envolve três fases principais. Na primeira fase, o problema de ranqueamento de atributos é decomposto em uma estrutura hierárquica envolvendo três elementos: o objetivo a ser alcançado, os critérios de avaliação empregados e os atributos a serem avaliados, conforme apresentado na Figura 8. A segunda fase é composta por três sub-fases: *i*) a avaliação em pares para cada nível de critérios considerados, a fim de determinar a importância relativa de cada critério; *ii*) a avaliação individual de cada atributo em relação a cada critério; e *iii*) a avaliação relativa de um atributo em relação a um critério, através da comparação entre pares de atributos. Na terceira e última fase, para cada critério, os atributos são ranqueados de acordo com seu desempenho em relação aos critérios definidos. A seguir, descrevemos como essas três fases são implementadas em nossa análise.

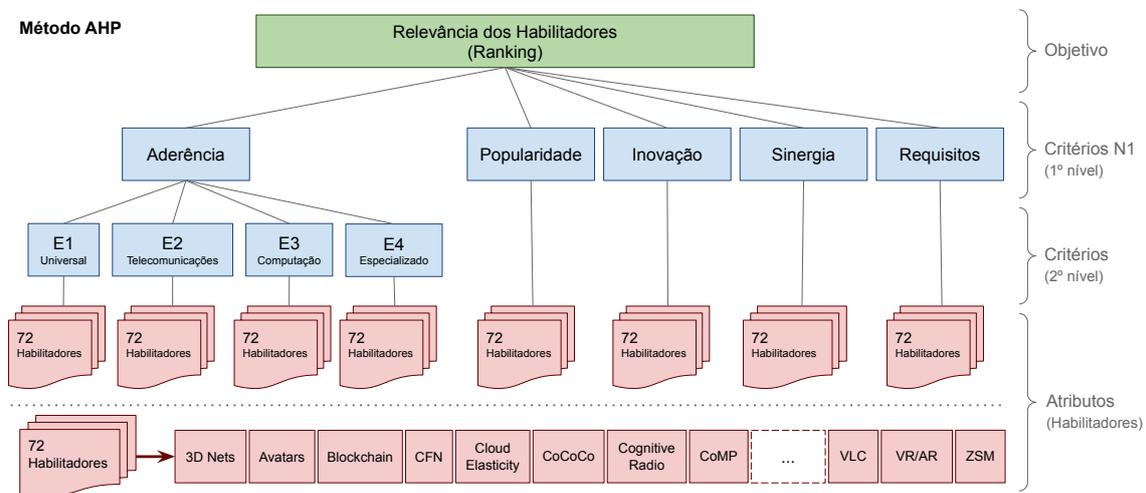
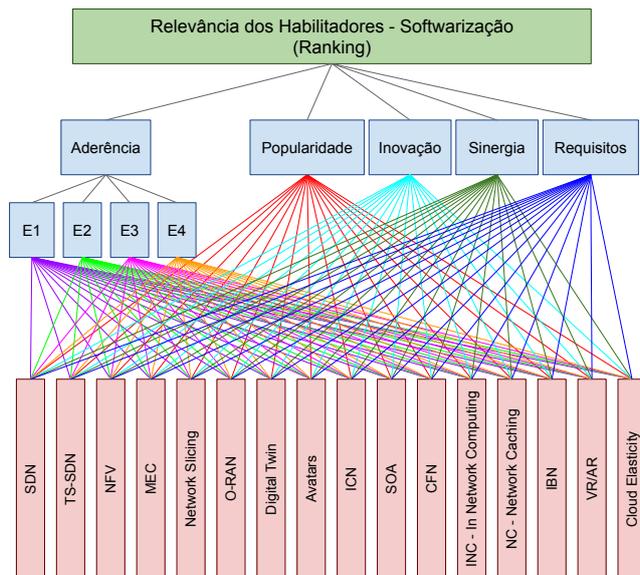


Figura 8: Metodologia AHP para classificação dos Habilitadores para 6G.

Primeira fase: Na primeira fase, o problema de ranquear os habilitadores mais relevantes para o desenho do 6G é modelada em uma estrutura hierárquica. Como mencionado anteriormente, nossa análise é conduzida para cada fundamento descrito na Tabela 4. Como exemplo, na Figura 9, apresentamos a decomposição do problema para o fundamento Softwarização. O objetivo consiste em ranquear os habilitadores desse grupo de fundamento. Esses habilitadores são avaliados em relação aos aspectos de Aderência (aplicabilidade), Popularidade, Inovação, Sinergia e Suporte a Requisitos. A avaliação dos habilitadores em relação a aderência, em decorrência dos seus sub-critérios, é realizada em duas etapas: primeiro os habilitadores são avaliados em relação aos critérios do nível 2, ou seja, em relação a aderência aos escopos univer-

sal (E1), de telecomunicações (E2), de computação (E3) e especializado (E4); em seguida, de forma recursiva, o procedimento de avaliação é realizado para o critério Aderência. Os aspectos, portanto, representam os critérios de avaliação em nosso estudo. Os atributos são representados pelos habilitadores que compõem o fundamento avaliado, i.e., SDN, TS-SDN, NFV, MEC, NS, O-RAN, DTs, *Avatars*, *Data Orientation*, SOA, CFN, ICN, *Network Caching*, IBN, VR/AR e *Cloud elasticity* para o fundamento Softwarização. A mesma metodologia é aplicada aos demais fundamentos.



Descrição	Peso
Mesma importância	1
Pouco mais importante	3
Mais importante	5
Muito mais importante	7
Extremamente mais importante	9

Figura 9: Estrutura hierárquica modelada para os habilitadores do fundamento Softwarização.

Tabela 8: Escala de pesos utilizados na determinação da importância relativa dos critérios considerados.

Segunda fase: A segunda fase é dividida em três sub-fases e tem como foco a definição das importâncias relativas. A primeira sub-fase determina a importância relativa dos critérios considerados para o projeto do 6G. A Tabela 8 mostra a escala de pesos sugerida pelo método AHP [87], a qual foi adotada nesta avaliação. Para avaliar a importância relativa dos critérios, cada par de critérios é analisado. Para ilustrar, considere o par Aderência e Popularidade. A questão que se coloca é: Aderência é mais importante do que popularidade? Se sim, o valor do peso deve ser acima de 1, caso contrário, deve ser 1 se forem igualmente importantes ou abaixo de 1 se for menos importante. Na Tabela 9, o peso 9 representa extremamente mais importante, enquanto o peso 1 indica igualdade de importância. A seguir, apresentamos o entendimento que foi consenso com relação à importância relativa de cada par de critério considerado.

- Aderência e Popularidade: Consideramos que é muito mais importante (peso 7) haver aderência (aplicabilidade) de um habilitador em um certo escopo que ele ser popular. Logo, a importância relativa da Aderência em relação à Popularidade é 7 e da Popularidade em relação à Aderência é $1/7$.
- Aderência e Inovação: Consideramos que é mais importante (peso 5) haver aderência (aplicabilidade) de um habilitador em um certo escopo que ele ser inovador.
- Aderência e Sinergia: Consideramos que Sinergia é um pouco mais importante (peso 3) que aderência (aplicabilidade). Na nossa visão, se o grau de sinergia entre um habilitador

e todos os outros for alta, justifica que ele seja aplicado, mesmo que tenha aderência baixa em algum escopo.

- Aderência e Requisitos: Consideramos que Aderência tem a mesma importância (peso 1) que o Suporte a Requisitos.
- Popularidade e Inovação: Consideramos que Inovação é um pouco mais importante (peso 3) que Popularidade. Na nossa visão, o grau de popularidade nos artigos lidos é tido como menos importante para o desenho do 6G que o habilitador ser considerado inovador.
- Popularidade e Sinergia: Consideramos que Sinergia é extremamente mais importante (peso 9) que popularidade nos artigos estudados. Na nossa visão, o grau de sinergia de um habilitador com os demais supera em muito a importância de um habilitador ser popular.
- Popularidade e Requisitos: Consideramos que atender requisitos é definitivamente mais importante (peso 5) que popularidade. Na nossa visão, vale mais um habilitador atender requisitos que ser popular nos artigos estudados.
- Inovação e Sinergia: Novamente, entendemos que a sinergia de um habilitador é muito mais importante (peso 7) para o projeto do 6G que o grau de inovação considerado para esse habilitador.
- Inovação e Requisitos: Consideramos que atender requisitos é mais importante (peso 5) que o grau de inovação de um habilitador.
- Sinergia e Requisitos: Consideramos que a Sinergia é mais importante (peso 5) que Requisitos. Ou seja, é melhor ter um habilitador mais sinérgico com os demais que um habilitador que atende vários requisitos do 6G.

A Tabela 9 resume os resultados da análise da importância relativa dos critérios considerados neste trabalho. Conduzimos uma análise semelhante para os sub-critérios do critério Aderência, ou seja, escopos universal (E1), de telecomunicações (E2), de computação (E3) e especializado (E4). Para os sub-critérios, levamos em consideração o seguinte raciocínio: queremos um desenho de 6G que seja aderente ao escopo E1, mas também com características do escopo E3, usando elementos do Escopo E1. Desse raciocínio, resultaram as importâncias ilustradas na Tabela 10.

Critério	Aderência	Popularidade	Inovação	Sinergia	Requisitos
Aderência	1	7	5	0,33	1
Popularidade	0,14	1	0,33	0,11	0,2
Inovação	0,2	3	1	0,14	0,2
Sinergia	3	9	7	1	5
Requisitos	1	5	5	0,2	1

Tabela 9: Análise da importância relativa dos critérios considerados.

A segunda sub-fase consiste na avaliação individual de cada habilitador de um dado fundamento em relação a cada critério considerado. Essa análise foi apresentada nas Seções 3.1-3.8. Finalmente, a terceira sub-fase consiste na quantificação da importância (relevância) relativa

Sub-critério	E1	E2	E3	E4
E1	1	0,11	0,14	3
E2	9	1	3	9
E3	7	0,33	1	7
E4	0,33	0,11	0,14	1

Tabela 10: Análise da importância relativa dos sub-critérios relacionados à Aderência.

de um habilitador em um certo critério. Essa avaliação também é realizada entre pares de habilitadores da seguinte forma. Seja H_1 e H_2 dois habilitadores do fundamento F . Seja V_1 e V_2 o desempenho obtido por H_1 e H_2 , respectivamente, para o Critério C . A importância de H_1 em relação a H_2 no critério C é dada por H_1/H_2 . Computando a importância de H_i em relação a H_j , $\forall H_i, H_j \in F$ para o critério C , obtemos uma matriz de importância relativa dos habilitadores do fundamento F para o critério C .

Terceira fase: Por fim, a terceira fase computa o ranqueamento dos habilitadores de um dado fundamento. Para tanto, inicialmente, computamos os autovalores e autovetores das matrizes de importância geradas na fase anterior, gerando um autovetor para cada critério. Em seguida, criamos o índice final de ranqueamento multiplicando-se os autovetores pela sua importância relativa. A soma dos índices dentro de um fundamento totaliza 100%.

As Figuras 10 a 14 ilustram os habilitadores mais relevantes para uma arquitetura 6G, para cada fundamento, de acordo com a avaliação apresentada nas Seções 3.1-3.8 e considerando o método AHP. No fundamento Energia (Figura 10a), o habilitador *Green Technology* (1.3) obteve maior importância, seguido por *Wireless Power Transferring* (1.2) e *Energy Harvesting* (1.1). Nota-se que, diferentemente da análise pela média aritmética, na análise pelo AHP, o habilitador *Wireless Power Transferring* obteve um desempenho melhor que *Energy Harvesting*. Isso ocorre devido ao maior peso atribuído ao critério inovação, para o qual o habilitador 1.1 obteve menor desempenho.

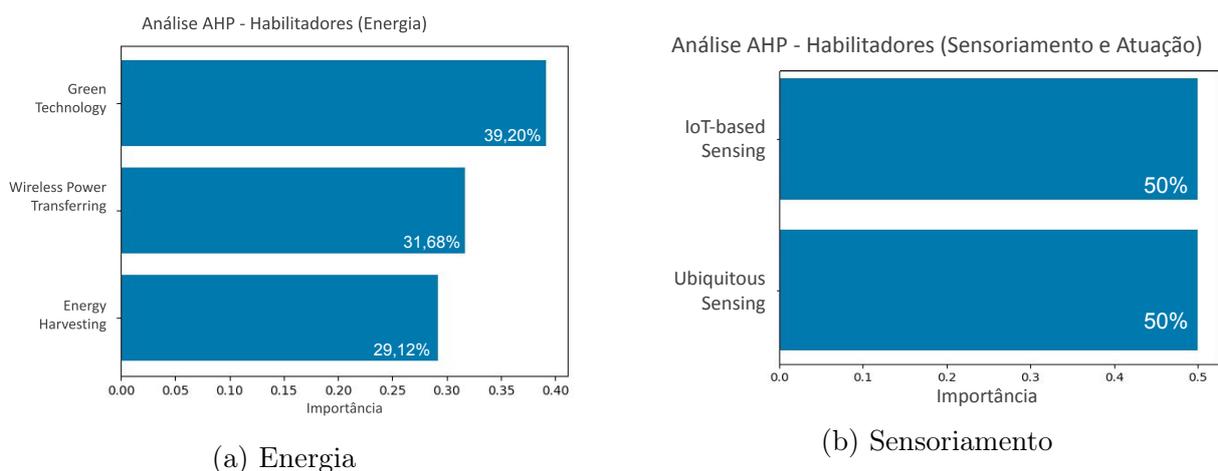


Figura 10: Desempenho dos Habilitadores dos fundamentos Energia e Sensoriamento segundo a análise AHP.

No fundamento Sensoriamento (Figura 10b), como observado na análise pela média aritmética, os habilitadores *Ubiquitous Sensing* (2.1) e *IoT-based Sensing* alcançaram o mesmo desempenho.

Em relação ao fundamento Comunicação (Figura 11), a análise pelo AHP demonstra que os habilitadores *cell-free networks* (3.26), Comunicações THz (3.2) e IRS/RIS (3.5) são os mais relevantes neste grupo. Logo em seguida, tem-se *ultra massive MIMO* (3.4), VLC (3.3), convergência óptico/sem fio (3.6), *Intelligent Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) (3.15), D2D (3.8), E-RAN (3.24), convergência de redes e computação (3.19) e UAVs (3.1). De fato, considerando os habilitadores mais relevantes de acordo com o método AHP para o fundamento Comunicação, apenas *Intelligent OFDMA* não é considerado fundamental na análise pela média aritmética.

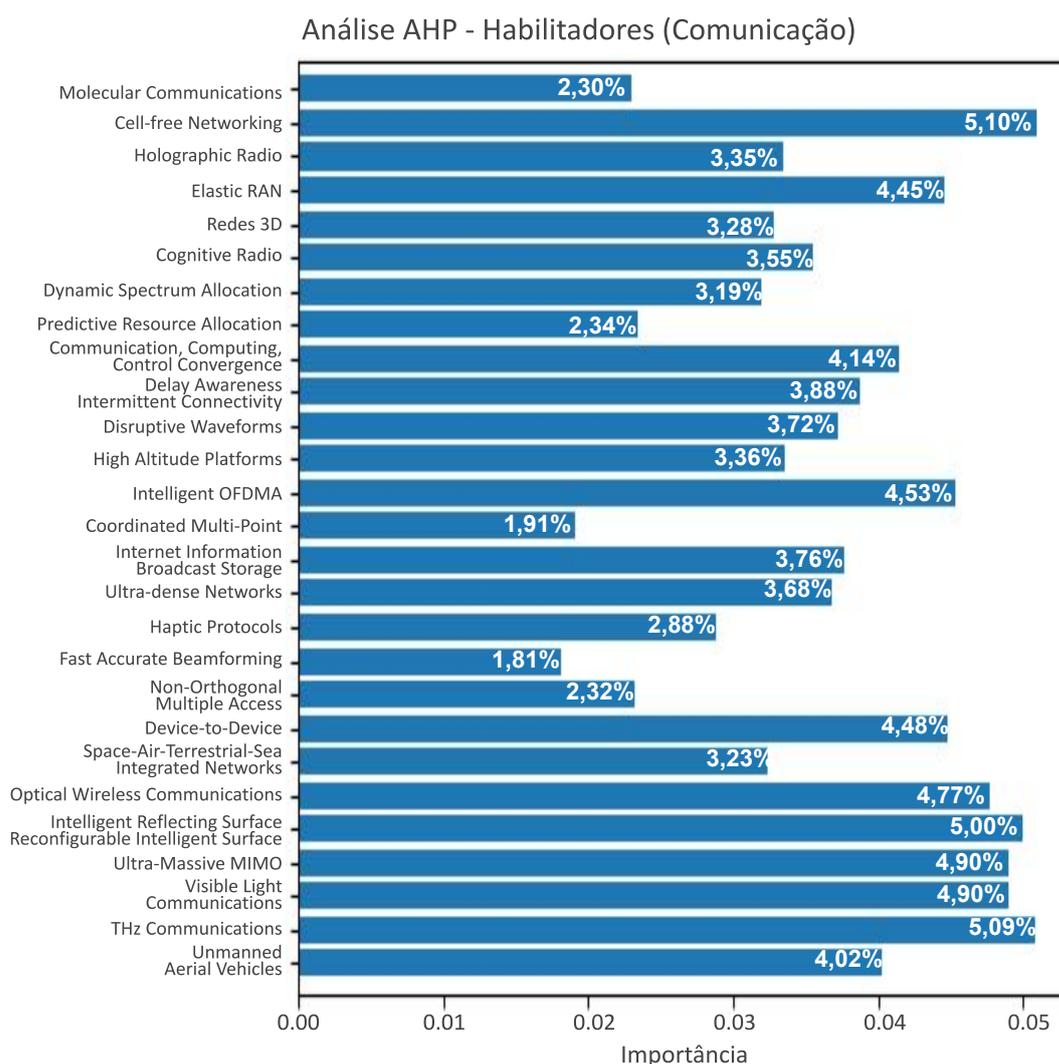


Figura 11: Desempenho dos habilitadores dos fundamentos Comunicação segundo a análise AHP.

No fundamento Softwarização (Figura 12), de acordo com o método AHP, os habilitadores mais relevantes são *Cloud Elasticity* (4.16), NFV (4.3), SOA (4.10), O-RAN (4.6), MEC (4.4) e SDN (4.1). Os habilitadores NS (4.5), armazenamento temporário em rede (4.13), VR/AR (4.15), DTs (4.7) e Avatares (4.8) também aparecem como importantes. Nota-se que, apesar de ocuparem posições diferentes, todos esses habilitadores também são considerados relevantes na análise pela média aritmética.

