

JOSÉ OLÍMPIO RODRIGUES BATISTA JUNIOR

**5G-Transversal: um *framework* para orquestração hierárquica
federada dos serviços de redes 5G e gerações futuras
em domínios heterogêneos**

São Paulo

2023

JOSÉ OLÍMPIO RODRIGUES BATISTA JUNIOR

**5G-Transversal: um *framework* para orquestração hierárquica
federada dos serviços de redes 5G e gerações futuras
em domínios heterogêneos**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Doutor em Ciências.

São Paulo

2023

JOSÉ OLÍMPIO RODRIGUES BATISTA JUNIOR

**5G-Transversal: um *framework* para orquestração hierárquica
federada dos serviços de redes 5G e gerações futuras
em domínios heterogêneos**

Versão Corrigida

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Doutor em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia de Computação

Orientador:
Prof. Dr. Carlos Eduardo Cugnasca

São Paulo

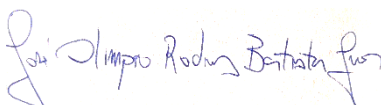
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 31 de agosto de 2023

Assinatura do autor:



Assinatura do orientador:



Catlogação-na-publicação

Batista Junior, José Olimpio Rodrigues

5G-Transversal: um *framework* para orquestração hierárquica federada dos serviços de redes 5G e gerações futuras em domínios heterogêneos / J. O. R. Batista Junior – versão corr. -- São Paulo, 2023.

169 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1.5G 2.6G 3.Computação em nuvem distribuída 4. Rede de gerência de telecomunicações 5. *Softwarização* de rede I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamentode Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II.t.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, à energia conhecida como *Deus*, a qual talvez um dia a ciência possa compreendê-la a ponto de se comprovar sua real existência, pelas oportunidades que nos propicia a cada dia em melhorar o que somos e o que fazemos uns aos outros.

A todos que, direta ou indiretamente, participaram e colaboraram comigo no desenvolvimento do Projeto Temático de Pesquisa intitulado como *Orquestrador Dinâmico em Tempo de Operação para Redes Móveis de Quinta e Futuras Gerações* e na implantação do Projeto *OpenCare5G*, assim como à Academia de Rede de Acesso ao Rádio Aberta da Ásia (Asia Open Radio Access Network Academy — AORA) e ao Centro de Ciência e Tecnologia (CCT) — processo nº. 2021/11.905-0, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) — PROEX 88887.603118/2021-00, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) e ao Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais (PCS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) — EP-USP, que me ofereceram a infraestrutura e suporte acadêmico-científicos necessários para a realização deste trabalho.

À estimada Profa. Dra. Tereza Cristina M. B. Carvalho, às minhas amigas Profa. Dra. Maria Terezinha S. Gomes, Ana Carolina F. Teodoro, Isis de Medeiros, Regina Célia L. Gonçalves e Renata Cristina Silva, aos Srs. Carlos Augusto Gomes e Rodrigo B. Honorato, aos Mes. Marco Aurélio Pestana e Renato B. Florentino pelos incentivos ao início deste trabalho.

Às Profas. Dras. Anna H. Reali Costa, Cíntia B. Margi, Graça Bressan, Solange N. A. de Souza, ao saudoso Prof. Dr. André R. Hirakawa, aos Profs. Drs. Bruno de Carvalho Albertini e Jorge Rady de Almeida Jr. por todo aprendizado que recebi em salas de aula.

A todos(as) demais professores(as) que me compartilharam seus respectivos conhecimentos até hoje.

Ao meu caro orientador, Prof. Dr. Carlos Eduardo Cugnasca, e ilustre colaborador, Prof. Dr. Moacyr Martucci Jr., pelos conselhos, orientações, aulas e incentivos de energia positiva que recebi até então.

À Profa. Maria Cristina V. Borba, Profa. Dra. Regina M. Silveira, aos Profs. Drs. Claudio de Castro Monteiro e Kechi Hirama, aos meus colegas de trabalho do *Smart Lab* da EP-USP (Eng. Celso T. Matsumura, Mes. Danilo de Souza Miguel, Josué L. M. Dantas e Nelson M. Garcia, Prof. Dr. Cledson A. Sakurai), bem como Prof. Dr. Antonio M. Saraiva, Mes. Fernando Xavier, Gustavo M. Mostaço e José S. R. de Faria, Drs. Roberto F. da Silva e Wilian F. Costa, do Laboratório de Automação Agrícola (LAA) da EP-USP, Mes. Douglas C. da Silva, Marco A. F. de Sousa e Wagner de Oliveira, do Laboratório de Arquitetura e Redes de Computadores (LARC) — EP-USP, à Ma. Cecília E. Y. Matsumura e aos engenheirandos da EP-USP Augusto B. V. Silva e João Paulo C. Barbosa pelo auxílio e companheirismo no dia a dia ao longo destes nossos quase cinco anos de convívio.

Por fim, mas de forma não menos importante, meu muito obrigado à minha memorabilíssima avó Edith M. Landi, à minha irmã, Luciane L. R. B. Marquezi e aos meus queridos pais José Olimpio R. Batista e Elisabete L. R. Batista, que me proporcionaram obter muito da estrutura e dos valores que possuo.

“Sou um homem: nada de humano me é estranho.” (SILVA, 2012, p. 12). Públio Terêncio Afro (185 a.C. – 159 a.C.), dramaturgo e poeta romano que, com esta frase tão simples, mas também profunda, resumiu toda a capacidade que temos de evoluir e fazer, possivelmente melhor, o que foi, o que é e o que ainda será feito por alguém.

RESUMO

As empresas de telecomunicações conseguem monetizar e dispor da multilocação, clientes específicos e casos de uso por meio do *network slicing*, atendendo, de forma automatizada, aos Acordos de Níveis de Serviços exclusivos de cada fatia ou *slice* fim a fim. Adiante, vislumbra-se um ambiente com vários fornecedores e redução das barreiras à adoção de redes públicas e privadas de comunicação baseadas nos padrões de tecnologias de redes móveis 5G. Então, a implementação de redes baseadas em Rede de Acesso ao Rádio Aberta (*Open RAN*) com Orquestração dos Serviços de Rede constitui-se num caminho evolutivo da funcionalidade de acesso ao rádio para segmentos de transporte e núcleo com escalabilidade e automação nativos da nuvem. Isso trará novos atores e integradores de sistemas capazes de estender e criar soluções federadas, flexíveis e resilientes. Todavia, é necessário ter uma arquitetura hierárquica e distribuída que integre diferentes orquestradores dinâmicos, multiprovedores, atuando em cada segmento da rede e proporcionando *handover* horizontal para processar o *network slicing* sob a infraestrutura de telecomunicações existente em um ecossistema aberto e confiável. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é conceber o 5G-Transversal, um *framework* conceitual para orquestração dos serviços de redes móveis com garantia da qualidade de serviços e, conseqüentemente, da continuidade dos serviços fim a fim, atuando em redes 5G e gerações futuras em domínios heterogêneos. Os métodos empregados partiram do levantamento de requisitos, seguindo pela avaliação de modelos de orquestração similares da literatura, pelo projeto e descrição do 5G-Transversal até sua verificação, culminando na proposta de solução. Como resultados principais, obtiveram-se o metamodelo do 5G-Transversal verificado em um estudo de caso de uso médico hipotético, porém plausível ao atendimento ultraconectado de urgência, acompanhado da proposição inicial de um modelo de negócios inovador. O usuário final terá uma relação direta exclusivamente com um Prestador de Serviços de Conectividade, que será responsável pela interface com diferentes empresas de telecomunicações através de uma entidade orquestradora. Portanto, o 5G-Transversal propõe contribuições às ações regulatórias, à evolução científica e tecnológica das redes 5G e gerações futuras, oferecendo a possibilidade de impactos econômico e social com a quebra de paradigma para o mercado de telecomunicações com foco no usuário final.

Palavras-chave: 5G. 6G. Computação em nuvem distribuída. Rede de gestão de telecomunicações. *Softwarização* de rede.

ABSTRACT

Telecommunications companies can monetize and deploy multi-tenancy, specific customers, and use cases through network slicing by automatically meeting unique Service Level Agreements of each slice end-to-end. Ahead, a multi-vendor environment and lower barriers to the public and private communication networks based on the 5G mobile network technologies standards will occur. Hence, deploying networks based on Open Radio Access Network with the Network Service Orchestration constitutes an evolutionary path from radio access functionality to the transport and core segments with cloud-native scalability and automation. It will bring new players and systems integrators able to extend and create federated, flexible, and resilient solutions. However, it is necessary to have a hierarchical and distributed architecture that integrates different dynamic and multi-provider orchestrators, acting in each network segment and providing horizontal handover to process network slicing under the existing telecommunications infrastructure in an open and reliable ecosystem. In this sense, this work aims to conceive 5G-Transversal, a conceptual framework for orchestrating mobile network services with guaranteed quality of service and, consequently, the continuity of end-to-end services operating in 5G and future generation networks at heterogeneous domains. The methods used started from the requirements survey, followed by the evaluation of similar orchestration models in the literature, from the design and description of the 5G Transversal to its verification, culminating in the solution proposal. As the main results, the 5G-Transversal metamodel verified in a hypothetical medical use case study but plausible for ultra-connected emergency care, accompanied by the initial proposition of an innovative business model. The end-user will have a direct and exclusive relationship with a Connectivity Service Provider responsible for interfacing with different telecommunications companies through an orchestrating entity. Therefore, 5G-Transversal proposes contributions to regulatory actions to the scientific and technological evolution of 5G and future communication systems, offering the possibility of generating economic and social impacts with a paradigm shift for the telecommunication market focused on the end-user.

Keywords: 5G. 6G. Distributed cloud computing. Network softwarization. Telecommunications management network.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1 – Projeção do tráfego global de dados em redes móveis | 27 |
| Figura 2 – Requisitos das redes 5G e 6G | 36 |
| Figura 3 – Evolução dos principais cenários do 5G ao 6G | 37 |
| Figura 4 – Arquitetura geral da rede 5G | 39 |
| Figura 5 – Evolução das <i>releases</i> propostas pelo 3GPP ao longo do tempo | 46 |
| Figura 6 – Visão geral do <i>network slicing</i> E2E em redes 5G | 50 |
| Figura 7 – Processo de construção do <i>network slicing</i> em redes 5G | 51 |
| Figura 8 – Estrutura de arquitetura para NFV-MANO..... | 54 |
| Figura 9 – Orquestração federada dos serviços de rede..... | 57 |
| Figura 10 – Arquitetura lógica de O-RAN | 67 |
| Figura 11 – Evolução da função de rede física à nuvem de rede | 72 |
| Figura 12 – Arquitetura geral do 5G-Transversal | 87 |
| Figura 13 – Grafo em árvore dos Orquestradores no 5G-Transversal..... | 92 |
| Figura 14 – Diagrama das classes de entrada e saída do 5G-Transversal | 93 |
| Figura 15 – <i>Framework</i> proposto: metamodelo de mapeamento dos Orquestradores do 5G-Transversal | 96 |
| Figura 16 – Arquitetura proposta dos Orquestradores M e D | 100 |
| Figura 17 – Funcionamento dos planos de comando dos Orquestradores M e D .. | 105 |
| Figura 18 – Sequência de modificação dos <i>slices</i> realizados pelos Orquestradores M e D..... | 108 |
| Figura 19 – Processo de <i>network slicing</i> no 5G-Transversal..... | 111 |
| Figura 20 – Modelo de negócios proposto em serviços..... | 114 |
| Figura 21 – Cenário do Serviço de Atendimento Ultraconectado Móvel de Urgência..... | 118 |
| Figura 22 – Processo de interação entre os Orquestradores do 5G-Transversal ... | 120 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Requisitos não funcionais mínimos do IMT-2020 | 35 |
| Tabela 2 – Abordagem dos trabalhos de padronização para a orquestração dos serviços de rede..... | 48 |
| Tabela 3 – Comparação de <i>slices</i> em redes 4G e 5G | 53 |
| Tabela 4 – Escopos de trabalhos de projetos de pesquisas em orquestração de redes móveis..... | 60 |
| Tabela 5 – Comparação qualitativa de características e recursos dos principais trabalhos em orquestração hierárquica | 62 |
| Tabela 6 – Exemplos de parametrização dos sub-requisitos não funcionais suportados pelo 5G-Transversal | 84 |
| Tabela 7 – Lacunas apresentadas pelos principais trabalhos em orquestração hierárquica | 85 |
| Tabela 8 – Publicações dos trabalhos científicos decorrentes desta tese de doutorado..... | 169 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|--|
| 3GPP | 3 rd Generation Partnership Project |
| 4G | Quarta Geração de Redes Móveis |
| 5G | Quinta Geração de Redes Móveis |
| 5GC | 5G <i>Core</i> |
| 5GMF | Fifth Generation Mobile Communications Promotion Forum |
| 5G-PPP | 5G Infrastructure Public Private Partnership |
| 5G-Tvs | 5G-Transversal |
| 6G | Sexta Geração de Redes Móveis |
| ACK | <i>ACKnowledgement</i> |
| AI | <i>Artificial Intelligence</i> |
| AMF | <i>Access and Mobility Management Function</i> |
| API | <i>Application Programming Interface</i> |
| AR | <i>Augmented Reality</i> |
| AUSF | <i>Authentication Server Function</i> |
| B5G | <i>Beyond 5G</i> |
| BD | <i>Big Data</i> |
| BSS | <i>Business Support Systems</i> |
| CaaS | <i>Container-as-a-service</i> |
| CAPEX | <i>CAPital EXpenditures</i> |
| CCM | <i>Container Infrastructure Service Cluster Management</i> |
| CI/CD | <i>Continuous Integration/Continuous Delivery</i> |
| CIR | <i>Container Image Registry</i> |
| CIS | <i>Container Infrastructure Service</i> |
| CISM | <i>Container Infrastructure Service Management</i> |
| CNCF | Cloud Native Computing Foundation |
| CNF | <i>Cloud-Native Network Functions</i> |
| CP | <i>Control Plane</i> |
| CPU | <i>Central Processing Unit</i> |
| CSMF | <i>Communication Service Management Function</i> |

| | |
|--------------|--|
| CUPS | <i>Control and User Plane Separation</i> |
| DC | <i>DataCenter</i> |
| DCN | <i>DataCenter Network</i> |
| E2E | <i>End-to-End</i> |
| EGMF | <i>Exposure Governance Management Function</i> |
| EM | <i>Element Manager</i> |
| eMBB | <i>enhanced Mobile Broadband</i> |
| ESG | <i>Environmental, Social and Governance</i> |
| eSIM | <i>embedded Subscriber Identity Module</i> |
| ETSI | European Telecommunications Standards Institute |
| FH | <i>Fronthaul</i> |
| FWA | <i>Fixed Wireless Access</i> |
| gNB | <i>next generation Node B</i> |
| GPU | <i>Graphics Processing Unit</i> |
| HAPS | <i>High Altitude Platform System</i> |
| HW | Hardware |
| IA | Inteligência Artificial |
| ICT | <i>Information and Communication Technology</i> |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IETF | Internet Engineering Task Force |
| IIoT | <i>Industrial Internet of Things</i> |
| IMT-2000 | <i>International Mobile Telecommunications-2000 (3G)</i> |
| IMT-2020 | <i>International Mobile Telecommunications-2020 (5G)</i> |
| IMT-2030 | <i>International Mobile Telecommunications-2030 (6G)</i> |
| IMT-Advanced | <i>International Mobile Telecommunications-Advanced (4G)</i> |
| IoT | <i>Internet of Things</i> |
| IP | <i>Internet Protocol</i> |
| ISG | <i>Industry Specification Group</i> |
| iSIM | <i>integrated Subscriber Identity Module</i> |
| ITU | International Telecommunication Union |
| ITU-R | ITU Radiocommunication Sector |

| | |
|------------|--|
| ITU-T | ITU Telecommunication Standardization Sector |
| JSON | <i>JavaScript Object Notation</i> |
| KPI | <i>Key Performance Indicator</i> |
| LTE EPC | <i>Long Term Evolution Evolved Packet Core</i> |
| LSO | <i>Lifecycle Service Orchestration</i> |
| MANO | <i>Management ANd Orchestration</i> |
| MDAF | <i>Management Data Analytics Function</i> |
| MEC | <i>Multi-access Edge Computing</i> |
| MEF | Metro-Ethernet Forum |
| MGMT | Gerenciamento |
| ML | <i>Machine Learning</i> |
| MLOps | <i>Machine Learning Operations</i> |
| mMTC | <i>massive Machine Type Communications</i> |
| MRF | <i>Media Resource Function</i> |
| Multi-IMSI | <i>Multiple International Mobile Subscriber Identities</i> |
| NaaS | <i>Network as a Service</i> |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NEF | <i>Network Exposure Function</i> |
| NFV | <i>Network Function Virtualization</i> |
| NFVI | <i>Network Function Virtualization Infrastructure</i> |
| NFVO | <i>Network Function Virtualization Orchestrator</i> |
| NGMN | Next Generation Mobile Networks |
| NPN | <i>Non-Public Network</i> |
| NR | <i>5G New Radio</i> |
| NRF | <i>Network Repository Function</i> |
| NSA | <i>5G Non-Standalone</i> |
| NSaaS | <i>Network Slice as a Service</i> |
| NSI | <i>Network Slice Instance</i> |
| NSMF | <i>Network Slice Management Function</i> |
| NSO | <i>Network Service Orchestration</i> |
| NSS | <i>Network Slice Subnet</i> |

| | |
|------------------|---|
| NSSF | <i>Network Slice Selection Function</i> |
| NSSI | <i>Network Slice Subnet Instance</i> |
| NSSMF | <i>Network Slice Subnet Management Function</i> |
| NTN | <i>Non-Terrestrial Network</i> |
| NWDAF | <i>Network Data Analytics Function</i> |
| OASIS | Organization for the Advancement of Structured Information Standard |
| O-C p | Orquestrador Intra-regional de <i>Core</i> primário |
| O-C s | Orquestrador Intra-regional de <i>Core</i> secundário |
| O-CU | <i>O-RAN Central Unit</i> |
| O-DU | <i>O-RAN Distributed Unit</i> |
| O-eNB | <i>O-RAN evolved Node B</i> |
| ONF | Open Network Foundation |
| OPEX | <i>Operational EXpenditure</i> |
| O-R p | Orquestrador Intra-regional de RAN primário |
| O-R s | Orquestrador Intra-regional de RAN secundário |
| O-RAN | <i>Open Radio Access Network</i> |
| Orquestrador-D | Orquestrador Intra-regional Multidomínio |
| Orquestrador-D p | Orquestrador Intra-regional Multidomínio primário |
| Orquestrador-D s | Orquestrador Intra-regional Multidomínio secundário |
| Orquestrador-M | Metaorquestrador dos Serviços de Rede |
| Orquestrador-M p | Metaorquestrador Inter-regional dos Serviços de Rede primário |
| Orquestrador-M s | Metaorquestrador Inter-regional dos Serviços de Rede secundário |
| O-RU | <i>O-RAN Radio Unit</i> |
| OS | <i>Operating System</i> |
| OSS | <i>Operational Support System</i> |
| O-T p | Orquestrador Intra-regional de Transporte primário |
| O-T s | Orquestrador Intra-regional de Transporte secundário |
| OTT | <i>Over-The-Top</i> |
| PCF | <i>Policy Control Function</i> |

| | |
|---------|--|
| PLMN | <i>Public Land Mobile Network</i> |
| PNF | <i>Physical Network Function</i> |
| PNI-NPN | <i>Public Network Integrated to Non-Public Network</i> |
| PoC | <i>Proof of Concept</i> |
| PRF | <i>Physical Radio Function</i> |
| QoE | <i>Quality of Experience</i> |
| QoS | <i>Quality of Service</i> |
| RAN | <i>Radio Access Network</i> |
| RedCap | <i>Reduced Capability</i> |
| REST | <i>REpresentational State Transfer</i> |
| RIC | <i>RAN Intelligent Controller</i> |
| SA | <i>5G Standalone</i> |
| SAUMU | <i>Serviço de Atendimento Ultraconectado Móvel de Urgência</i> |
| SBA | <i>Service Based Architecture</i> |
| SBI | <i>Service Based Interface</i> |
| SBMA | <i>Service Based Management Architecture</i> |
| SCF | <i>Small Cell Forum</i> |
| SDI | <i>Software-Defined Infrastructure</i> |
| SDN | <i>Software-Defined Networking</i> |
| SDR | <i>Software-Defined Radio</i> |
| SEAL | <i>Service Enabler Architecture Layer</i> |
| SFC | <i>Service Function Chaining</i> |
| SLA | <i>Service Level Agreement</i> |
| SMF | <i>Session Management Function</i> |
| SMO | <i>Service Management and Orchestration</i> |
| SNPN | <i>Standalone Non-Public Network</i> |
| SW | <i>Software</i> |
| Telco | <i>Telecommunications company</i> |
| TIP | <i>Telecom Infra Project</i> |
| TMN | <i>Telecommunications Management Network</i> |
| TN | <i>Transport Network</i> |

| | |
|-------|--|
| TOSCA | <i>Topology and Orchestration Specification for Cloud Applications</i> |
| TR | Tempo Real |
| TRL | <i>Technology Readiness Level</i> |
| TSG | <i>Technical Specification Group</i> |
| TSN | <i>Time-Sensitive Networking</i> |
| TX | Transmissão |
| UDM | <i>Unified Data Management</i> |
| UHD | <i>Ultra High Definition</i> |
| UICC | <i>Universal Integrated Circuit Card</i> |
| UP | <i>User Plane</i> |
| UPF | <i>User Plane Function</i> |
| uRLLC | <i>ultra Reliable Low Latency Communications</i> |
| V2I | <i>Vehicle-to-Infrastructure</i> |
| V2V | <i>Vehicle-to-Vehicle</i> |
| V2X | <i>Vehicle-to-everything</i> |
| VIM | <i>Virtualized Infrastructure Manager</i> |
| VM | <i>Virtual Machine</i> |
| VMM | <i>Virtual Machine Monitor</i> |
| VNF | <i>Virtual Network Function</i> |
| VNFC | <i>Virtualized Network Function Component</i> |
| VNFM | <i>Virtual Network Function Manager</i> |
| VR | <i>Virtual Reality</i> |
| vRAN | <i>virtual RAN</i> |
| VRF | <i>Virtual Radio Function</i> |
| WAN | <i>Wide Area Network</i> |
| WGS84 | <i>World Geodetic System 1984</i> |
| WIM | <i>Wide area network Infrastructure Manager</i> |
| XR | <i>EXtended Reality</i> |
| YAML | <i>YAML Ain't Markup Language</i> |
| YANG | <i>Yet Another Next Generation</i> |
| ZOOM | <i>Zero-touch Orchestration, Operations and Management</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----|--|
| m | Número total de domínios administrativos no 5G-Transversal |
| r | Raio de delimitação de uma região no 5G-Transversal |
| t | Tempo para atualização dos componentes do 5G-Transversal |
| x | Número a partir do qual ocorre a sobrecarga dos componentes do 5G-Transversal |
| y | Número de regiões distintas orquestradas pelo Orquestrador-M no 5G-Transversal |
| Z | Número total de regiões no 5G-Transversal |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 21 |
| 1.1 | ENUNCIADO DO PROBLEMA..... | 21 |
| 1.2 | OBJETIVOS..... | 24 |
| 1.2.1 | Objetivos..... | 24 |
| 1.2.2 | Questões de pesquisa | 24 |
| 1.2.3 | Escopo do trabalho | 25 |
| 1.3 | MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA | 25 |
| 1.3.1 | Desafios científicos, tecnológicos e de inovação | 26 |
| 1.3.2 | Desafios de sustentabilidade | 29 |
| 1.4 | MÉTODOS..... | 30 |
| 1.5 | ESTRUTURA DO DOCUMENTO..... | 31 |
| 2 | ESTADO DA ARTE DAS REDES MÓVEIS EMERGENTES | 32 |
| 2.1 | DESCRIÇÃO GERAL..... | 32 |
| 2.2 | REQUISITOS DO 5G..... | 34 |
| 2.3 | ARQUITETURA GERAL DO 5G | 38 |
| 2.4 | DESENVOLVIMENTO DA PADRONIZAÇÃO | 43 |
| 2.5 | CONTEXTUALIZAÇÃO DO ORQUESTRADOR DENTRO DA ARQUITETURA GERAL DO 5G | 48 |
| 2.6 | DESENVOLVIMENTOS EM ANDAMENTO | 58 |
| 2.7 | DESAFIOS E ASPECTOS EVOLUCIONÁRIOS | 63 |
| 2.7.1 | 5G versus Wi-Fi | 63 |
| 2.7.2 | Open RAN | 64 |
| 2.7.3 | Do 5G <i>Non-Standalone</i> ao <i>Standalone</i> | 69 |
| 2.7.4 | <i>Network slicing</i> e a nuvem de rede | 70 |
| 2.7.5 | Desafios operacionais..... | 73 |
| 2.7.6 | 5G otimizado..... | 74 |
| 2.7.7 | Do 5G ao 6G..... | 76 |
| 3 | CONCEPÇÃO DO <i>FRAMEWORK</i> PARA ORQUESTRAÇÃO | 78 |
| 3.1 | LEVANTAMENTO DE REQUISITOS | 79 |

| | |
|---|-----|
| 3.2 AVALIAÇÃO DE MODELOS DE ORQUESTRAÇÃO SIMILARES DA LITERATURA..... | 84 |
| 3.3 PROJETO E DESCRIÇÃO DO <i>FRAMEWORK</i> PROPOSTO | 86 |
| 3.3.1 Identificação dos componentes e elaboração do grafo em árvore..... | 90 |
| 3.3.2 Diagrama de classes do 5G-Transversal | 93 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 94 |
| 4.1 MAPEAMENTO DOS ORQUESTRADORES EM UM METAMODELO | 94 |
| 4.2 PROPOSIÇÃO DAS ARQUITETURAS DOS ORQUESTRADORES FEDERADOS..... | 99 |
| 4.2.1 Plano de comando dos serviços | 101 |
| 4.2.2 Plano de orquestração E2E | 102 |
| 4.2.3 Plano de execução do <i>network slicing</i> lógico | 103 |
| 4.3 PROCESSOS DA SOLUÇÃO DE ORQUESTRAÇÃO | 104 |
| 4.3.1 Processo de configuração dos <i>slices</i> | 104 |
| 4.3.2 Processo de modificação dos <i>slices</i> | 107 |
| 4.3.3 Processo de delegação das tarefas de orquestração federada..... | 109 |
| 4.3.4 Garantindo a disponibilidade do sistema..... | 112 |
| 4.4 PROPOSIÇÃO DE UM NOVO MODELO DE NEGÓCIOS | 113 |
| 4.5 VERIFICAÇÃO DO PROJETO..... | 117 |
| 4.5.1 Estudo de Caso: Serviço de Atendimento Ultraconectado Móvel de Urgência | 117 |
| 4.6 ASPECTOS CONTRIBUTOS..... | 124 |
| 4.6.1 Avanço no estado da arte | 124 |
| 4.6.2 Progresso social e econômico | 125 |
| 5 CONCLUSÕES | 127 |
| 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 127 |
| 5.2 CONTRIBUIÇÕES | 129 |
| 5.3 CUMPRIMENTO DA PESQUISA..... | 130 |
| 5.4 PERSPECTIVAS DE CONTINUIDADE E TRABALHOS FUTUROS | 130 |
| 5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 133 |
| REFERÊNCIAS..... | 136 |
| APÊNDICE – Publicações realizadas | 169 |

1 INTRODUÇÃO

Nesta seção, constam descritos: o enunciado do problema de pesquisa proposto, os objetivos e respectivas questões de pesquisa, o escopo abordado, a motivação e justificativa, os métodos adotados, assim como a estrutura deste documento.

1.1 ENUNCIADO DO PROBLEMA

A proposta da *International Mobile Telecommunications-2020* (IMT-2020) pela União Internacional de Telecomunicações (International Telecommunication Union — ITU), mais conhecida como redes 5G (Quinta Geração de Redes Móveis), trata-se de um tema de importância e abrangência mundial. Será aplicável em diferentes casos de uso, haja vista a necessidade cada vez maior de altas velocidades e menores tempos de resposta das aplicações (KAGAN, 2023; PARVEZ et al., 2018; TANG et al., 2021).

Por possibilitar, quando necessário, melhorias significativas quanto às taxas de transferência dados (em Gbps), baixa latência (ordem de milissegundos) e alta confiabilidade — 99,9999 % (ITU-R, 2022), o 5G tem potencial a impulsionar a adoção rápida e massiva de soluções de Internet das Coisas (*Internet of Things* — IoT).

Como a rede 5G vem sendo projetada para ser flexível, ela deve proporcionar serviços de Internet eficientes e viáveis, mesmo em locais onde a tecnologia atual não pode alcançar. Estima-se que as receitas cumulativas propiciadas pelo 5G entre os anos de 2020 e 2030 serão de US\$ 31 trilhões (ERICSSON, 2020b).

Assim, há oportunidade de integrar o estado da arte em telecomunicações com o conceito emergente de novos modelos de negócios, seja em redes públicas ou privadas (CISCO, 2019; CROUCH; LAIDLER; OSBORNE, 2023).

Todavia, não se pode discutir o 5G apenas sob o ponto de vista de telecomunicações, pois a computação tem papel fundamental e decisivo sobre o seu comportamento e desempenho (AMDOCS, 2022; ANRITSU, 2022; BATISTA JR et al., 2021; NENCIONI et al., 2018). Neste sentido, a filosofia adotada na padronização do

5G prevê o uso de tecnologias para a “softwarização” da rede, que, por sua vez, permite a segregação da rede através de seu fatiamento (*network slicing*), baseado em virtualização e software — SW (CAI et al., 2023; HILSON, 2023).

O *network slicing* é um atributo complexo, mas prevalente e fundamental nas redes 5G e gerações futuras (*Beyond 5G — B5G*), cujas especificações exigem a partição dos planos de dados, controle e gerenciamento para separar os ambientes que serão criados.

Através do *network slicing*, pode-se atender aos requisitos de desempenho, confiabilidade, eficiência energética etc. exigidos pelas aplicações nas diversas verticais das atividades econômicas atuais e emergentes, pois se consegue alcançar a programação e a modularidade no provisionamento de recursos de rede em relação a uma vertical¹ de serviços específica (MENA et al., 2020).

A complexidade do *network slicing* aumenta à medida em que as fatias de rede, *network slices* ou, simplesmente, *slices* têm de ser implementados simultaneamente para atender uma única determinada aplicação (WOOD, 2022).

No 5G, os recursos como comunicação, computação e armazenamento em *cache*, distribuir-se-ão pela rede. A coordenação destes recursos é essencial para a sua utilização efetiva no tratamento do alto volume de dados distribuídos (KAUR et al., 2018). Para viabilizar o *network slicing*, faz-se então necessário orquestrar os recursos e o gerenciamento programável (CHIRIVELLA-PEREZ et al., 2018; KSENTINI; FRANGOUDIS, 2020; WU et al., 2022).

Partindo da concepção de Rostami et al. (2017), impulsionado pelo aumento do tráfego massivo de dados sem fio de diferentes cenários de aplicação, esquemas eficientes de alocação de recursos devem ser explorados para melhorar a flexibilidade e capacidade do 5G com base no *network slicing*.

Além disso, os *slices* podem até mesmo se estender por áreas geográficas maiores ou abranger áreas onde a cobertura só pode ser garantida pela combinação de recursos de diferentes empresas de telecomunicações (Telcos). Tal implantação de *network slicing* requer uma combinação eficiente de recursos federados (fim a fim

¹ Uma vertical descreve serviços de rede específicos para clientes com requisitos semelhantes — por exemplo, uma vertical industrial, de saúde ou de agronegócio (WALIA et al., 2019).

ou *End-to-End* — E2E) em mais de um domínio² administrativo (MANSO et al., 2021; TALEB et al., 2019).