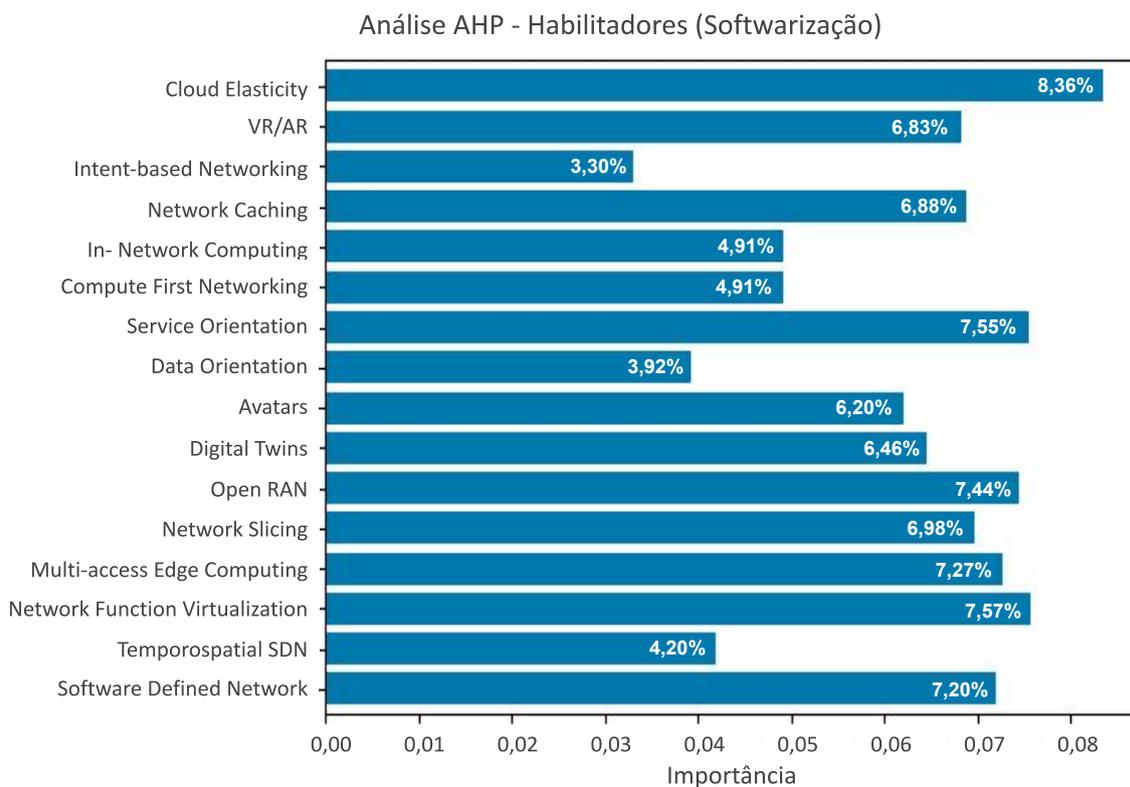


Figura 12: Desempenho dos habilitadores dos fundamentos Softwarização segundo a análise AHP.

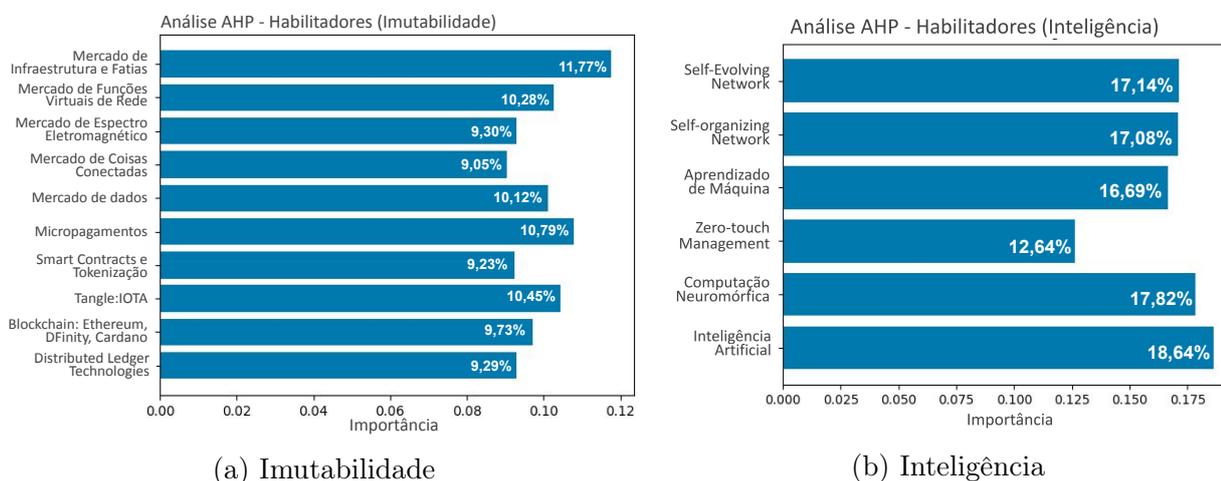


Figura 13: Desempenho dos Habilitadores dos fundamentos Imutabilidade e Inteligência segundo a análise AHP.

Para o fundamento Imutabilidade (Figura 13a), o habilitador mais bem avaliado é o mercado de infraestrutura e fatias (5.10), seguido do habilitador micropagamentos (5.5) e Tangle (IOTA) (5.3). Em seguida, tem-se o mercado de funções virtuais de rede (5.9), o mercado de dados (5.6) e *Blockchain* (5.2). Por fim, tem-se o mercado de espectro eletromagnético (5.8), DLTs (5.1), *smart contracts* (5.4) e mercado de coisas (5.7). Nota-se, portanto, que para o fundamento Imutabilidade, as análises pela média aritmética e pelo AHP resultam em ranqueamentos muito

semelhantes.

Em relação ao fundamento Inteligência, o método AHP e a análise pela média aritmética também demonstram resultados similares. Como mostrado na Figura 13b, *AI* (6.1) aparece como o habilitador mais importante neste grupo, seguido por computação neuromórfica (6.2) e redes auto-evolucionárias (6.6). Redes auto-organizáveis (6.5) e Aprendizado de máquina (6.4) finalizam a lista de habilitadores importantes para esse fundamento.

No fundamento Segurança (Figura 14a), o habilitador mais importante foi o relacionado à tecnologias de identificação (7.4). Em segundo lugar, ficaram as tecnologias de confiança e reputação (7.3). Tecnologias de privacidade (7.2) também tiveram um bom desempenho na análise pelo método AHP. De fato, considerando os habilitadores mais relevantes de acordo com o método AHP para o fundamento Segurança, todos também foram considerados fundamentais na análise pela média aritmética.

Por fim, no fundamento Tecnologia Quântica (Figura 14b), os principais habilitadores, de acordo com o método AHP, são QAC, QI (8.2), QML (8.3) e QC (8.1). Comparado com a análise pela média aritmética, o habilitador QML foi adicionado à lista de habilitadores fundamentais.

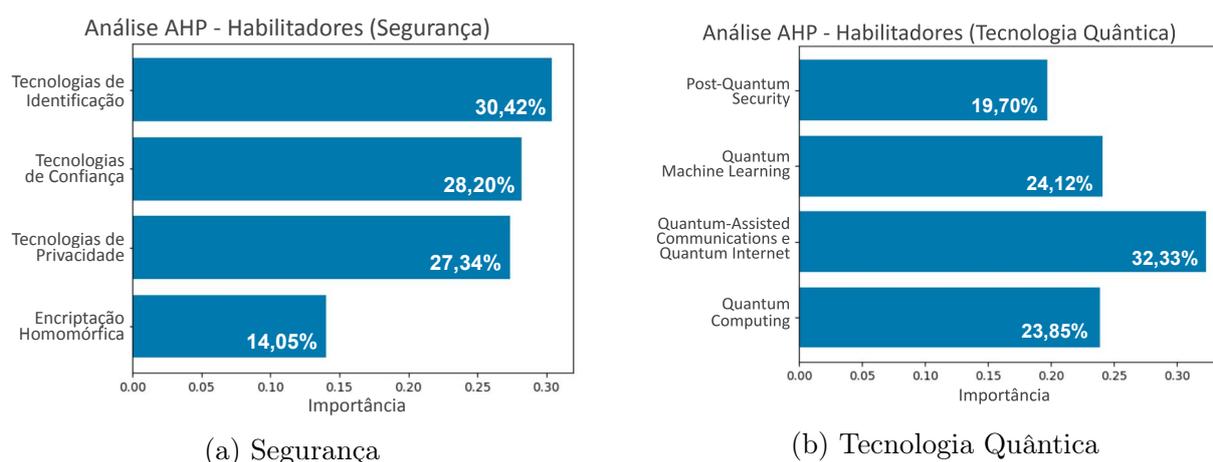


Figura 14: Desempenho dos Habilitadores dos fundamentos Segurança e Tecnologia Quântica segundo a análise AHP.

4 Síntese de Arquiteturas 6G

A presente seção apresenta a nossa visão sobre arquitetura 6G, a começar pela definição dos “Princípios de Projetos” que acreditamos serem fundamentais para um projeto de rede de sexta geração. Apresentamos também duas propostas de arquitetura para a próxima geração de redes móveis, sendo uma evolucionária e outra disruptiva. Na arquitetura evolucionária, o objetivo foi incorporar os habilitadores mais importantes identificados na Seção 3.9. No entanto, a compatibilidade com a geração atual e uma transição suave são critérios prioritários na arquitetura evolucionária. Assim, a adoção dos habilitadores deve respeitar esses critérios, ainda que isso implique em limitação de escopo e funcionalidades. Na arquitetura disruptiva, não há preocupação em manter compatibilidade retroativa com a geração atual ou anteriores, sendo possível explorar todo o potencial dos habilitadores selecionados.

4.1 Princípios de Projeto

Nesta seção, discutimos os princípios de projeto para os dois tipos de arquiteturas 6G. Na arquitetura evolucionária, o nível de adesão a cada princípio depende da compatibilidade retroativa com a geração atual de redes móveis. Na arquitetura disruptiva, todos os princípios podem ser explorados ao máximo.

A definição e a inspiração destes princípios levou em conta outras experiências do grupo envolvido no que diz respeito à arquiteturas de rede. Cabe destacar o projeto NovaGenesis [92], o qual é uma alternativa à Internet baseada na pilha *Transmission Control Protocol* (TCP)/*Internet Protocol* (IP). E ainda salientar a *Entity Title Architecture* (ETArch) [96], uma arquitetura disruptiva e relação à pilha TCP/IP baseada na premissa de que a rede deve ser capaz de suportar e se adaptar aos diferentes requisitos de comunicação das entidades, ou seja, os seres envolvidos.

Os princípios foram discutidos e adequados tendo em vista o que vem sendo apresentado na literatura recente sobre arquiteturas 6G, conforme descrito no Relatório 2.3 [5]. Além disso, os princípios norteadores foram elaborados em um alto nível de abstração e atuam como guias no processo do projeto. A seguir, são apresentados os onze (11) princípios definidos.

- ***Princípio 1: Integrar Habilitadores de Forma Coesa, Desacoplada e Sinérgica*** – todos os habilitadores da arquitetura devem operar de forma sinérgica e integrada entre si. Os habilitadores não devem incluir funções de rede existentes em outros habilitadores e devem definir interfaces desacopladas e sem duplicação de funcionalidades;
- ***Princípio 2: Virtualizar Sempre que Possível*** – objetiva virtualizar tudo o que pode ser virtualizado com bom desempenho. Além disso, todos os recursos de infraestrutura física do 6G podem (e dentro do possível, devem) ser representados por elementos virtuais;
- ***Princípio 3: Flexibilizar a Interface com os Recursos de Infraestrutura*** – recursos de infraestrutura (tanto físicos, quanto virtuais) devem ser controlados por serviços da arquitetura. Isso se justifica dadas as escalas no número de dispositivos e a necessidade de estabelecer uma forma de configurá-los através de funções de rede. Toda a infraestrutura física deve ser programável;
- ***Princípio 4: Gerir Componentes e Recursos de Rede de Maneira Autônoma*** – a auto-organização é exigência de uma arquitetura 6G, devido às suas escalas, complexidade e requisitos de desempenho. As interferências humanas devem ser minimizadas.

Além disso, a operação e a gerência devem ser baseadas nas intenções dos responsáveis humanos. Informações provenientes do mundo físico devem ser utilizadas para tomar decisões aprimoradas. O mundo físico deve ser auto-organizado através de gêmeos digitais que os representam no ambiente de serviços;

- ***Princípio 5: Utilizar uma Abstração de Serviços para Integrações e Configurações*** – todo o processamento de informações da arquitetura deve ser definido como um serviço. Por esse motivo, implementações de funções de rede voltadas para comunicação, armazenamento de dados e até troca de conteúdos devem ser realizados através de serviços. O ciclo de vida dos microsserviços deve ser contemplado como uma funcionalidade arquitetural. Isso inclui a composição dinâmica de serviços;
- ***Princípio 6: Priorizar uma Solução Sustentável*** – projetar para economizar energia. O planejamento, a implantação e a operação da infraestrutura devem ter como um dos objetivos principais o uso eficiente da energia. A adoção de fontes limpas e renováveis deve ser incentivada. Sempre que possível, técnicas de coleta de energia do meio devem ser adotadas;
- ***Princípio 7: Oferecer Segurança Intrínseca*** – a segurança, a privacidade e a confiança são preceitos de qualquer sistema da atualidade. Esse princípio defende que sempre devemos projetar considerando os requisitos de segurança, desde o início do projeto de 6G. Acredita-se que a aplicação de técnicas de imutabilidade da informação e computação, sobretudo com o advento das DLTs, seja fundamental para validação de contratos digitais e garantia de consistência de transações;
- ***Princípio 8: Garantir Ciência sobre o Estado da Rede e dos Sistemas Interconectados*** – a semântica de contexto pode ser extrapolada para qualquer contexto da arquitetura, tais como: redes, funções físicas, funções virtuais, contratos, ambientes, recursos, entidades, etc. Diversas ciências de contextos devem ser implementadas: ciência do ambiente (*situation awareness*), ciência de si próprio (*self awareness*), ciência da rede de comunicação (*network awareness*), ciência dos serviços (*service awareness*), dispositivos sociais, etc. As ciências de contextos devem alimentar os procedimentos de tomada de decisão, auxiliando na gestão e ainda contribuindo para que a rede seja resiliente e capaz de manter uma qualidade aceitável do sistema face a problemas ou falhas na rede;
- ***Princípio 9: Favorecer a Inovação e Criação de Novos Modelos de Negócio*** – utilizando interfaces abertas entre diversos componentes, sejam eles de hardware ou software, permitir que diferentes interessados possam inovar dentro da arquitetura e monetizar sobre recursos e funcionalidades. Isso poderá viabilizar a criação de novos mercados envolvendo, por exemplo, recursos físicos, coisas conectadas, dados, funções de rede e serviços, entre outros. A rede se comportará como um ecossistema onde diferentes interessados, de diferentes áreas, poderão de forma cooperativa inovar e ampliar as potencialidades e a escala da rede tanto em termos de serviços, como de usuários;
- ***Princípio 10: Ter a Capacidade de Satisfazer os Diferentes Requisitos das Aplicações Atuais e Futuras*** – a rede deve ser capaz de atender aos diferentes requisitos definidos pelas aplicações, sejam em termos de latência, vazão, qualidade de serviço e experiência, como também em aspectos como segurança da comunicação. Esse suporte deve se dar de maneira fim-a-fim, ou seja, independente da infraestrutura subjacente, de

maneira transparente para os sistemas finais e a qualidade e confiabilidade esperada em todos os segmentos da rede. Por outro lado, a rede deverá oferecer um substrato comum capaz de acomodar novas necessidades, considerando as novas realidades físicas e virtuais, como o metaverso, por exemplo.

- **Princípio 11: Focar em simplicidade e levar em conta a escalabilidade** – todas as soluções e decisões de projeto devem ter o foco na simplicidade. A simplicidade busca facilitar o gerenciamento da rede, a busca de soluções menos sujeitas a possíveis falhas ou erros e que, no geral, possam contribuir para maximizar a eficiência da rede. A busca da simplicidade também deve levar em conta a escalabilidade da rede, utilizando estratégias como hierarquia e estratificação da rede que permitam a distribuição de cargas em diferentes partições e o seu crescimento de acordo com as demandas de tráfego ou de expansão.

A Figura 15 correlaciona os princípios de projeto (linhas) com os habilitadores (colunas). A seguir, comentamos sobre o suporte oferecido pelos habilitadores para cada um dos princípios de projeto definidos:

- Princípio 1 (P1) - Todos os habilitadores selecionados (colunas) podem ser integrados de forma coesa, desacoplada uns dos outros e de forma sinérgica com os demais. Portanto, todos os habilitadores apresentados na Figura 15 contribuem em algum nível (dado pela análise de impacto sinérgico na seção anterior) para o projeto de 6G.
- Princípio 2 (P2) - Marcamos aqui os habilitadores que suportam a virtualização sempre que possível. As tecnologias verde impulsionam a virtualização, pois recursos virtuais podem ser desligados, economizando energia. No fundamento de comunicações, os que facilitam a virtualização são: E-RAN e CoCoCo Convergence. E-RAN foca na elasticidade horizontal e vertical, o qual é aspecto importante da virtualização da RAN. Já CoCoCo Convergence lida com a integração tecnológica, o que também alavanca a virtualização. Todos os habilitadores de *softwarização* ajudam no suporte do princípio de virtualizar sempre que possível, pois são justamente as tecnologias que permitem tal tendência. Os habilitadores de imutabilidade fornecem segurança e pagamentos para a virtualização paga de recursos de todo tipo, desde infraestrutura, coisas, espectro, etc. Até mesmo as tecnologias que oportunizam o mercado de dados suportam a troca de informações pagas relacionadas ao plano de controle de recursos virtualizados. O fundamento de inteligência inclui recursos que facilitam a otimização de funções virtuais, auto-organização, auto-evolução e aprendizado de máquina. Esses recursos são muito importantes no ciclo de vida de funções físicas (controladas via gêmeos digitais) e virtuais. Quanto ao fundamento de segurança, ele é fundamental para a virtualização do máximo possível. Por fim, computação quântica e QML podem ser usados para otimizar aspectos da virtualização, por exemplo, o *placement* de funções.
- Princípio 3 (P3) - Quanto à flexibilidade de interfaceamento com recursos físicos e virtuais (programabilidade generalizada), identificamos vários habilitadores que suportam essa premissa de projeto. Os primeiros são relacionados ao fundamento de sensoriamento. O controle de sensores e atuadores ubíquos é só mais um caso particular da programabilidade de recursos físicos. Em termos de comunicações, entendemos que todos habilitadores devem ser programáveis, para que haja flexibilidade de gerência e controle. Ou seja, se eles forem programáveis, suportam esse princípio. Na *softwarização*, apenas o habilitador

de avatar não tem relação com a programabilidade. Quanto à imutabilidade, os habilitadores selecionados contribuem para a segurança dos serviços de controle de infraestrutura física e virtual. Por esse e outros motivos, consideramos que eles suportam este princípio de projeto. O fundamento de inteligência também suporta este princípio, uma vez que a *servitização* demanda pela otimização de inúmeros aspectos, auto-organização e auto-evolução. Todos os habilitadores de segurança são importantes. Quanto as técnicas quânticas, elas podem ser usadas para otimizar o ecossistema de serviços, suporta comunicações quânticas assistidas como um serviço da rede e complementar o QML.

- Princípio 4 (P4) - Os pilotos automáticos de 6G podem gerenciar e controlar a maioria dos habilitadores de infraestrutura e virtualizados. Todos os habilitadores suportam a redução da interferência humana ao serem programáveis, representados por gêmeos digitais, gerenciados e controlados por AI/ML e computação autônoma. Componentes da *softwarização* ajudam a fazer a ponte entre humanos e máquinas. Dentre eles DTs, Avatares e AR/VR.
- Princípio 5 (P5) - Neste princípio, todo processamento de informações deve ser configurado como um serviço. Funções de rede para sensoriamento ubíquo e *IoT-based sensing* podem ser implementadas como serviços, suportando este princípio. No fundamento de comunicação, os habilitadores de E-RAN, IRS/RIS, *cell free networks*, D2D, DTN e CoCoCo Convergence possuem funções de rede implementadas como serviços. Todos os habilitadores de *softwarização* suportam a *servitização*. Os mercados de infra, dados, VNFs, espectro e coisas suportam a implementação de processamento de informações como um serviço. Da mesma forma, os habilitadores de inteligência, com exceção da computação neuromórfica (feita em hardware), também suportam este princípio. Ou seja, esses habilitadores podem ter seu ciclo de vida implementado através da composição dinâmica de microsserviços. O mesmo ocorre em segurança. Por fim, computação quântica pode ser disponibilizada como um serviço com interfaces padronizadas.
- Princípio 6 (P6) - Esse princípio preza pela sustentabilidade do 6G. A maioria dos habilitadores de todos os fundamentos podem ajudar a reduzir a pegada energética do 6G. Comunicações THz e *ultra dense* MIMO têm pouca relação com pegada energética. Tecnologias de imutabilidade têm sido mal avaliadas com relação à sua pegada energética, principalmente as derivadas de *blockchain*. Trata-se de uma questão polêmica, pois um sistema descentralizado pode ter um custo energético muito inferior em relação à solução equivalente estabelecida. Considere, por exemplo, o *Bitcoin*. Ele pode ter um gasto energético alto, mas poderia substituir boa parte do sistema bancário tradicional, o qual também tem alta pegada energética em prédios, *data centers*, etc. Inteligência artificial feita em software também tem alta pegada energética, sendo substituída por AI neuromórfica com pegada até 1000 vezes menor. As tecnologias de segurança acrescentam custo energético a qualquer solução. Um custo a ser pago definitivamente. Algumas novas técnicas foram estudadas nesse projeto, mas obtiveram baixa relevância na seção anterior. Por fim, QAC e QI também podem aumentar a pegada energéticas, mas mais estudos são necessários.
- Princípio 7 (P7) - Este princípio visa considerar a segurança desde o início do projeto, algo que estamos buscando em nossa contribuição. Quase todos habilitadores estão ligados diretamente ao fundamento de segurança. Porém, alguns poucos são menos relevantes

para suportar este princípio: *energy harvesting*, *green technologies*, comunicações THz, *ultra massive MIMO*, *cell free networks*, OWC, QAC, QI e QML.

- Princípio 8 (P8) - Trata da ciência de contexto na arquitetura, e.g., ciência do ambiente (*situation awareness*), ciência de si próprio (*self awareness*), ciência da rede de comunicação (*network awareness*), ciência dos serviços (*service awareness*). Os habilitadores de energia não suportam esses princípios diretamente, pois são na verdade consumidores dos mesmos. Já os habilitadores de sensoriamento suportam a ciência do ambiente, dos serviços, da rede, etc. No fundamento de comunicação, os habilitadores que mais contribuem com este princípio são: *ultra massive MIMO* (ciência do ambiente físico de sinais), IRS/RIS (ciência do ambiente de rádio), D2D (ciência da conectividade intermitente e oportunista), UAVs (ciência do ambiente 3D), DTN (ciência da conectividade oportunista), 3D *nets* (ciência do ambiente 3D), CoCoCo Convergence (ciência de fatias). No âmbito da *softwarização*, praticamente todos os habilitadores contribuem para o princípio. O-RAN traz para os serviços diversas ciências das funções de rede via controladores inteligentes (por exemplo, *Real-Time RAN Intelligent Controller* (RT-RIC) em O-RAN). SOA oferece ciência dos serviços que executam e suas demandas. *Network caching* oferece ciência dos conteúdos populares e *location-awareness*. MEC e NFV suportam várias ciências, como de si próprio, das funções de rede emuladas, etc. NS oferece ciência das demandas dos clientes e Avatares também. Gêmeos digitais oferecem representatividade do físico, portanto, tem-se ciência do físico (tanto de recursos internos, quanto do ambiente). SDN oferece *network-awareness*. No fundamento de imutabilidade, de forma geral, os habilitadores fornecem ciência de transações e registro imutável de dados. Esses habilitadores oferecem também ciência de contratos executados e seus custos, além de ciência de operações de compra e venda de dados, recursos de sensoriamento, infraestrutura, funções de rede, uso de espectro (*spectrum-awareness*), etc. Na parte de inteligência, tem-se ciência de decisões tomadas, ciência de contextos aprendidos, ciência da organização e evolução autônoma. No fundamento das tecnologias quânticas, tem-se algumas ciências relacionadas à computação quântica e às comunicações assistidas por tecnologia quântica.
- Princípio 9 (P9) - Este princípio espera dos habilitadores favorecimento da inovação e criação de novos modelos de negócio. Todos os habilitadores selecionados suportam em algum grau este princípio. O suporte à criação de ecossistemas abertos de negócios e mercados digitais com registro imutável se alinha muito bem com este princípio.
- Princípio 10 (P10) - Este princípio visa satisfazer aplicações atuais e futuras, sem descuidar dos aspectos essenciais de uma arquitetura convergente de informações. Todos os habilitadores suportam os casos de uso esperados para o 6G, em maior ou menor grau. Para atender aplicações futuras, é importante manter a flexibilidade e expansibilidade, aspectos esses suportados por *softwarização*, imutabilidade e inteligência. O suporte a novas realidades, virtuais ou híbridas é um dos destaques.
- Princípio 11 (P11) - Este princípio tem como objetivo garantir requisitos básicos de uma rede de comunicação. Desse modo, o P11 espera dos habilitadores a validação dos seguintes requisitos: resiliência, simplicidade e hierarquia. No contexto da resiliência, os habilitadores que a suportam são aqueles que tem como objetivo melhorar a comunicação e otimizar a *Quality of Service* (QoS), tais como *ultra massive MIMO*, IRS/RIS, forma de onda NOMA e CoCoCo Convergence. Além disso, alguns habilitadores são importantes

para auxiliar na configuração de uma rede gerenciável, por meio de um sistema simples. Apesar da futura rede possuir conceitos complexos, existem habilitadores que suportam o gerenciamento da rede, como MEC e *Cloud Elasticity*. Por último, a hierarquia, que remete a uma divisão de rede em camadas distintas, e, para o cenário das redes futuras, habilitadores que envolvem softwarização e virtualização, já que esses paradigmas serão fundamentais para a nova arquitetura de rede. Nesse sentido, podemos citar os habilitadores: SDN, NFV e O-RAN. Em termos de simplicidade, alguns habilitadores acrescentam maior complexidade à arquitetura: *energy harvesting*, *green tech*, comunicações THz, UAVs, DTN, 3D *networks*, *avatars*, AR/VR e tecnologias quânticas. Um habilitador cuja escalabilidade é questionada na literatura é *Blockchain*. Entretanto, outros habilitadores ajudam a melhorar a escalabilidade do 6G: E-RAN, *cell free networks*, D2D, CoCoCo Convergence, *cloud elasticity*, O-RAN, SOA, MEC, NFV, SDN e mercados descentralizados de forma geral.

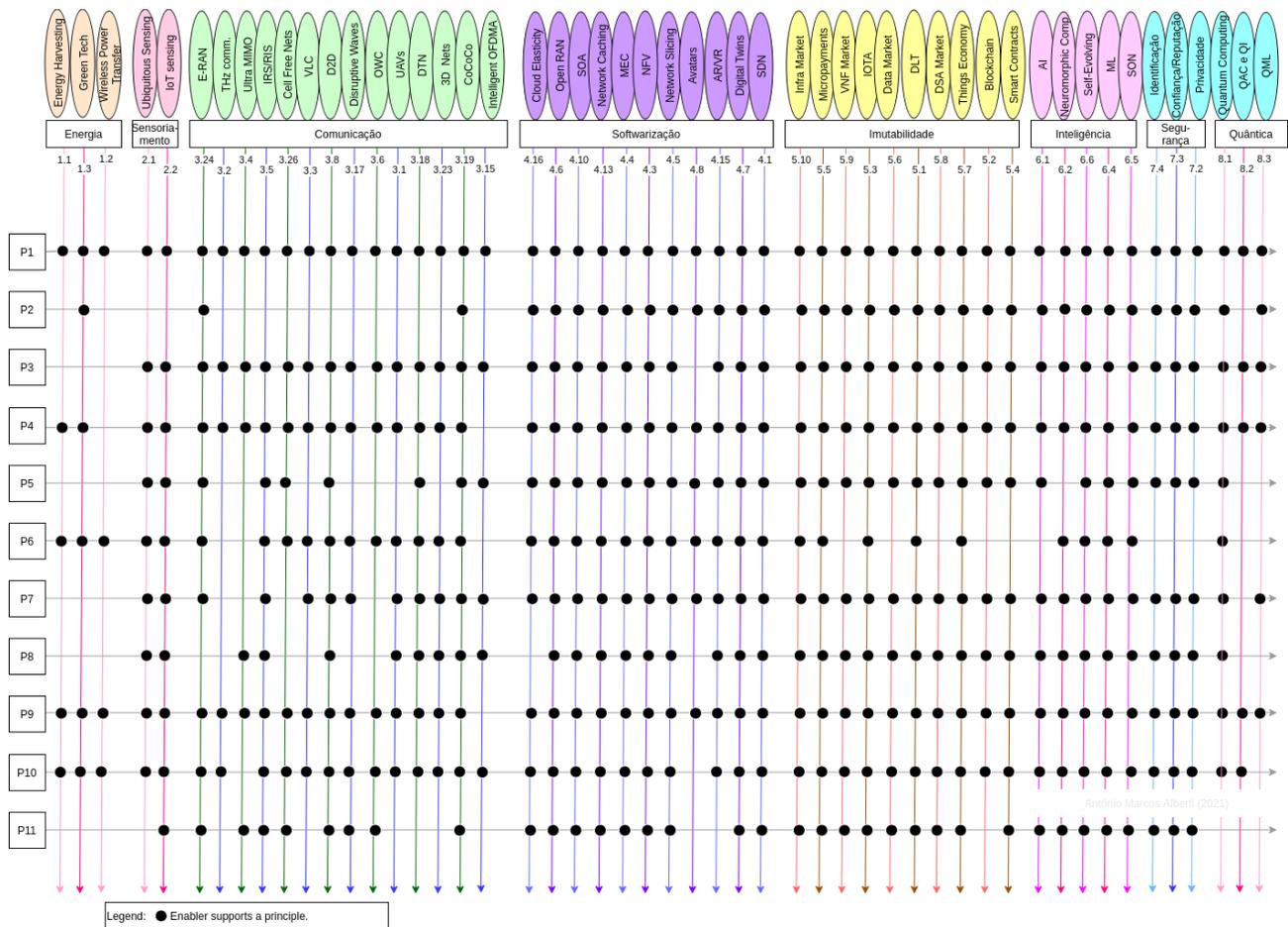


Figura 15: Análise de como os habilitadores que suportam os princípios. Concepção e desenho: Antônio M. Alberti. Siglas: E-RAN - *Elastic RAN*; IRS - *Intelligent Reflecting Surface*; RIS - *Reconfigurable Intelligent Surface*; VLC - *Visible Light Communication*; D2D - *Device to Device*; OWC - *Optical Wireless Communication*; UAV - *Unmanned Aerial Vehicle*; DTN - *Delay Tolerant Network*; CoCoCo - *Communication, Computing, Control*; SOA - *Service Oriented Architecture*; MEC - *Multi-access Edge Computing*; NFV - *Network Function Virtualization*; AR - *Augmented Reality*; VR - *Virtual Reality*; SDN - *Software Defined Network*; DLT - *Distributed Ledger Technology (DLT)*; AI - *Artificial Intelligence*; ML - *Machine Learning*; SON - *Self-Organizing Network*; QAC - *Quantum Assisted Communication*; QI - *Quantum Internet*; QML - *Quantum ML*.

A Figura 16 ilustra como os habilitadores podem ser adotados em uma arquitetura com 4 estratos: (i) físico (hardware); (ii) abstração (virtualização) e *middleware*; (iii) serviços (software); e (iv) casos de uso do 6G. No estrato físico, tem-se os diversos dispositivos que suportam todas as funções físicas e virtuais do 6G. Eles podem ser divididos em dispositivos de armazenamento (4.13), processamento elástico (4.16, 4.6 e 3.24) e troca de informações (3.17, 3.4, 3.18, 3.23, 3.3, 3.6, 3.26, 3.8, 3.1, 3.2, 8.2). Além disso, tem-se dispositivos para coleta de energia (1.1), economia de energia (1.3), sensoriamento e atuação (2.1 e 2.2), novos dispositivos computacionais: neuromórficos (6.2) e quânticos (8.1).

No estrato de abstração do físico e *middleware*, tem-se diversas funções que: virtualizam (4.1, 4.3, 4.4), fatiam recursos físicos e virtuais (4.5, 4.13), representam o físico (4.7), controlam o físico (4.1, 4.10), escoam tráfego (3.24, 4.6), protegem (7.1, 7.2, 7.3, 5.1, 5.2, 5.3, 5.4),

otimizam (8.1, 8.2), convergem controles (3.19) e monetizam (5.9, 5.1). Já no estrato de serviços, temos habilitadores que: criam novas realidades (4.15), representam humanos (4.8), monetizam criando novos mercados (5.7, 5.9, 5.6, 5.10, 5.8), auto-organizam e representam ciências de contextos (6.5), auto-evoluem (6.6), aprendem (6.4, 8.3) e decidem de forma ótima (6.1).

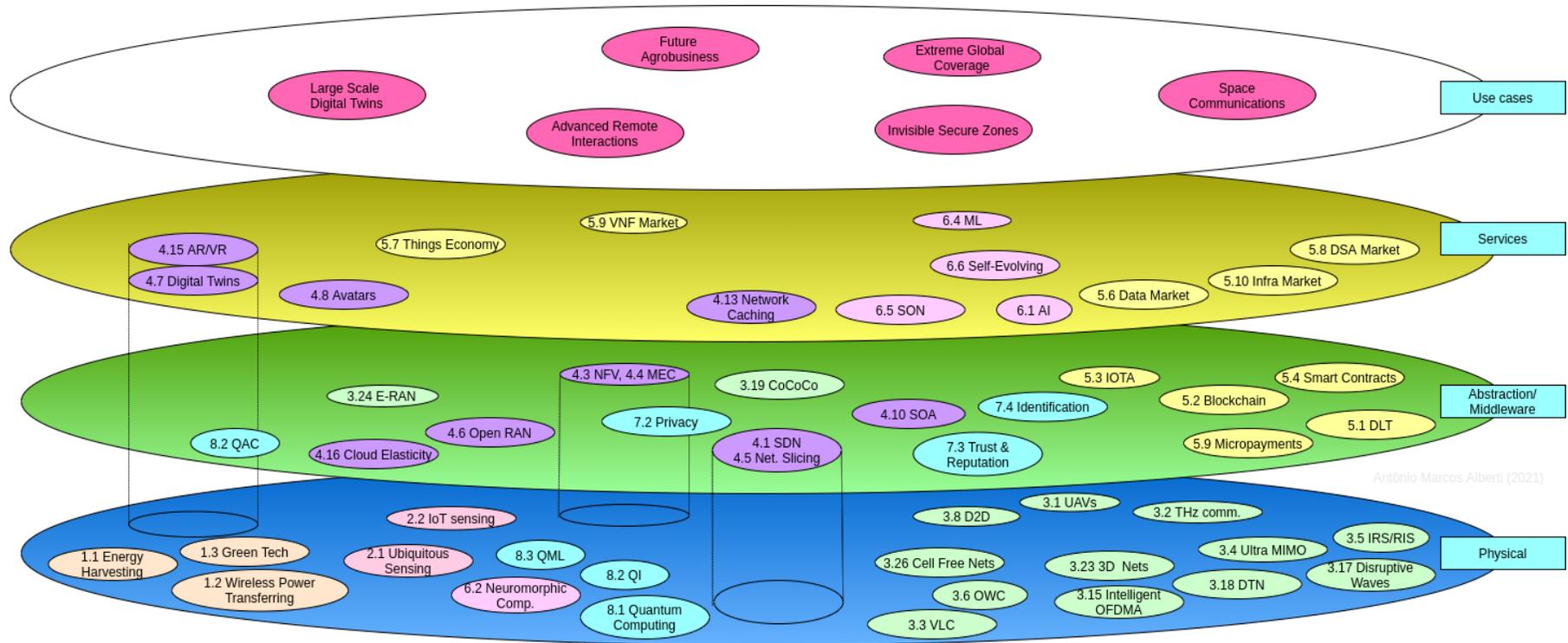


Figura 16: Posicionamento dos habilitadores e casos de usos em camadas. Concepção e desenho: Antônio M. Alberti. Siglas: E-RAN - *Elastic RAN*; IRS - *Intelligent Reflecting Surface*; RIS - *Reconfigurable Intelligent Surface*; VLC - *Visible Light Communication*; D2D - *Device to Device*; OWC - *Optical Wireless Communication*; UAV - *Unmanned Aerial Vehicle*; DTN - *Delay Tolerant Network*; CoCoCo - *Communication, Computing, Control*; SOA - *Service Oriented Architecture*; MEC - *Multi-access Edge Computing*; NFV - *Network Function Virtualization*; AR - *Augmented Reality*; VR - *Virtual Reality*; SDN - *Software Defined Network*; DLT - *Distributed Ledger Technology (DLT)*; AI - *Artificial Intelligence*; ML - *Machine Learning*; SON - *Self-Organizing Network*; QAC - *Quantum Assisted Communication*; QI - *Quantum Internet*; QML - *Quantum ML*.