Portanto, definir uma solução federada que integre diferentes orquestradores dos serviços de rede rumo à futura implementação, de modo a garantir a entrega dos serviços, é um tema que vem sendo pesquisado (AFOLABI et al., 2020; BADMUS et al., 2021; CHEN et al., 2019; CHOI, 2022; CHOI; CHUN; LEE, 2022; ESMAEILY; KRALEVSKA; GLIGOROSKI, 2020; HADIWARDYOY et al., 2021; HAGA, 2020; HORTIGÜELA, 2021; KAR; WU; LIN, 2020; KUKLIŃSKI et al., 2021; LI et al., 2021; PAVÓN et al., 2022; SÁNCHEZ et al., 2020; SANTOS et al., 2020; ZHAO; HE, 2022).

Há também a necessidade de assegurar a qualidade dos serviços prestados em novos modelos de negócios que atendam às demandas dos usuários, de acordo com os requisitos das aplicações utilizadas por eles (JUNIPER NETWORKS, 2022; SERVICENOW, 2023). Isto implicará uma quebra de paradigma para o mercado de telecomunicações, cujo foco serão os usuários, e não mais os produtos (SAKURAI, 2010; SERRA, 2007).

Mais ainda, a expansão da conectividade produz o desafio de implantar e operar redes que priorizem tanto o desempenho quanto a redução do consumo de energia (ETSI, 2023b; GILLMAN, 2023; KESHISHYAN, 2023). A questão da sustentabilidade ambiental ou, simplesmente, sustentabilidade, torna-se importante para que haja um comprometimento de desempenho ambiental, social e de governança (*Environmental, Social and Governance* — ESG) pelo mercado de telecomunicações, resultando em avaliações mais positivas para quem tiver melhores metas e reduções de consumo energético (FELLENBAUM; TAYLOR; CREANER, 2022; MORRISH; DHINGRA, 2022; SANTHANAM; MISHRA, 2023; TAAFFE, 2022).

² Domínio, a partir da definição de Afolabi et al. (2017) apud Badmus (2019), é uma topologia de recursos e dispositivos de rede que são coordenados e administrados como uma única unidade com regras e procedimentos comuns sob um único administrador.

1.2 OBJETIVOS

Além da descrição dos objetivos, são também apresentados, nesta seção, as questões de pesquisa e o escopo desta tese³ de doutorado.

1.2.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor um *framework* (ou abordagem ao funcionamento dos sistemas 5G/B5G) conceitual para orquestração dos serviços de redes móveis com garantia da qualidade de serviço (*Quality of Service* — QoS) e, conseqüentemente, da continuidade dos serviços E2E, o qual é denominado de 5G-Transversal (5G-Tvs), atuando em redes 5G e B5G e domínios heterogêneos.

Secundariamente, o 5G-Tvs contém uma abordagem inicial quanto à proposta de um modelo de negócios, a fim de contribuir com ações regulatórias para o quesito de continuidade dos serviços E2E. Considera-se as diversas demandas que serão suportadas pela rede, largura de bandas disponíveis, aspectos econômicos e regulatórios envolvidos, e a experiência do usuário.

1.2.2 Questões de pesquisa

Como suportar a orquestração dinâmica e horizontal (multidomínios administrativos), fora de um ambiente controlado em laboratório, dos serviços de uma rede 5G ou B5G, atendendo aos requisitos dos serviços, às respectivas aplicações e à relação custo vs. benefício no *network slicing* E2E?

A questão de pesquisa secundária é: Como poderá ser implementado um novo modelo de prestação de serviços E2E de redes 5G e B5G, de forma a garantir a continuidade dos serviços?

³ “Trabalho de pesquisa original, de cunho acadêmico, cujo conteúdo deve ser apresentado e defendido publicamente, no final dos cursos de pós-graduação” (MICHAELIS, 2023); “Trabalho escrito que um aluno deve elaborar, apresentar e defender perante um júri para a obtenção de um grau acadêmico, em geral de doutor” (PRIBERAM, 2023).

1.2.3 Escopo do trabalho

Este trabalho focará o problema e objetivos ora apresentados, considerando a motivação e a justificativa descritas a seguir, bem como o projeto de uma solução de orquestração dos serviços de rede (*Network Service Orchestration* — NSO) que atenda à execução do *network slicing* E2E sobre um ou mais domínios administrativos distintos e garantindo o cumprimento de QoS E2E.

Trabalhar-se-ão as demandas suportadas pela rede 5G/B5G a partir dos resultados apresentados na [Seção 3.1](#) (Levantamento de requisitos).

Não faz parte do escopo desta pesquisa trabalhar as redes 5G no que diz respeito às suas características de telecomunicações, tais como potência das antenas, atenuações, relações de sinal/ruído etc., uma vez que isso não seria aplicável ao contexto de orquestração computacional das redes.

1.3 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Este trabalho é motivado a partir das propostas elaboradas por:

- [Serra \(2007\)](#), que entrega um método para o levantamento de parâmetros de QoS para o cumprimento de Acordos de Níveis de Serviço (*Service Level Agreements* — SLAs) entre os provedores de serviços e o Usuários Finais para serviços móveis e interativos com conteúdo multimídia em um ambiente de convergência tecnológica;
- [Sakurai \(2010\)](#), que estabelece um modelo de negócios para o ambiente de telecomunicações, atendendo plenamente o Usuário Final⁴, conforme QoS acordada, sob uma arquitetura “aberta”, viabilizando as características do modelo de negócios estabelecido e integrando transparentemente os provedores de serviços, conteúdo, infraestrutura e acesso.

⁴ Usuário Final representa a pessoa ou entidade que receberá o serviço de conectividade móvel (humano ou não). Assim, os Usuários Finais são os clientes finais dentro de um determinado inquilino que consome os serviços. Por exemplo, numa vertical 5G industrial, os robôs conectados são os Usuários Finais e recebem os serviços de comunicação por um *slice*.

Este trabalho é motivado também pela própria filosofia adotada para implementar a arquitetura do 5G (5G-PPP, 2021; DOGRA; JHA; JAIN, 2020), a qual permite uma mudança na contratação de serviços digitais pelo Usuário Final. Nesse sentido, faz sentido a função de um Orquestrador para automatizar o oferecimento do serviço, com garantias de QoS e qualidade de experiência (*Quality of Experience* — QoE) ao Usuário Final em redes 5G e B5G.

Mais ainda, o 5G-Tvs justifica-se, dentre outros, à medida em que os trabalhos de: (i) Serra (2007) aponta a necessidade da proposta de uma arquitetura genérica e “aberta” de controle de QoS para ambientes convergentes e heterogêneos, sob cada domínio administrativo que compõe tais ambientes, com alocação e utilização dos recursos disponíveis para um melhor aproveitamento das infraestruturas disponíveis; e (ii) Sakurai (2010) abre um caminho evolutivo para os *handovers* vertical e horizontal (multidomínio), da mesma forma que ao conector entre os provedores de serviços, conteúdo, infraestrutura e acesso.

1.3.1 Desafios científicos, tecnológicos e de inovação

A transformação digital, visando a, por exemplo, soluções para cidades e saúde inteligentes, assim como a evolução da Internet e o Metaverso, Internet espacial persistente com experiências digitais personalizadas que abrangem os mundos físico, digital e virtual, trazem a necessidade de novas tecnologias e padrões que suportem o aumento das taxas de dados de acesso à Internet, inclusive sob a realidade estendida (*EXtended Reality* — XR) (PLUMB, 2023; QUALCOMM, 2022).

Excluindo-se o tráfego gerado pelo acesso fixo sem fio (*Fixed Wireless Access* — FWA⁵), o tráfego total global de dados em redes móveis está estimado para crescer e atingir 325 EB por mês em 2028. Incluindo o FWA, esse número sobe para 453 EB mensais até o final de 2028, como ilustra a Figura 1. Isso se deve a novas aplicações e novos serviços que estão surgindo e que ainda surgirão (ERICSSON, 2022b; ERICSSON, 2023a).

⁵ O FWA permite o fornecimento de banda larga sem fio usando *links* de rádio entre uma torre de celular e a residência do Usuário Final em áreas com infraestrutura de telecomunicações limitada, onde o cabeamento fixo de fibra é, por alguma razão, impraticável de se executar.

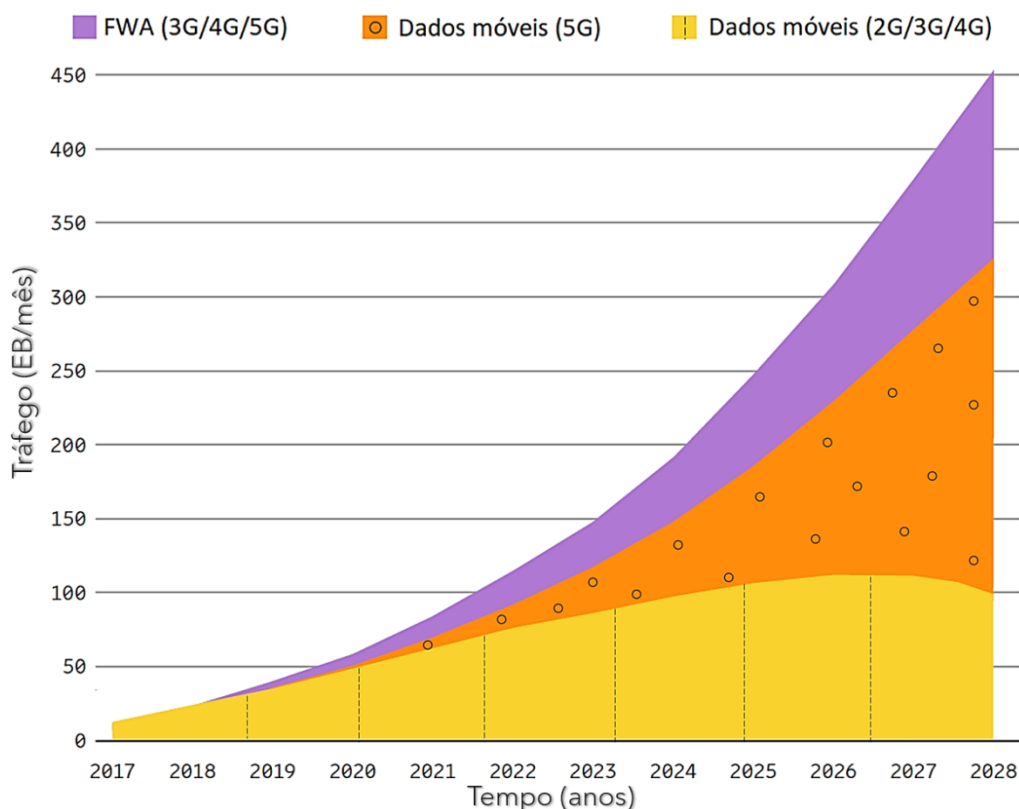


Figura 1 – Projeção do tráfego global de dados em redes móveis

Fonte: adaptada de [Ericsson \(2022b\)](#).

Para que possam, efetivamente, suportar o aumento de tráfego estimado, as redes 5G e B5G necessitarão de automatização e autonomia ([ARTIGIANI et al., 2023](#); [AVIDTHINK, 2023](#)). Isso exige uma combinação coerente de inteligência com controle e supervisão humana, processos operacionais automatizados controlados por SW e infraestrutura programável subjacente ([BATISTA JR et al., 2021](#); [KAUR et al., 2018](#); [PAOLINI, 2023](#); [RED HAT, 2023](#)).

A automação de rede é o processo de automatizar tarefas diárias da rede, como provisionamento, configuração, gerenciamento e implantação, para que essas tarefas ocorram, por exemplo, mais rapidamente e com menores chances de erros se comparado ao processo manual ([JUNIPER NETWORKS, 2023](#); [MAVENIR, 2023](#); [MISHRA, 2023](#); [NEC, 2023](#)). O uso de SW de automação baseado em interfaces de programação de aplicativos (*Application Programming Interfaces — APIs*) é um método eficiente para provisionar redes ([ANDERSON, 2020](#); [BLACKMAN, 2023a](#); [HPE](#); [INTEL, 2020](#)).

Entretanto, uma rede autônoma deve ir além dos recursos de automação para que seja auto-operada, incorporando Inteligência Artificial (IA). Essa rede é caracterizada pela agilidade, adaptabilidade e segurança com uma abordagem definida por SW (GLASS; NIEMÖLLER; MCDONNELL, 2023; RAMSAY, 2022; TM FORUM, 2022a; TRIPATHY, 2022).

As redes 5G e B5G, portanto, usarão recursos de aprendizagem de máquina (*Machine Learning* — ML) e otimização para se adaptarem dinamicamente às demandas de serviço e aos padrões de tráfego. Dessa forma, o controle por SW, que consiste na base das operações adaptativas, possibilitará a criação e a implantação dos serviços automatizados em redes autônomas sob as necessidades e velocidades programadas (KAUR et al., 2018; NIN, 2023; OLIMPIO; CUGNASCA; MARTUCCI, 2018).

Outrossim, espera-se que essas redes possam se adaptar, autoconfigurar, automonitorar, autorreparar e auto-otimizar por meio de avaliação constante das mudanças na própria rede e de realocação automática de recursos (SANDANO, 2018).

Em se considerando os desempenhos de redes 5G e B5G, a vasta quantidade de novas tecnologias introduzidas simultaneamente apresenta um desafio de pesquisa sobre tais tecnologias interligadas em implementações reais. Isso porque a combinação de novas frequências, formatos e códigos de camada física, computação em nuvem distribuída e funções de rede virtualizadas podem criar uma cadeia complexa de possíveis interações sobre essas redes (AMICE; LEGAULT, 2023).

O conceito de *network slicing* está intrinsecamente atrelado à “softwarização” de rede, ou seja, aos conceitos de Rede Definida por SW (*Software-Defined Networking* — SDN) e Virtualização das Funções de Rede (*Network Function Virtualization* — NFV), para fornecer redes virtuais flexíveis e dinâmicas (BATISTA JR et al., 2022; CAI et al., 2023; RAZA, 2018).

Baseado na evolução das implantações de redes 5G, as complicações aumentam devido à necessidade de reconfigurabilidade e agilidade. As redes 5G e B5G exigirão automação que possa suportar tecnologias de diversos domínios e fornecedores. Isso porque o *network slicing* atravessará vários segmentos de rede, como Rede de Acesso ao Rádio (*Radio Area Network* — RAN), transporte e núcleo

(core), que podem conter uma combinação de funções de rede virtual e física, tecnologias programáveis e não programáveis, cujo suporte tornar-se-á insustentável sem automação (JUNIPER NETWORKS, 2022; MUNALINGAL, 2020).

Evoluir cientificamente na “softwarização” de rede implica também ter padronização (CLIFT, 2023). Assim, em caráter de inovação, tem-se, por exemplo, a possibilidade do oferecimento da rede como um serviço (*Network as a Service* — NaaS), associada às tecnologias de virtualização da rede, tais como o SDN e NFV, como também tecnologias ML para o monitoramento e gerenciamento automático de alertas ou a detecção de ameaças.

Cabe ressaltar que o NaaS é uma abordagem que integra serviços de computação em nuvem com o acesso direto, porém seguro, do cliente para a infraestrutura de rede. Usando NaaS, o cliente pode implementar serviços avançados de rede, tais como a agregação em rede de dados e o *cache* inteligente (ANDERSON, 2020; BLUEPLANET, 2021; LENAHA; HAYSOM, 2020).

1.3.2 Desafios de sustentabilidade

A questão da sustentabilidade tem se tornado um tema preponderante para as Telcos e foi intensificada pela demanda sem precedentes por serviços digitais durante a pandemia de COVID-19⁶ (ETNO, 2023). A necessidade de maior largura de banda forçou as infraestruturas de telecomunicações a consumirem mais energia do que nunca, expandindo o consumo de carbono e o elevando a, aproximadamente, 2 % das emissões globais — semelhante à da indústria aérea (FELLENBAUM; TAYLOR; CREANER, 2022).

O consumo de energia normalmente representa de 20 a 40 % das despesas operacionais (*Operational Expenditure* — OPEX) das redes das Telcos e de 3,5 a 4 % de OPEX total das Telcos. Contudo, ao abordar suas próprias deficiências energéticas e permitir soluções sustentáveis em outras indústrias e modos de vida em geral, as Telcos têm o potencial de impactar até 15 % das emissões globais de carbono (FELLENBAUM; TAYLOR; CREANER, 2022).

⁶ COronaVirus Disease 2019 ou Doença do coronavírus 2019.

O setor de Tecnologia da Informação e Comunicação (*Information and Communication Technology* — ICT) é um facilitador para a redução nas emissões globais de efeito estufa, apoiando ações climáticas e a descarbonização de setores econômicos importantes, como produção, manufatura e transporte de energia (ERICSSON, 2022c; RCR WIRELESS NEWS; ERICSSON, 2023).

Portanto, segundo Nokia (2023b), o consumo de energia é uma das principais preocupações das Telcos, que o têm não apenas como parte de suas estratégias de transformação de rede, mas também de suas estratégias de ação climática. É por isso que muitas Telcos estão preocupadas com o fato de que a energia é a única grande despesa operacional de telecomunicações que deve aumentar nos próximos anos se nada for feito.

Dessa forma, através da automação inteligente e a consequente telemetria, o NSO poderá contribuir com os três principais elementos da abordagem descrita por Ericsson (2022c) para reduzir o consumo de energia das redes móveis, os quais são:

- evolução sustentável das redes com planejamento e iniciativas que permitam a sustentabilidade de suporte à operação em todos os segmentos de rede;
- expansão e modernização das redes, o que trará também reduções de OPEX;
- operação dos recursos de hardware (HW) sob algoritmos de ML para: (i) aumentar a utilização das baterias de íons de lítio, reduzindo a dependência da rede elétrica; (ii) maximizar o desempenho do tráfego; e (iii) ter soluções de monitoramento e ações preditivas que apliquem automaticamente medidas de economia de energia, tais como ativar a hibernação profunda com base nas tendências de utilização dos elementos de rede.

1.4 MÉTODOS

Este trabalho adota uma estratégia de engenharia e qualitativa (WAINER, 2007; WASLAWICK, 2020). Baseia-se, pois, no método científico, quanto aos seus aspectos de estudo dos assuntos necessários, criação de um meio de investigação, intitulação dos procedimentos, e análise dos resultados obtidos.

Os métodos de execução desta pesquisa seguem a abordagem *top-down*, uma maneira organizada de desenvolvimento de projetos de redes, com uma análise de cada camada da arquitetura 5G, iniciando-se com a camada de serviço, de onde vêm as demandas das aplicações, e terminando com a camada de infraestrutura, daí o termo *top-down*.

Também com base em métodos empregados por [Sakurai \(2010\)](#) e [Silveira \(2022\)](#), partiu-se do levantamento de requisitos, seguindo pela avaliação de modelos de orquestração similares da literatura, pelo projeto e descrição do *framework* proposto até sua verificação, culminando na proposta de solução, na análise discursiva, crítica e conclusiva sobre a consolidação dos resultados.

1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento encontra-se dividido em 5 (cinco) capítulos: este primeiro com a introdução do trabalho; o [Capítulo 2](#) apresenta o estado da arte das redes móveis emergentes; o [Capítulo 3](#) traz a concepção do *framework* proposto, 5G-Tvs, desde o levantamento de requisitos até a identificação dos seus componentes; o [Capítulo 4](#) segue com os resultados e discussão acerca deles, desde o mapeamento dos Orquestradores até a verificação do projeto; o [Capítulo 5](#) expõe as considerações de conclusões, contribuições, cumprimento da pesquisa e perspectivas de trabalhos futuros; na sequência, seguem as [Referências](#) utilizadas neste trabalho; por fim, as [publicações realizadas](#).

2 ESTADO DA ARTE DAS REDES MÓVEIS EMERGENTES

Neste capítulo, apresenta-se o estado da arte da IMT-2020 e IMT-2030 (6G)⁷ sob definições baseadas em padrões e abordagens disponíveis na literatura científica e na indústria de telecomunicações, no que tange ao período de pesquisa de 15/03/2018 a 22/05/2023 e ao escopo deste trabalho, apresentado na [Subseção 1.2.3](#) (Escopo do trabalho).

2.1 DESCRIÇÃO GERAL

A necessidade de conectividade às aplicações atuais e futuras de IoT levou ao desenvolvimento da padronização IMT-2020 da ITU para atender aos requisitos de desempenho, confiabilidade, eficiência energética e outros, assim como de uma possível simplificação da interação entre o Usuário Final e o provedor de serviços.

Os estudos iniciais para construir a visão da arquitetura do 5G foram realizados entre 2012 a 2015 por vários projetos internacionais em parceria entre a universidades e indústrias, com o objetivo de gerar um conjunto de requisitos e testar soluções tecnológicas que o 5G deverá atender ou adotar para as aplicações previstas num futuro próximo.

Após estudar as tendências de tecnologia, estimativas de tráfego, modelos de canais de ondas milimétricas, possíveis aplicações e os novos modelos de negócios, concluiu-se que o IMT-2020 é viável em bandas acima de 6 GHz ([ITU-R, 2022](#)).

Segundo [Spera \(2022\)](#), os avanços tecnológicos em telecomunicações têm trazido novos padrões na implementação das redes móveis. A desagregação tem sido trabalhada com o apoio de Telcos e fabricantes para o fomento da inovação, padronização e diversificação de fornecedores com padrão não proprietário para estas redes.

A desagregação das redes é idiopática ao 5G e refere-se à separação, sem perda da interoperabilidade, entre HW e SW, mesmo que sejam componentes de

⁷ Este trabalho classifica as redes móveis emergentes como 5G e 6G (Sexta Geração de Redes Móveis).

diferentes fornecedores e à separação de funções monolíticas em subsistemas menores, desde que haja interoperabilidade entre os componentes destes fornecedores (NOKIA, 2023c).

Implantar e operar um sistema com uma infraestrutura de rede eficiente, escalável e, principalmente, automatizada, será o grande desafio das Telcos (MISHRA, 2023). Para oferecerem serviços com confiabilidade, agilidade e implantação adequadas, em níveis econômico e técnico, as Telcos deverão utilizar diversas tecnologias, arquiteturas e desenvolvimentos além da desagregação das redes, tais como: SDN, NFV, *containerização* das funções de rede (*Cloud-Native Network Functions* — CNF), computação em nuvem distribuída e NSO (MARTIN, 2023).

Entretanto, há desafios na padronização de interfaces, definição dos indicadores-chave de desempenho (*Key Performance Indicators* — KPIs) e APIs, insumos importantes para se atingir os ganhos esperados e habilitar possibilidades de adoção de metodologias como DevOps, com foco em processos automatizados rumo à integração e entrega contínuas (*Continuous Integration/Continuous Delivery* — CI/CD) e sustentáveis (EISELE, 2022; SPERA, 2022).

Nesse contexto, uma mudança de paradigma para redes 5G desagregadas vem com a Separação dos Planos de Controle e Usuário (*Control and User Plane Separation* — CUPS) e a descentralização das aplicações no 5G “puro” (*Standalone* — SA), trazendo a possibilidade de serviços mais rápidos e confiáveis (NOKIA, 2023c).

Cohen (2022) expõe que, para ajudar a gerenciar a migração de redes 4G (Quarta Geração de Redes Móveis) para o padrão 5G Novo Rádio (*New Radio* — NR), o Projeto de Parceria de 3ª. Geração (3rd Generation Partnership Project — 3GPP) propôs dois modos de implantação para redes 5G: *Non-Standalone* (NSA) e SA. O 5G NSA é um passo necessário na transição global para o 5G SA.

O 5G NSA alavanca a infraestrutura existente de uma rede 4G utilizando-se o *core* dela (no caso o *Long Term Evolution Evolved Packet Core* — LTE EPC). Assim, a RAN 5G permanece dependente da rede 4G para gerenciar informações de controle e sinalização. Tal solução permite às Telcos fornecerem Internet mais rápida a seus clientes, sem retrabalhar completamente sua tecnologia de rede principal.

Já o 5G SA tem um *core* 5G (5GC), projetado sob uma arquitetura baseada em serviços (*Service Based Architecture* — SBA), que virtualiza as funções de rede por completo, através de interfaces baseadas em serviços (*Service Based Interfaces* — SBIs), fornecendo toda a gama de recursos 5G necessária para automação e oferecimento de serviços mais robustos, isto é, que trarão requisitos mais estritos ou complexos (COHEN, 2022; ESFANDIARI, 2023; RAMSAY; GUPTA, 2022).

2.2 REQUISITOS DO 5G

De acordo com 3GPP (2022b) e 5G-PPP (2022b), pode-se inferir que o 5G traz os seguintes principais requisitos funcionais:

- garantir conectividade que atenda aos requisitos de cada aplicação, sob infraestruturas física e lógica adequadas;
- ser compatível com as redes legadas;
- ser ubíquo;
- oferecer consumo de energia, latência, taxas de transmissão e recepção de dados, e densidade de conexões apropriados aos serviços demandados;
- permitir a melhoria da concorrência;
- facilitar o estabelecimento de modelos de regulação;
- garantir flexibilidade para novos modelos de negócio.

Em setembro de 2015, a primeira visão da ITU sobre a arquitetura 5G foi finalizada, estabelecendo-se os principais requisitos não funcionais que o 5G terá de cumprir em três cenários de uso: eMBB, uRLLC e mMTC⁸ (ITU-R, 2022; PARVEZ et al., 2018).

⁸ O 5G considera também outros cenários, configurando-o como uma plataforma de conectividade, além de um sistema de comunicações móveis (BROWN; MUFTI; LARSON, 2023).

Os principais cenários iniciais e respectivas aplicações do 5G são:

- eMBB: cenário no qual grande capacidade de escoamento de tráfego é o principal requisito a, por exemplo, comunicações móveis com alta concentração de dispositivos utilizando aplicações multimídia;
- mMTC: cenário no qual a profusão na densidade de dispositivos e alta eficiência energética são os requisitos principais. A maioria das aplicações de IoT enquadra-se nesse cenário, como a Indústria 4.0;
- uRLLC: cenário em que latência muito baixa e alta confiabilidade são os requisitos principais. Aqui se enquadram as aplicações industriais de IoT, os carros autônomos, a telemedicina, dentre outros.

Aliado a esses três cenários, deve-se incluir o cenário de “acesso a áreas remotas”, em que um grande raio de cobertura é o principal requisito, com aplicações na automação agrícola — Agricultura 4.0 (BATISTA JR et al., 2019b; ITU-T, 2022; TANG et al., 2021).

Como ilustrado na Tabela 1, o Grupo de Trabalho 5D da ITU definiu, em fevereiro de 2017, os requisitos não funcionais mínimos relacionados ao desempenho técnico da interface de rádio IMT-2020, o que representa novos recursos de sistemas além do IMT-2000 (ou 3G) e IMT-Advanced (ou 4G) (OECD, 2019).

| Funcionalidade IMT-2020 | Requisitos mínimos | Cenário de uso sob avaliação | Comparação com 4G (LTE) |
|-------------------------|--|------------------------------|------------------------------------|
| Pico da taxa de dados | Em <i>download</i> : 20 Gbps Em <i>upload</i> : 10 Gbps | eMBB | 200 vezes maior 100 vezes maior |
| Eficiência do espectro | Em pico de <i>download</i> : 30 bits/s/Hz Em pico de <i>upload</i> : 15 bits/s/Hz | eMBB | Não considerado |
| Latência | 4 ms para eMBB 1 ms para URLLC | eMBB uRLLC | Em uRLLC, 10 % da latência do LTE |
| Densidade de conexões | 1 milhão de dispositivos por km ² | mMTC | 100 vezes maior |

Tabela 1 – Requisitos não funcionais mínimos do IMT-2020

Fonte: adaptada de OECD (2019).

De acordo com o relatório preliminar sobre “Requisitos mínimos relacionados ao desempenho técnico para interfaces de rádio IMT-2020”, os indicadores de desempenho devem ser obtidos em cada caso de uso 5G (ITU-R, 2015, 2017, 2022). Contudo, os requisitos não funcionais do 5G rumo ao 6G vêm evoluindo de acordo com a Figura 2.

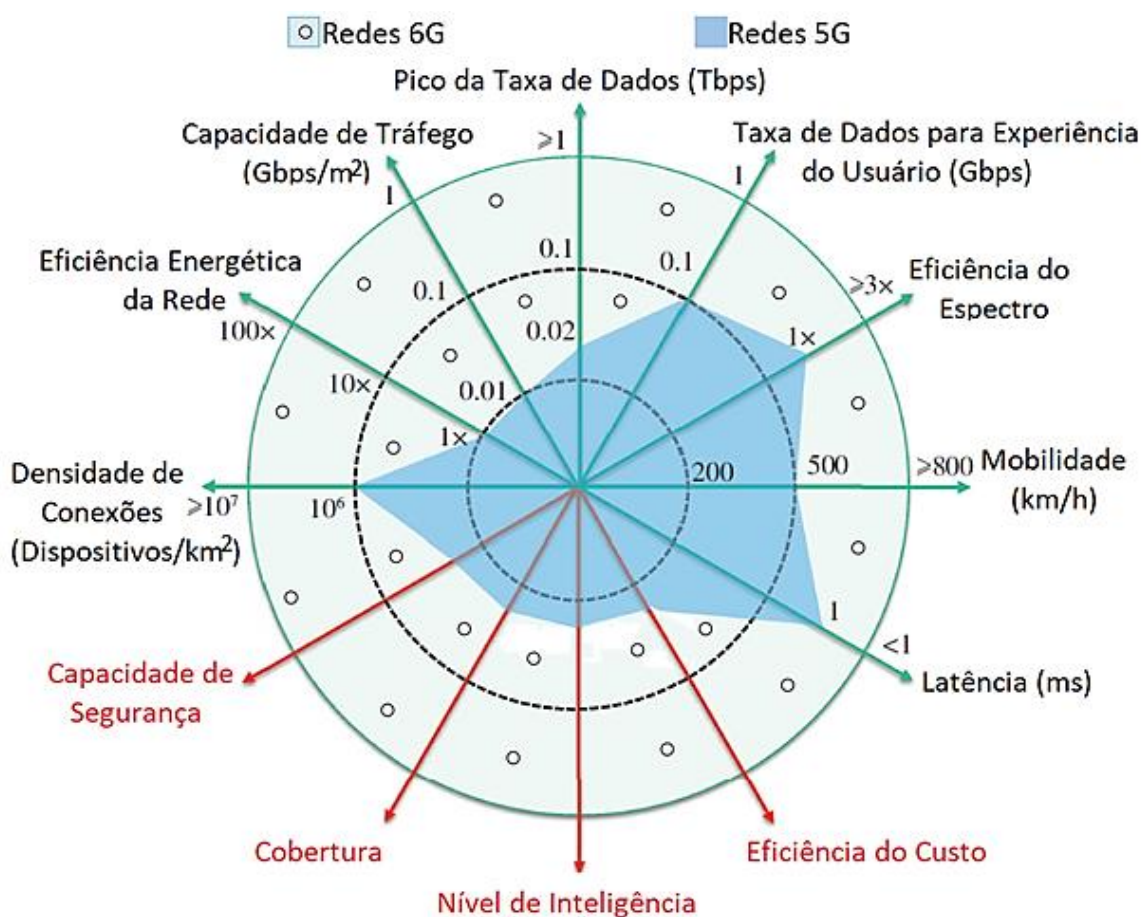


Figura 2 – Requisitos das redes 5G e 6G

Fonte: adaptado de You et al. (2021) apud Silva, Batista Jr, Sousa, Mostaçõ, Monteiro, Bressan, Cugnasca e Silveira (2022).

Neste sentido, o 5G e futuras redes móveis proporcionarão interconectividade entre padrões e dispositivos, com requisitos que incluem, quando necessário, além de altas taxas de transmissão, baixa latência e alta confiabilidade, questões como segurança da informação e o menor consumo de energia possível do sistema (HATT et al., 2023).

Todavia, o 5G evolui para melhorar ao 5G *Advanced* ou 5G Avançado (que será especificado pelas *releases* 18, 19 e 20 do 3GPP) e, dele, expandir-se ao 6G, suportando novos serviços e aplicações mais robustos, conforme ilustra a [Figura 3](#).

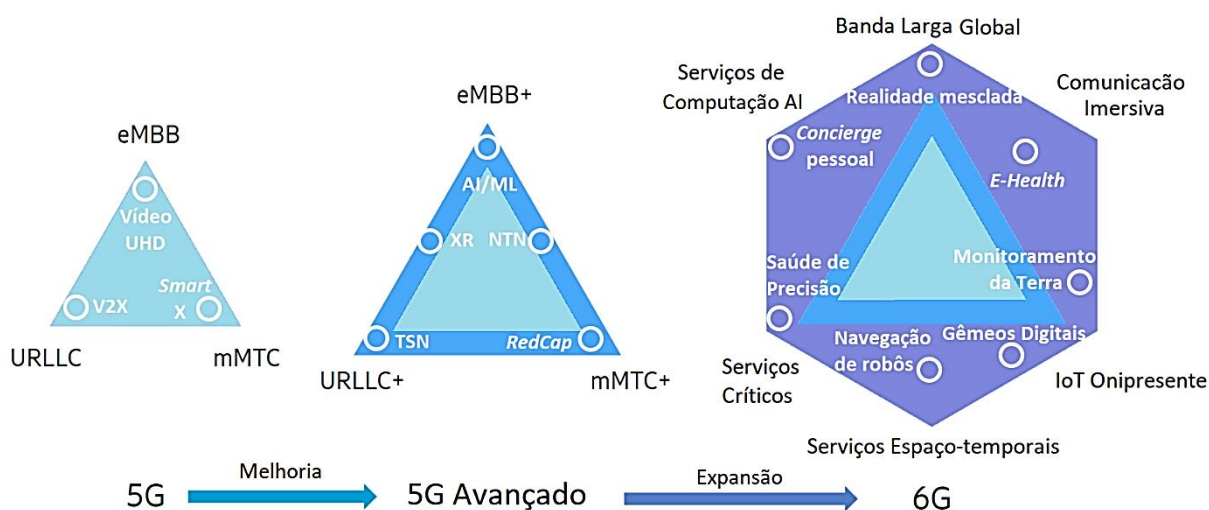


Figura 3 – Evolução dos principais cenários do 5G ao 6G

Fonte: adaptada de [Ericsson \(2022a\)](#).

Os trabalhos do 3GPP sobre o 5G Avançado iniciaram-se em 2022 para melhorar o desempenho do sistema 5G E2E, possibilitando mais casos de uso. Assim, o 5G Avançado está estabelecendo a base técnica dos próximos anos a experiências aprimoradas e expansão contínua em novas verticais até o 6G ([KAGAN, 2023](#)).

O 5G Avançado é um marco importante para as Telcos poderem monetizar seus recursos além do domínio do consumidor e também prepararem o setor de telecomunicações ao 6G, que se concentrará na inteligência distribuída, na combinação de mundos físico e virtual e no uso total de IA e ML em toda a rede ([HAMITI, 2023](#); [HILL, 2022b](#)).

A plataforma móvel de próxima geração, 6G, tem como objetivo principal proporcionar inovação com tecnologias sinérgicas em redes “verdes” ou ecologicamente “corretas”, que sustentarão a expansão da borda inteligente conectada ([QUALCOMM, 2022](#)).

2.3 ARQUITETURA GERAL DO 5G

No 5G, as tecnologias de computação e telecomunicações estão presentes na mesma arquitetura⁹, visando solucionar o problema da conectividade em IoT para qualquer classe de serviço, independente de seus requisitos não funcionais (ECC, 2018a; MATTISSON, 2018).

A Parceria Público-Privada de Infraestrutura 5G (5G Infrastructure Public Private Partnership — 5G-PPP), iniciativa conjunta entre a Comissão Europeia e a indústria europeia (fabricantes, Telcos, prestadores de serviços, pequenas e médias empresas e instituições de pesquisas), apresenta uma proposta de arquitetura geral de rede, visando atender todos os aspectos do *network slicing*, como ilustrado na Figura 4.

⁹ Neste trabalho, a arquitetura do 5G é entendida como uma abstração de um ou mais modelos, segundo características de requisitos do 5G. Um modelo de rede 5G, por sua vez, é o conjunto de um ou mais diagramas de rede obtidos e/ou propostos a partir da arquitetura do 5G.

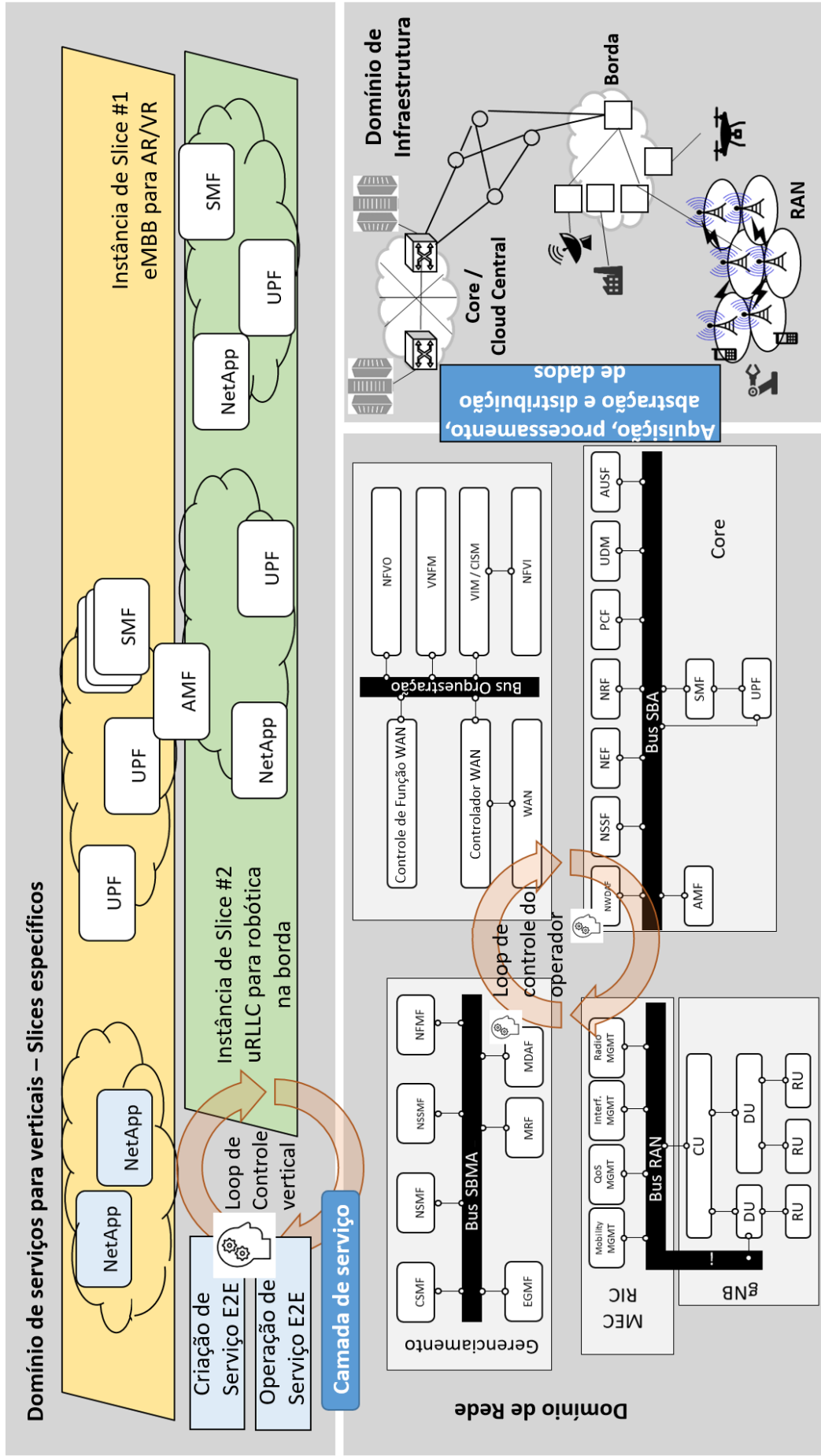


Figura 4 – Arquitetura geral da rede 5G
 Fonte: adaptada de [5G-PPP \(2021\)](#).

O [5G-PPP \(2021\)](#) introduz o conceito de redes não públicas (*Non-Public Networks* — NPNs) ou redes privadas. Uma NPN fornece serviços de rede 5G para uma organização de usuários ou grupo de organizações claramente definidos e é implantada nas instalações definidas da organização, como um campus ou uma fábrica ([CELONA, 2023](#)).

As redes 5G privadas vêm sendo desenvolvidas em um momento crítico, pois a transformação digital gera uma necessidade cada vez maior de visibilidade e inteligência dentro de uma determinada organização ([DEACON; CHIRALA, 2023](#)). Entretanto, o caminho para lançamentos 5G privados pode ser tortuoso. O principal desafio é garantir a confiabilidade do sistema e, ao mesmo tempo, minimizar o custo total de implantação ([DUKE-WOOLLEY, 2021](#); [VARGA et al., 2020](#)).

De acordo com [Duke-Woolley \(2021\)](#), os principais motivadores para implantações de NPN's são:

- transição do 4G ao 5G, com rápido aumento de casos de uso para a Indústria 4.0 em aplicações de manufatura e automação de fábrica, saúde, varejo e primeiros socorros;
- maior necessidade de plataformas de rede para fornecer contexto e conectividade para pessoas e ativos;
- transformação digital de empresas e indústrias, parte integrante de qualquer ambiente de negócios;
- abordagem baseada em arquitetura não proprietária, permitindo ecossistemas maiores e mais amplos, suportando várias topologias ou modelos de implantação, incluindo computação de borda multiacesso (*Multi-access Edge Computing* — MEC¹⁰);
- recursos distribuídos E2E baseados em nuvem com rápida integração e confiabilidade ([DIOGO, 2023](#));
- necessidade de segurança aprimorada.

¹⁰ Isto ocorre sobre uma parte da topologia de computação distribuída que aproxima as aplicações das fontes de dados, como dispositivos de IoT ou servidores de borda local, visando tempos de resposta menores do que os convencionalmente tratados em nuvem central.

De acordo com o [5G-PPP \(2021\)](#), a arquitetura geral do 5G compreende três principais domínios: as verticais, a rede e sua infraestrutura.

O Domínio de Serviços para verticais inclui as considerações relacionadas aos Sistemas de Apoio aos Negócios (*Business Support System* — BSS) nos serviços oferecidos (entre outros, *e-health*, robótica ou serviços de *streaming* de vídeo aprimorados) e às funções de política e decisão em nível comercial, bem como os aplicativos e serviços operados pelo inquilino¹¹. Isso inclui o sistema de orquestração E2E.

No Domínio de Serviços, o papel principal é desempenhado pela camada de serviço e o conceito de *NetApps*.

A camada de serviço fornece uma interface comum para o gerenciamento e operação da rede, permitindo a interação entre a inteligência de serviço e a rede subjacente. Esta camada define e implementa, por exemplo, os processos de negócio de uma determinada vertical ao longo de cadeias de valor específicas e sequencia os serviços definidos pela orquestração de funções.

Na camada de serviço, cada uma das atividades é caracterizada por restrições relacionadas às aplicações, como consumo de energia, precisão, requisitos de qualidade, de segurança e proteção, além de outros indicadores. Para tanto, os conjuntos de funções relacionados às aplicações são definidos em requisitos das aplicações, tais como latência, disponibilidade do serviço, segurança, taxa de transferência de dados e assim por diante.

O conceito de *NetApps* compreende todos os aplicativos habilitados para o 5G que constroem um serviço de rede, por meio de *slices*, que são então usados para fornecer esses serviços de rede e abranger diferentes funções de rede (incluindo funções de *core* e acesso), possivelmente orquestrados ([AMDOCS, 2020](#)).

As diferentes funções são operadas no Domínio de Rede, dispostas em diferentes *slices* de acordo com os KPIs que devem fornecer, sob a alocação dos recursos virtuais de rede. Isso inclui o sistema operacional de rede multidomínio e

¹¹ Inquilinos ou *tenants* são entidades dentro de uma vertical que requerem conectividade de comunicação e serviços para sua operação. Por exemplo, numa vertical industrial representada por uma área industrial com várias fábricas, cada fábrica é um inquilino ([WALIA et al., 2019](#)).

diferentes adaptadores e abstrações de rede acima das redes e ecossistemas heterogêneos de nuvem. Ela é responsável pela alocação dos recursos de rede (virtuais) e mantém o estado da rede para garantir a confiabilidade (da rede) em um ambiente de vários domínios.

Dentro do Domínio de Rede, as inovações vêm de quatro áreas, a saber: Acesso ([HABIBI et al., 2019](#)), Core, Gerenciamento e Orquestração, assim como aspectos de implantação entre domínios. Um desafio de pesquisa atualmente é conseguir uma troca de dados flexível entre elas ([5G-PPP, 2021](#)).

O Gerenciamento e Orquestração inclui o gerenciamento da virtualização de serviços e de suas funções e apresenta suma importância, pois é responsável pela criação, operação e controle de múltiplas comunicações ([ETSI, 2022b](#); [G-ESTEVEZ et al., 2019](#)). Ele é responsável pela:

- orquestração dos *slices* para soluções de rede personalizadas e especializadas;
- determinação da melhor solução, tanto do ponto de vista técnico como econômico, da solução para cada tipo de negócio, respeitando os requisitos de cada aplicação, como latência, volume de dados etc.

As inovações no Domínio da Infraestrutura são capturadas no contexto de campos específicos, como NPN ou o acesso baseado em *drones*, sendo basicamente a parte física da rede. Em outras palavras, o Domínio da Infraestrutura suporta as Funções de Rede Virtual (*Virtual Network Functions* — VNFs) e as Funções de Rede Física (*Physical Network Functions* — PNFs) necessárias para transportar e processar o tráfego de dados dos usuários. Todos os elementos de rede fazem parte de segmentos de rede: RAN, acesso por cabo, core, transmissão e redes de borda.

O Domínio da Infraestrutura e o Domínio de Rede permitem a criação, operação e controle de várias comunicações em andamento no Domínio de Serviços. Juntos, o Domínio da Infraestrutura e o Domínio de Rede administram os recursos de infraestrutura de rede entre as Telcos e usuários de acordo com a aplicação a ser entregue pela camada de serviço. Eles mapeiam os requisitos dos serviços, topologia

e configuração da rede, permitindo comunicações móveis através de *handovers* horizontais e verticais, garantindo o serviço E2E.

O Domínio da Infraestrutura e o Domínio de Rede também administram os recursos de processamento de dados (computação em nuvem), sob plataforma não proprietária para facilitar o desenvolvimento de APIs ([BLACKMAN, 2023a](#)).

Nestes Domínios (Infraestrutura e Rede), podem-se utilizar princípios de armazenamento e análise de dados, nos quais, por exemplo, sensores/atuadores são integrados à computação em nuvem, utilizando um banco de dados estruturado em *Big Data* (BD) para análise e processamento das informações coletadas, onde APIs são desenvolvidas para identificar e entender os dados coletados em uma determinada vertical, e fornecer orquestração de serviços.

A arquitetura suporta, nativamente, a busca por automação de rede, que é alcançada através de *loops* de controle e o uso de algoritmos de IA. Especificamente, identifica-se dois *loops* principais: o primeiro, habilitado pela camada de serviço que é alavancado pelo provedor de serviços através dos *NetApps* para orientar o comportamento da rede; e o segundo *loop*, que acontece dentro do Domínio da Rede, com módulos específicos como o função de análise de dados de rede (*Network Data Analytics Function* — NWDAF) ou o função de análise de dados de gerenciamento (*Management Data Analytics Function* — MDAF) projetado para essa finalidade.

2.4 DESENVOLVIMENTO DA PADRONIZAÇÃO

A padronização 5G e 6G vem sendo detalhada por institutos e organizações como ITU, 3GPP, 5G Brasil, 5G-PPP, Instituto Europeu de Normas de Telecomunicações (European Telecommunications Standards Institute — ETSI), em colaboração com diversos projetos de pesquisa internacionais ([3GPP, 2022b](#); [5G BRASIL, 2018](#); [5GINFIRE, 2022](#); [5G-PPP, 2022b](#); [CORDIS, 2022](#); [ETSI, 2023a](#)).

A ITU está trabalhando na definição do quadro e objetivos gerais dos futuros sistemas 5G e 6G ([ITU, 2023](#)). A ITU-R (Radiocomunicação) também descreve em detalhes uma ampla variedade de recursos associados a cenários de uso previstos, tendências de usuários e aplicativos em potencial, crescimento no tráfego, tendências tecnológicas e implicações de espectro ([ITU-R, 2023](#)).

Por outro lado, o foco da ITU-T (Telecomunicações) sobre o 5G e 6G é desenvolver relatórios sobre análise de lacunas de padrões acerca de vários tópicos relacionados aos aspectos de redes ([MOURAD et al., 2023](#)). Tal análise inclui arquitetura de rede de alto nível, estrutura de QoS E2E, tecnologias de rede emergentes como *fronthaul*, *backhaul* e NSO ([ITU-T, 2023a](#)).

O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers — IEEE) tem seu grupo de pesquisa de pré-padronização em *core* móvel baseado na nuvem para analisar os conceitos de SDN e NFV aplicados ao 5G ([IEEE, 2023](#)).

A Fundação de Rede Aberta (Open Networking Foundation — ONF) é uma organização orientada ao processo de desenvolvimento aberto e colaborativo de SDN, que é conduzido sob a perspectiva do Usuário Final. A especificação da ONF compreende seis subgrupos, incluindo redes móveis, definindo extensões para o *OpenFlow* suportar abstrações necessárias em redes móveis. Em particular, trabalha para identificar oportunidades de suporte ao desenvolvimento de padrões (por exemplo, Next Generation Mobile Networks — NGMN, 3GPP) relacionadas ao SDN em redes 5G ([ONF, 2023](#)).

O ETSI financiou vários grupos de especificação da indústria (*Industry Specification Groups* — ISGs) para desenvolver padrões relacionados ao SDN, NFV, MEC e gerenciamento autônomo de redes. Alguns dos membros do projeto são fornecedores de HW e SW (Intel, Red Hat e Canonical) e Telcos (Telefonica, Telenor) ([ETSI, 2023a](#)).

O 5G-PPP trabalha no desenvolvimento das próximas gerações de tecnologias de redes 5G e 6G, levando em conta os principais desafios da sociedade e seus requisitos de rede. Essa iniciativa compreende vários grupos de trabalho, incluindo de arquitetura do 5G, visando servir como plataforma comum e facilitar o consenso dos grupos de arquitetura 5G e SDN/NFV ([5G-PPP, 2022a](#)).

O 5G Forum está liderando o desenvolvimento das principais tecnologias de comunicação na Coreia, por meio de pesquisa e troca em larga escala entre todas as partes interessadas na nova infraestrutura de comunicações móveis, incluindo as de IoT, *Cloud*, BD e redes móveis, instituições de pesquisa acadêmica da indústria, como

também os fabricantes e prestadores de serviços em redes de comunicação de dados ou voz ([5G FORUM, 2023](#)).

O Grupo de Promoção do 5G (IMT-2020 Promotion Group) está trabalhando na análise dos principais cenários técnicos, desafios e tecnologias habilitadoras para o 5G na China. O objetivo é definir a nova arquitetura de rede 5G, plataforma de infraestrutura e tecnologias-chave de rede, definir o *road map* de tecnologia para formar o consenso sobre a estrutura de tecnologia de rede 5G, a fim de orientar a padronização internacional do 5G e promover o desenvolvimento industrial ([IMT-2020 PROMOTION GROUP, 2022](#)).

O Grupo de Promoção das Comunicações Móveis de Quinta Geração (Fifth Generation Mobile Communications Promotion Forum — 5GMF) foi criado para realizar pesquisa e desenvolvimento sobre os sistemas de comunicações móveis 5G relativos à padronização dos mesmos no Japão. O objetivo é o estudo da arquitetura geral da rede para dispositivos móveis 5G e a análise dos requisitos e tecnologias para infraestrutura de rede ([5GMF, 2023](#)).

O 5G Americas é uma organização comercial do setor composta pelos principais provedores e fabricantes de serviços de telecomunicações. Sua missão é promover o avanço e as capacidades completas das tecnologias 5G e 6G. Além disso, essa organização está examinando os direcionadores do mercado 5G/6G, casos de uso, requisitos, considerações regulatórias e elementos de tecnologia com o propósito de serem considerados para o desenvolvimento adicional dos sistemas 5G/6G E2E ([5G AMERICAS, 2023](#)).

A Aliança de Redes Móveis de Próxima Geração (Next Generation Mobile Networks — NGMN) desenvolve os requisitos da indústria para as tecnologias de banda larga móvel 5G. O foco particular neste processo tem sido sobre as necessidades das Telcos estabelecerem claras funcionalidades e metas de desempenho, bem como requisitos fundamentais para cenários de implantação e operações de rede, levando à implementação de uma evolução de rede econômica ([NGMN ALLIANCE, 2023](#)).

O Fórum de Células Pequenas (Small Cell Forum — SCF) é dirigido para impulsionar a adoção em larga escala de células pequenas, para influenciar e fornecer

insumos técnicos que informem e aprimorem o processo de padronização. As prioridades do SCF incluem o entendimento e a capacitação de novas transformações de rede com direcionamento na virtualização da camada de células pequenas e na preparação da tecnologia de células pequenas sob implementação em massa em redes heterogêneas, explorando os recursos de auto-organização (SCF, 2023).

O 3GPP, por sua vez, trabalha o desenvolvimento do 5G em fases, sob grupos de especificações técnicas diferentes (*Technical Specification Groups* — TSGs), que vêm atuando em versões ou *releases* ao longo do tempo (3GPP, 2022a), como exposto na Figura 5.

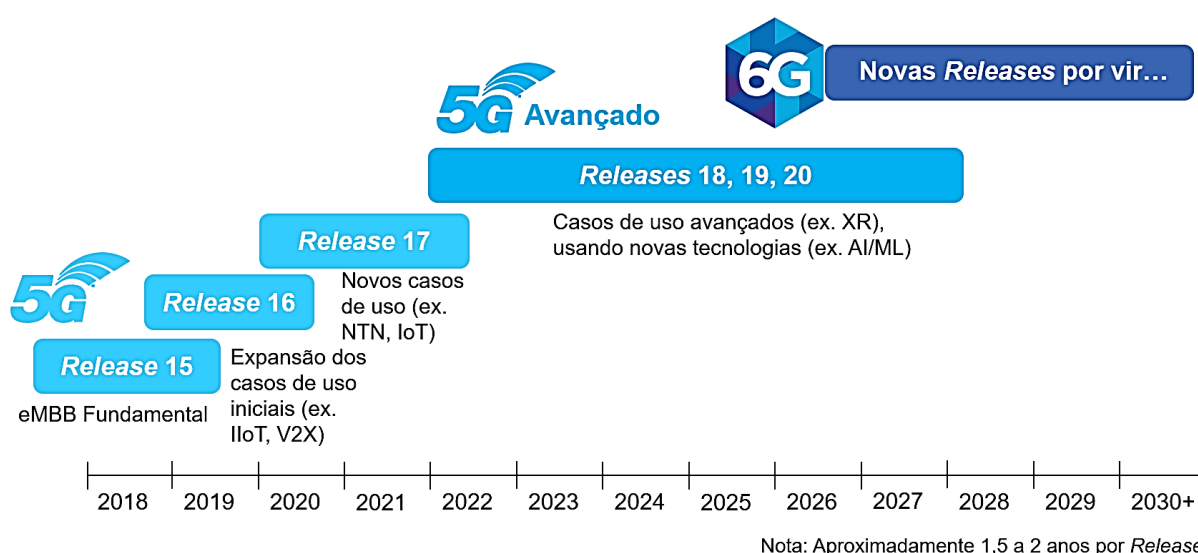


Figura 5 – Evolução das *releases* propostas pelo 3GPP ao longo do tempo

Fonte: adaptada de Wong (2022).

O 3GPP concluiu a primeira versão da padronização do 5G na *release* 15 em meados de 2018. A primeira etapa de evolução do sistema 5G foi feita na *release* 16. O 3GPP finaliza os trabalhos em mais evolução do sistema 5G na *release* 17, encerrando a primeira fase da evolução do 5G. A *release* 17 servirá como base tecnológica para o 5G Avançado, a partir dos estudos e trabalhos já iniciados na *release* 18 (WONG, 2022).

Habilitar sistemas 5G para suportar redes não terrestres (*Non-Terrestrial Networks* — NTN) tem sido uma área significativa em exploração no 3GPP (STUHLFAUTH, 2022). NTN também se tornou um termo genérico para qualquer rede

que possa envolver objetos voadores, incluindo redes de comunicação por satélite e sistemas de plataforma de alta altitude (*High Altitude Platform System* — HAPS) e redes aeroterrestres. As redes NTN favorecem o uso de IoT no cenário de mMTC ([5G AMERICAS, 2022](#); [DRIF et al., 2021](#); [LUO et al., 2022](#)).

Com relação à definição das redes privadas (NPNs), o 3GPP apresentou-a na *release* 16 e a refinou na *release* 17. As NPNs podem ser implantadas usando espectro licenciado compartilhado por meio de uma operadora de rede ou como redes independentes, usando espectro licenciado ou não licenciado, dependendo da aprovação regulatória local.

Vale notar que, segundo o 3GPP, uma NPN pode ser implantada como: a) uma Rede Não Pública Autônoma (*Standalone Non-Public Network* - SNPN), operada por um operador privado e não contando com funções de rede fornecidas por uma Rede Móvel Terrestre Pública (*Public Land Mobile Network* — PLMN); ou b) uma NPN integrada à rede pública (*Public Network Integrated* PNI-NPN), que consiste em uma rede não pública implantada com o suporte de uma PLMN ([COHEN, 2021](#)).

Com relação ao *network slicing*, uma questão que surgiu em alguns países é se o mesmo será consistente com a regulamentação de "neutralidade da rede 5G". As implicações práticas para as regras atuais da Internet aberta são especulativas neste estágio sobre o 5G. Isso ocorre porque a evolução dos diferentes elementos 5G, como o *network slicing*, depende não apenas das capacidades tecnológicas eventuais, mas também da demanda do mercado, do grau de competição, das estratégias comerciais, das questões regulatórias etc. ([OECD, 2019](#)).

O projeto de um Orquestrador em 5G deve considerar aplicações verticais sob os requisitos de serviços adequados aos casos de uso 5G e indicadores definidos pelo Órgão Regulador. A [Tabela 2](#) apresenta um resumo quanto à abordagem dos trabalhos desenvolvidos pelas principais organizações em relação especificamente à NSO. Além das organizações explanadas, estão também presentes neste contexto: Força-Tarefa de Engenharia da Internet (Internet Engineering Task Force — IETF), Fórum Metro-Ethernet (Metro-Ethernet Forum — MEF), Organização para o Avanço dos Padrões de Informação Estruturada (Organization for the Advancement of Structured Information Standard — OASIS) e TM Forum ([IETF, 2023](#); [MEF, 2023](#); [OASIS, 2023](#); [TM FORUM, 2022b](#)).

| Organização de Desenvolvimento de Padrões | Escopo | Abordagem |
|---|----------------------------------|--|
| ETSI | NFV | Métricas de QoS para orquestração de NFV Arquiteturas para multidomínios administrativos Arquitetura VNF e SDN na Arquitetura NFV Orquestração de recursos virtualizados Gerenciamento do ciclo de vida Especificação de modelos de serviço de rede Gerenciamento de políticas Gerenciamento de serviços multidomínio E2E |
| MEF | NFV, LSO | Arquitetura e estrutura de referência LSO (orquestração do ciclo de vida do serviço) |
| TM Forum | SDN, NFV | ZOOM (orquestração, operações e gerenciamento sem toque) |
| IETF | SDN, NFV, SFC | Orquestração dos recursos e serviços de rede Arquitetura SFC |
| NGMN | 5G | Gerenciamento de rede e serviços, incluindo orquestração Arquitetura E2E |
| 3GPP | 5G | Arquitetura de gerenciamento e orquestração |
| 5G-PPP | 5G | Arquitetura de gerenciamento e orquestração |
| OASIS | Modelagem de recursos e serviços | TOSCA para NFV TOSCA em YAML |
| ONF | SDN | Arquitetura SDN Mapeamento de Orquestração ao SDN Definição de Orquestração |
| ITU-T | 5G | Relatório sobre análise de lacunas de padrões em redes 5G Termos e definições para redes 5G Requisitos, estruturas de orquestração e gerenciamento de redes 5G Padronização e atividades de código aberto relacionadas ao SW de rede |
| ITU-R | 5G | Estrutura e objetivos gerais de redes 5G |

Tabela 2 – Abordagem dos trabalhos de padronização para a orquestração dos serviços de rede

Fonte: adaptada de [Sousa et al. \(2019\)](#).

2.5 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ORQUESTADOR DENTRO DA ARQUITETURA GERAL DO 5G

O *network slicing*, aspecto complexo das redes móveis emergentes, será vital para a borda da nuvem de dados e se torna prevalente com o 5G e suas especificações, que exigem a partição dos planos de dados, controle e gerenciamento para separar os ambientes que serão criados ([QUADRI; CESELLI; ROSSI, 2023](#)).

Assim, através do *network slicing*, podem-se suportar clientes individuais ou fornecer serviços privados específicos.

O *network slicing* refere-se ao compartilhamento de recursos de uma rede física em várias redes virtuais. Mais precisamente, *slices* são considerados como um conjunto de redes virtualizadas no topo de uma rede física (CRUZ, 2019).

Os *slices* consistem em recursos de rede física (PNFs) e recursos de rede virtual (VNFs), serviços de valor agregado, recursos de rede em nuvem com HW e SW dedicados ou compartilhados na RAN, redes de transporte e *core*, combinando-se, assim, diferentes tecnologias (VELASQUEZ et al., 2022). Os *slices* podem ser alocados para aplicativos e/ou serviços específicos, casos de uso ou modelos de negócios para atender aos seus requisitos. Cada *slice* pode ser operado independentemente com seus próprios recursos virtuais, topologia, fluxo de tráfego de dados, políticas de gerenciamento e protocolos.

O *network slicing*, via de regra, requer implementação E2E para suportar a coexistência de sistemas heterogêneos e abre o caminho para conectividade personalizada entre um grande número de dispositivos interconectados. Ele aprimora a automação de rede e aproveita a capacidade total da combinação das tecnologias de SDN e NFV (HPE; INTEL, 2020). Além disso, ajuda a tornar a arquitetura de rede tradicional escalável de acordo com o contexto. A Figura 6, então, ilustra o *network slicing* para *slices* em diferentes cenários de uso.