4.2 Arquitetura Evolucionária

Esta seção apresenta proposta para a arquitetura da rede 6G levando em conta uma abordagem evolucionária. Esta abordagem considera a especificação da arquitetura 6G no âmbito do 3GPP levando em conta compatibilidade com o 5G e os próximos *Releases* do 5G já previstos como o *Release-18* e *Release 19* [97], bem como considera outros estudos em andamento de rede futura além do 5G [29].

Esta proposta de Arquitetura 6G Evolucionária leva em conta uma extensa avaliação da literatura disponível no que diz respeito ao estado da arte nesta área, e que foi apresentada no Relatório 2.3 [5] produzido pelo projeto *BRASIL 6G*. Além disso, a arquitetura leva em conta as famílias de casos de uso apresentadas na Subseção 2.1 juntamente com cada um de seus requisitos detalhados na Subseção 2.2. O processo para definição da arquitetura levou ainda em conta os habilitadores tecnológicos selecionados na Subseção 3.9 e os princípios de projeto para a arquitetura 6G apresentados na Subseção 4.1.

O desenvolvimento da Arquitetura 6G Evolucionária considerou a análise dos habilitadores apresentada na subseção 3.9, porém nem todos os habilitadores apresentados nesta subseção foram selecionados. Do conjunto de habilitadores disponíveis nesta seleção, a escolha levou em conta os fundamentos de Comunicação, Softwarização e Inteligência que foram aqueles mais aderentes aos diferentes escopos como apresentado na Subseção 2.3.

Uma outra premissa essencial para o desenvolvimento desta arquitetura, é o princípio de que os serviços envolvidos nesta arquitetura 6G devem ser prestados na forma fim-a-fim, envolvendo pelo menos duas partes (entidades comunicantes) localizadas em pontos distintos da arquitetura. Isto remete a necessidade de considerarmos detalhes da infraestrutura da rede física, ou seja, como ela é formada fisicamente no cenário atual e como será no futuro, e junto inclui a necessidade de considerarmos os atores envolvidos nesta infraestrutura.

Atualmente o serviço envolve um prestador de serviço móvel que basicamente comercializa conectividade de rede e o acesso à rede Internet. Diversos serviços vislumbrados para o 6G terão como requisito fatias fim-a-fim que envolverão diferentes infraestruturas físicas em diferentes domínios administrativos. Nesse cenário, seguindo uma tendência já observada, o operador de redes de telecomunicações poderá ser visto sob diferentes perspectivas, quais sejam:

- Provedor de Infraestrutura de Rede (*Network Infrastructure Provider* (NIP) - Aquele que possui o controle e a gestão de uma infraestrutura física que pode ser utilizada por outros atores.
- Provedor de Serviço de Comunicação (*Communication Service Provider* (CSP) - Utiliza a infraestrutura de um ou mais NIP para oferecer serviços de comunicação. Do ponto de vista administrativo, um CSP pode possuir uma ou mais infraestruturas de rede. Neste caso um CSP pode oferecer um serviço fim-a-fim utilizando parte de sua infraestrutura própria, ou seja, um NIP sob a mesma administração, como utilizar infraestrutura de diferentes NIP para oferecer um *slice* fim-a-fim.

Além disso, a arquitetura da rede evoluirá do padrão atual, onde de cada um dos CSP opera em único domínio administrativo, para um cenário multidomínio administrativo dos serviços, permitindo o provimento destes novos serviços de modo fim-a-fim. Assim, evoluindo as possibilidades de negociação, configuração, controle e gerenciamento de serviços da forma que se conhece.

Caminha-se também para uma alta heterogeneidade e pluralidade de infraestruturas de rede com diferentes características, e com isto novos atores poderão surgir com papéis específicos e

diferenciados dentro do escopo de serviços, de provimento de conectividade, e de provimento de infraestrutura de rede. De forma que para a arquitetura de rede 6G, devemos incluir a análise dos habilitadores seus impactos e desdobramentos e os princípios de projeto apresentados anteriormente. Além disso, considerações de provimento dos serviços fim-a-fim dentro das novas infraestruturas de rede física com:

- Rede estratificada em camadas atendendo ao princípio de projeto de escalabilidade.
- Rede orientada para serviços atendendo ao princípio de projeto de criação de novos modelos de negócio.
- Alta heterogeneidade de redes e com múltiplos domínios, e rede distribuída, com complexidade muito mais alta comparada ao que existe atualmente [29].

Considerando a infraestrutura da rede física como a camada básica para o desenvolvimento da Arquitetura 6G Evolucionária, camadas superiores adicionais a esta devem ser criadas para suportar os novos cenários ou as novas verticais.

Levando em conta o Princípio P11 de projeto, que trata de hierarquia e simplicidade da arquitetura, parte o uso de diferentes camadas a fim de segregar seus componentes em conjuntos relacionados de funções com oferecimento de funções para outras camadas, levando em conta baixo acoplamento e alta coesão dos componentes. Com isto, novas camadas são propostas para a arquitetura 6G evolucionária, apresentadas na Figura 17a, sendo as seguintes:

- Camada de Família de Aplicações (*Application Families*)
- Camada de Serviços e Negócios (*Service and Business*)
- Camada de Gerenciamento e Controle (*Management and Control*)
- Camada de Infraestrutura (*Infrastructure*)

A Figura 17 apresenta as camadas da Arquitetura Evolucionária para dois cenários. A Figura 17a mostra as camadas da arquitetura representando um único provedor de rede, assim com um único domínio de gerenciamento e controle administrativo, com sua própria infraestrutura de rede. A camada de Serviços e Negócios provê suporte para as Família de Aplicações dentro do seu próprio domínio de rede. Neste cenário, o CSP oferece o serviço utilizando um único NIP, sendo que ambos estão sob o mesmo domínio administrativo.

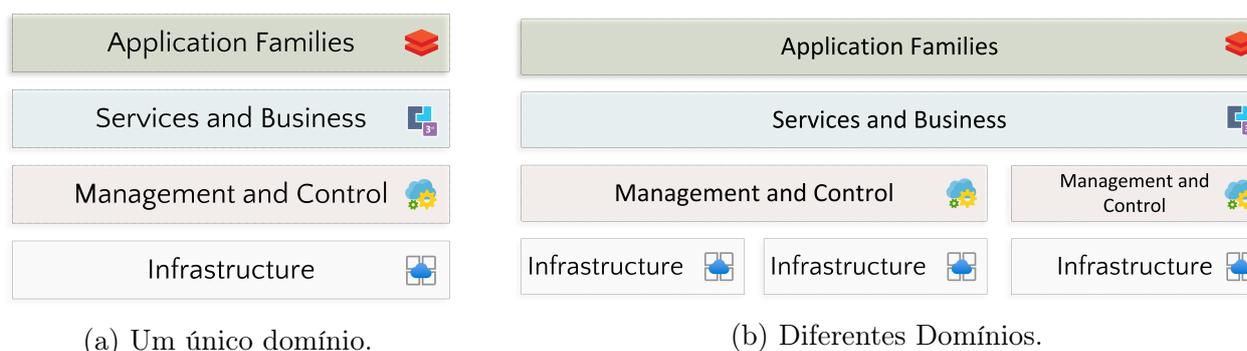


Figura 17: Visões das Camadas da Arquitetura Evolucionária.

A Figura 17b mostra um cenário com as mesmas camadas anteriores mas contendo dois provedores serviços de comunicação (CSP) com administração e controle distintos. Na Figura 17b, a parte esquerda contém duas infraestruturas sendo administradas por uma mesma camada de controle, isso significa que esse CSP contrata infraestrutura de dois provedores de infraestrutura (NIP) distintos. Alternativamente, o outro provedor possui sua própria infraestrutura. De forma que este cenário inclui múltiplos domínios com heterogeneidade e pluralidade de infraestruturas provendo suporte para a camada de Família de Aplicações, com a camada de Serviços e Negócios desempenhando papel intermediário de forma agnóstica aos Provedores neste suporte.

A camada de Famílias de Aplicações considera os casos de uso resumidos em famílias conforme desenvolvida na subseção 2.1 e é apresentada na Figura 18. Basicamente, esta camada indica os serviços característicos do 6G que serão disponibilizados com o suporte das camadas inferiores.



Figura 18: Famílias de Aplicações para o 6G.

A camada de Serviços e Negócios, apresentada na Figura 19, realiza a intermediação e gerenciamento dos serviços. Relacionando esta camada com a Figura 17a nota-se que a intermediação do serviço de conectividade pode estar sob controle dentro de um único domínio administrativo, ou, conforme Figura 17b sob mais domínios administrativos. Portanto, o aspecto evolucionário proposto refere-se à camada de Serviços e Negócios realizar a intermediação dos serviços dentro de dois domínios administrativos distintos.

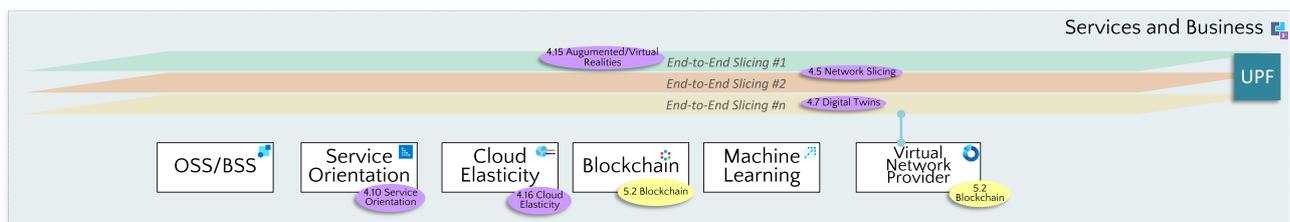


Figura 19: Camada de Serviços e Negócios.

A camada de Serviços e Negócios da Figura 19 apresenta a configuração dos *Network Slicing* que desempenham um papel crucial e básico para a realização do 6G. Considerando uma premissa de estas novas redes suportarem diferentes serviços, com requisitos diversos, sobre uma mesma infraestrutura de rede comum. Esse suporte, é mandatório na evolução das redes móveis para o 6G, especificamente para a multiplexação de redes lógicas virtualizadas cada uma provendo serviços *over the top* para uma camada de serviços dentro de uma rede voltada para serviços [98].

Para o 5G, a implementação do *Network Slicing* está sendo desafiador, mesmo considerando um único domínio de rede, dada a diversidade e heterogeneidade das tecnologias das infraestruturas físicas, especificamente no acesso (RAN), distribuição ou agregação, e de núcleo, possuem requisitos técnicos distintos dentro do conceito de *Network Slicing*. A camada de acesso RAN

possui requisitos de latência da ordem de microssegundos, bem menor que as latências das camadas de agregação e de núcleo, e além disso a RAN possui recursos restritos de comunicação em interface aérea, de forma que é desafiador o aspecto de alocação de recursos para cada um dos *Slices*, de acordo com os *Service Level Agreement (SLA)*s contratados, estando ainda em fase de maturidade na definições de procedimentos e padronizações.

A funcionalidade de *Network Slicing* tem dependência da rede 5G, como apresentado na Figura 19, com o elemento UPF como um dos extremos da da comunicação fim-a-fim do serviço provido pelos diferentes *Slices*. No 6G, esta dependência poderá ser mantida, mas já com maturidade em relação aos procedimentos que envolvem o seu ciclo de vida e comportamento dinâmico, e há a possibilidade de haver uma padronização na rede para que esta funcionalidade possa ser configurada fora dos domínios da tecnologia 6G. Outro desafio no 6G, ainda necessário de ser endereçado, é a sua configuração multidomínio, indo além dos desafios do 5G encontrados atualmente, dentro ainda de um domínio de rede único.

A Figura 19 apresenta alguns dos habilitadores que serão responsáveis pelos serviços oferecidos por esta camada. Estes habilitadores englobam *Network Slicing* (Seção 3.4.5), *Digital Twins* (Seção 3.4.7), *Service Orientation* (Seção 3.4.10), *Augmented/Virtual Realities* (Seção 3.4.15), *Cloud Elasticity* (Seção 3.4.16) e *Blockchain* (Seção 3.5.2).

Estes habilitadores são oferecidos como serviços para a camada superior a fim de suportar as famílias de aplicações indicadas na Figura 18. Nesta camada também existem os sistemas de suporte à operação (*Operations Support System (OSS)*) e ao negócio (*Business Support System (BSS)*).

A camada de Gerenciamento e Controle, é mostrada na Figura 20 para o cenário com 2 provedores de rede. Como mencionado anteriormente, cada provedor gerencia e controla a sua rede, através de suas plataformas de gerencia incluindo o BSS e OSS, e suas plataformas de Orquestração.

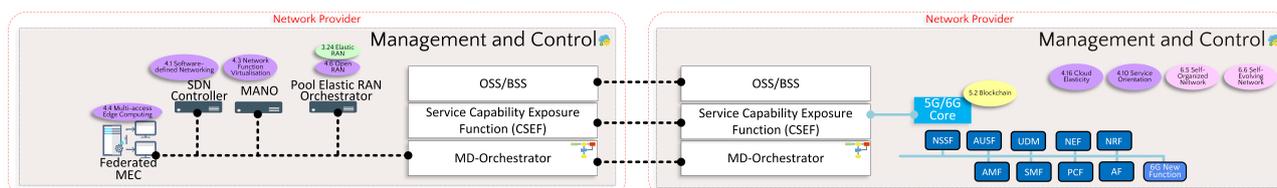


Figura 20: Camada de Gestão e Controle.

Como pode ser visto na Figura 20, esta camada possui habilitadores ligados aos fundamentos de comunicação, softwarização, imutabilidade e inteligência. Os habilitadores de comunicação envolvem: *Elastic-RAN* (Seção 3.3.24).

Já os fundamentos da softwarização englobam: *Software Defined Networking* (Seção 3.4.1); *Network Function Virtualisation* (Seção 3.4.3); *Multi-access Edge Computing* (Seção 3.4.4); *Open RAN* (Seção 3.4.6) *Service Orientation* (Seção 3.4.10); *Cloud Elasticity* (Seção 3.4.16). Para o 6G o fundamento de softwarização da rede será ainda mais intensa e responsável por suportar os *slices* fim-a-fim envolvendo diferentes domínios administrativos.

Para a imutabilidade o habilitador relevante é o *Blockchain* (Seção 3.5.2). Neste caso este habilitador é visto como um componente utilizado para a gestão e controle da rede, enquanto na camada de Serviços e Negócios este habilitador é fornecido como um serviço para as aplicações.

Em relação ao fundamento de inteligência a camada compreende serviços para viabilizar *Self-Organizing Network* (Seção 3.6.5) e *Self-Evolving Network* (Seção 3.6.6). Neste caso o habilitador de *Machine Learning* (Seção 3.6.4) é utilizado internamente na própria rede. Da

mesma forma, na camada de Serviços e Negócios, este habilitador é fornecido como serviço para as famílias de aplicações.

Os conceitos OSS e BSS são os pontos determinantes das operações de telecomunicações e permitem que as Operadoras de rede ofereçam serviços de forma eficiente para seus assinantes. O OSS descreve sistemas de processamento de informação das operadoras para gerenciar a operação de suas redes de comunicação. BSS é o termo utilizado para descrever uma funcionalidade voltada para o cliente no plano de serviços e negócios. Essas plataformas permitem que uma Operadora coordene recursos de rede, serviços, clientes, negócios e processos [99].

A função denominada por *Service Capability Exposure Function* (SCEF) definida na *Release 13* do 3GPP [100] foi criada com objetivo de expor de forma segura as informações dos serviços e capacidades/recursos da rede 4G, 5G e agora estendo para o 6G, além dos limites de um domínio, com definição de protocolo e interface de comunicação. Sem isto não haveria meios de entidades fora de um determinado domínio de rede conhecer estas informações.

Na Figura 20, para o cenário para 2 provedores de rede, a camada de Serviços e Negócios faz a intermediação e gerenciamento dos serviços, simultaneamente com estes dois domínios de rede. Isto é possível com uma rede distribuída e Federalizada, onde neste último, as plataformas OSS/BSS e de Orquestração comunicam-se através de um protocolo e interface de comunicação. E uma exposição dos serviços comercializados da rede é implementada através da função SCEF.

Considerando os serviços fim-a-fim dentro do 6G, há a necessidade de comunicação coordenada multidomínio para este serviço fim-a-fim, nos planos de orquestração, operação, e negócios, para resultar na configuração do *Slicing* de rede fim-a-fim com o SLA conforme negociado e contratado. O modelo de rede Federalizada é importante neste caso, para a orquestração dos potenciais recursos distribuídos em redes multidomínio para o atendimento de serviços-fim-a-fim [101][102]. A inclusão deste modelo de rede Federalizadas atende ao princípio de simplicidade no projeto, introduzindo a criação de um conjunto de interfaces ou protocolos padrão únicos.

A camada de Infraestrutura é detalhada na Figura 21. Com as redes orientadas à *software* (SDN) e com computação em nuvem, os recursos de infraestrutura de rede irão migrar para o provimento de serviços e aplicações, com diferentes atores possuindo multiplicidade de infraestruturas e recursos de rede.

Além da multiplicidade de domínios anteriormente apresentada, espera-se uma alta heterogeneidade e pluralidade de ofertas de infraestruturas de redes com diferentes características. Também é incluída na arquitetura a proposta das redes distribuídas, que possibilitam o atendimento ao princípio de projeto de redes autônomas. Isto tudo traz uma alta complexidade para a nova rede 6G no atendimento do serviço fim-a-fim. Também é esperado o surgimento de novos atores nesta camada: Provedor não Terrestres; Provedor de Nuvem; Provedor de redes especializados.

A Figura 21 apresenta os habilitadores relevantes para esta camada envolvendo os fundamentos de sensoriamento e atuação, comunicação e softwarização.

Os fundamentos de sensoriamento e atuação levam em conta o suporte ao *IoT-based Sensing* (Seção 3.2.2).

Esta camada acomodará diversos novos habilitadores para suportar os novos tipos de comunicação sendo importante destacar: *Unmanned Aerial Vehicle* (Seção 3.3.1); *THz Communications* (Seção 3.3.2); *Visible Light Communications* (Seção 3.3.3); *Optical Wireless Communications* (Seção 3.3.6); *Disruptive Waveforms* (Seção 3.3.17); Redes 3D (Seção 3.3.23) e *Elastic-RAN* (Seção 3.3.24).

Em relação ao fundamento de softwarização esta camada conterà os seguintes habilitadores:

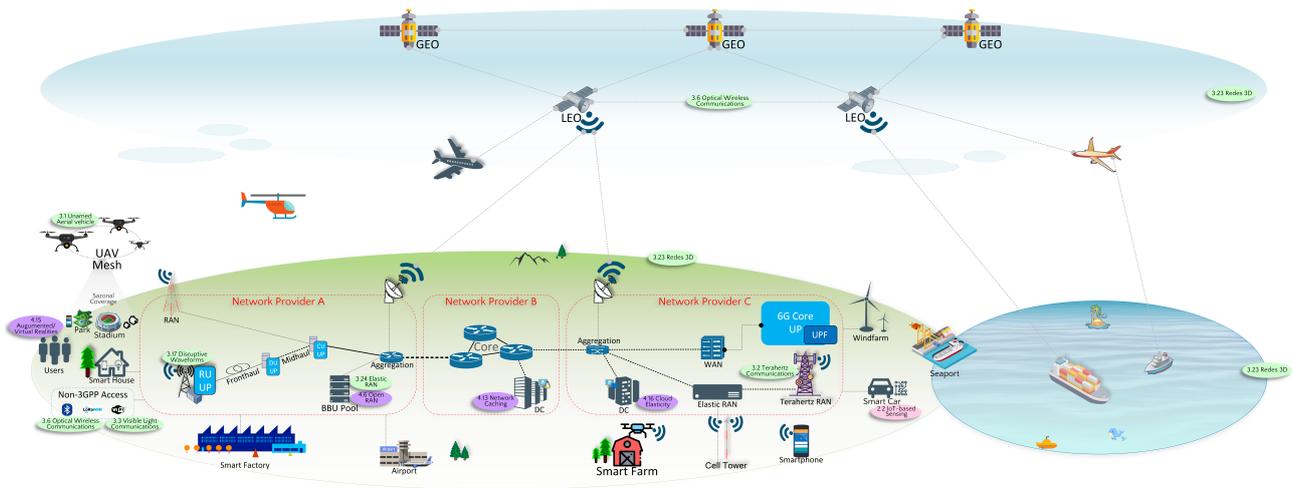


Figura 21: Camada de Infraestrutura.

Open RAN (Seção 3.4.6); *Network Caching* (Seção 3.4.13); *Augmented/Virtual Realities* (Seção 3.4.15) e *Cloud Elasticity* (Seção 3.4.16)

As grandes Operadoras terrestres regionais e nacionais possivelmente manterão a sua infraestrutura de rede, estas estratificadas nas camadas de acesso (atendendo a uma localidade), de agregação (atendendo a uma região), e núcleo (atendendo a comunicação longa distância e conexão com outras Operadoras). Podemos também ter Operadoras de redes SATSI, onde possivelmente não obedecerá a estrutura de camadas. Na parte da RAN, com a rede desagregada e O-RAN, podemos ter diferentes atores atuando no *Fronthaul*, *Midhaul*, e *Backhaul*. Também podemos ter atores provendo redes especializadas VLC, ou poderemos ter Provedores para acesso a redes 3D ou redes *Cell Free*.

É provável que as redes 6G com a suas interfaces RAN se posicionem na camada de acesso e agregação, a menos de cenários específicos onde ela vai desempenhar o papel no núcleo da rede.

A figura 22 apresenta a Arquitetura 6G Evolucionária completa com todas as camadas descritas previamente.

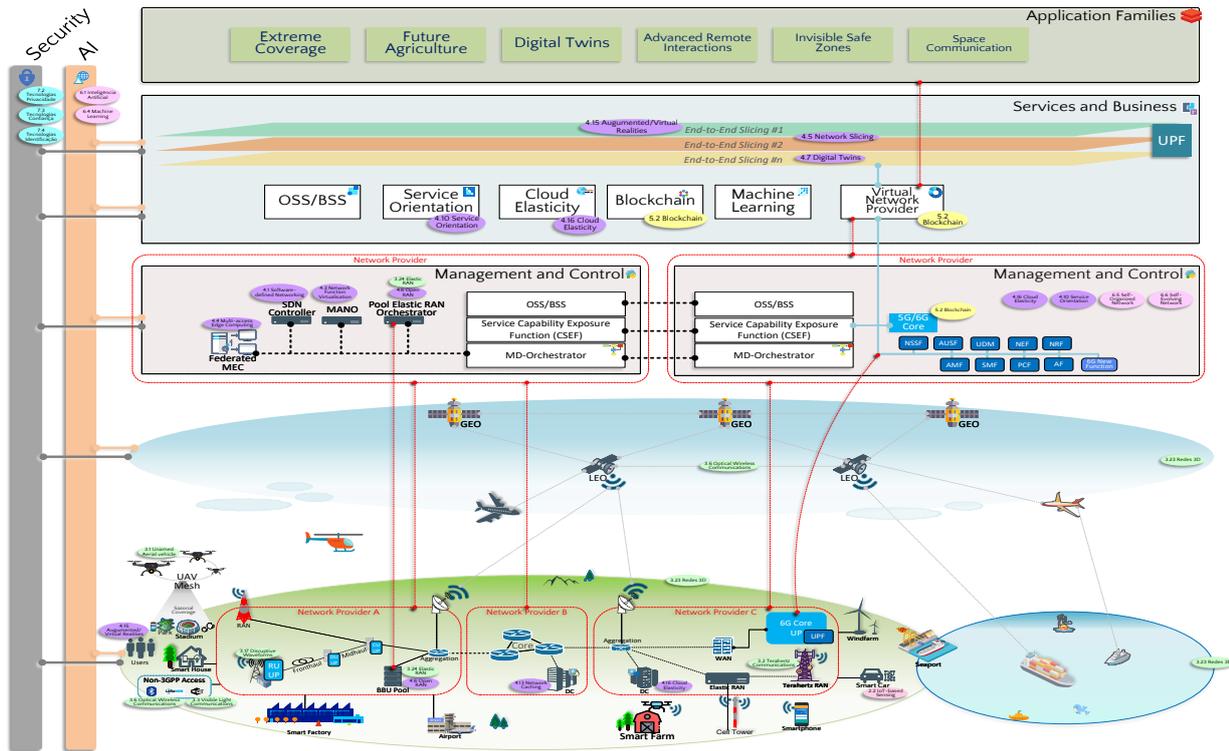


Figura 22: Visão Geral da Arquitetura Evolucionária.

Um aspecto relevante é que os fundamentos de segurança e inteligência estão presentes em todas as camadas de forma ortogonal e portanto são representados como dois barramentos na lateral da Figura 22.

O barramento indica que estes habilitadores estão espalhados por todas as camadas. No caso do fundamento de inteligência os habilitadores envolvem Inteligência Artificial (Seção 3.6.1) e *Machine Learning* (Seção 3.6.4). Para o fundamento de segurança os habilitadores compreendem tecnologias de privacidade (Seção 3.7.2), confiança/Reputação (Seção 3.7.3) e identificação (Seção 3.7.4).

Ao acomodar esses habilitadores espera-se um impacto na arquitetura das redes móveis atuais, exigindo que as futuras versões sejam projetadas sob perspectiva, considerando os habilitadores tecnológicos e seus impactos evolucionários desde sua concepção.

Cabe destacar que no projeto da arquitetura evolucionária alguns dos habilitadores selecionados foram menos explorados em detrimento de outros. Isto está relacionado ao fato de que a evolução é uma linha norteadora desta arquitetura. Um exemplo, é o caso dos habilitadores ligados à Tecnologia quântica (Seção 3.8).

4.3 Arquitetura Disruptiva

Nesta seção, apresentamos uma proposta de arquitetura 6G disruptiva. Ela cobre os habilitadores selecionados na Seção 3.9. Entretanto, a forma como os habilitadores são integrados na arquitetura é disruptiva, sem preocupação de manter compatibilidade com as atuais gerações de comunicações móveis. Ainda, novos habilitadores provenientes da pesquisa em Internet do futuro são acrescentados, mas devidamente justificados. Vale ressaltar que muitos resultados

da pesquisa em Internet do futuro foram acrescentados ao 5G, por exemplo, NFV, SDN, etc. Nesse contexto, os habilitadores que diferem da arquitetura evolucionária são:

- *Data Orientation* (4.9) - Também conhecido como ICN, esse habilitador permite novas formas de distribuir conteúdos. Três principais técnicas fazem parte desse escopo: *Name-Based Routing* (NBR), *Name Resolution Service* (NRS), *Self-Verifying Naming* (SVN). NBR consiste em rotear pacotes utilizando o nome dos conteúdos ao invés do endereço de destino de equipamento ou número de circuito virtual. Ou seja, os roteadores encaminham pacotes para o próximo salto usando nomes de conteúdos (dados). A resolução de nomes de conteúdos em localizadores e outras informações é tipicamente feita por serviços de resolução de nomes em ICN, i.e. NRSes. Por fim, o uso de nomes auto-verificáveis (SVNes) como identificadores de conteúdos trás a vantagem do acesso íntegro aos mesmos.
- *Cognitive Radio* (3.22) - O uso oportunístico e dinâmico do espectro de radiofrequência é uma demanda importante para as redes futuras, pois espectro é um recurso escasso e cada vez mais demandado. Embora seja um tópico bastante estudado e avaliado na prática, nunca foi efetivamente explorado para as novas gerações de comunicações móveis por questões regulatórias, políticas e mercadológicas. Ainda, demanda por modelos de AI/ML que apenas mais recentemente se tornaram disponíveis.
- INC (4.12) - Visa utilizar qualquer recurso computacional existente para processar informações.
- *Decentralized Networking* (DN) (não presente em nossas análises) - É outro esforço do *Internet Research Task Force* (IRTF)¹ que visa criar redes descentralizadas, inspiradas no que a *Blockchain* fez pela Web.
- IBN (4.14) - Objetiva acomodar as intenções das pessoas através de processamento de linguagem natural em sua total potencialidade. Como tal, tem relação estreita com a linguagem natural e com ciência de contextos. Assistentes podem capturar intenções verbalmente e guiar representantes para a execução de tarefas.
- *Zero-Touch Management* (6.3) - Visa reduzir ao máximo a interferência humana via pilotos automáticos.

Na Figura 23, apresentamos uma ilustração do estrato físico do 6G disruptivo. A partir da Figura 16 e dos resultados nas seções anteriores, temos os seguintes componentes no estrato físico: (i) coletores de energia; (ii) sensores e atuadores; (iii) *gateways* de protocolos (IoT e outros); (iv) computadores de todo tipo; (v) dispositivos de armazenamento de dados (*storages*); (vi) dispositivos de rede - comutadores, roteadores, pontos de acesso; (vii) dispositivos fotônicos; (viii) dispositivos OWC e VLC; (ix) smartphones; (x) veículos de todo tipo (barcos, aviões, carros, ônibus, etc.); (xi) unidades remotas de rádio (*Remote Radio Units*); (xii) *data centers* (de borda, regionais, metropolitanos, nacionais, internacionais); (xiii) UAVs (*drones*, balões, etc.); (xiv) satélites (*Geostationary Orbit* (GEO), *Medium Earth Orbit* (MEO), *Low Earth Orbit* (LEO)); (xv) superfícies inteligentes; (xvi) dispositivos de realidade aumentada (óculos, holografia); (xvii) robôs; e (xviii) rádios definidos por software (*Software Defined Radio* (SDR)). Esses componentes são conectados via rede sem fio, em diversas bandas de frequência. Terminais satelitais se conectam via um computador *high end* e um SDR, podendo

¹<https://irtf.org/>

facilmente atender áreas remotas ou mal atendidas pela rede terrestre. Sensores, atuadores, robôs, superfícies inteligentes e outros dispositivos de IoT são conectados via *gateways*, *access points*, OWC e até mesmo VLC. Veículos terrestres podem se conectar uns aos outros em redes *ad hoc* (com *D2D communication*) ou via satélite. Na borda da rede de acesso, servidores são usados para processar, armazenar e trocar informações. Computadores também são usados para conectividade programável multiprotocolo via P4 (*Programming Protocol-independent Packet Processors*). Unidades remotas são conectadas sem fio ou por fibra, suportando VLC, OWC (incluindo *Radio over Fiber*). As unidades remotas implementam toda a parte de RF e a parte baixa da camada física (*low Physical Layer* (PHY)). Na porção de agregação da rede, sinais ópticos modulados são convertidos novamente em RF para processamento em SDR e/ou servidor. Servidores podem realizar processamento da parte alta da camada física (*high PHY*), incluindo técnicas cooperativas multi célula.

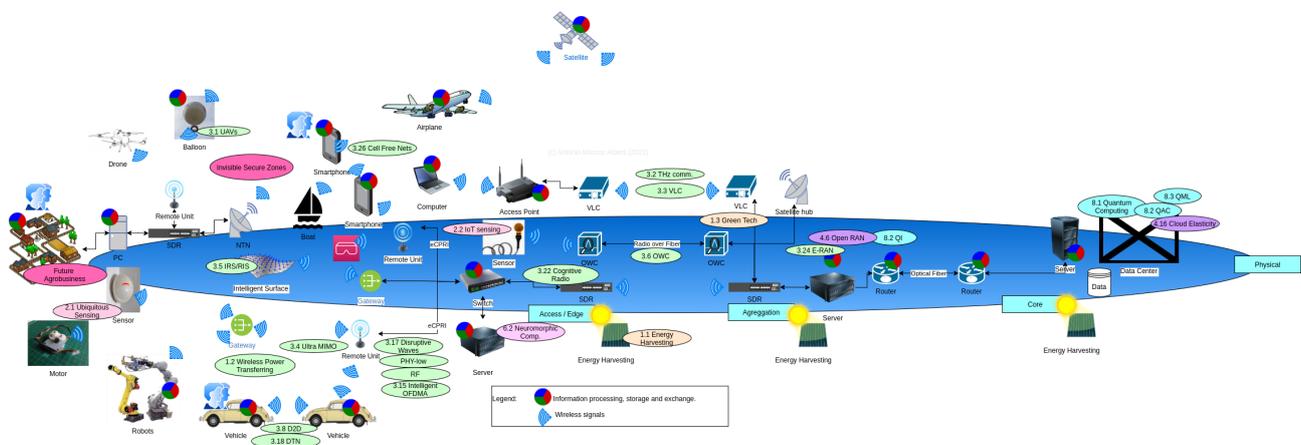


Figura 23: Estrato físico da arquitetura 6G. Concepção e desenho: Antônio M. Alberti. Siglas: IRS - *Intelligent Reflecting Surface*; RIS - *Reconfigurable Intelligent Surface*; VLC - *Visible Light Communication*; D2D - *Device to Device*; OWC - *Optical Wireless Communication*; UAV - *Unmanned Aerial Vehicle*; DTN - *Delay Tolerant Network*; AC - *Quantum Assisted Communication*; QI - *Quantum Internet*; QML - *Quantum Machine Learning*; RF - *Radiofrequency*; PHY - *Physical Layer*; OFDMA - *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*; MIMO - *Multiple Input/Multiple Output*; IoT - *Internet of Things*; SDR - *Software Defined Radio*; PC - *Personal Computer*; NTN - *Non Terrestrial Network*.

Ainda no estrato físico da arquitetura, um *hub* satelital recebe sinais do satélite e encaminha para processamento em SDR e servidor. O mesmo ocorre para as conexões VLC e OWC. A comunicação direta entre SDRs (na borda e agregação) também é possível e desejável. No núcleo da rede, servidores de maior capacidade suportam diversos habilitadores. A comunicação entre os servidores de agregação e de núcleo ocorre via roteadores TCP/IP. No entanto, outras arquiteturas de protocolos poderiam ser usadas, como NovaGenesis [92] e ETArch. A hospedagem de funções virtuais pode acontecer tanto no acesso, quanto na agregação e núcleo. Para ilustrar esse fato, utilizamos um ícone com forma de pizza e três cores: azul seria computação (processamento de dados em computadores com arquitetura Von Neumann, quânticos e neuromórficos); verde simboliza o armazenamento em cache local; e vermelho são os recursos de comunicação (placas de rede, lasers, FPGA, comutadores, etc.). Balões, aviões, *drones* e outros UAVs acrescentam a característica 3D na rede.

Com relação ao estrato de abstração/*middleware*, temos os seguintes componentes que utilizam os habilitadores previamente selecionados:

- Controladores Legados (*Legacy Controllers*) - Implementam controladores de todo tipo, i.e., SDN, O-RAN, 5G Core (5GC), qualquer controlador de tecnologia 5G ou anterior.
- Gerentes Legados (*Legacy Managers*) - Operam na gerência imperativa de recursos. Ou seja, utilizando protocolos tradicionais de gerência (por exemplo, *Simple Network Management Protocol* (SNMP)² ou *Network Configuration Protocol/Yet Another Next Generation* (NETCONF/YANG)³). Interagem com componentes do estrato de serviços.
- Virtualizadores (*Virtualizer*) - Hipervisores e ambientes de contêineres. Controle de recursos da infraestrutura para virtualização. Exemplos de tecnologias de virtualização são máquinas virtuais (*Virtual Machines* (VMs)), contêineres e *unikernels*. Os recursos de rede física são virtualizados a partir do fatiamento via programabilidade de equipamentos. No estrato de serviços, comutadores virtuais podem ser implementados como funções virtuais de rede, utilizando fatias da rede física. Os virtualizadores também englobam a gerência do recurso físico onde se virtualiza, por exemplo, o escopo do *Virtualized Infrastructure Manager* (VIM)⁴ de NFV, como o *OpenStack*.
- Plataformas de software - O ambiente orientado a serviço demanda o suporte de plataformas para executar diversas funções de abstração e *middleware*.