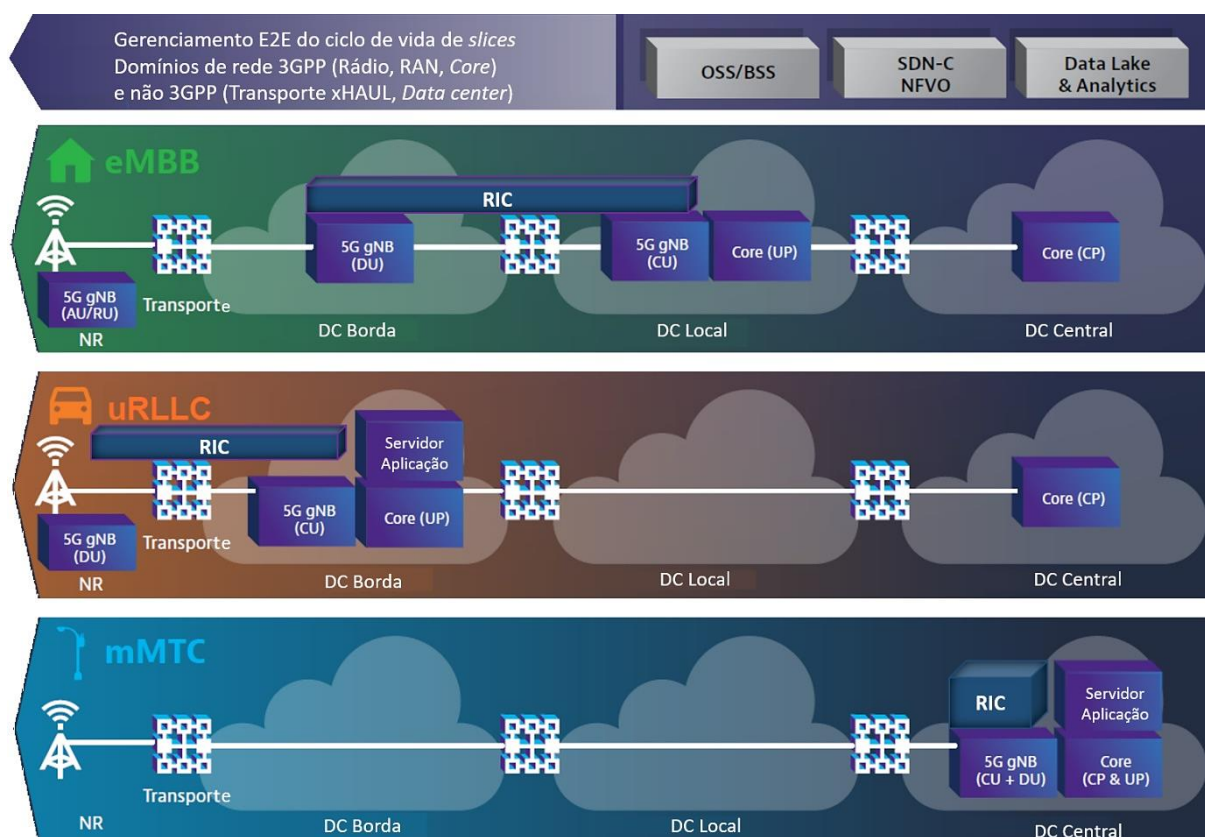


Figura 6 – Visão geral do *network slicing* E2E em redes 5G

Fonte: adaptada de Viavi (2023).

Nota-se que a topologia de rede 5G utilizada varia para eMBB, uRLLC e mMTC em função dos requisitos de serviços que devem ser suportados, por exemplo, em:

- eMBB, sendo necessária a instalação do Controlador Inteligente de RAN (RAN *Intelligent Controller* — RIC) entre a borda e a nuvem local, e a distribuição do core 5G entre as nuvens local e central;
- uRLLC, o RIC deve ser instalado até a borda e o core 5G, distribuído entre a borda e a nuvem central;
- mMTC, tanto o RIC quanto o core 5G estando totalmente instalados junto à nuvem central.

Como o *network slicing* compartilha uma infraestrutura subjacente comum a várias redes virtualizadas, pode ser considerado uma das maneiras mais econômicas de usar recursos de rede e reduzir as despesas de OPEX e de capital (*CAPital EXpenditure* — CAPEX). Também garante que a confiabilidade e as limitações (congestionamento, problemas de segurança e assim por diante) de um *slice* não afetem os outros (TOOSI et al., 2019).

O *network slicing* auxilia o isolamento e a proteção de dados, controle e plano de gerenciamento que reforçam a segurança dentro da rede (DIKMEN; HERRICK; MACAULAY, 2023). Mais ainda, pode ser estendido a vários paradigmas de computação, como borda e nuvem distribuída (BATISTA JR et al., 2019a; MARTUCCI JR; RODRIGUES; CUGNASCA, 2019; RIEKSTIN et al., 2018; VENNAN, 2020a, 2020b). Neste sentido, melhora-se a interoperabilidade e aproximam-se os serviços ao Usuário Final com menos violações dos SLAs.

Pode-se inferir que o processo de construção do *network slicing* em redes 5G deverá ser realizado sob três camadas virtualizadas principais, a saber: (i) Camada de instância de serviço; (ii) Camada de instância de *network slice*; e (iii) Camada de recursos, conforme ilustrado na Figura 7.

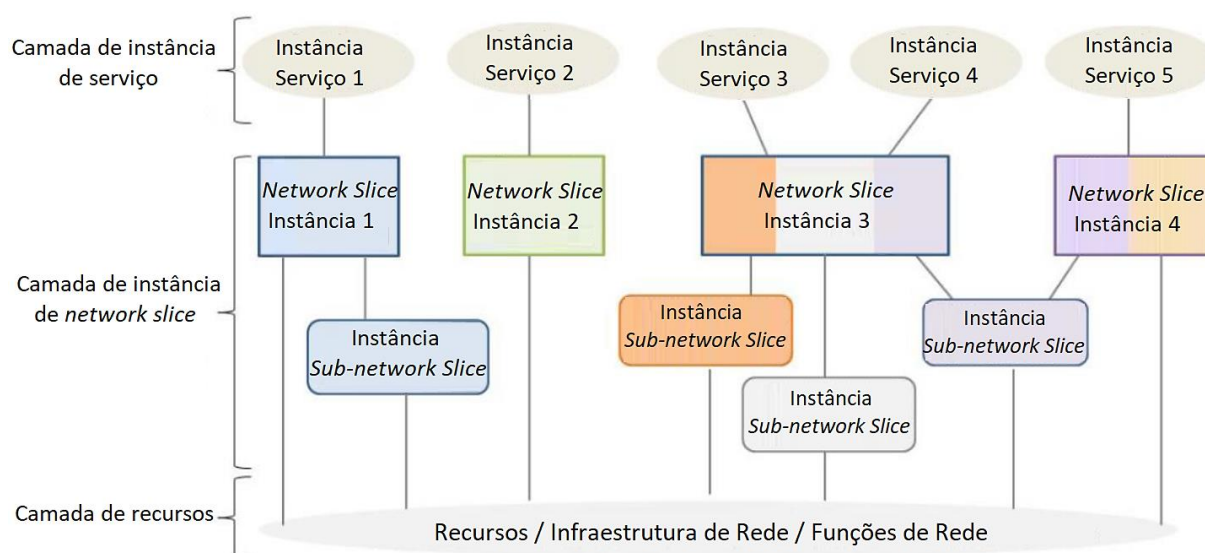


Figura 7 – Processo de construção do *network slicing* em redes 5G

Fonte: adaptada de Afolabi et al. (2018).

Cada serviço é caracterizado por uma instância de serviço, isto é, uma construção em tempo de operação de um serviço do Usuário Final ou de um serviço comercial realizado por um *slice* (NGMN ALLIANCE, 2020).

Em outras palavras, cada instância de serviço reflete um serviço fornecido por um segmento vertical via aplicação da Telco. A instância do *network slice* representa um conjunto de recursos personalizados para acomodar os requisitos de desempenho de um serviço específico e pode conter nenhuma, uma ou várias instâncias diferentes de *sub-network* (sub-rede), isoladas ou compartilhadas.

Uma instância de *sub-network* pode ser uma função de rede, subconjunto de funções de rede ou recursos de rede que realizam parte de uma instância do *network slice*. Cada instância do *network slice* é estabelecida E2E e pode conter sub-redes distintas, domínios lógicos e/ou fisicamente isolados de outra instância do *network slice*.

Em particular, os recursos associados a uma sub-rede podem ser usados de maneira isolada, disjuntiva ou compartilhada, seguindo as políticas e os arranjos de configuração específicos da instância do *network slice*. Uma instância do *network slice*, por sua vez, pode ser usada exclusivamente por uma instância de serviço ou compartilhada entre instâncias de serviço diferentes, geralmente do mesmo tipo. Abstrações comuns de recursos relevantes e APIs abertas permitem o controle dinâmico e automação de instâncias dos *slices* que refletem demandas dinâmicas dos serviços (AFOLABI et al., 2018; ZAHOOR et al., 2022).

O provisionamento de recursos entre redes virtuais é difícil de ser alcançado, pois cada rede virtual tem um nível diferente de afinidade de recursos e pode ser alterada com o passar do tempo. Além disso, o gerenciamento de mobilidade e a virtualização de recursos sem fio podem intensificar os problemas de *network slicing* em 5G. Logo, implementar *network slicing* E2E é um objetivo desafiador, necessitando de tecnologias facilitadoras bem desenvolvidas, padrões globais e ecossistema maduro (MARINOVA et al., 2020).

A Tabela 3 apresenta uma comparação das diferentes características de *slices* em redes 4G e 5G.

| Característica do <i>Slice</i> | 4G/5G NSA Estático | 5G SA Estático | 5G SA Dinâmico |
|--|--------------------|----------------|------------------------|
| Automatizado com orquestração | Não | Não | Sim |
| Alta escalabilidade e variedade de atributos | Não | Médio | Sim |
| Infraestrutura requerida | Core 4G | Core 5G | Core 5G + Orquestração |

Tabela 3 – Comparação de *slices* em redes 4G e 5G

Fonte: adaptada de Bourdot (2022).

A concepção de um Orquestrador corresponde a um desafio de pesquisa, uma vez que, por exemplo, deve desempenhar funções fundamentais para o 5G, como a predição do comportamento do *slice* escolhido, que exigirá técnicas de ML e computação de borda. Pesquisas recentes em *network slicing* da rede 5G concentram-se principalmente em abordar os desafios por meio de estruturas eficientes de *network slicing* (MARTINI; GHARBAOUI; CASTOLDI, 2023).

Os cenários atendidos em redes 5G têm requisitos estritos e heterogêneos que serão alcançados por aprimoramentos na rede de acesso via rádio e uma coleção de tecnologias sem fio inovadoras. Melhorias em SW, como o SDN e NFV desempenharão um papel fundamental na integração dessas diferentes tecnologias (CAI et al., 2023; ETSI, 2020b).

As RANs e cores das redes 5G serão baseadas em uma infraestrutura virtualizada SDN/NFV, capaz de orquestrar os recursos e controlar a rede, a fim de fornecer serviços de rede de forma eficiente, flexível e com escalabilidade. Nesse sentido, Nencioni et al. (2018) apresentaram o *status* das redes de acesso e *core* de rádio 5G definidas por SW e uma ampla gama de futuros desafios de pesquisa sob os aspectos de orquestração e controle.

O conceito de virtualização traz a necessidade da produção, controle e gerenciamento de Máquinas Virtuais (*Virtual Machines* — VMs), realizados pelo *hypervisor*¹² ou Monitor de Máquina Virtual (*Virtual Machine Monitor* — VMM), um

¹² O *Hypervisor* ou VMM é uma camada de software localizada entre a camada de hardware e o sistema operacional. É responsável pelo gerenciamento e alocação de recursos de hardware de uma máquina virtual, por controlar o acesso do sistema operacional visitante (máquina virtual) aos dispositivos de hardware. Ele também deve prover recursos que garantam a segurança das máquinas virtuais através de mecanismos como isolamento, particionamento e encapsulamento.

firmware capaz de fornecer plataforma virtual para sistemas operacionais, permitindo a execução de aplicativos e/ou outros serviços, tais como a seleção dos *slices*. Os *hypervisors* permitem supervisionar o compartilhamento de recursos de HW entre instâncias dos *slices* (AFOLABI et al., 2018).

Através da seleção dos *slices*, o Orquestrador poderá criar uma rede lógica com diferentes características personalizadas para a necessidade de cada usuário, garantindo parâmetros como latência, largura de banda / taxa de transferência, segurança, disponibilidade etc. (BOLAN, 2020).

A Figura 8 ilustra a estrutura de arquitetura NFV para gerenciamento e orquestração (MANO) em alto nível. Os aprimoramentos desta arquitetura permitem que a estrutura NFV gerencie Funções de Rede Virtual (*Virtual Network Function* — VNFs) em contêineres, bem como vários *clusters* de contêineres de sistema operacional.

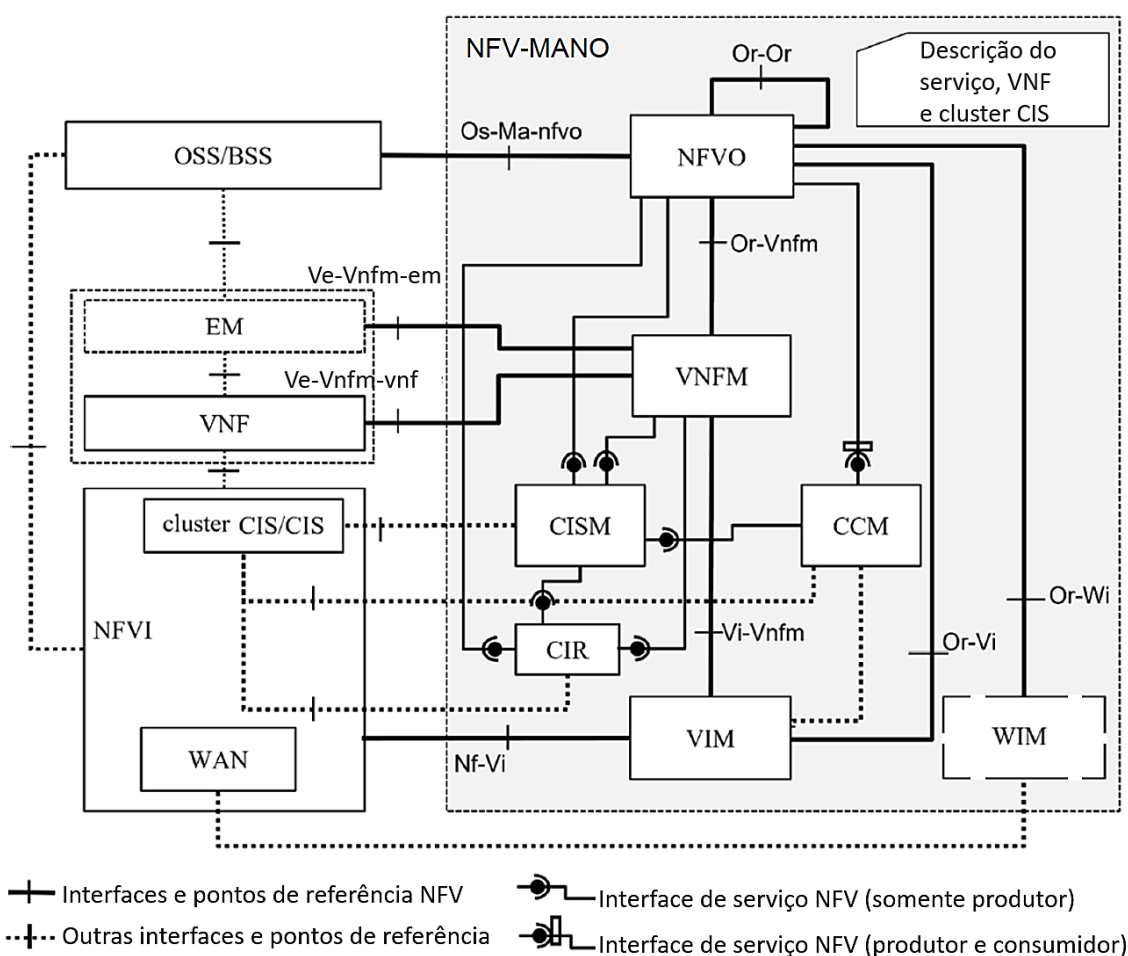


Figura 8 – Estrutura de arquitetura para NFV-MANO

Fonte: adaptada de [ETSI \(2022b\)](#).

O gerenciamento flexível dos *clusters* de contêineres do sistema operacional permite que as Telcos criem o isolamento necessário das funções de rede, como necessário num caminho de evolução para suas infraestruturas de NFV, suportando funções de rede baseadas em máquinas virtuais e nativas da nuvem paralelamente.

Com isso, permite-se suportar cargas de trabalho de funções virtualizadas nativas da nuvem, que estão se tornando cada vez mais populares em redes de telecomunicações para implantações 5G, com soluções interoperáveis padronizadas ([ANTIPOLIS, 2023](#)).

Esta estrutura de arquitetura NFV-MANO apresenta três principais domínios de trabalho, identificados como segue:

- VNF, como a implementação de SW de uma função de rede que é capaz de funcionar através da Infraestrutura NFV (*Network Function Virtualization Infrastructure* — NFVI);
- NFVI, que inclui a diversidade de recursos e como eles podem ser virtualizados. O NFVI suporta a execução das VNFs e os serviços de rede (recursos de rede, computação e armazenamento virtuais). Ele, então, inclui o Serviço de Infraestrutura de Contêineres (*Container Infrastructure Service* — CIS), que se refere ao serviço que fornece o ambiente em tempo de operação para uma ou mais tecnologias de virtualização de contêineres e pode ser exposto por um ou vários *clusters* CIS. As VNFs “containerizadas” são implantadas e gerenciadas em instâncias CIS e fazem uso de contêineres implantados nos *clusters* CIS, cujo gerenciamento é realizado pela função de Gerenciamento de *Cluster* CIS (*CIS Cluster Management* — CCM) no domínio do Gerenciamento e Orquestração de NFV (*NFV Management ANd Orchestration* — NFV-MANO);
- NFV-MANO, que abrange a orquestração e o gerenciamento do ciclo de vida das atividades físicas e/ou recursos de SW que suportam a virtualização de infraestrutura e o gerenciamento do ciclo de vida das VNFs ([ODINI, 2019](#)). O NFV-MANO concentra-se em todas as tarefas de gerenciamento específicas da virtualização necessárias na estrutura de NFV.

Nota-se que o Gerenciador de Infraestrutura Virtualizada (*Virtualized Infrastructure Manager* — VIM) não gerencia todo o NFVI: partes específicas têm gerenciamento específico. São elas: o Registro de Imagens de Contêineres (*Container Image Registry* — CIR), gerenciado pela função de Gerenciamento de Serviços de Infraestrutura de Contêineres (*Container Infrastructure Service Management* — CISM) e a Rede de Longa Distância (*Wide Area Network* — WAN), gerenciada pelo Gerenciador de Infraestrutura de Rede de Longa Distância (*Wide area network Infrastructure Manager* — WIM), que, por sua vez, poderá estar presente fora do domínio do NFV-MANO.

A estrutura de arquitetura do NFV-MANO inclui interfaces de serviços e os seguintes pontos de referência, definidos em detalhes por [ETSI \(2022b\)](#):

- Os-Ma-nfvo, ponto de referência entre Apoio Operacional (*Operational Support System* - OSS), BSS e NFVO;
- Or-Vnfm, ponto de referência entre NFVO e VNFM;
- Or-Vi, ponto de referência entre NFVO e VIM;
- Ve-Vnfm-em, ponto de referência entre EM e VNFM;
- Ve-Vnfm-vnf, um ponto de referência entre VNF e VNFM;
- Vi-Vnfm, ponto de referência entre VIM e VNFM;
- Nf-Vi, um ponto de referência entre NFVI e VIM;
- Or-Or, ponto de referência entre NFVOs em diferentes domínios administrativos;
- Or-Wi, ponto de referência entre um NFVO e um WIM.

A orquestração em redes 5G implicará o gerenciamento eficiente dos *slices* ([YALA et al., 2019](#)). Quando se trata de orquestração, começa-se a definir o que realmente será o 5G e, dele, obter o oferecimento de serviços a partir das novas redes (5G e B5G) que serão implantadas e das redes atuais e/ou legadas (4G, 3G e 2G). A bem da verdade, o 5G, em seu sentido mais profundo, trata-se de um *framework* multisserviço que envolve esforços e tecnologias de telecomunicações e computação

para que quaisquer serviços sejam implantados, diferentemente das redes atuais e/ou legadas e rumo ao que será o 6G.

No processo de orquestração ou gerenciamento de serviços e controle do *network slicing*, tem-se que o *slice* fornece uma conectividade E2E, permitindo a coexistência de diferentes tecnologias de rede sobre uma infraestrutura comum e sob um processo contínuo de malha fechada que analisa os requisitos de serviço para garantir o desempenho desejado (AFOLABI et al., 2018).

A Figura 9 ilustra a orquestração federada dos serviços de rede a partir da ordem comercial dos serviços demandados via função de gerenciamento de serviço de comunicação (*Communication Service Management Function* — CSMF). O CSMF traduz a solicitação de serviço em requisitos de *slices* para a função de gerenciamento de *slices* (*Network Slice Management Function* — NSMF) coordenar, sob ordem técnica, a criação e o gerenciamento dos *slices* nos diferentes segmentos de rede via função de gerenciamento de sub-rede de *slices* (*Network Slice Subnet Management Function* — NSSMF).

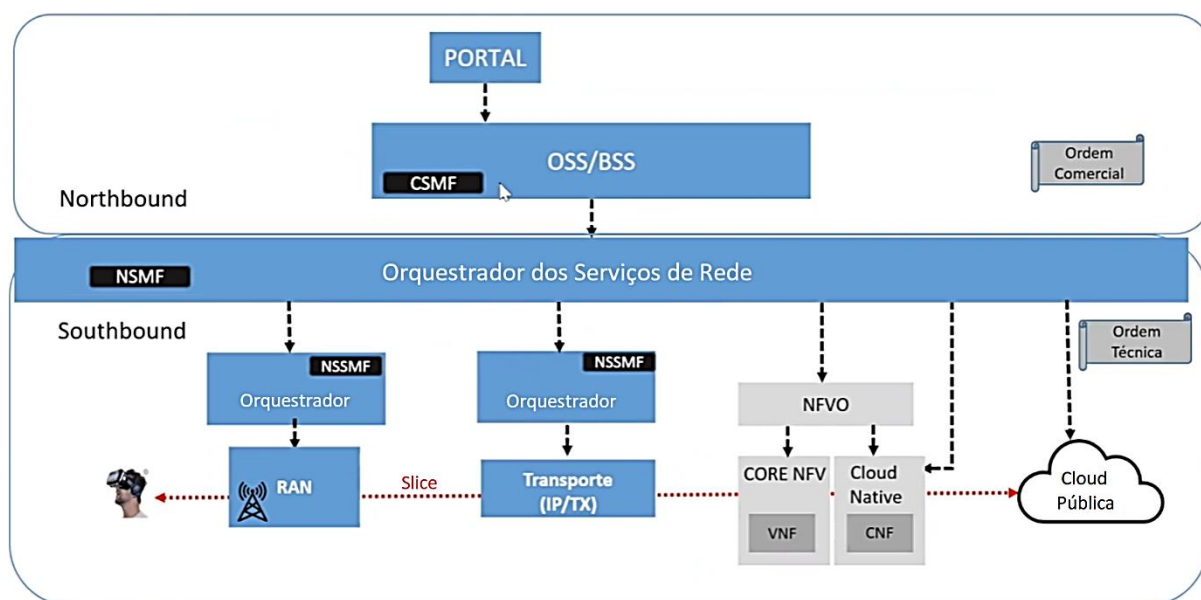


Figura 9 – Orquestração federada dos serviços de rede

Fonte: adaptada de Bourdot (2022).

A orquestração e o controle E2E horizontais dos sistemas 5G serão vitais para coordenar e explorar efetivamente todo o potencial da tecnologia 5G e identificar diversas questões que precisam ser resolvidas (HATT et al., 2023). Esforços adicionais são necessários para desenvolver algoritmos e métodos que sejam capazes de gerenciar os recursos e fornecer serviços avançados de 5G com QoS apropriada para os Usuários Finais, de modo a gerar um sistema realmente confiável e econômico (HUAWEI, 2023a; MA et al., 2020).

2.6 DESENVOLVIMENTOS EM ANDAMENTO

Pesquisas e desenvolvimentos vêm sendo realizados em nível mundial para orquestradores de redes 5G e B5G por institutos e pesquisadores como Ericsson, Nokia, ETSI e outros (AFOLABI et al., 2017, 2020; CELONA, 2023; EKBATANI, 2023; ERICSSON, 2022a, 2023b; ETSI, 2023a; G-ESTEVEZ et al., 2019; GRAMAGLIA et al., 2018; HUAWEI, 2023b; KUNNAPPILLY; BACKEMAN; SECELEANU, 2021; MAULE; VARDAKAS; VERIKOUKIS, 2022; NOGALES et al., 2019; PAGÈS; AGRAZ; SPADARO, 2023; SOUSA et al., 2019; THOTTAN, 2020; VALCARENGHI et al., 2018; WEN et al., 2019).

Guerzoni et al. (2017) apresentaram uma solução de *network slicing* federado em que um orquestrador multidomínio lida com solicitações de *slice* para recursos além de seu domínio. O orquestrador de vários domínios proposto analisa os requisitos de serviço relacionados e, em seguida, entra em contato diretamente com os domínios vizinhos apropriados, realizando a negociação de recursos.

Uma arquitetura de orquestração multidomínio hierárquica é introduzida por Afolabi et al. (2017), com base no conceito de abstração recursiva e agregação de recursos que agrupa recursos heterogêneos de NSI (Instância do *Network Slice*) inicialmente em um nível por domínio e depois entre domínios federados.

Um conceito semelhante é apresentado pelo 5G NORMA (2017), onde um elemento funcional *Inter-slice Resource Broker* abrangente é proposto para gerenciar e orquestrar recursos para *slices* E2E em vários domínios de tecnologia. Cada domínio facilita uma instância local do padrão ETSI NFV-MANO interagindo com o *broker* (ETSI, 2022b). Muito embora diferentes domínios de tecnologia possam

pertencer a uma administração distinta, a solução pressupõe uma orquestração e gerenciamento unificados fornecidos por apenas um domínio administrativo.

[Taleb et al. \(2019\)](#) elaboraram uma proposta de orquestração multidomínio e *framework* de gerenciamento para enfrentar os desafios de serviço do *network slicing* ao utilizar recursos federados (multidomínio E2E).

Diversos trabalhos em arquiteturas de orquestração são encontrados na literatura, com foco em modelos verticais, nos quais mecanismos de garantia de SLA são propostas para aplicações específicas, por meio de modelos em uma arquitetura E2E, como 5G EVE, 5G Exchange (5GEx), 5GENESIS, 5GROWTH, 5GTANGO, 5G-Transformer, 5G-VICTORI e 5G-VINNI ([5G EVE, 2021](#); [5G EXCHANGE, 2023](#); [5GENESIS, 2022](#); [5GROWTH, 2023](#); [5GTANGO, 2020](#); [5G-TRANSFORMER, 2022](#); [5G-VICTORI, 2023](#); [5G-VINNI, 2021](#)).

No entanto, uma estratégia que tem mostrado bons resultados é desacoplar e distribuir recursos computacionais entre a borda e a nuvem. Para estes casos, a integração entre funções específicas da rede (borda e nuvem) ajuda a suportar diferentes tipos de aplicações e serviços, atendendo principalmente aos requisitos de QoS/QoE ([BARAKABITZE et al., 2020b](#)). As arquiteturas propostas nos projetos 5G NORMA, 5G!Pagoda, 5G-Crosshaul, 5GIK, 5G-MoNArch, MATILDA e NECOS mostram em detalhes essa integração ([5G NORMA, 2018](#); [5G-MONARCH, 2019](#); [BARAKABITZE et al., 2020a](#); [ESMAEILY; KRALEVSKA; GLIGOROSKI, 2020](#); [NECOS, 2019](#)).

Assim, vários trabalhos científicos (artigos) e alguns acadêmicos (teses) sobre arquiteturas de orquestração para atender mais de um domínio administrativo podem ser encontrados na literatura ([BADMUS, 2019](#); [BERNINI et al., 2020](#); [CASTAÑEDA et al., 2021](#); [CHAHBAR et al., 2021](#); [CISNEROS et al., 2022](#); [DALGKITSIS et al., 2022](#); [MANSO et al., 2021](#); [OLIVEIRA, 2019](#); [ORDONEZ-LUCENA et al., 2021](#); [RAFIQ et al., 2020](#); [SONKOLY et al., 2020](#); [TOUMI et al., 2021](#); [WU, ZHOU, 2021](#); [ZHANG et al., 2022](#)).

Ademais, vêm sendo desenvolvidos importantes projetos de pesquisas mundialmente em orquestração de redes móveis cujos alguns resumos de escopos dos trabalhos almejados estão ilustrados na [Tabela 4](#) ([5G EXCHANGE, 2023](#); [5G NORMA, 2018](#); [5G-TRANSFORMER, 2022](#); [5G!PAGODA, 2023](#); [5GTANGO, 2020](#); [MATILDA, 2023](#); [NECOS, 2019](#); [SLICENET, 2020](#); [T-NOVA, 2016](#); [VITAL5G, 2023](#)).

| Classe | Característica | 5G-Transversal | 5G Exchange (2023) | 5G NORMA (2018) | 5G-Transformer (2022) | 5G!Pagoda (2023) | 5GTANGO (2020) | MATILDA (2023) | NECOS (2019) | SliceNet (2020) | T-NOVA (2016) | VITAL5G (2023) |
|-------------------------|-----------------------|----------------|--------------------|-----------------|-----------------------|------------------|----------------|----------------|--------------|-----------------|---------------|----------------|
| Rede | Acesso | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | p | √ | x | √ |
| | Transporte | √ | √ | x | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| | Core | √ | √ | x | √ | √ | √ | √ | √ | √ | x | √ |
| | Datacenter | √ | √ | √ | √ | i | √ | x | √ | i | √ | x |
| Tecnologia | Cloud | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| | SDN | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| | NFV | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| | Legado | √ | √ | i | i | i | p | i | x | i | √ | x |
| Domínio – Provedor(es) | 1. Intra | √ | x | i | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| | 1. Inter | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| | 2. Múltiplos | √ | √ | i | x | √ | x | x | √ | √ | x | p |
| Funções de Orquestração | Serviços | √ | √ | i | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| | Recursos | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | p |
| | Ciclo de Vida | √ | √ | i | √ | √ | √ | √ | p | √ | √ | √ |
| | Open Source | √ | p | √ | p | √ | √ | √ | √ | i | √ | √ |
| | IA em Orquestração | √ | i | x | i | i | x | x | p | √ | x | x |
| | QoS E2E | √ | √ | x | i | i | √ | i | p | √ | x | i |
| | Framework Regulatório | p | p | x | x | x | x | x | x | x | x | x |

√ Plenamente x Não p Parcialmente i Indefinido

Tabela 4 – Escopos de trabalhos de projetos de pesquisas em orquestração de redes móveis

Fonte: adaptada de [Sousa et al. \(2019\)](#).

Pelo exposto, conclui-se que, dentre os projetos analisados, somente o:

- 5GEx, 5GTANGO, 5G-Transformer e 5G-Tvs apresentam uma solução de *network slicing* federado;
- T-NOVA, 5GEx e 5G-Tvs oferecem soluções completas de NSO que possam compatibilizar as redes legadas;
- 5GEx, NECOS, 5G!Pagoda, SliceNet e 5G-Tvs são totalmente capazes de orquestrar redes em multiprovedores;
- SliceNet e 5G-Tvs tratam a NSO com IA e QoS E2E;

- 5GEx e 5G-Tvs apresentam uma proposta parcial introdutória que possa conduzir um futuro *framework* regulatório;
- 5G-Tvs oferece uma proposta que atende a todas as classes e características que constam na [Tabela 4](#).