O principal componente desse estrato é o virtualizador, tal qual ilustrado na Figura 24. Ele suporta a virtualização de recursos físicos, bem como *middleware* necessário para VMs, contêineres, *unikernels*, etc. As plataformas tradicionais podem ser descritas por representantes no ecossistema de serviços do 6G. Controladores SDN (*OpenFlow*, P4, *Stratum* e outras tecnologias correntes) podem ainda se fazer necessários no contexto do 6G. Entretanto, com a descentralização trazida pelo uso de gêmeos digitais em conjunto com DLTs, cria-se um mercado de serviços de controle também descentralizado. Controladores legados podem participar desse mercado, efetivando comandos através dos atuais protocolos de controle de rede. De forma similar, o plano de gerência tradicional (e.g., SNMP) pode também ser inserido como serviços de gerência de rede legados. Por fim, temos diversas plataformas de software necessárias para suportar DLTs, mercados, segurança, pagamentos digitais, fatiamento, armazenamento temporário, novas realidades (AR/VR), orientação a serviços, etc.



Figura 24: Estrato de *middleware* e plataformas da arquitetura 6G. Concepção e desenho: Antônio M. Alberti. Siglas: MEC - *Multi-access Edge Computing*; NFV - *Network Function Virtualization*; CoCoCo - *Communication, Computing, Control*; AR - *Augmented Reality*; VR - *Virtual Reality*; SDN - *Software Defined Network*; DLT - *Distributed Ledger Technology*; VM - *Virtual Machine*; OS - *Operating System*.

Por fim, no estrato de serviços, temos diversos serviços inovadores e legados, os quais convivem através de mercados abertos digitais. Os serviços desse estrato se apoiam em plataformas

²Protocolos clássicos de gerência de redes de telecomunicações.

³Protocolos de auto configuração de redes e linguagem para descrição de recursos programáveis.

⁴Trata-se de componente da arquitetura NFV responsável pela gerência de recursos físicos e virtualizados. Ou seja, é o gerente da infraestrutura física e virtual, cuidando do ciclo de vida de recursos que serão usados para instanciar funções virtuais.

de *middleware* e virtualizadores do estrato abaixo. A seguir, descrevemos os componentes desse estrato em detalhes:

- Funções Virtuais (*Virtual Functions*) - Implementam todo tipo de funções de processamento, armazenamento e troca de informações como serviços da Web (decentralizada em DLT como *smart contracts*). Executam exposição de recursos/capacidades/disponibilidades (para diretório de serviços). Expõem nomes ao resolvedor de nomes. Realizam descoberta de possíveis parceiros para composição dinâmica de grafo de serviços, busca de possíveis acordos de nível de serviço e/ou seleção/ajuste em contratos inteligentes. Utilizam facilitadores para encontrar grafos de serviço possíveis aos quais podem se conectar. A contratação pode ser feita diretamente entre funções virtuais ou através de representantes (*proxies*). As funções virtuais de rede podem ser implementadas e acionadas via *smart contracts*, podendo possuir outros programas que somente processam via DLT.
- Resolução de Nomes e Armazenamento Temporário (*Name Resolution and Network Caching*) - É uma função virtual que armazena relacionamentos entre nomes. Também integra *cache* de rede. Armazena informações (nomes, identificadores, descritores, possíveis contratos inteligentes, etc.) de recursos físicos, serviços, interfaces e *firmwares*.
- Gêmeos Digitais (DTs) - Representam tudo o que é físico e não pode ser virtualizado. Controlam todo tipo de recurso de forma imperativa a partir de contratos formados com outros serviços. Implementam controladores de todo tipo, SDN, O-RAN, 5GC, etc. Ou seja, os representantes também são controladores dos representados. Gêmeos virtuais também são implementados como funções virtuais.
- Pilotos Automáticos (*Autopilots*) - São algoritmos treinados de inteligência artificial que podem ser integrados à computação autônoma, permitindo aprendizado tanto por ML, quanto por tentativa e erro no nível autônomo. Os pilotos automáticos atuam na tomada de decisão em um domínio/organização/coletivo. Atuam também na otimização e configuração de recursos e serviços contratados. Interagem com resolução de nomes e facilitadores para determinar as melhores oportunidades existentes nos mercados digitais, a fim de contratá-los. Durante a duração dos contratos, os pilotos automáticos interagem com gêmeos digitais para refletir no físico decisões sobre os contratos nos mercados.
- Assistentes (*Assistants*) - São representantes de indivíduos. Diferem dos representantes de organizações e/ou coletivos. Esses são chamados de *proxies*. Também são implementados como funções virtuais. Os assistentes são como versões melhoradas dos atuais sistemas, tais como *Apple Siri*, *Google Assistente*, *Alexa* e *Bixby*.
- Representantes (*Proxies*) - São serviços que representam entidades, tais como residências, edifícios, condomínios, empresas, operadoras, organizações, instituições, coletivos, etc. Os representantes armazenam políticas, preferências, modelos de contratos, intenções, dentre outras informações importantes para contratação de serviços em 6G. Os representantes recebem demandas dos assistentes em um certo domínio e dão andamento à contratação ou liberação de recursos e serviços, conforme política organizacional. São implementados como funções virtuais. A representação de plataformas de *middleware* legadas em domínio também pode ser feita por instâncias auxiliares desse componente, por exemplo, para NFV, DLT, etc.

- Facilitadores (*Facilitators*) - Recebem demandas por fatias do 6G e facilitam a construção de grafos de serviços a partir delas. Montam e devolvem sugestões de grafos de serviços possíveis a partir do que existe nos mercados descentralizados. Contratam funções virtuais nos mercados para implementar fatias. Facilitam a descoberta de *smart contracts* existentes, suas características, cláusulas, etc. Podem ser utilizados tanto em mercados, quanto em outras aplicações.
- Mercados Digitais (*Digital Markets*) - Oferecem uma ampla gama de implementações de funções virtuais, incluindo componentes das gerações anteriores (4G, 5G). Na prática, os mercados podem ser suportados através de ambientes com DLTs e *smart contracts*, ou até mesmo em ambientes de *cloud* tradicional (sem imutabilidade e, portanto, menos seguros). Os mercados formam verdadeiras lojas, onde facilitadores, representantes, pilotos automáticos, etc. podem buscar, contratar e vender recursos (físicos - coisas, espectro eletromagnético, redes físicas, antenas, torres, *sites* de borda, etc.) e serviços (funções virtuais). A composição dinâmica não é limitada a um único mercado (fechado ou aberto) e as lojas dos fornecedores tradicionais podem também ser integradas.
- Avatares - São objetos virtuais que permitem uma pessoa interagir em outras realidades. Diferem dos assistentes por não representarem as pessoas em sua ausência. Avatares são presenças das próprias pessoas físicas em outras realidades.

Na Figura 25, três atores do 6G são ilustrados: (i) cliente final do 6G (chamado de *user*); (ii) um operador/provedor de infraestrutura física (*infra provider*); (iii) provedor de serviços/conteúdos (*service/content provider*). Imaginamos que mesmo os usuários finais precisarão ter um conjunto mínimo de serviços instalados para seu uso. Eles podem executar em uma nuvem de borda oferecida pela operadora de serviços (contratada da operadora de infraestrutura) ou em um *data center* particular do cliente/terceiros. É no estrato de serviços que se encontram funções virtuais de rede executadas na forma de contratos inteligentes ou outros códigos chamados a partir desses. As funcionalidades de todos os planos do 6G (dados, controle, gerência, conhecimento e inferência) são implementadas dessa forma, para todos os atores. Isso simplifica a arquitetura.

A presença de um sistema de resolução de nomes e *cache* de rede permite a exposição e descoberta de recursos, serviços e interfaces [92]. Tanto nomes e ligações entre nomes, quanto objetos que descrevem entidades (descritores) podem ser usados. Isso inclui os contratos inteligentes também. Na Figura 25, os sistemas de resolução de nomes de cada domínio se conectam entre si, de acordo com as políticas estabelecidas no domínio pelo seu representante (*proxy*). O *Name Resolution and Temporary Caching* (NRTC) é muito importante em todo o ciclo de vida das entidades 6G, uma vez que em essência muitas das ações do ciclo de vida das entidades se relaciona a seus nomes e descritores. A descoberta de serviços bem conhecidos pelos seus nomes em um domínio ou entre domínios, mediante autenticação/autorização, é necessária para automatizar diversos procedimentos, desde *bootstrapping* até encerramento.

Olhando pelo ponto de vista dos representantes, eles podem, de forma autônoma, utilizar os NRTCs para descobrir entidades físicas ou virtuais existentes. Pilotos automáticos podem envolver identificadores, localizadores, descritores, arquivos de configuração, etc. como *inputs* e *outputs* de suas redes neurais ou outras técnicas de AI/ML. Ou seja, o sistema de nomes provê entradas para a tomada de decisão, as quais combinadas com os pedidos feitos pelo *proxy* resultam em planos de ações/configurações a serem executados em serviços e contrapartes físicas via gêmeos digitais. Facilitadores podem usar o sistema de nomes para descobrir todo

tipo de informação advinda de experiências anteriores de contratação. Isso pode inclusive ser considerado na tomada de decisão que envolva, como entradas, informações atuais e históricas de mercados digitais.

Para ilustrar o funcionamento de alto nível desses atores do estrato de serviços e demais estratos, vamos a um exemplo. Imagine um grupo de aficionados por *drones* que queira criar um evento temporários de 3 dias em uma cidade. Todos participantes querem controlar os seus *drones* através do 6G. Querem tirar fotos e gravar vídeos com seus *drones* e compartilhar uns com os outros e postar em redes sociais. Cada *drone* tem um gêmeo digital que executa no domínio de cada usuário separadamente. Na véspera do evento, todos os proprietários pedem a seus assistentes uma fatia de rede 6G para uso de seus *drones*. O assistente conversa por *chat* ou reconhecimento de voz com os usuários. Para atender a demanda, o assistente a envia para o representante do seu domínio (*proxy*). O representante é de fato o encarregado a resolver o problema, enquanto o assistente tem como principal função entendê-la e reportar o que está acontecendo. O *proxy* consulta o piloto automático para ver se algo parecido já foi feito antes. Se sim, ele utiliza informações de solução anterior para contratá-la novamente via facilitador ou diretamente no mercado digital. Caso essa fatia nunca tenha sido montada antes, com características similares ou idênticas, o *proxy* então aciona o facilitador para encontrar possibilidades de contratos que possam atender a demanda. O facilitador informa o piloto automático sobre as possibilidades. O piloto decide e informa o *proxy*. O *proxy* contrata os recursos necessários para a fatia nos mercados de recursos físicos (computação, armazenamento e rede), funções virtuais de rede necessárias, espectro de RF demandado, etc. Em resumo, o representante compra fatias de recursos compartilhados (ou dedicados) com suas carteiras digitais em diversos mercados. Se configurações de controle e gerência tradicionais forem necessárias, o representante os aciona via gerentes/controladores legados (sem acionamento por contratos inteligentes).

Observe que nesse cenário, cada representante de usuário pode tomar decisões diferentes, as quais resultam em fatias diferentes e que podem ser mais adequadas para o problema. Os contratos quando monetizados reservam recursos pelo tempo necessário ao evento. Ou até menos, conforme decisão de cada participante (isso no caso de um participante permanecer no evento parcialmente, ou seja, por menos tempo que a sua duração). O representante obedece políticas e etiquetas de preferência dos usuários, tais como moeda de preferência para pagamentos, operadores de preferência, redes de preferência, limite de atraso, etc. No lado do provedor de serviços, a demanda dos clientes é recebida pelos representantes desses domínios. Eles informam operadores humanos via seus respectivos assistentes. Ou seja, assim como os clientes, os operadores humanos das operadoras também têm assistentes (profissionais, nesse caso).

O ciclo se repete a partir do *proxy* do operador de serviços. O piloto automático, da mesma forma, pode verificar se fatias como essa já foram criadas. O representante então age na contratação de recursos físicos do operador de infraestrutura. A demanda segue para o representante dos provedores de infraestrutura, onde novamente outro representante é acionado. A solução final é montada de baixo para cima através da monetização de contratos inteligentes adequados para cada estrato: dos recursos físicos (os gêmeos digitais são envolvidos para efetivar controle e gerência), dos recursos virtualizados (no operador de serviços) e de monitoramento de conformidade e configuração ótima, a qual alimenta os pilotos automáticos de todos os atores.

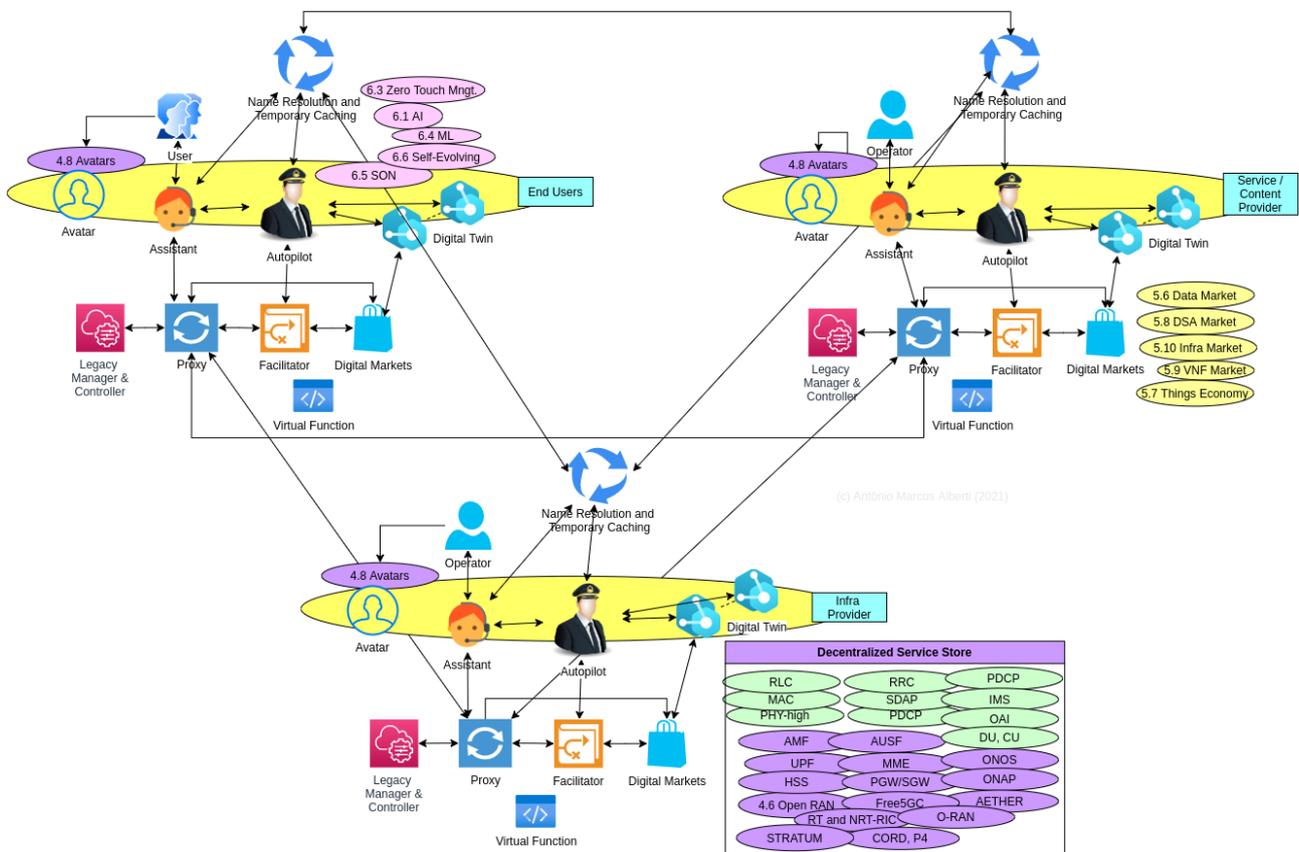


Figura 25: Estrato de serviços da arquitetura 6G. Concepção e desenho: Antônio M. Alberti. Siglas: AI - *Artificial Intelligence*; ML - *Machine Learning*; SON - *Self-Organizing Network*; VNF - *Virtual Network Function*; DSA - *Dynamic Spectrum Assignment*; RLC - *Radio Link Control*; MAC - *Medium Access Control*; PHY - *Physical Layer*; AMF - *Access and Mobility Management Function*; UPF - *User Plane Function*; HSS - *Home Subscriber Server*; RAN - *Radio Access Network*; RT - *Real Time*; NRT - *Non Real Time*; RIC - *RAN Intelligent Controller*; CORD - *Central Office Re-architected as a Datacenter*; 5GC - *5G Core*; RRC - *Radio Resource Control*; SDAP - *Service Data Adaption Protocol*; PDCP - *Packet Data Convergence Protocol*; IMS - *IP Multimedia Subsystem*; OAI - *Open Air Interface*; DU - *Distributed Unit*; CU - *Central Unit*; ONOS - *Open Network Operating System*; ONAP - *Open Network Automation Platform*.

A solução completa com os três estratos é mostrada na Figura 26. Essa solução permite a contratação dinâmica de recursos físicos/virtuais para atender a demanda dos usuários, via representantes, apoiado por inteligência artificial, de forma imutável através da monetização digital sem gasto duplo e descentralizado. Na prática, tem-se a utilização de uma loja descentralizada de serviços, interfaces e recursos (legados e novos) que servem todos os atores. Os gêmeos digitais refletem o necessário para cada fatia nos recursos que eles espelham. Novos serviços são alocados mediante monetização. Os operadores humanos podem usar avatares para interagir com os usuários diretamente em uma realidade virtual. Toda a operadora pode ter uma presença digital nos meta-versos. Os maiores ativos serão de conhecimento de como criar as melhores fatias e atendê-las apropriadamente, ou seja, a inteligência e acompanhamento humano na criação de fatias ótimas e customizadas por AI. Quando a fatia não é mais necessária (tempo limite é atingido ou finalização de serviço), os contratos são todos encerrados e os

recursos/serviços se tornam disponíveis para outros usuários.