A [Tabela 5](#), por sua vez, compara o 5G-Tvs com modelos de orquestração hierárquica apresentados em outros trabalhos, sendo eles:

- 5G-EmPOWER, de [Riggio et al. \(2015\)](#);
- CORD, de [Peterson et al. \(2016\)](#);
- X-MANO, de [Francescon et al. \(2017\)](#);
- *Kista*, de [Rostami et al. \(2017\)](#);
- LanFL-WanFL Hierárquico, de [Yuan et al. \(2017\)](#);
- 5G OS, de [Dräxler et al. \(2018\)](#);
- ClusVNFI, de [Chen et al. \(2019\)](#);
- 5G!Pagoda, de [Kukliński et al. \(2019\)](#);
- NSOS, de [Afolabi et al. \(2020\)](#);
- 5GIK, de [Esmaeily, Kravetska e Gligoroski \(2020\)](#);
- ETSI NFVO-C, de [ETSI \(2020a\)](#);
- OSM-WireGuard, de [Haga \(2020\)](#);
- *Data Centers NFV Hierárquicos em Malha*, de [Kar, Wu e Lin \(2020\)](#);
- 5G-VINNI, de [Sánchez et al. \(2020\)](#);
- *Hyperstrator*, de [Santos et al. \(2020\)](#);
- Micro-operador 5G, de [Badmus et al. \(2021\)](#);
- 5G-CARMEN, de [Hadiwardoyo et al. \(2021\)](#);
- Extremo, de [Hortigüela \(2021\)](#);
- MonB5G, de [Kukliński et al. \(2021\)](#);
- Gerenciamento Hierárquico de SLA, de [Li et al. \(2021\)](#);
- *Framework de Orquestração Distribuída Hierárquica*, de [Choi \(2022\)](#);
- *Arquitetura Abrangente Distribuída Hierárquica*, de [Choi, Chun e Lee \(2022\)](#);

- Hexa-X, de [Pavón et al. \(2022\)](#);
- Orquestrador para Aprendizado Federado Hierárquico, de [Zhao e He \(2022\)](#).

| Trabalho | Abordagens da Orquestração | | | Tecnologias compatíveis | | Network slicing no segmento de rede | | | |
|--|----------------------------|--------------|---------------------|-------------------------|-----|-------------------------------------|----|------|-----|
| | Controle | Decisão | Desagregação lógica | SDN | NFV | RAN | TN | Core | DCN |
| Riggio et al. (2015) | Distribuída | Centralizada | Externa | √ | √ | √ | √ | × | × |
| Peterson et al. (2016) | Distribuída | Centralizada | Interna | √ | √ | √ | √ | √ | × |
| Francescon et al. (2017) | Hierárquica | Distribuída | Interna | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| Rostami et al. (2017) | Distribuída | Centralizada | Externa | √ | √ | √ | √ | × | √ |
| Yuan et al. (2017) | Hierárquica | Distribuída | Externa | × | √ | × | × | × | √ |
| Dräxler et al. (2018) | Hierárquica | Hierárquica | Interna | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| Chen et al. (2019) | Hierárquica | Distribuída | Interna | × | √ | × | × | √ | √ |
| Kukliński et al. (2019) | Hierárquica | Hierárquica | Interna | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| Afolabi et al. (2020) | Hierárquica | Hierárquica | Interna | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| Esmaily, Kravetska e Gligoroski (2020) | Hierárquica | Distribuída | Interna | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| ETSI (2020a) | Hierárquica | Distribuída | Interna | × | √ | × | × | √ | √ |
| Haga (2020) | Hierárquica | Distribuída | Interna | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| Kar, Wu e Lin (2020) | Hierárquica | Distribuída | Externa | √ | √ | × | × | × | √ |
| Sánchez et al. (2020) | Hierárquica | Hierárquica | Interna | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| Santos et al. (2020) | Hierárquica | Hierárquica | Interna | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| Badmus et al. (2021) | Hierárquica | Distribuída | Interna | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| Hadiwardoyo et al. (2021) | Hierárquica | Distribuída | Interna | √ | √ | √ | √ | × | √ |
| Hortigüela (2021) | Hierárquica | Distribuída | Interna | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| Kukliński et al. (2021) | Hierárquica | Distribuída | Interna | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| Li et al. (2021) | Hierárquica | Hierárquica | Interna | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| Choi (2022) | Hierárquica | Hierárquica | Interna | √ | √ | × | √ | × | × |
| Choi, Chun e Lee (2022) | Hierárquica | Hierárquica | Interna | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| Pavón et al. (2022) | Hierárquica | Distribuída | Interna | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| Zhao e He (2022) | Hierárquica | Distribuída | Externa | × | √ | × | × | × | √ |
| 5G-Transversal | Hierárquica | Distribuída | Interna | √ | √ | √ | √ | √ | √ |

Tabela 5 – Comparação qualitativa de características e recursos dos principais trabalhos em orquestração hierárquica

Fonte: adaptada de [Santos et al. \(2020\)](#).

As abordagens de orquestração destes trabalhos apresentados podem diferir na tomada de controle (do processo de orquestração) e de decisão (ou seja,

centralizada, distribuída ou hierárquica), no nível de desagregação de orquestração lógica (implementado pelo próprio orquestrador ou por aplicativos externos), bem como no suporte para diferentes domínios administrativos, segmentos de rede (RAN, TN — Transporte, Core ou DCN — *Datacenter*) e tecnologias ([SANTOS et al., 2020](#); [TALEB et al., 2019](#)).

De acordo com a comparação qualitativa de características e recursos dos principais trabalhos em orquestração hierárquica realizada, conclui-se que, assim como o 5G-Tvs, os trabalhos de [Afolabi et al. \(2020\)](#), [Badmus et al. \(2021\)](#), [Choi, Chun e Lee \(2022\)](#), [Dräxler et al. \(2018\)](#), [Esmaeily, Kralevska e Gligoroski \(2020\)](#), [Francescon et al. \(2017\)](#), [Haga \(2020\)](#), [Hortigüela \(2021\)](#), [Kukliński et al. \(2019\)](#), [Kukliński et al. \(2021\)](#), [Li et al. \(2021\)](#), [Pavón et al. \(2022\)](#), [Sánchez et al. \(2020\)](#), e [Santos et al. \(2020\)](#) apresentam soluções SDN/NFV de *network slicing* federado.

Contudo, apenas os trabalhos de [Badmus et al. \(2021\)](#), [Esmaeily, Kralevska e Gligoroski \(2020\)](#), [Francescon et al. \(2017\)](#), [Haga \(2020\)](#), [Hortigüela \(2021\)](#), [Kukliński et al. \(2021\)](#), e [Pavón et al. \(2022\)](#) propõem soluções com controle hierárquico, decisão distribuída e desagregação lógica interna como o 5G-Tvs.

2.7 DESAFIOS E ASPECTOS EVOLUCIONÁRIOS

À medida que o 5G evolui sob pesquisa e desenvolvimento em ambientes controlados e reais (implantações comerciais) em diversos países, ocorrem problemas e soluções que implicam desafios e tendências de melhorias tecnológicas necessárias, cujas considerações seguem nesta seção.

2.7.1 5G versus Wi-Fi

O advento das tecnologias 5G e Wi-Fi 6/6E (IEEE 802.11ax)¹³ oferece opções e recursos para aprimorar as redes corporativas e expandir a implantação da IoT. O uso do 5G oferece uma opção adicional poderosa para gerenciar locais corporativos

¹³ Assim como o 5G, o Wi-Fi evoluirá em novas gerações, sendo a próxima esperada como Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be), trazendo melhorias ([AMDPCS, 2023b](#)).

fisicamente separados, enquanto o Wi-Fi 6/6E oferece taxas de transferência de dados aumentadas e conectividade aprimorada nos interiores dos edifícios (ALCATEL-LUCENT ENTERPRISE, 2023; CISCO, 2019).

Pode-se obter a simplicidade do Wi-Fi com a capacidade de implantar redes privadas em espectro de uso gratuito. Porém, também se pode obter os benefícios do 5G — maior segurança, mais escalabilidade, melhor cobertura — sem a necessidade de uma Telco (ERICSSON, 2020a).

Segundo Blackman (2022), espera-se que o 5G e Wi-Fi coexistirão como soluções complementares. O Wi-Fi continuará sendo a opção principal para conectividade corporativa básica — computadores, *smartphones*, impressoras e outros dispositivos comerciais padrão. Por outro lado, as empresas utilizarão redes 5G privadas quando precisarem de recursos e serviços mais robustos, tais como em cenários de missão crítica: automação industrial e robótica, conectividade de IoT e implantações de alta mobilidade ou escaláveis em grandes e complexas áreas de cobertura internas e externas (BICS, 2023; CELONA, 2023; TALEB; AFOLABI; BAGAA, 2019).

A percepção de 5G privado e Wi-Fi como tecnologias complementares é também um indicador de inovações ainda mais interessantes que estão por vir. Os primeiros casos de uso de 5G privado e Wi-Fi 6E concentrar-se-ão em aumentar as configurações de Wi-Fi existentes para ativar casos de uso avançados, como análise de vídeo em alta definição, robótica móvel automatizada e soluções de realidades aumentada (*Augmented Reality* — AR) e virtual (*Virtual Reality* — VR).

À medida que mais bandas de espectro se tornarem disponíveis, mais opções de conectividade otimizada surgirão, de acordo com o que é importante para o caso de uso em termos de desempenho, confiabilidade, segurança, custo, eficiência energética etc.

2.7.2 Open RAN

Outra mudança de paradigma para redes 5G desagregadas vem com a Rede de Acesso ao Rádio Aberta (*Open RAN*) ou, simplesmente, O-RAN (AORA, 2022).

A O-RAN surge como um termo para padrões de toda a indústria para interfaces RAN que suportem a interoperação entre os equipamentos de diferentes fornecedores, sem a necessidade de HW e SW proprietários, o que estimulará a concorrência e, teoricamente, reduzirá os custos, beneficiando o Usuário Final (KINNEY, 2022b).

Em outras palavras, a O-RAN constitui-se através da “softwarização” da área de rádio (*Software-Defined Radio* — SDR), sendo uma forma moderna de injetar concorrência no mercado de equipamentos de rádio, garantindo que produtos de diferentes fornecedores sejam interoperáveis (interfaces que não são proprietárias). Isso permite independência suficiente entre as operadoras para gerenciar, de forma eficiente, suas próprias funções de rede em nuvem sob uma infraestrutura compartilhada de RAN, evitando quaisquer conflitos potenciais (ANRITSU, 2022; HABIBI, 2019; NTT DOCOMO, 2021).

De acordo com Craven (2021), os padrões de O-RAN usam princípios e tecnologias de RAN virtual (*virtual RAN* — vRAN) porque a vRAN traz recursos como maleabilidade de rede, segurança aprimorada e custos reduzidos de OPEX e de CAPEX. Por exemplo, com a virtualização, as Telcos podem ter um tempo de comercialização mais rápido, pois trazer um novo recurso para a rede pode ser tão fácil quanto atualizar remotamente suas VNFs.

As principais organizações que trabalham os padrões da O-RAN são o Telecom Infra Project (TIP) e a O-RAN Alliance. O TIP tem seu padrão O-RAN baseado nos princípios da desagregação de HW e SW, interfaces não proprietárias e flexibilidade. A colaboração para o desenvolvimento da O-RAN vem sendo facilitada e incentivada pela O-RAN Alliance.

A O-RAN Alliance baseia-se nos princípios fundamentais de sistemas abertos (HW e SW genéricos) e inteligência rumo à automação para implantar e operar a rede. Caracteriza-se por ser uma comunidade mundial de operadoras de rede móvel, fornecedores e instituições de pesquisa com o objetivo de, assim, remodelar o segmento de RAN em um ecossistema mais inteligente, aberto, virtualizado e totalmente interoperável.

A [Figura 10](#) ilustra a arquitetura lógica de O-RAN, cujos elementos-chave são:

- *Framework* de Orquestração e Gerenciamento de Serviços (SMO), que inclui uma malha de integração e serviços de dados para as funções que gerencia ([WICK; XAVIER, 2023](#));
- RICs, sendo eles: (i) RIC não em Tempo Real (TR), que usa fluxos de trabalho com IA para controlar e melhorar os elementos e recursos de O-RAN; e (ii) RIC quase em TR, que controla mais especificamente elementos e recursos com coleta de dados granulares e comunicação pela interface E2;
- *O-Cloud*, uma plataforma de computação em nuvem, composta pelos nós da infraestrutura física usando a arquitetura O-RAN, que cria e hospeda as VNFs usadas pelos RICs e outros elementos de infraestrutura;
- Unidade Central O-RAN (O-CU), que gerencia diferentes protocolos a nível dos planos de controle e do usuário;
- Unidade Distribuída O-RAN (O-DU), que hospeda um conjunto de protocolos de controle de *link* de rádio e interfaces físicas;
- Unidade de Rádio O-RAN (O-RU), que processa as frequências de rádio recebidas pela camada física da rede e as envia ao O-DU através de uma interface *fronthaul*. O O-RU é o único elemento da arquitetura da O-RAN não gerenciado pelo SMO. Em vez disso, é gerenciado pelo O-DU. A virtualização do O-RU será estudada e trabalhada futuramente.

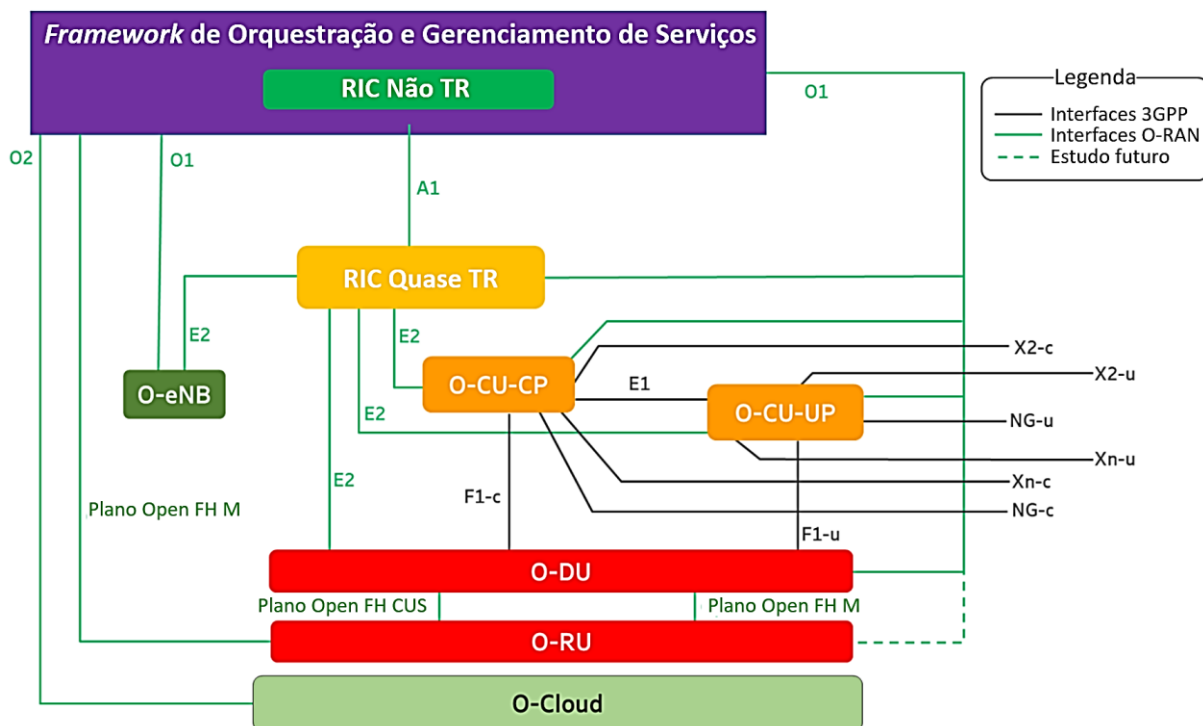


Figura 10 – Arquitetura lógica de O-RAN

Fonte: adaptada de [O-RAN Alliance \(2022\)](#).

As seguintes interfaces são definidas e mantidas pela O-RAN Alliance, e têm detalhes especificados em [O-RAN Alliance \(2022\)](#):

- interface A1;
- interface O1;
- interface O2;
- interface E2;
- interface de *Open Fronthaul*.

Já as interfaces a seguir são definidas e mantidas pelo 3GPP, mas fazem parte da arquitetura O-RAN e estão apresentadas em [O-RAN Alliance \(2022\)](#):

- interface E1;
- interface F1-c;

- interface F1-u;
- interface NG-c;
- interface NG-u;
- interface X2-c;
- interface X2-u;
- interface Xn-c;
- interface Xn-u.

Nota-se que os RICs da O-RAN serão fundamentais para permitir a programação, a inteligência e a desagregação da rede. Por meio de planos de controle e gerenciamento, os RICs acessam o panorama geral da O-RAN, como elementos, conexões e funções. Isso permite ao RIC tomar decisões inteligentes sobre a O-RAN para otimizar o desempenho, desde a otimização de recursos e serviços, IA, otimização de energia e garantia do *slice* de rede. Então, permite-se casos de uso avançados da rede, oportunidades de receita, como redes móveis privadas e localizadas por meio de geolocalização e *network slicing*; e maiores oportunidades de economia de OPEX e CAPEX, com melhor sustentabilidade no consumo de energia.

Para se aproveitar todo o potencial econômico da O-RAN, a automação inteligente em escala será fundamental. Isso exige a participação de fornecedores, Telcos e integradores de sistemas porque nenhuma empresa possui toda a tecnologia e conhecimento necessários para fazê-lo sozinha.

De acordo com [Mishra \(2022\)](#), essa colaboração exigirá progresso em três áreas principais:

- abordagem para testes padronizados e não proprietários, de forma automatizada e baseada em APIs, compatíveis com o 3GPP, que emulem a camada física, equipamentos de usuário e estações base;
- plataformas de automação padronizadas para operações de rede. Essas plataformas automatizariam tanto a rede quanto os alertas de operação que ela gera;

- arquitetura de orquestração que seja impulsionada por APIs não proprietárias, incluindo plataformas e modelos de dados comuns, a fim de que os desenvolvedores possam criar casos de uso em torno deles.

O 6G, provavelmente, trará características fundamentais para atender redes mais resilientes, críticas, unificadas, distribuídas e automatizadas do que o 5G.

Nesse sentido, a desagregação, virtualização, inteligência distribuída e outros componentes para implantação do 6G nativo da nuvem (*cloud-native*¹⁴) serão mandatórios.

Com automação em escala para O-RAN, pode-se obter telemetria significativa, aproveitada por operações de ML (MLOps) sob o desenvolvimento e teste de algoritmos. Isso garantirá que as redes funcionem em ambientes heterogêneos e futuristas (RAFIQ et al., 2020).

Kinney (2021) considera que o progresso da indústria nos últimos anos prova que o ecossistema O-RAN será um componente crítico para dimensionar as futuras implantações de redes 6G.

Será interessante considerar CI/CD aplicado a redes de telecomunicações em O-RAN para testes e medições evolutivos em conjunto com o 6G através, por exemplo, da paridade de ambiente virtualizado e gêmeo digital de rede (KINNEY, 2022a).

2.7.3 Do 5G *Non-Standalone* ao *Standalone*

Brown (2022) avalia que a implementação do 5G SA é uma tarefa desafiadora, atrelada, dentre outros, aos seguintes elementos-chave:

¹⁴ *Cloud-native* ou computação nativa em nuvem refere-se à abordagem para criar aplicativos e serviços especificamente para um ambiente de computação em nuvem, e às características desses aplicativos e serviços. Os aplicativos nativos da nuvem são mais fáceis de atualizar porque são feitos de microsserviços executados em contêineres, o que significa que um aplicativo é dividido em partes que podem ser atualizadas individualmente.

- infraestrutura nativa da nuvem: não é uma evolução direta de um *core* virtual, mas uma rearquitetura e reconstrução de toda a plataforma principal, o que na prática, geralmente, significa uma plataforma de nuvem computacional em telecomunicações mais ampla. Além disso, o 5G SA exige padrão operacional que incentiva testes, implantação, iteração e otimização contínuos para aprimorar, refinar e melhorar a rede para todos os usuários;
- implementação do 5GC: depende do mapeamento da arquitetura 3GPP para uma infraestrutura nativa da nuvem e de novas interfaces, protocolos, funções de rede, sinalização, bases de dados de assinantes, sistemas de monitoramento, tecnologias de roteamento etc.;
- cobertura de RAN 5G: para operar uma rede SA, a cobertura precisa ser boa o suficiente para suportar sinalização de plano de controle e tráfego de *uplink*, o que significa uma área de cobertura equivalente a 4G. Isso, por definição, é um investimento enorme que leva tempo;
- dispositivos compatíveis com o SA: o 5G SA agora está disponível em *smartphones* de última geração, mas inicialmente com recursos limitados. Novos dispositivos com capacidade de SA permearão a base de assinantes ao longo do tempo, mas o ponto de inflexão do mercado ainda parece distante.

Então, a migração do 5G NSA ao 5G SA exige que as Telcos repensem seus principais KPIs: segurança, recuperação automática de falhas de recursos de rede, tempo de resposta e outros fatores devem ser expostos, observados, medidos e otimizados. Será necessário também considerar a questão da sustentabilidade em função do possível aumento do consumo de energia demandado pelo 5G SA, tal como da definição de padrões que possam ser implementados pela indústria (COHEN, 2022; RIEKSTIN et al., 2018).

2.7.4 Network slicing e a nuvem de rede

Na visão de Stern (2021), para que o *network slicing* realmente evolua de demonstrações de provas de conceito para implementações em escala de produção

com sucesso, as Telcos terão de evoluir ferramentas e processos operacionais. Para que isso então ocorra, será necessário considerar-se que:

- a) existem pelo menos cinco domínios (CSMF, NSMF, RAN, transporte e *core*) para o gerenciamento dos *slices*. Por exemplo, o NSMF deve ser capaz de se integrar entre os domínios para garantir a criação e o gerenciamento adequados de um número potencialmente grande de instâncias de *slices*, enquanto os NSSMFs devem ser projetados para interagir com tipos específicos de funções de rede apropriadas ao seu domínio;
- b) estruturas personalizadas são essenciais, abordando ambientes distintos. Cada provedor de serviços precisará considerar quais aspectos de sua infraestrutura ele terá controle direto e quais dependerá de terceiros para fornecer. Assim, embora cada provedor de serviços possa estar em conformidade com a sua estrutura de *network slicing*, cada implementação dessa estrutura terá uma aparência diferente;
- c) a exposição será um importante facilitador e diferenciador. As Telcos precisarão considerar cuidadosamente o nível e o tipo de controle a que expõem seus clientes, mitigando os riscos com uma estrutura eficaz de controle e monitoramento;
- d) as operações serão mais difíceis do que a criação dos *slices*. Os verdadeiros desafios virão quando as equipes de operações se tornarem responsáveis pelo gerenciamento de uma coleção de instâncias de *slices* nas redes móveis. Processos como gerenciamento de mudanças precisarão evoluir para incluir considerações sobre o impacto para instâncias de *slices* criados dinamicamente. Esses processos serão novos para a maioria das equipes de operações e exigirão treinamento e ferramentas que atualmente não existem na maioria dos ambientes de operação. Isso exigirá um nível mais alto de coordenação entre as equipes de RAN, transporte e *core* do que existe na maioria das Telcos atualmente.

Visto o dinamismo das redes 5G e B5G, ou seja, a capacidade disponível, a latência e os recursos necessários poderem mudar em segundos, [Cohen \(2021\)](#)

considera que, para se criar e modificar um *slice*, será necessária uma solução dinâmica e eficiente em nuvem: a nuvem de rede (*network cloud*).

A nuvem de rede usa um conjunto unificado de recursos e pode alocar cada recurso para uma carga de trabalho diferente (ou seja, uma instância de serviço ou função de rede). Isso significa que se pode criar um *slice* que otimizará um conjunto de parâmetros (por exemplo, latência e recursos) e os manterá otimizados, de acordo com as condições da rede e sua infraestrutura.

A solução nuvem de rede permitirá a reconexão da conectividade “física” de maneira virtual. Conectar diferentes funções de rede em um *slice* não demandará nenhuma alteração física. Como os *slices* e cargas de trabalho/funções de rede residem na mesma infraestrutura de HW, mover recursos de um *slice* a outro ou duplicar e colocar uma função de rede será apenas uma questão de alteração de realizada por SW — gerenciada pelo sistema de orquestração (COHEN, 2021; LAHLOU et al., 2022; MARTIN, 2023).

Assim, a Figura 11 ilustra a evolução esperada das soluções de computação baseadas em PNF, VNF, CNF à nuvem de rede.

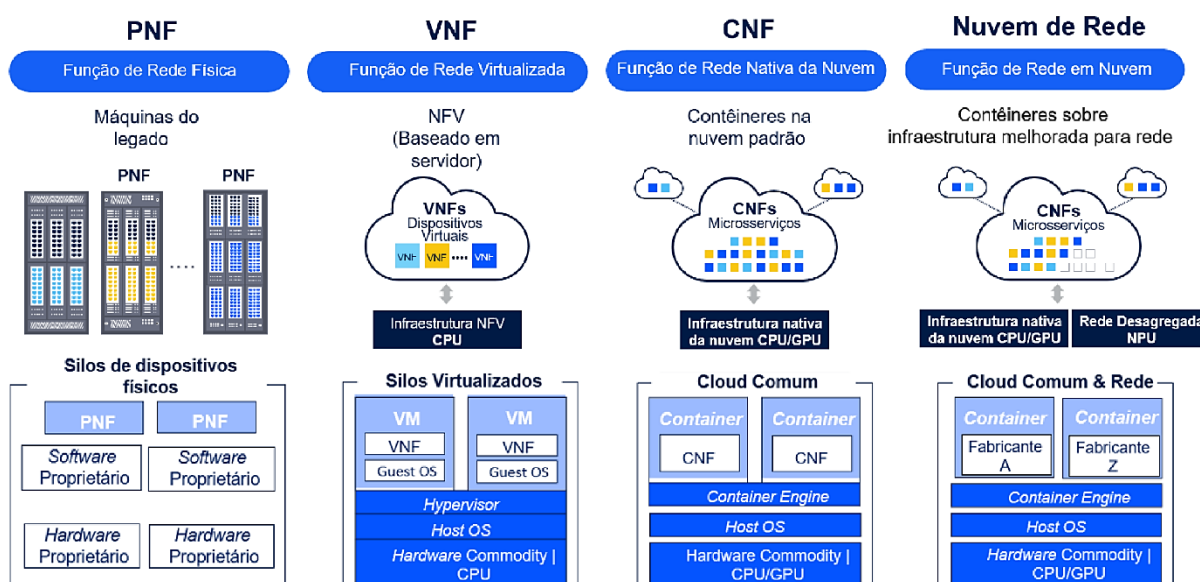


Figura 11 – Evolução da função de rede física à nuvem de rede

Fonte: adaptada de Almog (2022).

2.7.5 *Desafios operacionais*

As Telcos enfrentam vários desafios operacionais à medida que o 5G evolui e amadurece, tanto em termos de implantação e execução de novas redes 5G, quanto no gerenciamento dessas novas redes com as redes 4G existentes. Portanto, [Hill \(2022a\)](#) avalia alguns dos desafios operacionais para redes 5G que deverão ser considerados, a saber:

- escalabilidade: à medida que o 5G está sendo implantado, o número e os tipos de nós de rede estão crescendo “exponencialmente”, de modo que a capacidade de implantar e gerenciar essa rede em maior escala torna-se crucial;
- velocidade de implantação: o 5G não apenas está sendo implantado em larga escala, mas também em uma linha do tempo agressiva;
- integração: diretamente relacionada à implantação, em termos de como as Telcos possam garantir que as redes 5G funcionem bem com as 4G existentes — o que é particularmente importante porque as redes 5G NSA dependem diretamente do LTE EPC como âncora para transportar o tráfego do plano de controle;
- teste e suporte das novas tecnologias 5G: como as Telcos devem garantir o atendimento aos requisitos que os clientes demandarão sob vários serviços 5G ([PAOLINI, 2023](#));
- complexidade da rede: gerenciar a rede como um todo é um dos desafios operacionais mais significativos no 5G. É agravado pela migração do 5G NSA ao SA, pois as dificuldades nas operações e manutenção da rede, assim como o cumprimento dos SLAs aos Usuários Finais, aumentam até que a rede esteja eficientemente estável em 5G SA ([ACENTURY, 2023](#)).

2.7.6 5G otimizado¹⁵

Zethzon (2022) expõe que, para se construir uma rede 5G verdadeiramente otimizada em relação ao que a filosofia e os padrões do 5G demandam frente aos novos modelos de negócios que surgirão, existem seis aspectos essenciais para o sucesso que devem ser considerados:

- 1) **Infraestrutura nativa da nuvem.** A rede precisa oferecer suporte a funções de rede nativas da nuvem e SW baseado em contêiner. Isso é feito com a introdução de uma plataforma de contêiner como serviço (*Container-as-a-service* — CaaS) certificada na Fundação de Computação Nativa em Nuvem (*Cloud Native Computing Foundation* — CNCF), baseada em Kubernetes (K8s). As principais características dessa plataforma incluem automação eficiente de *loops* de CI/CD, gerenciamento automatizado do ciclo de vida e operações de funções de rede em contêiner (CNFs) em uma infraestrutura definida por SW gerenciada (*Software-Defined Infrastructure* — SDI) (BASUMALLICK, 2022; THE LINUX FOUNDATION, 2022);
- 2) **Core 5G.** Para otimização do 5G, o 5GC é um pré-requisito em combinação com o 5G SA. No futuro, isso só será acentuado ainda mais, pois o 5GC será a plataforma para inovação e padronização. O novo 5GC representa uma mudança de paradigma. Sua arquitetura SBA, projetada para implementação nativa em nuvem, traz novas oportunidades e desafios à medida que transforma a maneira atual como o SW é protegido, automatizado e gerenciado em ciclo de vida (ESFANDIARI, 2023; FINEGOLD, 2022);
- 3) **Voz 5G.** Com o 5G, há novas oportunidades para desenvolver serviços de voz e comunicação mais avançados, incluindo chamadas interativas, combinações com AR e VR e outros futuros serviços de comunicação. A introdução da voz 5G acontecerá em diferentes fases de evolução da tecnologia, dependendo da velocidade em que a cobertura 5G estiver disponível, bem como das capacidades dos dispositivos. As Telcos devem

¹⁵ Trata-se da extração de todo o potencial que o 5G poderá oferecer aos seus usuários.

planejar cuidadosamente a evolução do serviço de voz 5G para garantir o desempenho ideal de voz/dados em redes 5G;

- 4) **Automação e orquestração.** Maior automação e orquestração aprimorada são essenciais para gerenciar os novos recursos e complexidades que o 5G oferece, assim como ter melhor controle dos custos operacionais e maior capacidade de atendimento aos requisitos de negócios (CASTAÑEDA et al., 2021; CISNEROS et al., 2022; OLIVEIRA, 2019; ORDONEZ-LUCENA et al., 2021; WU, ZHOU, 2021; ZHANG et al., 2022). Os “silos” tradicionais terão de ser substituídos por uma abordagem mais horizontal baseada em serviços, em que a orquestração federada entre domínios se tornará uma necessidade de negócios. Um exemplo disso é o *network slicing*, que será crucial para abordar novas oportunidades de negócios nos segmentos corporativo e de consumo. Enfatiza-se aqui também a nuvem distribuída e seu potencial de computação na borda e além da borda da rede, pois a redução da latência deverá ocorrer E2E e será vital para os serviços críticos, tais como uma telecirurgia (BATISTA JR et al., 2019a; VENNAN, 2020a, 2020b);
- 5) **Operações e gerenciamento do ciclo de vida.** A implantação do 5GC marca a primeira vez que a tecnologia de computação nativa em nuvem será introduzida no *core* das redes móveis, o que trará benefícios como decomposição de SW e ciclo de vida aprimorado, maior agnosticidade entre aplicativos e infraestrutura subjacente, níveis mais altos de resiliência de aplicativos e maiores graus de automação e orquestração. As Telcos, então, devem considerar a introdução de soluções modernas para enfrentar os desafios operacionais e, ao mesmo tempo, definir o escopo de uma arquitetura com componentes legados e virtualizados no *core*. Isso significa investir em tecnologia que possa aproximá-los de uma rede sem toque, para criação e entrega rápida de serviços inovadores que também aproveitam a computação de borda e o *network slicing* (AARNA NETWORKS, 2022; ETSI, 2022a; LIYANAGE et al., 2022; RAMSAY; GUPTA, 2022);
- 6) **Segurança.** Com novos casos de uso e o aumento do número de dispositivos conectados, a rede ficará mais exposta a ameaças. Segurança não é apenas detectar ameaças e fornecer mitigação. É uma estrutura completa que vai

desde a implementação de padrões de segurança até o monitoramento e operação de uma variedade de aplicativos de segurança em toda a rede 5G. Com a introdução do 5GC, as soluções atuais e futuras precisam ser avaliadas e automatizadas. A automação de segurança oferece a capacidade de escalar facilmente o gerenciamento de segurança em toda a rede, manter-se atualizado sobre o *status* de segurança e reagir a novos riscos de segurança. Isso também abre oportunidades de negócios em segurança ([AMDOCS, 2023a](#)).