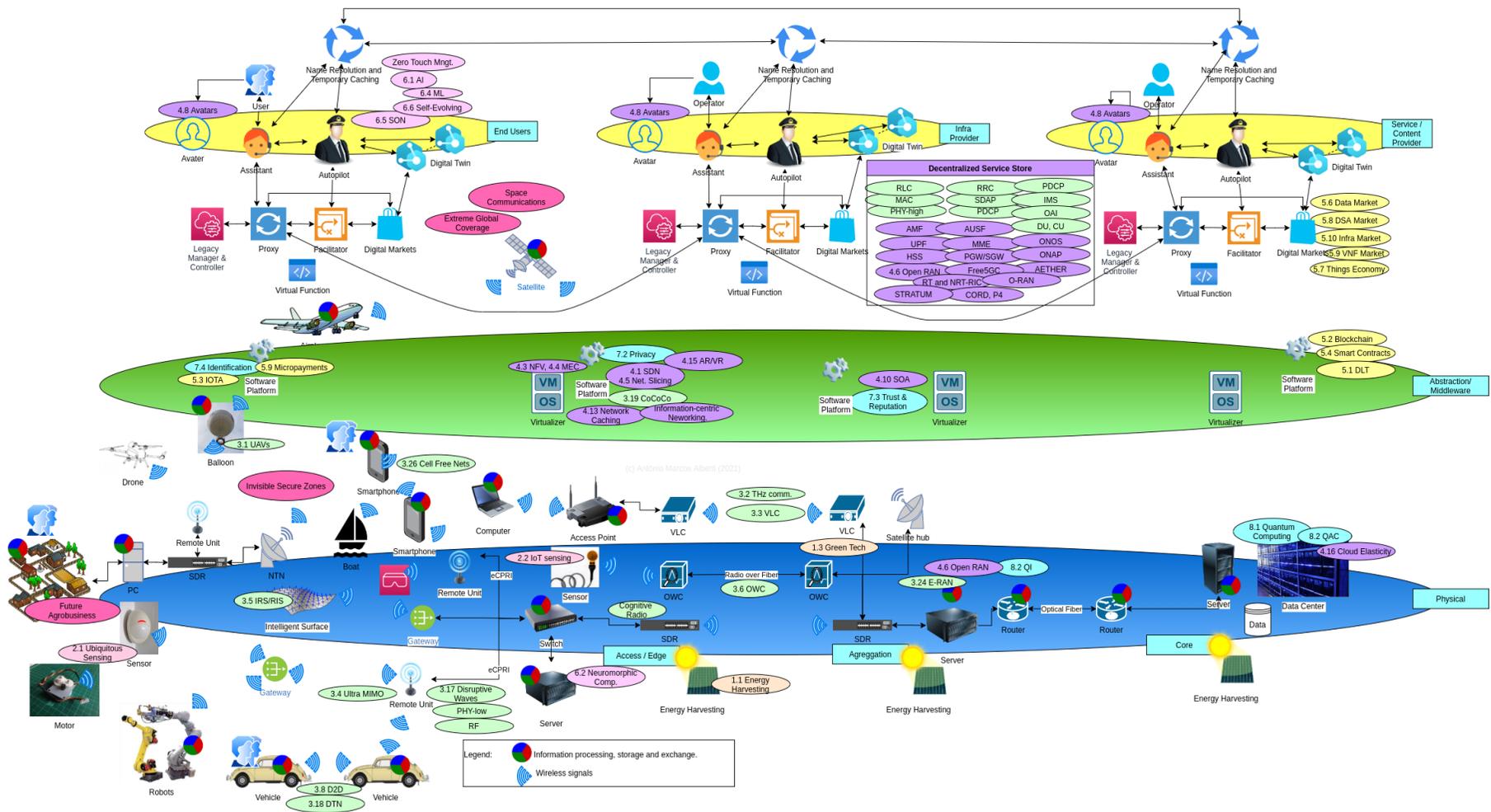


Figura 26: Arquitetura 6G disruptiva. Concepção e desenho: Antônio M. Alberti.

5 Conclusão

O levantamento de requisitos foi dividido em duas partes: funcionais e não-funcionais. Ou seja, foi utilizada uma abordagem bastante tradicional no projeto de grandes sistemas. Os requisitos funcionais foram herdados do trabalho realizado previamente pela equipe do projeto, conforme descrito no relatório Casos de Uso e Requisitos para as Redes 6G [4]. Neste relatório, descrevemos brevemente esses requisitos funcionais, com o intuito de tornar o texto minimamente autocontido, mas também aproveitamos para contextualizar e exemplificar os requisitos funcionais no escopo de arquiteturas 6G. Com base nas famílias de casos de uso, os requisitos não-funcionais são identificados e descritos também neste relatório.

Uma metodologia para análise de habilitadores foi desenvolvida considerando os aspectos de aderência (aplicabilidade), popularidade, inovação, impacto sinérgico e suporte aos requisitos do 6G. Uma nota de relevância foi calculada para cada habilitador utilizando-se dois métodos: (i) média aritmética; (ii) método de comparação em pares (AHP). As notas de aderência foram fragmentadas de acordo com os escopos de arquitetura definidos no relatório da Atividade 2.3 desse projeto [5]. Ao todo, 72 habilitadores foram analisados (provenientes desse relatório anterior) com relação a esses aspectos, utilizando a nova metodologia proposta. Buscamos tornar a avaliação a mais objetiva possível. Nesse contexto, a análise de popularidade e de suporte a requisitos foi embasada em dados quantitativos. Já as análises de aderência, inovação e impacto sinérgico foram feitas de forma qualitativa, utilizando o conhecimento e a experiência da equipe. Entretanto, todas as notas alocadas de forma subjetiva foram justificadas no texto da Seção 3.

A relevância dos habilitadores obtida por média aritmética foi detalhada na Subseção 3.9.1. Visando selecionar os habilitadores tecnológicos mais importantes para o 6G, uma nota de corte igual a 5 foi adotada. Ou seja, os habilitadores que obtiveram nota de relevância por média aritmética abaixo de 5 foram cortados do desenho do 6G proposto na Seção 4. Em resumo, os seguintes habilitadores foram selecionados para cada fundamento:

- **Energia** - *Green Technology e Energy Harvesting.*
- **Sensoriamento** - *IoT-Based Sensing e Ubiquitous Sensing.*
- **Comunicações** - *Cell-free Networking, Elastic-RAN, 3D networking, CoCoCo Convergence, Delay Awareness, Intermittent Connectivity, Disruptive Waveforms, Device-to-Device Communications, Optical-Wireless Communications, Intelligent Reflecting Surface, Reconfigurable Intelligent Surface, Ultra Massive MIMO, Visible Light Communications, THz Communications e Unmanned Aerial Vehicles.*
- **Softwarização** - *Cloud Elasticity, Augmented Reality, Virtual Reality, Network Caching, Service Oriented Architecture, Avatares, DTs, Open RAN, NS, Multi-access Edge Computing, Network Function Virtualization e Software Defined Network.*
- **Imutabilidade** - *Mercado de Infraestrutura e Fatias, Mercado de Funções Virtuais de Rede, Mercado de Espectro Eletromagnético, Mercado de Coisas Conectadas (Things Economy), Mercado de Dados, Micropagamentos, Smart Contracts e Tokenização, Tangle (IOTA), Blockchain e Distributed Ledger Technologies.*
- **Inteligência** - *Self-Evolving Networking, Self-Organizing Networks, Aprendizado de Máquina, Computação Neuromórfica e Inteligência Artificial.*

- **Segurança** - Tecnologias de Identificação, Confiança e Privacidade.
- **Tecnologia Quântica** - Computação Quântica, *Quantum Assisted Communications* e *Quantum Internet*.

Já a relevância dos habilitadores obtida pelo método AHP foi detalhada na Subseção 3.9.2. Ao fim da análise deste método, pôde-se realizar uma avaliação dos habilitadores mais relevantes para uma arquitetura 6G através de um ranqueamento dos mesmos. Desta forma, cada habilitador obteve um índice final de ranqueamento, cuja soma dentro de um fundamento totaliza 100%. Em resumo, para cada fundamento, os seguintes habilitadores foram ranqueados com os maiores índices de importância para uma arquitetura 6G:

- **Energia** - *Green Technology* e *Wireless Power Transferring*.
- **Sensoriamento** - *IoT-Based Sensing* e *Ubiquitous Sensing*
- **Comunicações** - *Cell-free Networking*, *THz Communications* e *Intelligent Reflecting Surface*.
- **Softwarização** - Cloud Elasticity, NFV, SOA, O-RAN, MEC e SDN.
- **Imutabilidade** - Mercado de Infraestrutura e Fatias, Micropagamentos e Tangle (IOTA).
- **Inteligência** - AI, Computação Neuromórfica e *self-evolving networks*.
- **Segurança** - Tecnologias de Identificação, Confiança e Privacidade.
- **Tecnologia Quântica** - QAC, QML e QC.

Em resumo, apesar de em alguns casos os habilitadores ocuparem posições diferentes de importância para uma arquitetura 6G, em grande parte dos métodos de média aritmética e AHP houve similaridade entre os resultados obtidos, com as tecnologias consideradas como relevantes em ambas as análises.

Uma vez selecionados os habilitadores a serem usados no 6G, trabalhamos na definição dos princípios que guiarão o projeto da arquitetura do 6G. A seguir, apresentamos os princípios que foram definidos. Vale observar que uma análise detalhada da correlação entre habilitadores e princípios foi realizada na Subseção 4.1.

- **Princípio 1:** Integrar Habilitadores de Forma Coesa, Desacoplada e Sinérgica;
- **Princípio 2:** Virtualizar Sempre que Possível;
- **Princípio 3:** Flexibilizar a Interface com os Recursos de Infraestrutura;
- **Princípio 4:** Gerir Componentes e Recursos de Rede de Maneira Autônoma;
- **Princípio 5:** Utilizar uma Abstração de Serviços para Integrações e Configurações;
- **Princípio 6:** Priorizar uma Solução Sustentável;
- **Princípio 7:** Oferecer Segurança Intrínseca;
- **Princípio 8:** Garantir Ciência sobre o Estado da Rede e dos Sistemas Interconectados;

- **Princípio 9:** Favorecer a Inovação e Criação de Novos Modelos de Negócio;
- **Princípio 10:** Ter a Capacidade de Satisfazer os Diferentes Requisitos das Aplicações Atuais e Futuras;
- **Princípio 11:** Focar em simplicidade e levar em conta a escalabilidade.

O projeto da arquitetura para a rede 6G foi realizado em dois eixos distintos: um, que parte de uma visão evolucionária, e outro, que considera a visão disruptiva da arquitetura.

A arquitetura evolucionária levou em conta que para o 6G, o processo de especificação ocorrerá no âmbito do 3GPP e que, dentro do possível, haverá compatibilidade com os próximos *releases* da rede 5G com a arquitetura 6G. Para o projeto da arquitetura evolucionária, foram ainda considerados: as famílias de casos de uso, os requisitos funcionais e os não-funcionais apresentados, os escopos de arquiteturas identificados e os princípios de projeto.

Os habilitadores identificados e priorizados anteriormente foram selecionados para a arquitetura evolucionária. Entretanto no projeto desta arquitetura, para alguns habilitadores foi considerado um papel de menor relevância quando comparado com a arquitetura disruptiva. Um exemplo, são os habilitadores ligados à tecnologia quântica.

A arquitetura evolucionária definiu um conjunto de camadas: (i) Serviços e negócios; (ii) Gestão e Controle; e (iii) infraestrutura. Os habilitadores foram distribuídos ao longo destas camadas, sendo destacados os mais relevantes. Em particular no caso dos habilitadores dos fundamentos de segurança e inteligência os mesmos estão presentes em todas as três camadas com igual importância. Nesta arquitetura há duas categorias de provedores: um cujo foco é apenas fornecer a infraestrutura (NIP) e outro que é responsável pelo serviço de comunicação (CSP). Os serviços fim-a-fim poderão envolver mais de um provedor nestes diferentes níveis.

Levando-se em conta os habilitadores selecionados e os princípios de projeto citados, projetamos uma arquitetura disruptiva para o 6G (que não precisava ser compatível com o 5G corrente). Essa arquitetura tem três estratos: (i) físico; (ii) *middlewares* e plataformas; e (iii) serviços. O estrato físico engloba todos os habilitadores visíveis e palpáveis de infraestrutura, incluindo todo tipo de dispositivo, equipamento, rede, *cloud*, etc. Dividimos o estrato físico em três regiões: (a) acesso; (b) agregação; e (c) núcleo. O estrato de *middleware*/plataformas inclui recursos para virtualização, monetização, *servitização*, segurança, armazenamento, fatiamento e programabilidade. Já no estrato de serviços, incluímos inúmeras funções virtuais para: nomeação, armazenamento, computação, orquestração, controle, gerência, ciclo de vida, exposição, descoberta, facilitação, contratação, mercado digital, piloto automático, representação do físico e do humano. Uma loja descentralizada (aberta) de serviços inclui diversas funções de rede das gerações existentes (4G, 5G) e novas para o 6G. Interfaces entre funções de rede podem ser publicadas em um sistema de resolução de nomes distribuído, permitindo a descoberta e contratação em tempo de execução de recursos de infraestrutura, virtualizados e serviços. A meta da arquitetura disruptiva é criar um ambiente hiper convergente onde os componentes do 6G podem ser evoluídos e ofertados através de contratos inteligentes em tecnologia de registro imutável de informação e computação (em inglês, DLT). Para fins de compatibilidade e escalabilidade, funções virtuais implantadas em contêineres ou máquinas virtuais também são suportadas, mas a grande novidade é a execução de funções virtuais a partir da monetização de contratos inteligentes em DLT pública ou *Central Bank Digital Coin* (CDBC). O papel das DLTs na arquitetura é talvez a principal diferença com relação a arquitetura evolucionária.

Como trabalhos futuros, sugerimos a continuação do projeto das arquiteturas evolucionária e disruptiva. Sugerimos a integração de componentes existentes para a arquitetura evolucionária, envolvendo implementações pontuais e experimentação. Com relação a arquitetura

disruptiva, o ideal seria o aprimoramento do desenho por um período mais longo, resultando em um documento de especificação detalhado para sua implementação futura. São iniciativas correlacionadas, mas independentes.

Referências

- [1] C.-X. Wang, F. Haider, X. Gao, X.-H. You, Y. Yang, D. Yuan, H. Aggoune, H. Haas, S. Fletcher, and E. Hepsaydir, “Cellular architecture and key technologies for 5g wireless communication networks,” Feb. 2014.
- [2] Q. C. Li, H. Niu, A. T. Papathanassiou, and G. Wu, “5g network capacity: Key elements and technologies,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 71–78, 2014.
- [3] P. Ameigeiras, J. J. Ramos-Muñoz, L. Schumacher, J. Prados-Garzon, J. Navarro-Ortiz, and J. M. López-Soler, “Link-level access cloud architecture design based on sdn for 5g networks,” *IEEE Network*, vol. 29, pp. 24–31, 2015.
- [4] L. Mendes et al., “Casos de Uso e Requisitos para as Redes 6G,” Projeto Brasil 6G, Report, 2021.
- [5] A. Alberti et al., “Arquiteturas para a Rede 6G,” Projeto Brasil 6G, Report, 2021.
- [6] S. J. Nawaz, S. K. Sharma, S. Wyne, M. N. Patwary, and M. Asaduzzaman, “Quantum Machine Learning for 6G Communication Networks: State-of-the-Art and Vision for the Future,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 46 317–46 350, 2019.
- [7] L. Bonati, M. Polese, S. D’Oro, S. Basagni, and T. Melodia, “Open, Programmable, and Virtualized 5G Networks: State-of-the-Art and the Road Ahead,” *Computer Networks*, vol. 182, p. 107516, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128620311786>
- [8] J. R. Bhat and S. A. Alqahtani, “6G Ecosystem: Current Status and Future Perspective,” *IEEE Access*, vol. 9, p. 43134–43167, 2021, conference Name: IEEE Access.
- [9] T. Maksymyuk, J. Gazda, M. Volosin, G. Bugar, D. Horvath, M. Klymash, and M. Dohler, “Blockchain-Empowered Framework for Decentralized Network Management in 6G,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 9, pp. 86–92, 2020.
- [10] V. Ziegler and S. Yrjola, “6g indicators of value and performance,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–5.
- [11] 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. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109%2Fcomst.2021.3059644>
- [12] R. Gupta, A. Nair, S. Tanwar, and N. Kumar, “Blockchain-assisted Secure UAV Communication in 6G Environment: Architecture, Opportunities, and Challenges,” *IET Communications*, 10 2020.
- [13] T. Hewa, G. Gür, A. Kalla, M. Ylianttila, A. Bracken, and M. Liyanage, “The Role of Blockchain in 6G: Challenges, Opportunities and Research Directions,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–5.
- [14] H. X. Nguyen, R. Trestian, D. To, and M. Tatipamula, “Digital Twin for 5G and Beyond,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 2, pp. 10–15, 2021.

- [15] G. Liu, Y. Huang, N. Li, J. Dong, J. Jin, Q. Wang, and N. Li, “Vision, requirements and network architecture of 6G mobile network beyond 2030,” *China Communications*, vol. 17, no. 9, pp. 92–104, Sep. 2020, conference Name: China Communications.
- [16] T. Taleb, R. L. Aguiar, I. G. B. Yahia, B. Chatras, G. Christensen, U. Chunduri, A. Clemm, and X. Costa, “White Paper on 6G Networking,” University of Oulu, Tech. Rep. 6, Jun. 2020. [Online]. Available: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526226842.pdf>
- [17] Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, and P. Fan, “6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 28–41, 2019.
- [18] L. U. Khan, I. Yaqoob, M. Imran, Z. Han, and C. S. Hong, “6G Wireless Systems: A Vision, Architectural Elements, and Future Directions,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 147 029–147 044, 2020.
- [19] S. Ali, W. Saad, N. Rajatheva, K. Chang, D. Steinbach, B. Sliwa, C. Wietfeld, K. Mei, H. Shiri, H.-J. Zepernick *et al.*, “6g white paper on machine learning in wireless communication networks,” *arXiv preprint arXiv:2004.13875*, 2020.
- [20] N. Rajatheva, I. Atzeni, E. Bjornson, A. Bourdoux, S. Buzzi, J.-B. Dore, S. Erkucuk, M. Fuentes, K. Guan, Y. Hu *et al.*, “White paper on broadband connectivity in 6g,” *arXiv preprint arXiv:2004.14247*, 2020.
- [21] E. Peltonen, M. Bennis, M. Capobianco, M. Debbah, A. Ding, F. Gil-Castiñeira, M. Jurmu, T. Karvonen, M. Kelanti, A. Kliks *et al.*, “6G white paper on edge intelligence,” *arXiv preprint arXiv:2004.14850*, 2020.
- [22] M. Chen, U. Challita, W. Saad, C. Yin, and M. Debbah, “Artificial neural networks-based machine learning for wireless networks: A tutorial,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3039–3071, 2019.
- [23] X. Huang, J. A. Zhang, R. P. Liu, Y. J. Guo, and L. Hanzo, “Airplane-Aided Integrated Networking for 6G Wireless: Will It Work?” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 84–91, 2019.
- [24] E. Calvanese Strinati and S. Barbarossa, “6G networks: Beyond Shannon towards semantic and goal-oriented communications,” *Computer Networks*, vol. 190, pp. 1–17, 2021.
- [25] Y. Al-Eryani and E. Hossain, “THE D-OMA METHOD FOR MASSIVE MULTIPLE ACCESS IN 6G. Performance, Security, and Challenges,” *IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY MAGAZINE*, vol. 14, no. 3, pp. 92–99, 09 2019.
- [26] M. Elsayed and M. Erol-Kantarci, “AI-enabled future wireless networks: Challenges, opportunities, and open issues,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 70–77, 2019.
- [27] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, “6g wireless communication systems: Applications, requirements, technologies, challenges, and research directions,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 957–975, 2020.