2.7.7 Do 5G ao 6G

Enquanto as implantações do 5G ocorrem, o desenvolvimento de padrões para melhorias do 5G continua. Mais pesquisadores e membros da indústria também trabalham em pesquisas científicas e tecnológicas sobre o que serão as redes 6G, ainda sem padronização consolidada ([ERICSSON, 2022a](#); [WOODEN, 2023](#)).

[Hill \(2022b\)](#) traz a discussão que o 5G tem como uma de suas principais missões expandir o uso de comunicações móveis em mercados verticais, além dos aplicativos tradicionais de *smartphones*. Há um foco substancial no setor industrial. A *release* 16 do 3GPP, por exemplo, traz a camada de arquitetura do ativador de serviço (*Service Enabler Architecture Layer* — SEAL).

O SEAL reestrutura a arquitetura no nível do *core* da rede para expandir os recursos além dos casos de uso de comunicações móveis tradicionais, sob protocolos e recursos para menor latência, alta confiabilidade e *sidelink* para comunicações veiculares, como também usos de comunicações de missão crítica.

Nas *releases* 17 e 18 do 3GPP, o SEAL deverá ser aprimorado, com foco em localização e posicionamento, assim como os primeiros padrões de interconexão de redes terrestres e NTN, e padrões associados à computação de borda ([5G AMERICAS, 2022](#)).

Todo esse trabalho vem, portanto, para expandir a rede e seus recursos ao uso em outros setores e torná-la ainda mais programável, com padrões associados a melhorias do sistema.

A *release* 18 do 3GPP deverá trazer uma contribuição significativa sobre a adição de IA ao 5G por meio de um foco inicial na interface aérea (G-ESTEVEZ et al., 2019). Nesse sentido, a extensão em que a IA estará integrada no sistema geral será uma das diferenças definidoras entre o 5G e 6G.

Espera-se que o 6G traga, a partir de 2030, a IA desde o início, não apenas como um complemento ou aprimoramento (ABOUAOMAR et al., 2023). No geral, espera-se também que o 6G ofereça padrões mais centrados em SW, que se estendam não apenas a verticais industriais/empresariais, mas sim com flexibilidade maior. Por exemplo, há a possibilidade de automação da cadeia de suprimentos global, bem como “telepresença imersiva” para que pessoas ou máquinas em locais remotos possam interagir de maneiras que combinem simulação/emulação e operações (NIN, 2023).

O 6G permitirá ainda mais a fusão dos mundos físico, digital e virtual. As interações imersivas com XR trarão comunicações conjuntas onipresentes no Metaverso, suportando nativamente a computação distribuída.

Existem três principais motivos pelos quais o 5G evoluirá ao 6G:

- aproveitar os avanços da tecnologia de *Core* (em áreas sem fio e adjacentes, como semicondutores e ciência de materiais);
- suportar as necessidades de sustentabilidade da sociedade (crescimento econômico, acesso digital e iniciativas ecológicas) sob o que será a “Indústria 5.0” (BLACKMAN, 2023b);
- atender aos novos requisitos para experiências que não podem ser concluídas com 5G: o 6G, mais confiável, resiliente e seguro do que o 5G, tende a mesclar a computação com comunicação, a ponto de trabalhar em sistemas que, atualmente, não usam comunicações móveis (QUALCOMM, 2022).

Por outro lado, partindo-se das discussões estabelecidas sobre as redes 5G, por exemplo, pelo Think Tank USP (BORSANELLI, 2023), haverá também mais riscos reais para o desenvolvimento do 6G que representam a possibilidade de fragmentação na tecnologia em função de tensões geopolíticas e desejos concorrentes por liderança tecnológica (HILL, 2022b).

3 CONCEPÇÃO DO *FRAMEWORK* PARA ORQUESTRAÇÃO

Este capítulo apresenta a concepção do 5G-Transversal (5G-Tvs), introduzindo o levantamento de requisitos, avaliando modelos de orquestração similares da literatura e culminando com o projeto e descrição do *framework* conceitual proposto.

Para [Shehabuddeen et al. \(1999\)](#) apud [Carvalho \(2013\)](#) e [Schmitz \(2017\)](#), um *framework* conceitual suporta o entendimento, a comunicação de estruturas e relacionamentos dentro de um sistema com propósito específico, identificando seus elementos e relações para nortear análises, explicar processos e prever resultados.

Um *framework* conceitual pode ser um plano de conceitos interligados que, juntos, fornecem a compreensão abrangente de um ou mais fenômenos, servindo à solução de problemas complexos sob abordagem multidisciplinar ([JABAREEN, 2009](#)).

Inicialmente, cabe notar que o que 5G-Tvs reflete a proposição de um *framework* conceitual completo e federado de NSO hierárquica e distribuída em regiões, domínios administrativos distintos (multiprovedores ou não) e heterogêneos — daí o nome 5G-Transversal.

Neste sentido, o termo *framework* do 5G-Tvs refere-se a uma abordagem de um sistema completo de NSO, sob uma proposição em alto nível que visa atender às características de requisitos das redes 5G e B5G, de acordo com a própria arquitetura do 5G ([5G-PPP, 2021](#)).

O 5G-Tvs é composto por um elemento chamado Metaorquestrador dos Serviços de Rede ou Orquestrador-M, aderente ao 5G e B5G, o qual terá papel fundamental sobre a QoS e continuidade dos serviços E2E, no nível do usuário e suas demandas, que poderão ser variadas e dinâmicas.

O Orquestrador-M, pois, deverá estabelecer e manter o *slice* que atenda aos requisitos do serviço alvo ao menor custo, durante o ciclo de vida do *slice*, trabalhando em tempo de operação e visando aos requisitos e à continuidade dos serviços demandados.

Em adição, o 5G-Tvs caracteriza-se por apresentar uma solução encadeada de integração e orquestração hierárquica e distribuída dos serviços de rede junto a

outros orquestradores, intra-regionais, possibilitando oferecer fluentemente o processo de *network slicing* E2E e:

- balanceamento de carga entre os orquestradores;
- contextualização de regiões de orquestração;
- metaorquestração em terceiro nível;
- redundância parcial e total dos orquestradores.

O NSO funcionará de forma horizontal, em tempo de operação, avaliando as necessidades dos usuários e direcionando suas solicitações para a infraestrutura com as melhores rotas de execução e os menores custos. Para isso, o 5G-Tvs atenderá ao escopo a seguir:

- execução do *network slicing* E2E;
- compatível com as tecnologias de *cloud*, SDN/NFV e legado;
- atuação sobre um ou mais domínios administrativos distintos;
- orquestração dos serviços e recursos de rede, bem como ciclo de vida dos *slices*;
- solução de código aberto;
- utilização de IA;
- cumprimento de QoS E2E.

3.1 LEVANTAMENTO DE REQUISITOS

Após extensa revisão sistemática da literatura, visando identificar o estado da arte (pesquisa junto aos organismos de padronização dos requisitos, indicadores, modelos de redes 5G/B5G e informações relevantes sobre o desenvolvimento das redes 5G/B5G, assim como das principais lacunas de pesquisa), aponta-se os requisitos, funcionais e não funcionais, aos quais o *framework* conceitual proposto deverá atender.

O principal objeto de estudo foram as teses e artigos publicados nos principais periódicos e eventos nas áreas relacionadas ao 5G e B5G, redes de comunicação de dados e computação em nuvem, preferencial, mas não limitadamente a 2018 e anos subsequentes.

Na elicitação de requisitos, buscou-se identificar características do *framework* proposto. Os pilares conceituais e de referência a serem usados neste passo estão descritos no [Capítulo 2](#) (Estado da arte das redes móveis emergentes) deste documento.

Os requisitos funcionais são os relacionados às necessidades da existência de serviços, funcionalidades específicas, assim como técnicas e ferramentas de gerenciamento de recursos. Estes recursos podem se referir tanto aos HWs que fazem parte do sistema (e os recursos destes, como gerenciamento de energia) quanto aos SWs.

Os requisitos não funcionais são aqueles relacionados, por exemplo, ao desempenho, qualidade do serviço, segurança, disponibilidade e confiabilidade¹⁶ do sistema.

Neste trabalho, entende-se o requisito funcional como sendo uma característica, funcionalidade ou necessidade que o sistema deve contemplar, ou seja, um requisito funcional é aquilo que o sistema deve fazer. Em outras palavras, o requisito funcional é o requisito necessário para o funcionamento e que define o funcionamento do sistema.

Já o requisito não funcional é aquele que descreve não o que o sistema fará, mas, em função do ambiente em que o sistema está inserido, o quão bem ou mal o fará. Assim, o requisito não funcional é mensurável e pode, por exemplo, caracterizar-se por um requisito de desempenho, isto é, proporcionar atribuição da qualidade do desempenho do sistema.

¹⁶ A disponibilidade corresponde à probabilidade de um determinado sistema estar operando corretamente, isto é, de acordo com sua especificação de requisitos, e disponível para realizar suas funções num instante de tempo. Por outro lado, a disponibilidade difere da confiabilidade, pois a confiabilidade refere-se a uma probabilidade associada a um intervalo de tempo ([CAMARGO JR, 2020](#)).

Tanto os requisitos funcionais quanto os não funcionais possuem importância no desenvolvimento do 5G-Tvs. Dessa forma, o 5G-Tvs deve suportar os seguintes requisitos funcionais:

- 1) **Agnosticismo.** O *slice* pode suportar um único serviço (mapeamento 1:1) ou vários serviços (mapeamento 1:n). Nesse último caso, o gerenciamento do ciclo de vida do serviço deve ser separado do gerenciamento do ciclo de vida do *slice*;
- 2) **Atender multidomínio.** O *network slicing* pode envolver apenas um ou vários domínios administrativos distintos, sendo que cada domínio pode pertencer a uma ou mais Telcos¹⁷;
- 3) **Automatizar funções.** O sistema deve operar automaticamente, sem a necessidade da intervenção humana, ou seja, os orquestradores devem suportar o *network slicing* dinâmico em vários *slices*, tanto a nível de criação quanto modificação;
- 4) **Basear-se em políticas e intenções.** As operações dos *slices* e o gerenciamento do ciclo de vida devem ser baseados em políticas técnico-funcionais preestipuladas, utilizando-se também da IA;
- 5) **Cobrir intra e/ou inter-regiões.** O sistema deve orquestrar *slices* em uma ou mais regiões geográficas;
- 6) **Compatibilizar sistemas legados.** Para as Telcos, será uma grande vantagem usarem sistemas baseados em HW existentes no contexto de *network slicing*. Isso é especialmente verdadeiro à RAN, que normalmente consome 70 % do custo total da rede móvel (KUKLIŃSKI et al., 2019). Posteriormente, sugere-se a migração para soluções de rede totalmente segmentadas e baseadas em SW;
- 7) **Descentralização.** A estrutura funcional do sistema deve garantir que a arquitetura interna de um *slice* deva ser composta pelos Planos de Dados, Controle, Aplicação, Gerenciamento e Recursos, cada um com funções

¹⁷ No 5G-Tvs, o termo “Telco” refere-se a um provedor de infraestrutura e operador de redes públicas 5G/B5G.

específicas no encaminhamento de dados, controle da conectividade, comunicação em nível de aplicação, gerenciamento da rede virtual e dos recursos subjacentes utilizados. Os planos também podem ser fatiados parcialmente tendo uma parte comum que é usada por muitos *slices*;

- 8) **Escalabilidade.** O gerenciamento e orquestração dos *slices* devem ser escaláveis, permitindo alocação dinâmica e eficiente de recursos para *slices* em um ou mais domínios, intra ou inter-regionalmente, garantindo a densidade de conexões necessárias;
- 9) **Federar o *slice*.** Um *slice* federado pode ser composto por *slices* ou *sub-slices* pertencentes a diferentes domínios e/ou regiões, da RAN ao *core* da rede;
- 10) **Flexibilizar serviços e recursos.** O ciclo de vida do *slice* deve ser gerenciado sob o aspecto de adaptação às necessidades momentâneas dos serviços e recursos;
- 11) **Garantir mobilidade.** Se um *slice* for composto em RANs distantes, um mecanismo de continuidade deve ser implantado dentro do *slice*, visando à continuidade do(s) serviço (s).

O 5G-Tvs deve suportar também os seguintes requisitos não funcionais:

- 1) **Disponibilidade.** Deve haver redundância entre os Orquestradores para garantia da disponibilidade total do sistema, bem como balanceamento de carga entre os Orquestradores assim que houver sobrecarga em qualquer um de seus módulos funcionais. Neste contexto, a sobrecarga de trabalho caracteriza-se por uma carga maior do que $x\%$ ¹⁸;
- 2) **Manutenibilidade.** Manutenções preventivas e corretivas devem ser suportadas no sistema sem que o mesmo tenha seu desempenho e confiabilidade comprometidos;
- 3) **Monitoramento.** Os Orquestradores devem suportar recursos de monitoramento de alto nível quanto aos aspectos de segurança, contabilidade e desempenho;

¹⁸ Número que deverá ser ratificado em testes num futuro protótipo do 5G-Tvs.

- 4) **Resiliência.** O gerenciamento de falhas e desempenho deve ser automatizado e executado pelos Orquestradores;
- 5) **Segurança.** Por questões de privacidade, um *slice* deve estar logicamente isolado de outros, de modo que o sistema tenha segurança apropriada;
- 6) **Tempo de resposta em recursos.** A alocação de recursos deve ocorrer em até o tempo t para atualização dos componentes do sistema¹⁹. Além disso, o Plano de Dados fatiado deve fornecer mecanismos que garantam o desempenho adequado das operações do Plano de Dados.

Deve-se alcançar uma rede flexível, adaptável e programável para garantias da disponibilidade e confiabilidade do sistema proposto. Uma abordagem para melhorar a resiliência é aplicar redundância (MENDES, 2014). Isto permitirá um tempo de recuperação de falhas mais curto e, conseqüentemente, aumentar a disponibilidade geral da rede. No entanto, o aumento da redundância também vem com o aumento dos custos (CAPEX) e da complexidade operacional (OPEX).

Cabe ainda notar que, baseado nos elementos apresentados na introdução deste projeto, o *framework* proposto deve considerar e suportar, concomitante e transparentemente, todas as bandas presentes nas seguintes características das faixas de frequências (ECC, 2018b; EUROPEAN COMMISSION, 2019):

- abaixo de 1 GHz para o posicionamento dos dispositivos de IoT (principalmente os sensores) pelo alcance das comunicações. A capacidade para transferência de dados deve ser baixa para essa categoria e a latência pode ser alta, conforme a Tabela 6. A densidade de conexão desejada no 5G será de 10.000 a 1.000.000 de dispositivos por km²;
- entre 1 GHz e 6 GHz à utilização para dispositivos móveis, banda larga e missão crítica. Terá menor alcance que a faixa exposta no item acima, porém possibilitará mobilidade;

¹⁹ Tempo que deverá ser ratificado em testes num futuro protótipo do 5G-Tvs.

- acima de 6 GHz, permitindo o uso massivo para banda larga de elevada capacidade (de 1 Gbps a 20 Gbps). O alcance dos dispositivos será limitado à mobilidade. A limitação de alcance do sinal 5G nessa faixa é determinada pela visibilidade entre as antenas e a potência utilizada.

| Sub-requisito | Parametrização de desempenho dos serviços | | |
|---|---|------------|--------|
| | Baixo | Médio | Alto |
| Largura de banda (Mbps) | < 10 | 10 - 250 | > 250 |
| Latência (ms) | < 10 | 10 - 50 | > 50 |
| Confiabilidade (%) | < 95 | 95 - 99,9 | > 99,9 |
| Eficiência energética - bateria (dias) | < 4 | 4 - 90 | > 90 |
| Densidade de conexões (dispositivos/km ²) | < 100 | 100 - 1000 | > 1000 |
| Mobilidade (km/h) | 0 - 3 | 3 - 50 | > 50 |

Tabela 6 – Exemplos de parametrização dos sub-requisitos não funcionais suportados pelo 5G-Transversal

O projeto de rede 5G também deve considerar os casos de uso e KPIs definidos pelo Órgão Regulador. Nesse sentido, ITU especificou vários desafios IMT-2020 (ITU-R, 2015, 2017, 2022).

Assim, de acordo com o levantamento realizado, a Tabela 6 mostra exemplos de sub-requisitos que os Orquestradores trabalharão a partir dos requisitos não funcionais atrelados aos serviços que o *framework* proposto suportará em termos dos serviços, classificando-os com desempenho baixo, médio ou alto (DUKE-WOOLLEY, 2021).

3.2 AVALIAÇÃO DE MODELOS DE ORQUESTRAÇÃO SIMILARES DA LITERATURA

Há várias iniciativas de código aberto que fornecem soluções para gerenciar redes E2E.

A Tabela 7 estende os resultados apresentados na Tabela 5, identificando e apresentando as lacunas presentes no estado da arte em orquestração hierárquica de redes E2E frente aos principais demais trabalhos analisados.

| Trabalho | Abordagens da Orquestração | | | | Network slicing | |
|---|----------------------------|------------|---------------|-----------------------|-----------------|-----|
| | Multidomínio | Redundante | Regionalizada | Nível 3 ²⁰ | Balanceado | E2E |
| Riggio et al. (2015) | x | x | x | x | x | x |
| Peterson et al. (2016) | √ | x | x | x | x | x |
| Francescon et al. (2017) | √ | x | x | √ | x | √ |
| Rostami et al. (2017) | x | x | x | x | x | x |
| Yuan et al. (2017) | x | x | x | x | x | x |
| Dräxler et al. (2018) | √ | x | x | x | x | √ |
| Chen et al. (2019) | x | x | x | x | x | x |
| Kukliński et al. (2019) | √ | x | x | x | x | √ |
| Afolabi et al. (2020) | √ | x | x | x | x | √ |
| Esmaeily, Kravetska e Gligoroski (2020) | √ | x | x | x | x | √ |
| ETSI (2020a) | √ | x | x | x | x | x |
| Haga (2020) | √ | x | x | x | x | √ |
| Kar, Wu e Lin (2020) | x | x | x | √ | x | x |
| Sánchez et al. (2020) | √ | x | x | √ | x | √ |
| Santos et al. (2020) | √ | x | x | x | x | √ |
| Badmus et al. (2021) | √ | x | x | x | x | √ |
| Hadiwardoyo et al. (2021) | √ | x | x | x | x | x |
| Hortigüela (2021) | √ | x | x | x | √ | √ |
| Kukliński et al. (2021) | √ | x | x | √ | x | √ |
| Li et al. (2021) | √ | x | x | x | x | √ |
| Choi (2022) | √ | x | x | x | x | x |
| Choi, Chun e Lee (2022) | √ | x | x | x | x | √ |
| Pavón et al. (2022) | √ | x | √ | √ | x | √ |
| Zhao e He (2022) | x | x | x | x | x | x |
| 5G-Transversal | √ | √ | √ | √ | √ | √ |

Tabela 7 – Lacunas apresentadas pelos principais trabalhos em orquestração hierárquica

O estudo feito mostra as diferenças destes trabalhos quanto à capacidade (ou não) de: (i) atender a orquestração em diferentes domínios administrativos; (ii) ser redundante (diferentes orquestradores trabalhando primária e secundariamente); (iii) tratar diferentes regiões de orquestração; (iv) atender metaorquestração (nível 3); (v) conseguir balancear, por orquestradores distintos, as cargas de *network slicing*; e (vi) atender o *network slicing* E2E nas redes de comunicação.

²⁰ Nível 3 ou Metaorquestração

Portanto, a análise das lacunas apresentadas pelos principais trabalhos em orquestração hierárquica traz a conclusão que:

- apenas o 5G-Tvs é a única solução capaz de apresentar redundância para melhor disponibilidade do sistema como um todo;
- nenhum dos outros trabalhos analisados possui todas as características de orquestração propostas pelo 5G-Tvs;
- somente [Pavón et al. \(2022\)](#) oferecem uma solução similar à do 5G-Tvs no que tange ao balanceamento no *network slicing*.

3.3 PROJETO E DESCRIÇÃO DO *FRAMEWORK* PROPOSTO

Este trabalho vislumbra e propõe uma solução de orquestração hierárquica federada para redes 5G e gerações futuras em domínios heterogêneos. Utiliza-se um conjunto de orquestradores distribuídos para gerenciar, hierárquica e colaborativamente, diferentes segmentos de rede, múltiplos domínios e regiões de orquestração distintas. Esta solução é apresentada e discutida nesta seção.

A [Figura 12](#) ilustra a arquitetura geral de NSO proposta no 5G-Tvs, que atende tanto um ou mais domínios administrativos quanto uma ou mais regiões de orquestração simultaneamente.

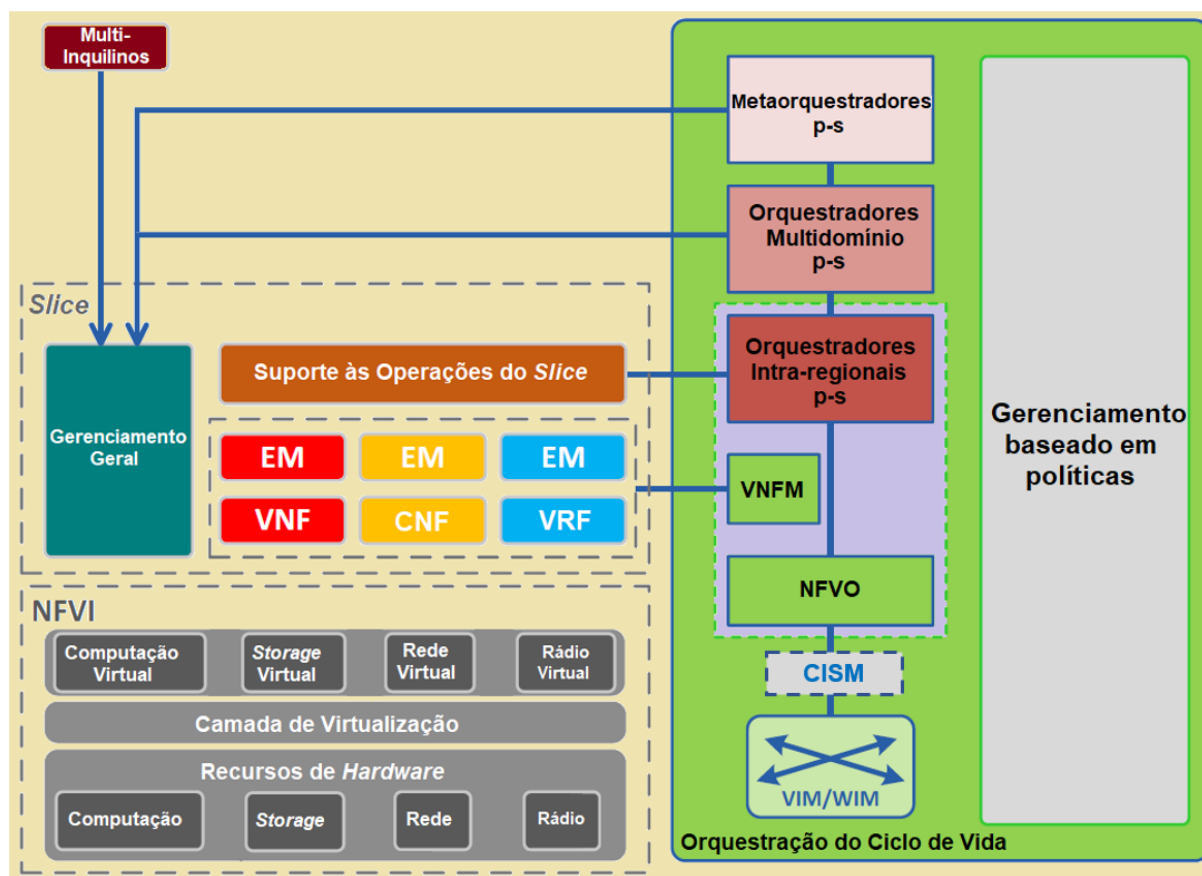


Figura 12 – Arquitetura geral do 5G-Transversal

Fonte: adaptada de Kukliński et al. (2019).

Esta arquitetura de orquestração é baseada na arquitetura ETSI NFV-MANO (ETSI, 2022b), estendida para suportar, colaborativamente, operações multidomínio, funções específicas de *network slicing* e o gerenciamento baseado em políticas no processo de orquestração.

As funções de orquestração definidas por ETSI (2022b) são descritas nesta seção juntamente com os novos componentes introduzidos no 5G-Tvs, estendendo também a estrutura de orquestração elaborada por Kukliński et al. (2019), que apresenta funcionalidades interessantes à proposta do 5G-Tvs em termos de *network slicing* E2E, desagregação lógica interna e orquestração hierárquica multidomínio — daí o motivo desta escolha. Dessa forma, no 5G-Tvs constam:

- NFVI. Não há modificações no NFVI definido na arquitetura ETSI NFV-MANO, em que há recursos físicos e virtualizados, mas as comunicações devem ocorrer multidomínio quando necessário;

- VIM/WIM. O VIM está definido na arquitetura ETSI NFV-MANO. A funcionalidade adicional do VIM inclui a capacidade de controlar o plano de dados, como na forma de um controlador SDN, a fim de fornecer uma separação do plano de dados quando o tráfego de dados é roteado diretamente pela rede (ou seja, programabilidade do plano de dados). Já o WIM tem a função de definir as redes virtuais entre as diferentes partes de um *slice* sobre as redes de transporte comuns (ou seja, as regras de compartilhamento do ambiente entre *datacenters*);
- Orquestrador de Virtualização de Funções de Rede (NFVO), que tem sua funcionalidade definida na arquitetura ETSI NFV-MANO, permitindo a intermediação dos recursos NFVI entre múltiplos *slices*. O NFVO comunica-se com vários VIMs e WIMs, sendo capaz de alocar os recursos adequadamente entre eles, fornecendo também indicações sobre como o sistema deve ser dimensionado e onde as funções de rede devem ser colocadas através das informações de descrição de cada *slice*. No 5G-Tvs, o NFVO é estendido para suportar modificações dinamicamente durante a execução dos serviços com ganhos em desempenho E2E;
- Gerenciador das Funções de Rede Virtualizadas (VNFM), cujo papel é definido por [ETSI \(2022b\)](#) para: (i) alocar recursos apropriados às VNFs ou delegar esta operação ao NFVO; (ii) receber eventos sobre a conclusão das operações específicas e informações sobre as configurações dinâmicas; e (iii) configurar dinamicamente as VNFs e controlar a execução dos eventos do ciclo de vida do *slice* com o suporte do Gerenciador de Elemento (EM);
- CISM: incluso na arquitetura ETSI NFV-MANO. Por definição, a VNF possui Componentes de Função de Rede Virtualizada (*Virtualized Network Function Components* — VNFCs) containerizados e a função de um VNFC containerizado é encapsulada na imagem do contêiner e instanciada pelo CISM. Uma instância de um VNFC em contêiner é executada sobre uma instância de um serviço de infraestrutura de contêiner, que fornece o ambiente de tempo de execução do contêiner. A função do ambiente de tempo de execução do contêiner é encapsulada na imagem da VM e instanciada na NFVI ([ETSI, 2019](#));

- Orquestradores Intra-regionais p-s: são os Orquestradores intra-regionais locais p-s (primários e secundários) introduzidos pelo 5G-Tvs, que serão explanados na [Seção 4.1](#) (Mapeamento dos Orquestradores em um metamodelo);
- Orquestradores Multidomínio p-s: são os Orquestradores intra-regionais de domínios primários e secundários introduzidos pelo 5G-Tvs, que serão explanados na [Seção 4.1](#) (Mapeamento dos Orquestradores em um metamodelo);
- Metaorquestradores p-s: são os Metaorquestradores primários e secundários introduzidos pelo 5G-Tvs, que serão explanados na [Seção 4.1](#) (Mapeamento dos Orquestradores em um metamodelo);
- gerenciamento baseado em políticas: a estrutura de gerenciamento do 5G-Tvs para *network slicing* é definida por um conjunto de políticas que regem o comportamento do sistema distribuído como um todo, forma flexível e redundante. O principal benefício dessa abordagem é fazer com que os serviços e funções de rede possam ser gerenciados da mesma maneira em sistemas heterogêneos. Faz-se com que os riscos de eventos de alta complexidade em diferentes componentes possam ser mitigados, através de adaptação e reconfigurações durante o tempo de execução para as novas condições de rede.

Com base na [Figura 12](#) e nas informações monitoradas dos *slices*, o NFVI e os componentes de gerenciamento do ciclo de vida podem adaptar-se em níveis de:

- VIM à migração de VMs, gestão e mitigação de falhas na VM, configuração da infraestrutura, proteção da segurança da infraestrutura, autenticação e autorização, escalonamento de recursos para desempenho e resiliência;
- CISM à configuração, migração e gestão dos VNFCs baseados em contêineres;

- WIM ao estabelecimento de novos caminhos de dados, direcionamento de tráfego entre vários caminhos de dados, classificação e diferenciação de QoS, diferenciação de aplicativos por meio da programabilidade do plano de dados;
- NFVO à colocação de funções de rede no domínio, políticas de dimensionamento, gestão automática de falhas, resiliência e segurança através de mecanismos independentes de aplicação, modificando as políticas na seleção de recursos específicos do domínio;
- Orquestradores Intra-regionais propostos pelo 5G-Tvs: modificação das políticas de seleção de NFVOs;
- Orquestradores Multidomínio propostos pelo 5G-Tvs: modificando as políticas na seleção de domínios administrativos, fornecendo relatórios de violação de SLA e reestabelecendo domínios intermediários;
- Metaorquestradores propostos pelo 5G-Tvs: transmitindo ao inquilino eventos do sistema sobre o qual o *slice* está implantado (ou seja, comportamento normal e eventos excepcionais que podem influenciar o bom funcionamento do *slice* inter-regionamente).

3.3.1 Identificação dos componentes e elaboração do grafo em árvore

A [Figura 13](#) apresenta os Orquestradores que compõem o Orquestrador de Serviços no 5G-Tvs.

O Orquestrador de Serviços é a entidade (orquestradora) responsável pelo serviço de Orquestração, que será discutido na [Seção 4.4](#) (Proposição de um novo modelo de negócios).

O Orquestrador de Serviços possui diversos Orquestradores em sua estrutura funcional, estando estes alocados regionalmente (regiões de 1 a Z). Parte-se dos metaorquestradores inter-regionais: Metaorquestrador Inter-regional dos Serviços de Rede secundário (Orquestrador-M s) e Metaorquestrador Inter-regional dos Serviços de Rede primário (Orquestrador-M p). Isto posto, para cada região, tem-se:

- a) os orquestradores intra-regionais locais, a saber: Orquestrador Intra-regional de RAN secundário (O-R s), Orquestrador Intra-regional de RAN primário (O-R p), Orquestrador Intra-regional de Transporte secundário (O-T s), Orquestrador Intra-regional de Transporte primário (O-T p), Orquestrador Intra-regional de *Core* secundário (O-C s) e Orquestrador Intra-regional de *Core* primário (O-R p), variando em domínios administrativos de 1 a m ;
- b) os orquestradores intra-regionais de domínios: Orquestrador Intra-regional Multidomínio secundário (Orquestrador-D s) e Orquestrador Intra-regional Multidomínio primário (Orquestrador-D p).

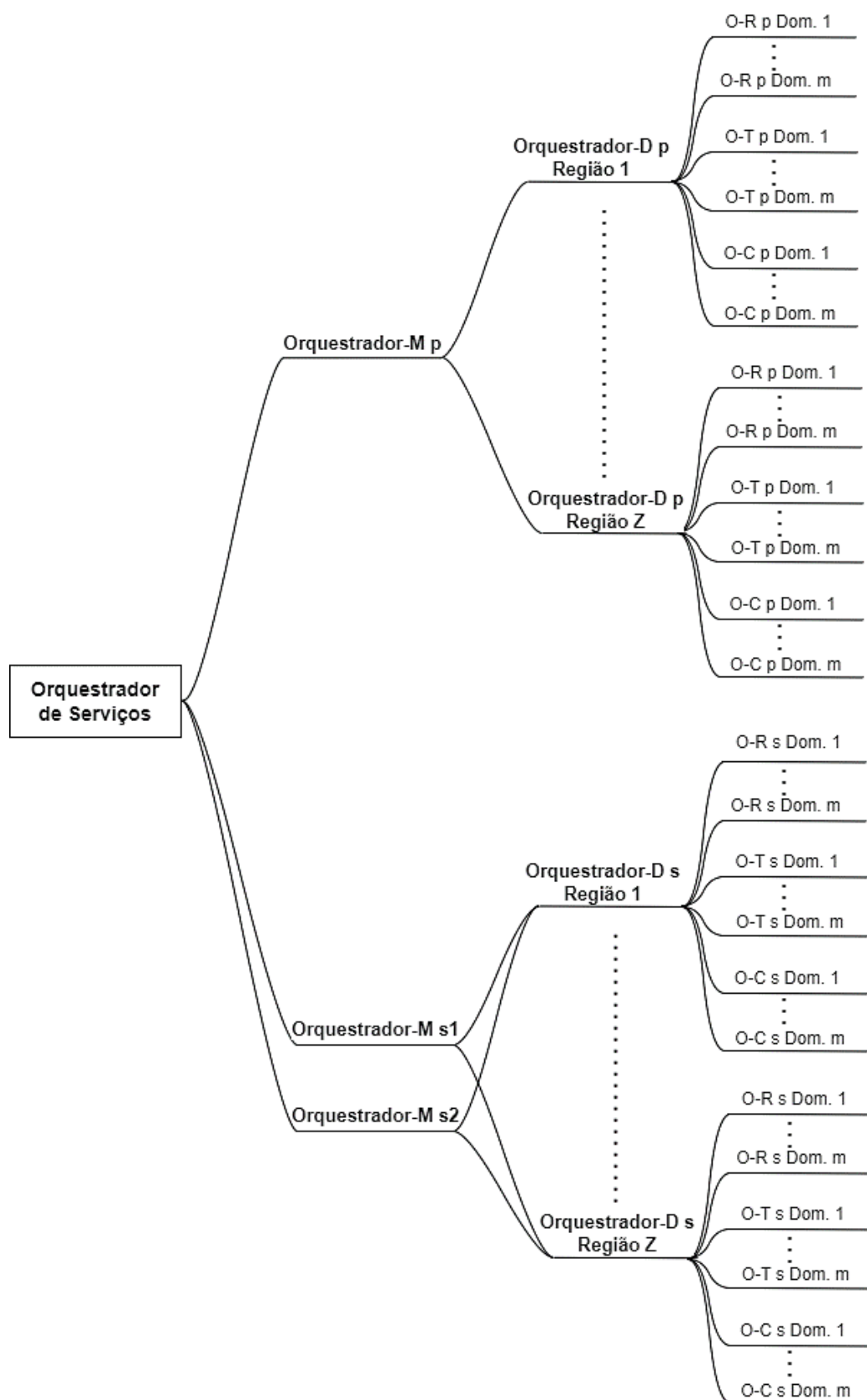


Figura 13 – Grafo em árvore dos Orquestradores no 5G-Transversal

3.3.2 Diagrama de classes do 5G-Transversal

A [Figura 14](#) ilustra o diagrama das classes de entrada e saída do 5G-Tvs.

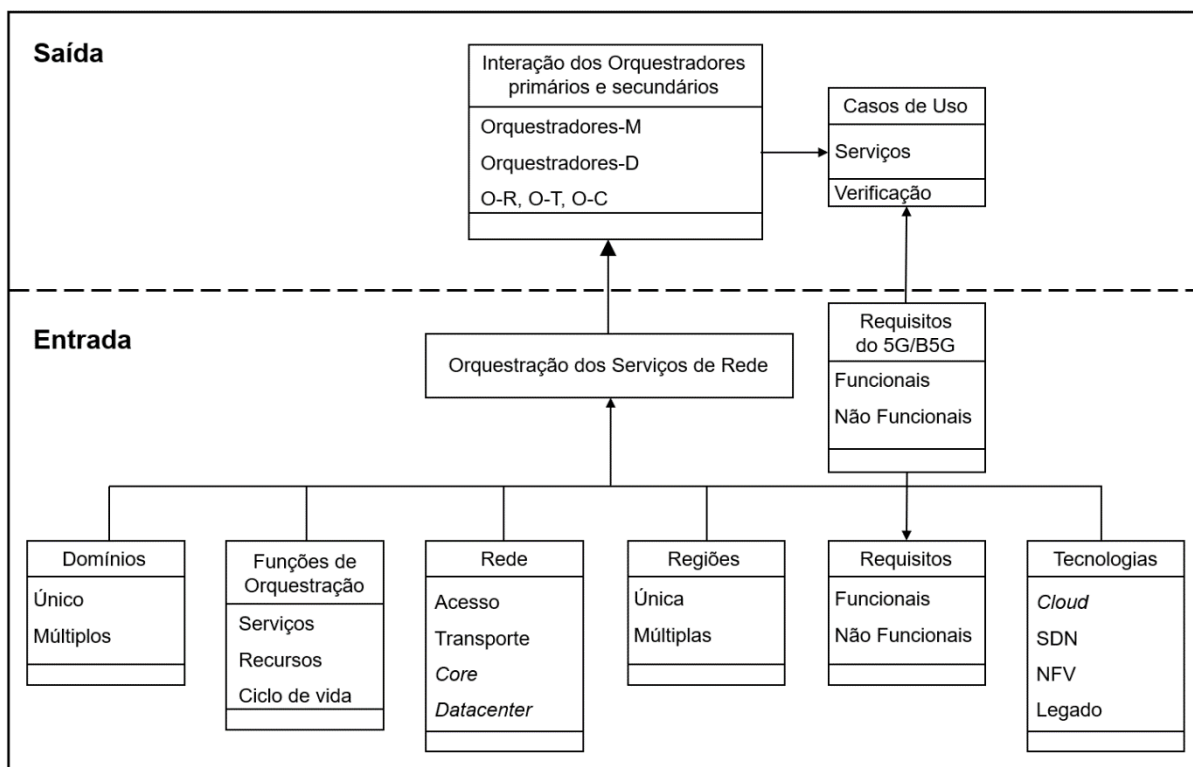


Figura 14 – Diagrama das classes de entrada e saída do 5G-Transversal

As classes de entrada são: (i) Orquestração dos Serviços de Rede e as demais que a suportam — (ii) Domínios administrativos; (iii) Funções de Orquestração, em níveis de serviços, recursos das redes e ciclo de vida dos *slices*; (iv) Rede, sob os segmentos que a compõem (acesso, transporte, *core* e *datacenter*); (v) Regiões, cujo conceito será apresentado a seguir na [Seção 4.1](#) (Mapeamento dos Orquestradores em um metamodelo); (vi) Requisitos do 5G-Tvs, em conformidade com a classe (vii) Requisitos das redes 5G e B5G, funcionais e não funcionais; e (viii) Tecnologias (*cloud*, SDN, NFV, legado).

As classes de saída são: (i) Processo de Interação dos Orquestradores primários e secundários, detalhado ao longo do [Capítulo 4](#) (Resultados e discussão); e (ii) Casos de Uso das redes 5G e B5G, que devem ser verificados ou validados, atendendo aos próprios Requisitos das redes 5G e B5G.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados deste trabalho, mapeando os orquestradores em um metamodelo, propondo as arquiteturas dos orquestradores federados, analisando em detalhes a solução de orquestração, sugerindo um novo modelo de negócios e verificando o projeto através de um Estudo de Caso sobre um caso de uso relacionado ao atendimento médico emergencial.

Neste trabalho, entende-se o Estudo de Caso como a etapa anterior a uma Prova de Conceito (*Proof of Concept* — PoC²¹).

4.1 MAPEAMENTO DOS ORQUESTRADORES EM UM METAMODELO

A [Figura 15](#) ilustra o *framework* proposto, contém o mapeamento dos Orquestradores em um metamodelo, reflete o ecossistema do 5G-Tvs, sendo o primeiro resultado deste trabalho.

Inicialmente, nota-se que os *slices* podem diferir em relação à suas respectivas funcionalidades, KPIs, e área geográfica de cobertura. Segundo [Mannweiler et al. \(2019\)](#), a definição da área geográfica de cobertura é, dentre outros, importante para:

- planejar os recursos de um novo *slice*;
- oferecer serviços de rede restritos regionalmente;
- impedir que os terminais acessem um *slice* quando estão no local errado.

De acordo com [3GPP \(2023\)](#), um *network slice* compreende um ou mais *sub-network slices*, e cada um destes pode existir em uma ou mais áreas geográficas de cobertura.

²¹ Uma PoC é a demonstração de um produto ainda em concepção para determinar se as ideias e a proposta de solução deste produto podem ser transformadas em realidade ([COLLINS, 2023](#); [GILLIS, 2023](#); [MERRIAM-WEBSTER, 2023](#)). O objetivo de uma PoC não é buscar demanda de mercado para o conceito ou, necessariamente, escolher a melhor forma de produzi-lo. Em vez de focar a construção ou desenvolvimento da solução associada ao produto, a PoC caracteriza-se, portanto, como uma etapa além da concepção da solução ([GILLIS, 2023](#)).

O limite de uma área geográfica de cobertura pode ser descrito de várias maneiras. A maneira mais fácil é o uso de limites predefinidos existentes (por exemplo, fronteiras nacionais). Para aplicações industriais, no entanto, pode ser desejável restringir a área geográfica de cobertura à planta industrial de um inquilino (MANNWEILER et al., 2019).

A especificação definida em 3GPP (2021) baseia-se, fundamentalmente, no Sistema Geodésico Mundial 1984 (*World Geodetic System* — WGS84), mas tem como principal desvantagem sua limitação ao máximo de 15 (quinze) pontos por polígono para descrever uma área geográfica de cobertura.

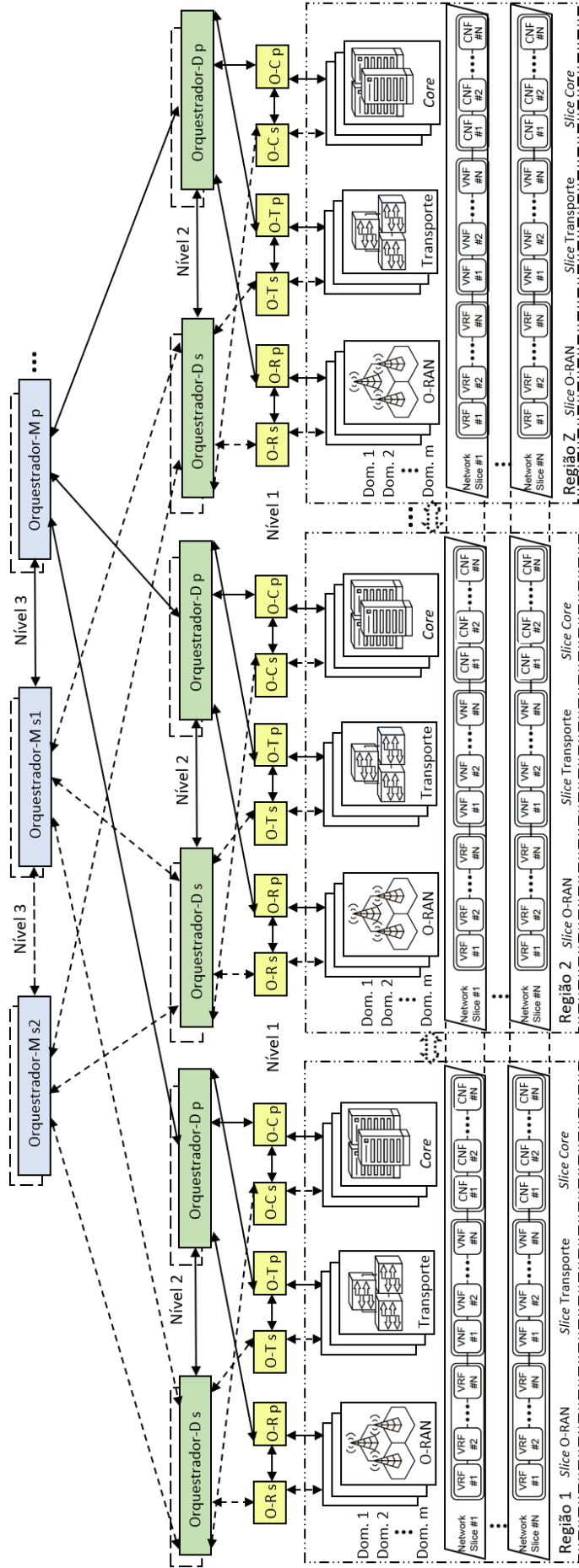


Figura 15 – Framework proposto: metamodelo de mapeamento dos Orquestradores do 5G-Transversal

O formato *shapefile* definido por [ESRI \(1998\)](#), também baseado no sistema de coordenadas WGS84, torna-se uma alternativa para descrever o limite de uma área geográfica de cobertura, pois aproveita vários tipos de dados, incluindo polígonos.

A partir do *shapefile*, no 5G-Tvs, estende-se o conceito de área geográfica e se define o conceito de região de orquestração ou, simplesmente, região como sendo a área delimitada pelo círculo de raio r cujo centro está em cada Orquestrador-D p²². Para cada região, tem-se 3 (três) níveis de orquestração:

- a) o nível 1 de orquestração contém os orquestradores intra-regionais locais, O-R s, O-R p, O-T s, O-T p, O-C s e O-R p;
- b) o nível 2 de orquestração contém os orquestradores intra-regionais de domínios, Orquestrador-D s e Orquestrador-D p;
- c) o nível 3 de orquestração, por sua vez, contém os metaorquestradores inter-regionais, Orquestrador-M s e Orquestrador-M p, que são capazes de atender, em geral, mas não limitadamente a este número, até y regiões distintas²³. Isto poderá, portanto, abranger um ou mais países.

Destaca-se que os:

- Orquestradores intra-regionais locais p-s comunicam-se com vários NFVOs localizados no mesmo domínio administrativo sobre as informações em *slices* específicos. Os Orquestradores intra-regionais locais p-s assemelham-se aos NFVOs, conforme definição da ETSI NFV-MANO, mas têm funções adicionais para fluxo de trabalho dinâmico junto aos Orquestradores intra-regionais de domínio p-s;

²² Raio correspondente a uma distância para ser ratificada em testes num futuro protótipo do 5G-Tvs.

²³ Número de regiões que deverá ser ratificado em testes num futuro protótipo do 5G-Tvs.

- Orquestradores intra-regionais de domínio p-s têm como função principal fornecer, quando necessário, um *slice* sobre domínios administrativos distintos, implementando as seguintes funcionalidades:
 - recebem dos Metaorquestradores p-s os requisitos referentes a um *slice* específico sob uma descrição estática, como TOSCA ou um arquivo de descrição do *slice*. Isso segue a descrição dos serviços, de onde são retirados os requisitos de desempenho de rede necessários à prestação do serviço, de acordo com o requisito de SLA contratado pelo Usuário Final;
 - estabelecem conexões seguras com os Orquestradores intra-regionais locais p-s;
 - negociam com os Orquestradores intra-regionais locais p-s os recursos a serem alocados para cada *slice*;
 - tomam decisões com base nos requisitos recebidos na divisão da funcionalidade do *slice* entre os vários domínios administrativos, com base no preço da infraestrutura de hospedagem, localização central ou na disponibilidade de recursos (por exemplo, largura de banda ou latência). A decisão é tomada pela função de política de seleção de domínio e pode usar diferentes algoritmos de posicionamento para que seja cumprida, assim como considerar os dados presentes nas bases de dados operacionais dos Orquestradores intra-regionais de domínio p-s;
 - baseiam-se também em simulações para a previsão de situações futuras: se houver uma probabilidade acima de um determinado valor crítico, será realizado um procedimento de troca ou *handover* (horizontal) entre diferentes domínios administrativos para evitar descontinuidade de serviço ou perda de qualidade;
 - acionam a instalação do *slice* sobre os vários domínios administrativos;
 - quando a instalação for bem-sucedida, trocam os parâmetros de conectividade entre os diferentes Orquestradores intra-regionais locais p-s para unir as partes do *slice*;
 - descartam os *slices* em um ou mais domínios se houver falhas para atendimento dos SLAs.

- Metaorquestradores p-s iniciam as operações do *slice*, transmitindo os pontos de entrada específicos para o gerenciamento do *slice* aos Orquestradores intra-regionais de domínio p-s. São responsáveis por reconfigurar os *slices* em diferentes regiões de orquestração após a implantação. Os Metaorquestradores p-s fornecem a interface para o operador do *slice* (um inquilino ou vertical), incluindo a API para consultar a disponibilidade de recursos, informações de preços e status dos recursos implantados, implantar novos *slices* ou desfazê-los. Eles são capazes de coletar informações de capacidade de serviço abstratas relacionadas a diferentes domínios administrativos, criando um repositório de suporte de serviço global, interagindo com o OSS/BSS para coletar informações comerciais, políticas ou administrativas ao lidar com solicitações dos *slices* automatizadamente.

A realimentação dos valores de QoS, associada à possibilidade de *handover* horizontal durante a execução do serviço, fornece a característica dinâmica do 5G-Tvs. Espera-se que, quanto mais os Orquestradores forem utilizados, mais precisamente e em menor tempo de operação eles operarão.

4.2 PROPOSIÇÃO DAS ARQUITETURAS DOS ORQUESTRADORES FEDERADOS

Os principais componentes e módulos dos Orquestradores M e D propostos estão distribuídos em planos de comandos, que contêm funcionalidades que expressam, como outros ([BARAKABITZE et al., 2020a](#); [BERNINI et al., 2020](#); [MENA et al., 2020](#); [SONKOLY et al., 2020](#); [TALEB et al., 2019](#)), as propostas dos principais institutos e associações de padronização (3GPP, 5G-PPP e ETSI) — em particular, do *framework* ETSI NFV-MANO ([BARAKABITZE et al., 2020a](#); [ETSI, 2023a](#)).

No entanto, a arquitetura proposta neste trabalho apresenta uma combinação interessante entre os recursos fornecidos pela computação de borda, possibilitando um diferencial promissor para um serviço de orquestração eficiente. Tal estratégia tende a trazer bons resultados desacoplando e distribuindo recursos computacionais entre a borda e a nuvem.

Para estes casos, a integração entre funções específicas da rede (borda e nuvem) ajuda a suportar diferentes tipos de aplicações e serviços, atendendo principalmente aos requisitos de QoS e QoE em ambientes de tecnologias heterogêneas e multi-provedores (BARAKABITZE et al., 2020b).

Visto a complexidade inerente dos Orquestradores federados (Orquestradores M e D), ou seja, que entregam os *slices* E2E, ilustra-se suas respectivas arquiteturas propostas, que são o segundo resultado deste trabalho, na Figura 16.

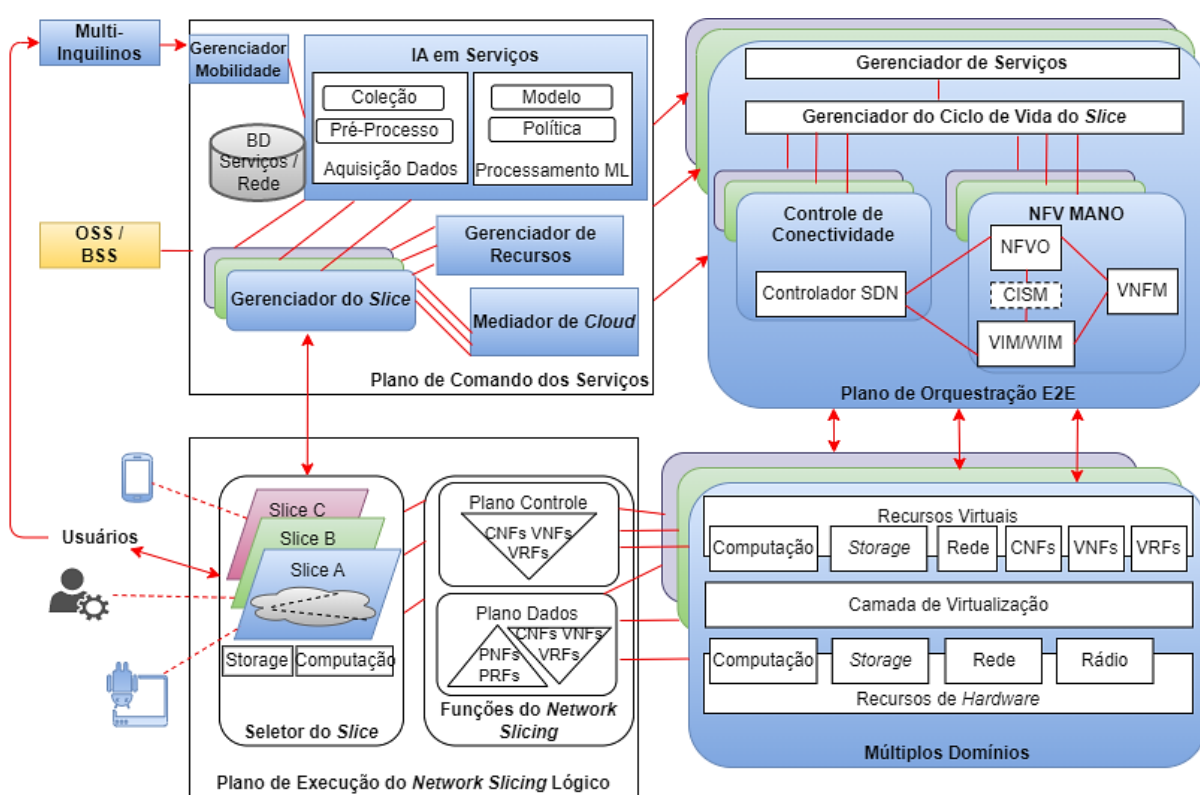


Figura 16 – Arquitetura proposta dos Orquestradores M e D

Fonte: adaptada de Batista Jr et al. (2021).

Conforme a Figura 16 e concepções de Batista Jr et al. (2021), a arquitetura proposta consiste nos seguintes blocos funcionais: *Plano de Comando dos Serviços*, *Plano de Orquestração E2E* e *Plano de Execução do Network Slicing Lógico*, sendo este último composto por funções de rede que compreendem aspectos de gerenciamento de infraestrutura, separação entre controle e plano de dados e funções de borda, em especial o serviço de seleção de *slices*.

4.2.1 Plano de comando dos serviços

O *Plano de Comando dos Serviços* realiza a orquestração e gerenciamento de serviços em recursos federados de solicitações de *slices* admitidos com sucesso.

Este trabalho propõe um conjunto de blocos funcionais que integram a infraestrutura física e lógica da rede, alinhados a um serviço de orquestração multidomínio.

O *Gerenciador de Mobilidade* faz uso da previsão de tráfego através da consulta a um banco de dados de serviços da rede disponível (*BD Serviços / Rede*), que atua como uma espécie de “catálogo” mostrando o estado da rede em tempo de operação.

O “serviço” será preparado utilizando-se dados históricos de serviços armazenados em na estrutura *BD Serviços / Rede*, sobre a qual ferramentas baseadas em IA auxiliarão na preparação da descrição do serviço em função do histórico de operação e tendo em vista a necessidade de agilizar o *network slicing*.

Em seguida, é verificado o panorama da rede e executada a transferência para o domínio que possa satisfazer os requisitos solicitados. No entanto, para a decisão de transferência ocorrer de forma eficiente, há o processamento da previsão e das informações heurísticas fornecidas pelo bloco *IA em Serviços*, que contém um conjunto de algoritmos de análise de dados, utilizando técnicas para fazer previsão de tráfego, ou seja, garantir que se cumpra o SLA.

A participação do *Gerenciador de Slices* consiste em verificar os modelos de previsão previamente fornecidos pelo *IA em Serviços*, bem como classificando os requisitos não funcionais dos serviços em sub-requisitos com prioridades baixa, media e alta. Isso feita, escalará proativamente as VMs e/ou contêineres para o serviço de orquestração, que utiliza VNFs e CNFs específicas para alocar esses recursos no *Core* da Rede.

O *Gerenciador de Recursos* negocia a conectividade em diferentes domínios administrativos. Já o *Mediador de Cloud*, por sua vez, orienta e interpreta os requisitos de *slice* relacionados a VNFs e serviços de valor agregado em plataformas heterogêneas.

Juntos, o *Gerenciador de Recursos* e o *Mediador de Cloud* mapeiam os recursos necessários para o *slice*, seguindo a especificação definida pelos outros módulos anteriormente descritos (por exemplo, *Gerenciador de Mobilidade e IA em Serviços*).

O uso da IA será vital para realizar simulações e prever a situação futura de conectividade. Calculado o risco, se houver probabilidade acima de um certo valor crítico (que será definido e ajustado ao longo da operação dos Orquestradores M e D), será executado procedimento de *handover* horizontal para evitar descontinuidade do serviço ou perda de qualidade.

4.2.2 Plano de orquestração E2E

O *Plano de Orquestração E2E* está sob a estrutura ETSI NFV-MANO e, portanto, os módulos que o compõem implementam as funcionalidades de tal estrutura.

Em geral, um *slice* é negociado diretamente entre o Usuário Final e o Domínio de Rede. As solicitações do Usuário Final usando seu perfil de consumo (requisitos de QoS) são atendidas sobre o *slice* alocado de acordo com o SLA (RODRIGUEZ; GUILLEMIN; BOUBENDIR, 2020).

O funcionamento deste Plano de Comando ocorre da seguinte forma: o módulo *Gerenciador de Serviços* recebe as solicitações dos modelos de *slices* e alocação dinâmica de recursos. Em seguida, processa os arquivos de modelo e inicia as instâncias necessárias para provisionar os recursos solicitados.

Destaca-se, aqui, que os componentes padrão da estrutura ETSI NFV-MANO são mantidos através dos módulos *Gerenciador do Ciclo de Vida do Slice* e *NFV MANO* — este último, composto pelos submódulos *VIM*, *VNFM* e *NFVO*. Esses módulos, juntos, fornecem as tecnologias de virtualização necessárias para a implementação da orquestração de serviços.

Em adição ao módulo *NFV MANO*, o módulo *Gerenciador do Ciclo de Vida do Slice* cumpre a verificação de conectividade e recursos de provisionamento de rede, utilizando-se do módulo *Controlador SDN*, responsável pela gestão e execução dos

controles necessários para estabelecer a camada de transporte do *slice* de serviço de rede solicitada (YALA, 2019; YI, 2018).

Por fim, um conjunto de APIs REST (clientes *southbound*) se conecta aos recursos virtuais da Nuvem, MEC e arquitetura de NFV em múltiplos domínios para subsidiar o provisionamento e entrega do *slice* E2E. Nesse contexto, a criação de *slices* E2E e a garantia de qualidade envolvem diversas tecnologias de virtualização, redes de acesso, transportes e redes *core*.

De acordo com os trabalhos de Bonati et al. (2020) e Mena et al. (2020), são necessárias também diferentes tecnologias de virtualização (por exemplo, contêineres ou VMs) e diferentes orquestradores (no caso, intra-regionais) para efetiva orquestração E2E.

4.2.3 Plano de execução do *network slicing* lógico

A gestão da infraestrutura pode usar várias camadas de virtualização, ou seja, são necessários recursos de computação e rede a partir de uma estrutura de “softwarização” multicamadas em redes 5G.

Assim, este bloco consiste em dois módulos: o *Seletor do Slice* e o de *Funções do Network Slicing*. O *Seletor do Slice* consiste em uma solução de seleção executada no usuário e também na borda da rede (SILVA; BATISTA JR; SOUSA; MOSTAÇO; MONTEIRO; BRESSAN; CUGNASCA; SILVEIRA, 2022).

O módulo *Funções do Network Slicing* faz a interface entre o *Seletor do Slice* e os múltiplos domínios em termos do plano de controle (VNFs, Funções de Rádio Virtuais — VRFs e CNFs) e plano de dados (PNFs, Funções de Rádio Físicas — PRFs, VNFs, VRFs e CNFs).

4.3 PROCESSOS DA SOLUÇÃO DE ORQUESTRAÇÃO

Sob o ponto de vista da arquitetura dos Orquestradores M e P, uma série de procedimentos operacionais ocorrem, considerando-se a configuração e atualização do *network slicing* para que a solução de orquestração proposta (incluindo os procedimentos de gerenciamento) funcione adequadamente.

4.3.1 Processo de configuração dos *slices*

O fluxo de solicitações e definições para configuração do *slice* acontece conforme o procedimento ilustrado na [Figura 17](#).