- [28] T. Huang, W. Yang, J. Wu, J. Ma, X. Zhang, and D. Zhang, “A Survey on Green 6G Network: Architecture and Technologies,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 175 758–175 768, 2019.
- [29] ITU-T, “Network 2030 - Architecture Framework,” Tech. Rep., 2020. [Online]. Available: <http://handle.itu.int/11.1002/pub/815d5501-en>
- [30] H. X. Yajun Zhao, Guanghui YU, “6G Mobile Communication Network: Vision, Challenges and Key Technologies,” *SCIENTIA SINICA Informationis*, vol. 49, no. 8, p. 963–987, Aug 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1360/N112019-00033>
- [31] Z. B. e. S. P. Yifei Yuan, Yajun Zhao, “Potential Key Technologies for 6G Mobile Communications,” *Science China Information Sciences*, vol. 63, no. 8, May 2020. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/336230111_Potential_Key_Technologies_for_6G_Mobile_Communications
- [32] N. H. Mahmood, S. Böcker, A. Munari, F. Clazzer, I. Moerman, K. Mikhaylov, O. Lopez, O.-S. Park, E. Mercier, H. Bartz, R. Jäntti, R. Pragada, Y. Ma, E. Annanperä, C. Wietfeld, M. Andraud, G. Liva, Y. Chen, E. Garro, F. Burkhardt, H. Alves, C.-F. Liu, Y. Sadi, J.-B. Dore, E. Kim, J. Shin, G.-Y. Park, S.-K. Kim, C. Yoon, K. Anwar, and P. Seppänen, “White Paper on Critical and Massive Machine Type Communication Towards 6G,” *arXiv:2004.14146 [cs, eess]*, May 2020, arXiv: 2004.14146. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2004.14146>
- [33] H. Saarnisaari, S. Dixit, M.-S. Alouini, A. Chaoub, M. Giordani, A. Kliks, M. Matinmikko-Blue, N. Zhang, A. Agrawal, M. Andersson *et al.*, “A 6g white paper on connectivity for remote areas,” *arXiv preprint arXiv:2004.14699*, 2020.
- [34] X. You, C.-X. Wang, J. Huang, X. Gao, Z. Zhang, M. Wang, Y. Huang, C. Zhang, Y. Jiang, J. Wang, M. Zhu, B. Sheng, D. Wang, Z. Pan, P. Zhu, Y. Yang, Z. Liu, P. Zhang, X. Tao, S. Li, Z. Chen, X. Ma, C.-L. I, S. Han, K. Li, C. Pan, Z. Zheng, L. Hanzo, X. S. Shen, Y. J. Guo, Z. Ding, H. Haas, W. Tong, P. Zhu, G. Yang, J. Wang, E. G. Larsson, H. Q. Ngo, W. Hong, H. Wang, D. Hou, J. Chen, Z. Chen, Z. Hao, G. Y. Li, R. Tafazolli, Y. Gao, H. V. Poor, G. P. Fettweis, and Y.-C. Liang, “Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts,” *Science China Information Sciences*, vol. 64, no. 1, p. 110301, Nov 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11432-020-2955-6>
- [35] C. She, R. Dong, Z. Gu, Z. Hou, Y. Li, W. Hardjawana, C. Yang, L. Song, and B. Vucetic, “Deep learning for ultra-reliable and low-latency communications in 6G networks,” *IEEE Network*, vol. 34, no. 5, pp. 219–225, 2020.
- [36] D. Marasinghe, N. Jayaweera, N. Rajatheva, and M. Latva-Aho, “Hierarchical user clustering for mmwave-noma systems,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–5.
- [37] I. F. Akyildiz, A. Kak, and S. Nie, “6g and beyond: The future of wireless communications systems,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 133 995–134 030, 2020.
- [38] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, 2020.

- [39] C.-L. I, “Ai as an essential element of a green 6g,” *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 5, no. 1, pp. 1–3, 2021.
- [40] R. d. R. Righi, L. Andrioli, V. F. Rodrigues, C. A. d. Costa, A. M. Alberti, and D. Singh, “Elastic-RAN: An adaptable multi-level elasticity model for Cloud Radio Access Networks,” *Computer Communications*, vol. 142–143, p. 34–47, Jun 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366418309770>
- [41] Q. Yu, J. Ren, H. Zhou, and W. Zhang, “A Cybertwin based Network Architecture for 6G,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, Mar 2020, p. 1–5.
- [42] S. Yrjola, P. Ahokangas, M. Matinmikko-Blue, R. Jurva, V. Kant, P. Karppinen, M. Kinula, H. Koumaras, M. Rantakokko, V. Ziegler *et al.*, “White paper on business of 6g,” *arXiv preprint arXiv:2005.06400*, 2020.
- [43] G. Gui, M. Liu, F. Tang, N. Kato, and F. Adachi, “6G: Opening New Horizons for Integration of Comfort, Security, and Intelligence,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 5, pp. 126–132, 2020.
- [44] M. Ejaz, T. Kumar, M. Ylianttila, and E. Harjula, “Performance and Efficiency Optimization of Multi-layer IoT Edge Architecture,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–5.
- [45] A. Shahraki, M. Abbasi, M. Piran, M. Chen, S. Cui *et al.*, “A comprehensive survey on 6G networks: Applications, core services, enabling technologies, and future challenges,” *arXiv preprint arXiv:2101.12475*, 2021.
- [46] N. Jayaweera, D. Marasinghe, N. Rajatheva, and M. Latva-Aho, “Factory Automation: Resource Allocation of an Elevated LiDAR System with URLLC Requirements,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–5.
- [47] I. Yaqoob, K. Salah, M. Uddin, R. Jayaraman, M. Omar, and M. Imran, “Blockchain for Digital Twins: Recent Advances and Future Research Challenges,” *IEEE Network*, vol. 34, no. 5, pp. 290–298, 2020.
- [48] R. Saracco, “Digital Twins: Bridging Physical Space and Cyberspace,” *Computer*, vol. 52, no. 12, pp. 58–64, 2019.
- [49] X. Tang, C. Cao, Y. Wang, S. Zhang, Y. Liu, M. Li, and T. He, “Computing power network: The architecture of convergence of computing and networking towards 6G requirement,” *China Communications*, vol. 18, no. 2, pp. 175–185, Feb. 2021, conference Name: China Communications.
- [50] J. Wu, R. Li, X. An, C. Peng, Z. Liu, J. Crowcroft, and H. Zhang, “Toward Native Artificial Intelligence in 6G Networks: System Design, Architectures, and Paradigms,” *arXiv:2103.02823 [cs]*, Mar. 2021, arXiv: 2103.02823. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2103.02823>
- [51] S. Musso, G. Perboli, M. Rosano, and A. Manfredi, “A decentralized marketplace for m2m economy for smart cities,” in *2019 IEEE 28th International Conference on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE)*, 2019, pp. 27–30.

- [52] P. Ferraro, C. King, and R. Shorten, “Distributed ledger technology for smart cities, the sharing economy, and social compliance,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 62 728–62 746, 2018.
- [53] A. Pouttu, F. Burkhardt, C. Patachia, L. Mendes, G. R. Brazil, S. Pirttikangas, E. Jou, P. Kuvaja, F. T. Finland, M. Heikkilä *et al.*, “6g white paper on validation and trials for verticals towards 2030’s,” *6G Research Visions*, no. 4, 2020.
- [54] ITU-T, “New Services and Capabilities for Network 2030: Description, Technical Gap and Performance Target Analysis,” in *ITU-T*, 10 2019, p. 45.
- [55] J. H. Kim, “6g and internet of things: a survey,” *Journal of Management Analytics*, vol. 8, no. 2, pp. 316–332, 2021.
- [56] J. Park, S. Samarakoon, M. Bennis, and M. Debbah, “Wireless network intelligence at the edge,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 11, pp. 2204–2239, 2019.
- [57] M. Moltafet, M. Leinonen, and M. Codreanu, “An approximate expression for the average aoi in a multi-source m/g/1 queueing model,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–5.
- [58] R. Kantola, “Trust networking for beyond 5g and 6g,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–6.
- [59] V. Räisänen, “A framework for capability provisioning in B5G,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–4.
- [60] S. Wang, T. Sun, H. Yang, X. Duan, and L. Lu, “6G Network: Towards a Distributed and Autonomous System,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–5.
- [61] H. Viswanathan and P. E. Mogensen, “Communications in the 6G Era,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 57 063–57 074, 2020.
- [62] M. Saravanan, S. Behera, and V. Iyer, “Smart contracts in mobile telecom networks,” in *2017 23RD Annual International Conference in Advanced Computing and Communications (ADCOM)*, 2017, pp. 27–33.
- [63] I. Badmus, A. Laghrissi, M. Matinmikko-Blue, and A. Pouttu, “Identifying requirements affecting latency in a softwarized network for future 5g and beyond,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–6.
- [64] H.-C. Yang and M.-S. Alouini, “Data-Oriented Transmission in Future Wireless Systems: Toward Trustworthy Support of Advanced Internet of Things,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 78–83, 2019.
- [65] H. Han, J. Zhao, W. Zhai, Z. Xiong, and W. Lu, “Smart City Enabled by 5G/6G Networks: An Intelligent Hybrid Random Access Scheme,” 2021.
- [66] M. S. Kaiser, N. Zenia, F. Tabassum, S. A. Mamun, M. A. Rahman, M. S. Islam, and M. Mahmud, “6G Access Network for Intelligent Internet of Healthcare Things: Opportunity, Challenges, and Research Directions,” in *Proceedings of International Conference on Trends in Computational and Cognitive Engineering*, M. S. Kaiser, A. Bandyopadhyay, M. Mahmud, and K. Ray, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 317–328.

- [67] A. Bourdoux, A. N. Barreto, B. van Liempd, C. H. M. de Lima, D. Dardari, D. Belot, E. S. Lohan, G. Seco-Granados, H. Sardeddeen, H. Wymeersch, J. Suutala, J. Saloranta, M. Guillaud, M. Isomursu, M. Valkama, M. R. K. Aziz, R. Berkvens, T. Sanguanpuak, T. Svensson, and Y. Miao, “6g white paper on localization and sensing,” *arXiv e-prints*, 2020.
- [68] A. Dogra, R. K. Jha, and S. Jain, “A Survey on beyond 5G network with the advent of 6G: Architecture and Emerging Technologies,” *IEEE Access*, pp. 1–1, 2020, conference Name: IEEE Access.
- [69] D. Kutscher, T. Karkkainen, and J. Ott, “Directions for Computing in the Network,” Internet Engineering Task Force, Internet-Draft draft-kutscher-coinrg-dir-02, Jul. 2020, work in Progress. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-kutscher-coinrg-dir-02>
- [70] I. Moerman, D. Zeghlache, A. Shahid, J. F. Santos, L. A. DaSilva, K. David, J. Farscrotu, A. de Ridder, W. Liu, and J. Hoebeker, “Mandate-driven Networking Eco-system: A Paradigm Shift in End-to-End Communications,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–6.
- [71] Y. Zhou, L. Liu, L. Wang, N. Hui, X. Cui, J. Wu, Y. Peng, Y. Qi, and C. Xing, “Service-aware 6g: An intelligent and open network based on the convergence of communication, computing and caching,” *Digital Communications and Networks*, vol. 6, no. 3, pp. 253–260, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352864820300237>
- [72] J. Haavisto and J. Riekkki, “Interoperable gpu kernels as latency improver for mec,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–5.
- [73] G. Wikström, J. Peisa, P. Rugeland, N. Johansson, S. Parkvall, M. Girnyk, G. Mildh, and I. L. Da Silva, “Challenges and technologies for 6g,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–5.
- [74] V. Ziegler, H. Viswanathan, H. Flinck, M. Hoffmann, V. Räsänen, and K. Hätönen, “6G Architecture to Connect the Worlds,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 173 508–173 520, 2020.
- [75] H. Yang, A. Alphones, Z. Xiong, D. Niyato, J. Zhao, and K. Wu, “Artificial-Intelligence-Enabled Intelligent 6G Networks,” *IEEE Network*, vol. 34, no. 6, pp. 272–280, 2020.
- [76] N. Zivic, C. Ruland, and J. Sassmannshausen, “Distributed ledger technologies for m2m communications,” in *2019 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, 2019, pp. 301–306.
- [77] A. Cullen, P. Ferraro, C. King, and R. Shorten, “On the resilience of dag-based distributed ledgers in iot applications,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 8, pp. 7112–7122, 2020.
- [78] S. Guo, Y. Qi, P. Yu, S. Xu, and F. Qi, “When Network Operation Meets Blockchain: An Artificial-Intelligence-Driven Customization Service for Trusted Virtual Resources of IoT,” *IEEE Network*, vol. 34, no. 5, pp. 46–53, 2020.

- [79] M. Caleffi, D. Chandra, D. Cuomo, S. Hassanpour, and A. S. Cacciapuoti, “The rise of the quantum internet,” *Computer*, vol. 53, no. 6, pp. 67–72, 2020.
- [80] Z. Yan, T. Nguyen, F. Liu, T. Hewa, M. Liyanage, A. Ijaz, J. Partala, R. Abbas, A. Hecker, S. Jayousi, A. Martinelli, S. Caputo, J. Bechtold, I. Morales, A. Stoica, G. Abreu, S. Shahabuddin, E. Panayirci, H. Haas, T. Kumar, B. Ozparlak, and J. Röning, *6G white paper: research challenges for trust, security and privacy*, ser. 6G Research Visions, M. Ylianttila, R. Kantola, A. Gurtov, L. Mucchi, and I. Oppermann, Eds. Finland: University of Oulu, Jun. 2020, no. 9.
- [81] 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.
- [82] F. Daniel and L. Guida, “A service-oriented perspective on blockchain smart contracts,” *IEEE Internet Computing*, vol. 23, no. 1, pp. 46–53, 2019.
- [83] 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.
- [84] R. A. Mishra, A. Kalla, K. Shukla, A. Nag, and M. Liyanage, “B-vnf: Blockchain-enhanced architecture for vnf orchestration in mec-5g networks,” in *2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF)*, 2020, pp. 229–234.
- [85] M. Bhandary, M. Parmar, and D. Ambawade, “Securing logs of a system - an iota tangle use case,” in *2020 International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, 2020, pp. 697–702.
- [86] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjöland, and F. Tufvesson, “6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 7, pp. 1166–1199, 2021.
- [87] S. T.L. and V. L.G., *Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process*. MA-Dordrecht-London: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [88] O. L. A. López, H. Alves, R. D. Souza, S. Montejo-Sánchez, E. M. G. Fernández, and M. Latva-Aho, “Massive Wireless Energy Transfer: Enabling Sustainable IoT Toward 6G Era,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 11, pp. 8816–8835, Jun. 2021, conference Name: IEEE Internet of Things Journal.
- [89] 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, conference Name: IEEE Communications Surveys Tutorials.
- [90] J. Walko, “Cognitive radio,” *IEE Review*, vol. 51, no. 5, pp. 34–37, May 2005, conference Name: IEE Review.
- [91] L. F. Borges, M. T. Barros, and M. Nogueira, “Toward Reliable Intra-Body Molecular Communication: An Error Control Perspective,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 5, pp. 114–120, 2021.

- [92] A. M. Alberti, M. A. F. Casaroli, D. Singh, and R. da Rosa Righi, “Naming and name resolution in the future internet: Introducing the novagenesis approach,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 67, pp. 163–179, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X16302643>
- [93] P. Porambage, G. Gür, D. P. M. Osorio, M. Liyanage, A. Gurtov, and M. Ylianttila, “The roadmap to 6g security and privacy,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 1094–1122, 2021.
- [94] W. F. Silvano and R. Marcelino, “Iota Tangle: A cryptocurrency to communicate Internet-of-Things data,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 112, pp. 307–319, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X19329048>
- [95] D. J. Bernstein and T. Lange, “Post-quantum cryptography,” *Nature*, vol. 549, no. 7671, pp. 188–194, Sep. 2017, bandiera_abtest: a Cg_type: Nature Research Journals Number: 7671 Primary_atype: Reviews Publisher: Nature Publishing Group Subject_term: Computer science;Quantum information Subject_term_id: computer-science;quantum-information. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/nature23461>
- [96] F. Silva, J. Castillo-Lema, A. Neto, F. Silva, P. Rosa, D. Corujo, C. Guimarães, and R. Aguiar, “Entity title architecture extensions towards advanced quality-oriented mobility control capabilities,” in *2014 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Jun. 2014, pp. 1–6.
- [97] 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.
- [98] J. Jose Ordonez-Lucena, P. Ameigeiras, L. M. Contreras, J. Folgueira, and D. López, “On the Rollout of Network Slicing in Carrier Networks: A Technology Radar,” *Sensors*, vol. 21, no. 8094, 2021.
- [99] G. Americas, “White Paper: Management, Orchestration & Automation,” Tech. Rep., 2019.
- [100] 3GPP, “TS 23.628: Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Architecture enhancements to facilitate communications with packet data networks and applications,” Tech. Rep., 2018.
- [101] ITU-T, “White Paper FG-NET2030: Network 2030 - A Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond,” Tech. Rep., May 2019.
- [102] 5GPPP, “5G PPP Architecture Working Group, View on 5G Architecture,” Tech. Rep., 2019.