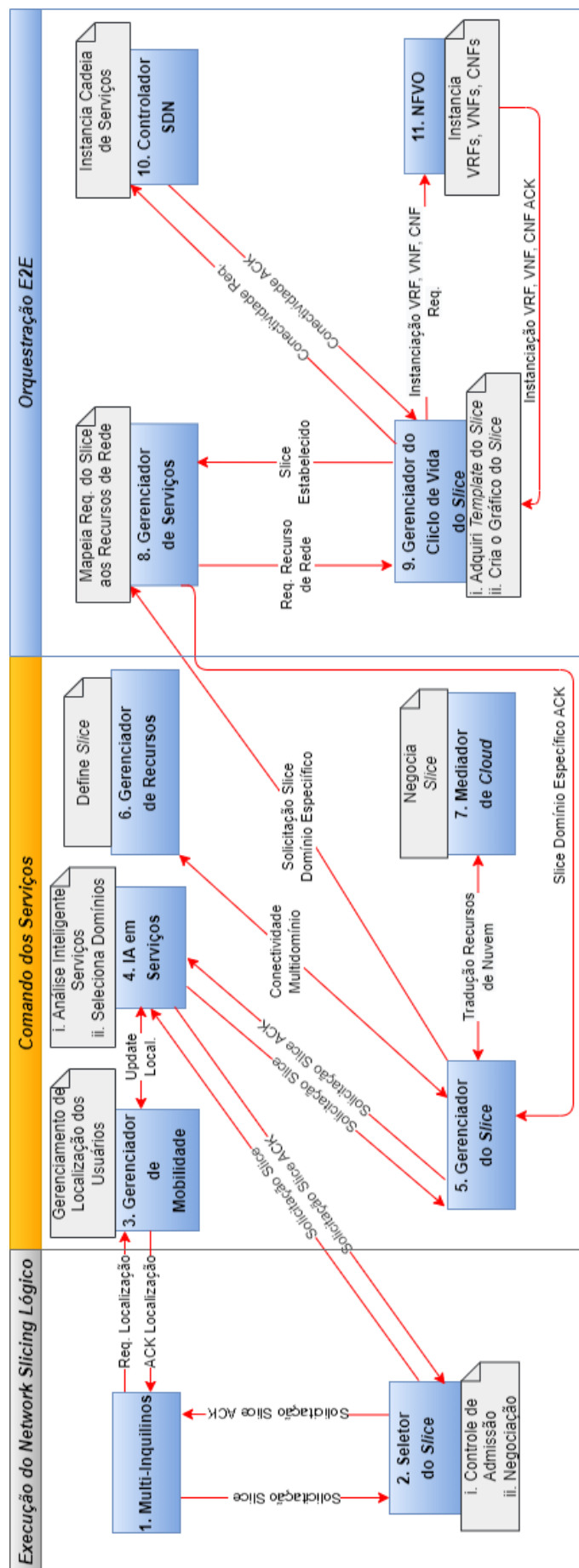


Figura 17 – Funcionamento dos planos de comando dos Orquestradores M e D

Fonte: adaptada de [Batista Jr et al. \(2021\)](#).

A negociação inicia-se entre os equipamentos dos usuários (1) e a oferta de *slices* (2), dentro de uma dada área geográfica, visando a solicitações de *slices* personalizados, uma das principais funções do Orquestrador (ESMAEILY; KRALEVSKA; GLIGOROSKI, 2020; MENA et al., 2020; RODRIGUEZ; GUILLEMIN; BOUBENDIR, 2020; TALEB et al., 2019). Esta função de mapear e avaliar o melhor *slice* é realizada pelo *Plano de Execução do Network Slicing Lógico*.

Desta forma, após a percepção do *slice* do Usuário Final sugerida pelo *Plano de Execução do Network Slicing Lógico*, o módulo *Gerenciador de Mobilidade* (3) solicita ao *IA em Serviços* (4) que o Orquestrador de Serviços cumpra com os Requisitos de SLA solicitados, iniciando-se o provisionamento do *slice*, onde os recursos computacionais e de rede são verificados e alocados para o estabelecimento do *slice*.

O provisionamento do *network slicing* multidomínio segue a estrutura ETSI NFV-MANO e ocorre através da cooperação entre o *Gerenciador do Slice* (5), *Gerenciador de Recursos* (6) e *Mediador de Cloud* (7). Trabalhando em conjunto, estes módulos visam a definir os *slices*, mapear os recursos necessários para o *slice* — seguindo a especificação estipulada pelos módulos anteriores (por exemplo, *Gerenciador de Mobilidade* solicita e *IA em Serviços*) — e negociar conectividade em diferentes domínios administrativos.

Depois de mapear os recursos, o módulo *Gerenciador de Serviços* (8) aciona os modelos definidos, um recurso comum usado principalmente no provisionamento de aplicações verticais e/ou modifica o modelo para acomodar a alocação de recursos, fornecendo os requisitos de SLA negociados.

É importante observar que as questões relacionadas ao tempo de alocação, além da conformidade com as métricas de QoS são mantidas pelo módulo *Gerenciador do Ciclo de Vida do Slice* (9), que implementa as especificações ETSI NFV-MANO. Toda parte do SW é implementada a partir do tratamento de fluxos de dados no *Controlador SDN* (10), além da instanciação das VNFs e CNFs necessárias para os serviços que serão fatiados (11).

A operação descrita acima pode ocorrer paralelamente multidomínio e sob a gestão e orquestração do Orquestrador M e/ou D como um todo.

4.3.2 Processo de modificação dos *slices*

Uma vez criados os *slices*, eles podem ser modificados. A [Figura 18](#) mostra a sequência de solicitações e interações para modificação dos *slices*. Assim que o *Gerenciador do Slice* estiver configurado, o *IA em Serviços* fornece os detalhes correspondentes de decomposição de serviço da solicitação de *slice*. O *Gerenciador do Slice* depende dos trabalhos do *Mediador de Cloud* para orientação sobre como interpretar os requisitos de divisão relacionados a VNFs e serviços de valor agregado em plataformas heterogêneas.

A conectividade entre domínios diferentes é estabelecida através do *Gerenciador de Recursos*. Feito isso, o *Gerenciador do Slice* estabelece comunicação segura com cada *Gerenciador de Serviços* no respectivo domínio administrativo. Em seguida, este fornece o tipo de serviço específico (por exemplo, SLA e política) relacionado à solicitação de *slice*.

O *Gerenciador de Serviços* realiza uma análise de mapeamento para identificar os recursos de rede, ou seja, funções de rede, serviço de valor agregado e conectividade, que correspondem a certos subdomínios de tecnologia e, em seguida, informa o *Gerenciador do Ciclo de Vida do Slice*.

Então, o *Gerenciador do Ciclo de Vida do Slice* seleciona o modelo de *slice* apropriado e cria o gráfico de recurso do *slice* desejado. Em seguida, realiza a configuração do recurso para o correspondente subdomínio emitindo uma solicitação para o respectivo *Controlador SDN* e/ou *NFV MANO*.

O *Controlador SDN*, então, precisa criar a NFV com a lista de computação e conectividade desejadas. Existem duas principais opções ao configurar uma NFV ou a lista de conectividade: o NFVO do domínio específico encaminha a solicitação diretamente para o *VIM* correspondente ou comunica a solicitação para o *VNFM* relevante. Quando a solicitação chega ao *VIM*, ele representa uma situação de escalonamento de recursos relacionada a um recurso VNF compartilhado.

Em se tratando de CNFs, o NFVO do domínio específico poderá, ainda, atuar sobre o CISM para a gestão do processo de modificação dos *slices* em computação.

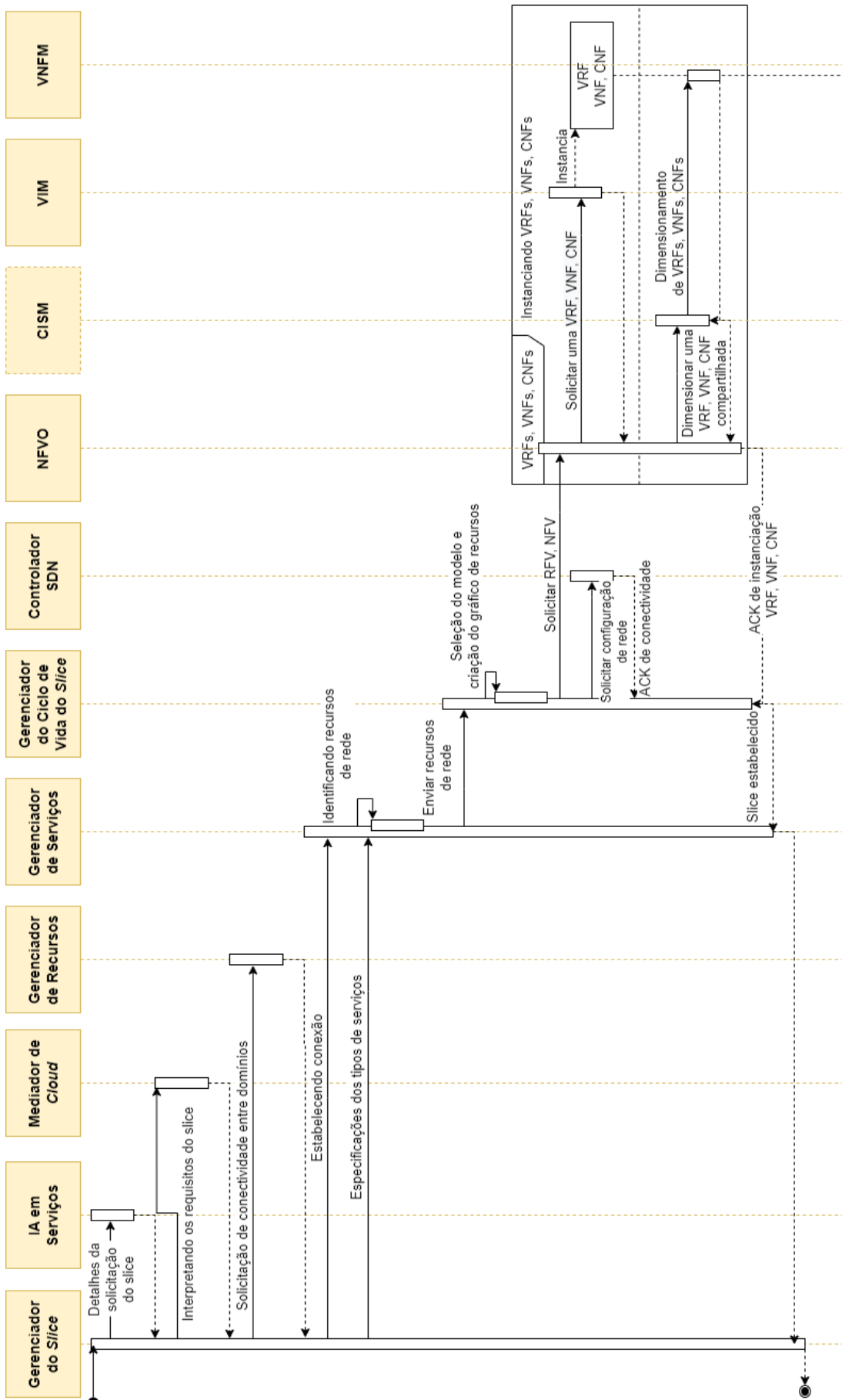


Figura 18 – Sequência de modificação dos slices realizados pelos Orquestradores M e D

Fonte: adaptada de [Batista Jr et al. \(2021\)](#).

Todavia, as solicitações para instanciar VNFs são tratadas pelo subdomínio *VNFM*. Para transpor a barreira de conectividade, o *Controlador SDN* do domínio específico realiza as configurações de rede necessárias para estabelecer a camada de transporte e cadeia de serviços relacionados. Uma NSI multidomínio torna-se operacional quando todas as Instâncias de Sub-rede do *Network Slice* (*Network Slice Subnet Instances* — NSSIs) específicos do domínio e a conectividade entre domínios forem configurados com sucesso.

Finalmente, uma vez concedidos os recursos, um *Reconhecimento* (ACK) será devolvido ao inquilino, atualizando também o *Seletor do Slice*.

4.3.3 Processo de delegação das tarefas de orquestração federada

Partindo de algumas proposições de Santos et al. (2020), no 5G-Tvs cada orquestrador intra-regional local é responsável pelo gerenciamento de recursos em um determinado segmento de rede, ao passo que os orquestradores intra e inter-regionais de domínios (Orquestradores D e M) coordenam a alocação de serviços e posicionamento funcional entre orquestradores e seus respectivos segmentos, interagindo com os orquestradores subjacentes e coordenando o ciclo de vida dos *slices*.

Esta arquitetura de orquestração hierárquica permite a descentralização do controle e decisão sobre redes E2E, entregando um ponto central de gerenciamento para toda infraestrutura de rede E2E, mas dividindo o gerenciamento de recursos E2E e os problemas de *network slicing* em problemas menores e tratáveis por segmento.

Isto permite que cada orquestrador individual se concentre em um número limitado de tarefas bem definidas, utilizando paradigmas e abstrações sob medida para as particularidades de seu respectivo segmento. Assim, reduz-se a complexidade do gerenciamento de recursos em termos de projeto e implementação.

Contudo, esse paradigma de orquestração descentralizada requer coordenação entre diferentes orquestradores para implantação de *slices*, um processo que envolve dimensionar, criar e combinar vários *slices* de segmentos (*Network Slice Subnets* — NSSs).

A combinação de todos os orquestradores ora apresentados traz os seguintes benefícios:

- capacidade de instanciar *slices* personalizados aproveitando recursos heterogêneos disponíveis em vários segmentos de rede;
- monitoramento dos serviços de comunicação existentes, sob métricas de desempenho do orquestradores distribuídos;
- otimização do uso dos recursos da rede de acordo com as demandas dos serviços de comunicação.

Portanto, o 5G-Tvs serve como uma ferramenta de automação de rede que não apenas facilitará as operações de rede para as Telcos implantarem *slices*, mas também possibilitará novos modelos de negócios através do oferecimento de *slice* como serviço (*Network Slice as a Service* — NSaaS).

Além disso, visto sua visão holística da rede, um Orquestrador-M poderá atuar como um provedor de serviços para alugar recursos de Orquestradores-D responsáveis por diferentes domínios administrativos; por exemplo, solicitar *slices* RAN fornecerem cobertura em diferentes regiões de Orquestração.

As Telcos poderão solicitar *slices* ao Orquestrador-M, especificando-os com descritores de *slices*, isto é, requisitos E2E de alto nível, como cobertura móvel em áreas específicas com conectividade a determinados *datacenters* com determinadas capacidades (ZHOU et al., 2016). Tais implementações dos descritores de *slices* incluem JSON e YAML, usando linguagens de modelagem YANG ou TOSCA (KATSALIS et al., 2016).

O Orquestrador-M é responsável por interagir com o Orquestrador-D, traduzindo esses requisitos E2E de alto nível em requisitos para segmentos de rede específicos na forma de descritores de NSSs (descritores de *slice* O-RAN, Transporte ou Core). Esses descritores de segmento conterão, por exemplo, as taxa de *download* ou latência necessárias, bem como áreas de cobertura.

Isso feito, o Orquestrador-D encaminhará esses descritores de NSSs para os respectivos orquestradores subjacentes, conforme ilustra a [Figura 19](#).

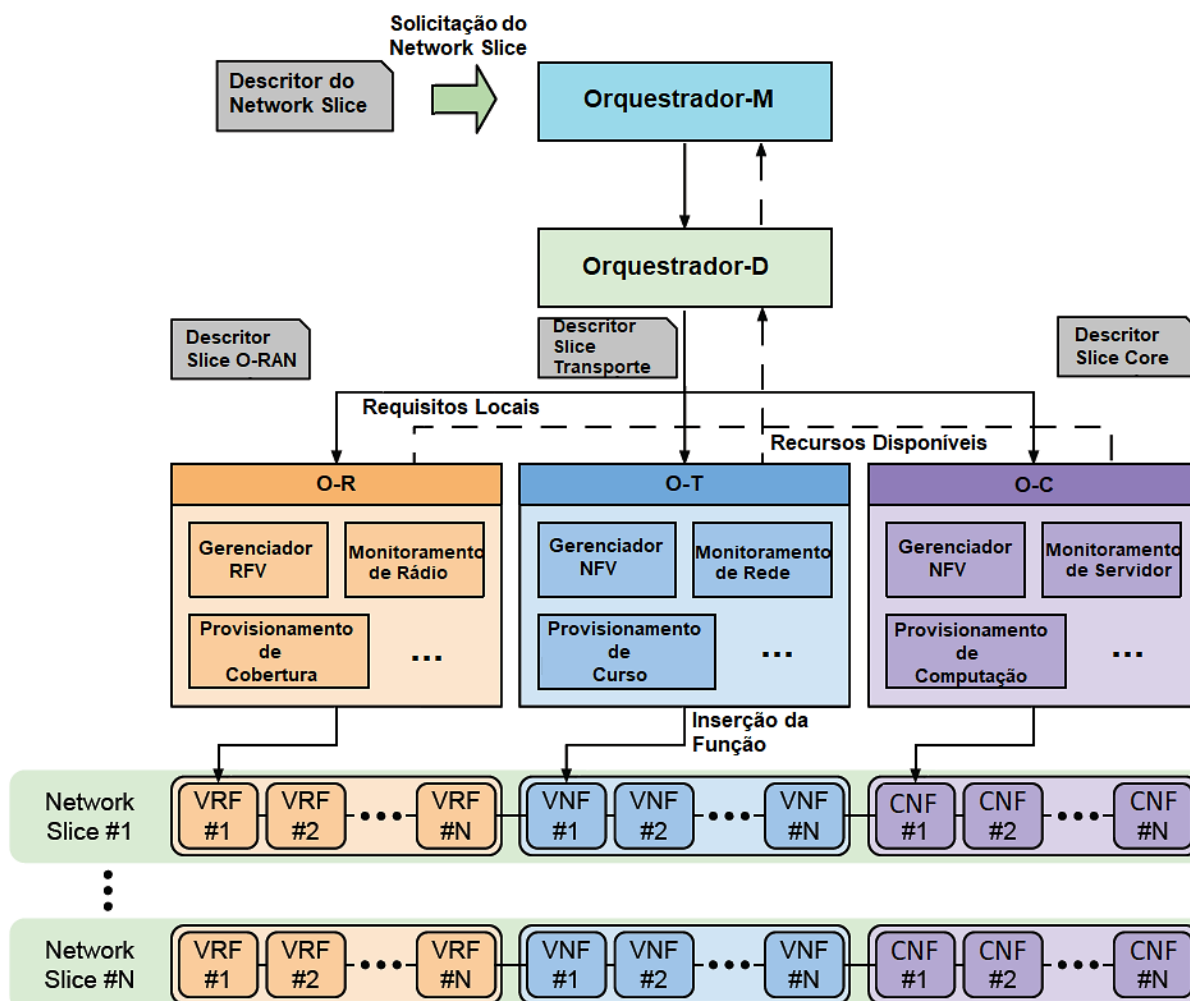


Figura 19 – Processo de *network slicing* no 5G-Transversal

Fonte: adaptada de Santos et al. (2020).

Cada orquestrador intra-regional local utilizará suas próprias diretrizes de gerenciamento de recursos para mapear os requisitos locais na configuração de rede em baixo nível, decidindo a alocação adequada dos requisitos de recursos.

Os *slices* finais resultantes podem compreender vários NSSs, cada um dos quais possuindo diferentes tipos de funções (por exemplo, VNFs e/ou VRFs). Dependendo dos recursos alocados e das funções colocadas, cada NSSs poderá ter um desempenho diferente.

Entretanto, o Orquestrador-D atuará de maneira a garantir a QoS consistente para cada *slice*, solicitando NSSs que forneçam as características demandas por cada

serviço, seja orquestrando horizontalmente em domínios administrativos diferentes ou solicitando ao Orquestrador-M a mudança de região.

4.3.4 Garantindo a disponibilidade do sistema

O sistema do 5G-Tvs deve lidar com problemas que possam surgir durante a criação ou modificação de *slices*, tais como a falta de recursos necessários, falhas na alocação de recursos ou posicionamento funcional e falhas inesperadas de comunicação ou HW.

Neste sentido, o Orquestrador-D solicita a execução de operações em vários segmentos de rede e, de acordo com os resultados de tais solicitações, confirma as operações, aceitando que os orquestradores intra-regionais locais as realizem ou não, ou seja, simplesmente revertendo a instanciação dos NSSs e atuando junto ao Orquestrador-M, se necessário.

A redundância total (modo ativo-ativo) é uma abordagem prevista, consistindo nas instâncias ativa e redundante executarem simultaneamente a mesma tarefa de processamento, onde os resultados finais do processamento são comparados e as falhas, identificadas. Tal abordagem é, no caso, adequada para ter alta disponibilidade ([SHARIAT et al., 2019](#)).

Devido à sua eficiência de custo, o esquema de redundância com compartilhamento de carga também será adotado, de modo que as tarefas de processamento possam ser executadas paralelamente quando houver sobrecarga num determinado Orquestrador.

Dessa maneira, projeta-se que todos os Orquestradores primários poderão, a qualquer momento, solicitar suporte dos seus respectivos Orquestradores secundários em situações de sobrecarga em qualquer um dos seus módulos, assim como ter suas respectivas atuações totalmente absorvidas pelos seus pares de Orquestradores secundários caso estes Orquestradores primários se tornem inoperantes por qualquer motivo.

Ainda, se todos os Orquestradores de nível 2 tornarem-se indisponíveis, o(s) Orquestrador(es) de nível imediatamente superior (nível 3) atuante(s) naquele

momento terá(ão) capacidade de assumir as funções de orquestração daqueles Orquestradores de nível 2.

Portanto, o 5G-Tvs aproveita os recursos dos Orquestradores-D (nível 2) existentes e a experiência de trabalho de cada um deles frente às suas comunidades estabelecidas para fornecer o gerenciamento de recursos e serviços do modo mais eficaz possível.

Já se todos os Orquestradores de nível 1 tornarem-se indisponíveis, o Orquestrador(es) de nível 2 atuante(s) naquele momento realizará(ão) o *handover horizontal* para garantir a continuidade dos serviços.

4.4 PROPOSIÇÃO DE UM NOVO MODELO DE NEGÓCIOS

A evolução das redes móveis 5G/B5G baseadas em nuvem, virtualizadas, desagregadas e não proprietárias apresenta uma complexidade maior às operações do que as redes legadas. Ao mesmo tempo, a monetização dessas redes de próxima geração exigirá a entrega de serviços com níveis de desempenho e confiabilidade sem precedentes ([ACENTURY, 2023](#); [HAMITI, 2023](#); [HOOD et al., 2023](#); [KINNEY, 2023](#); [NOKIA, 2023a](#); [RCR WIRELESS NEWS, 2023](#)).

Os provedores de serviços estão em uma jornada para novos paradigmas operacionais, que se concentrarão na intenção de negócios e exigirá garantias contínuas em vários domínios e fornecedores ([GORDON, 2022](#)).

Partindo dos trabalhos elaborados por [Sakurai \(2010\)](#) e [Serra \(2007\)](#), o 5G-Tvs pretende, assim, mostrar que as tecnologias 5G e B5G podem viabilizar um mercado inovador, com novos agentes que resultarão em novos modelos de negócios, sob padrões éticos necessários ([LAWRENCE, 2023](#)). Os resultados do 5G-Tvs poderão ser replicados para regiões pobres e explorados pela indústria e Telcos para definir modos de operação para soluções futuras e novos serviços.

A [Figura 20](#) ilustra uma primeira proposta de modelo de negócios em nível de serviços que o 5G-Tvs oferece, caracterizando-se como o terceiro resultado deste trabalho.

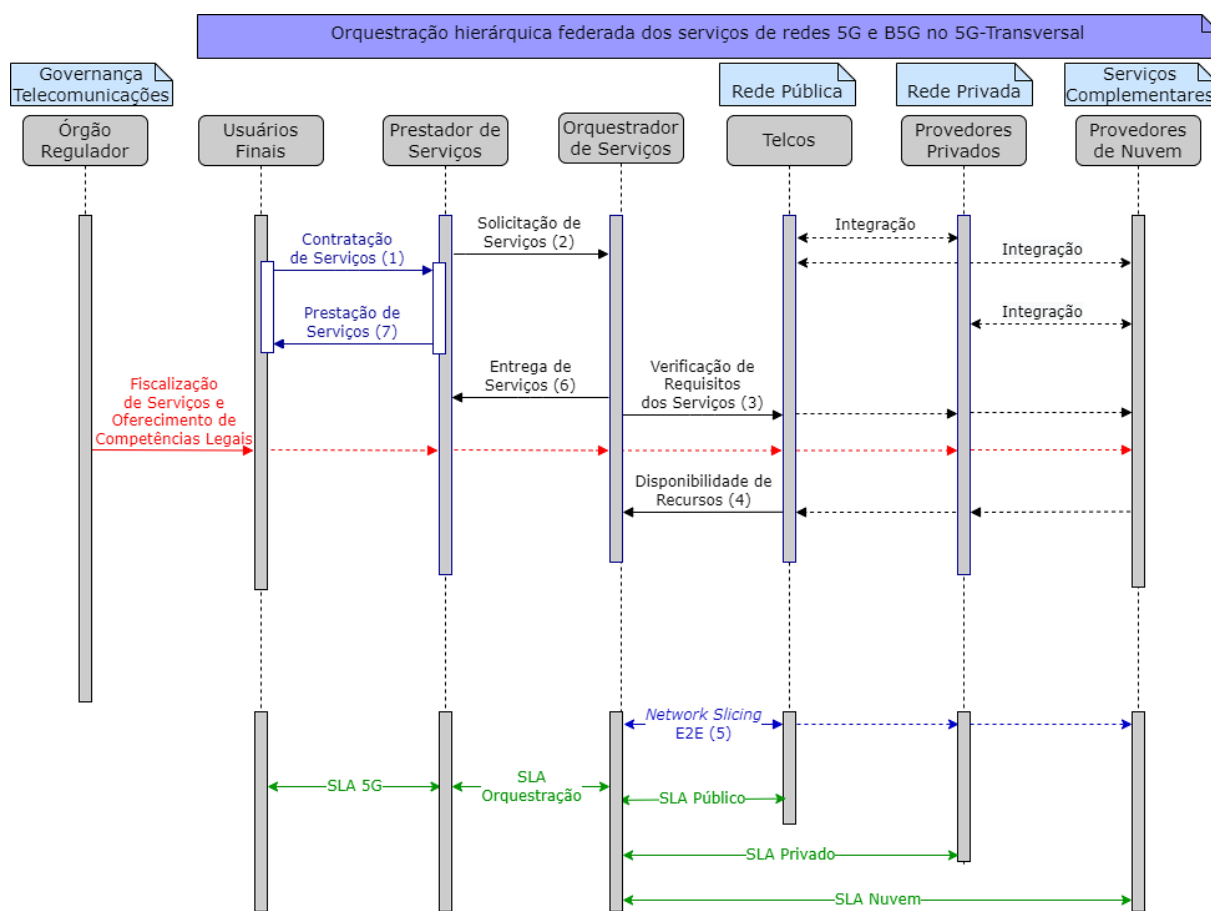


Figura 20 – Modelo de negócios proposto em serviços

Neste modelo proposto, tem-se que:

- 1) Os Usuários Finais contratarão os serviços de um Prestador de Serviços de Conectividade ou, simplesmente, Prestador de Serviços, que é a entidade “Acima do Topo” (*Over-The-Top* — OTT²⁴) responsável por prover o conteúdo desejado pelos Usuários Finais;
- 2) Por sua vez, o Prestador de Serviços contratará o Orquestrador de Serviços, que é a entidade (orquestradora) responsável por estabelecer o *slice* mais adequado ao serviço a ser prestado;
- 3) Como os *slices* serão E2E, o Orquestrador de Serviços solicitará às Telcos a respectiva verificação dos requisitos dos serviços;

²⁴ OTT é uma plataforma tecnológica que permite a distribuição de conteúdos de mídia e outros através da Internet ao usuário (ITU-T, 2023b).

- 4) As Telcos, então, responderão com a disponibilidade de recursos ao Orquestrador de Serviços, que não interferirá diretamente nos Orquestradores locais das Telcos. Salieta-se que as redes das Telcos poderão ou não estar integradas com as redes de provedores privados ou de serviços complementares como nuvem e as redes dos provedores privados poderão ou não estar integradas às redes de serviços complementares como nuvem;
- 5) O Orquestrador de Serviços processará a confecção dos *slices* aos Usuários Finais;
- 6) O Orquestrador de Serviços entregará os serviços demandados;
- 7) O Prestador de Serviços cumprirá a contratação realizada pelos Usuários Finais.

Portanto, nesse modelo de negócios, o Usuário Final não se relacionará com as Telcos diretamente, pois terá um único contrato com o Prestador de Serviços, que será o responsável pela interface com as Telcos, através do Orquestrador de Serviços.

Destaca-se que um serviço poderá ser implementado por um conjunto de aplicações e possuir um conjunto de requisitos definidos no contrato entre o Prestador de Serviços e o Usuário Final, respeitando-se o SLA contratado.

O SLA é constituído por um documento formal de acordo entre o contratante e a organização provedora de serviço. Tem como objetivo definir os tipos e os níveis de qualidade de serviço que a organização provedora de serviço se compromete a disponibilizar, além de cláusulas legais. Serve como uma ferramenta de comunicação e de prevenção de conflitos. Deve ser constantemente atualizado para revisão do acordo, adequação dos serviços e negociação de ajustes no acordo ([SERRA, 2007](#)).

O Órgão Regulador fiscalizará os serviços e oferecerá competências legais ao cumprimento inexorável dos SLAs estabelecidos, por exemplo, entre os Usuários Finais e o Prestador de Serviços (SLA 5G), Prestador de Serviços e Orquestrador de Serviços (SLA Orquestração), Orquestrador de Serviços e Telcos (SLA Público), Orquestrador de Serviços e Provedores Privados (SLA Privado), Orquestrador de Serviços e Provedores de Nuvem (SLA Nuvem).

Vale notar que os SLAs, sob os quais os serviços serão gerenciados, terão de ser mensuráveis e exceder o que a tecnologia Wi-Fi existente oferece em termos de, por exemplo, disponibilidade e tempos de resposta.

O modelo de negócios proposto será um instrumento para proporcionar a competição saudável entre os provedores de infraestrutura e de serviços de uma forma geral. No caso das Telcos, por exemplo, quem tiver disponível melhores e mais amplas redes 5G/B5G, trabalhará mais e, conseqüentemente, monetizará mais (HAMITI, 2023; SPIRENT, 2023).

Nota-se que, como a qualidade do serviço será sempre monitorada, a Telco detentora de cada *slice* deverá manter a qualidade dentro do estabelecido. Caso contrário, perderá o serviço pelo processo de *handover* horizontal gerenciado pelo Orquestrador de Serviços.

A definição do *slice* considera, depois de atendidos os requisitos técnicos, o preço, para o qual certamente a concorrência será maior entre os Prestadores de Serviços com a mesma tecnologia. Além disso, os Prestadores de Serviços com tecnologias diferentes, mas que atendam aos requisitos técnicos, também entram na disputa, melhorando o universo de concorrência.

Será mandatório novo modelo regulatório, uma vez que a negociação dos *slices* levará em conta os parâmetros operacionais das Telcos, bem como seus comportamentos estatísticos, procurando prever a infraestrutura em questão durante a prestação do serviço. O ideal, assim, é que o Orquestrador de Serviços tenha acesso total às informações operacionais das redes das Telcos.

O novo modelo regulatório proposto tem potencial para melhorar a concorrência, abrindo oportunidades a pequenas e médias empresas, o que também implicará melhores preços aos usuários.

Na regulação e nas políticas público-privadas, deve ser levado em consideração que a aplicação do 5G-Tvs atenderá várias classes de serviços com características distintas. Isso será estratégico desde empresas a nações.

Por conseguinte, esta proposta de modelo de negócios poderá, futuramente, suportar o aprimoramento do ato regulatório para ampliação, democratização e melhoria do desempenho das redes 5G e B5G. Caberá ao Órgão Regulador avaliar

os modelos regulatórios (largura de banda, competição, qualidade, cobertura e infraestrutura), identificando possíveis barreiras regulatórias que impactem o desempenho e a expansão das redes 5G e B5G, mas também garantindo o total equilíbrio de mercado.

4.5 VERIFICAÇÃO DO PROJETO

Esta seção verifica o projeto do 5G-Tvs através de um Estudo de Caso para atendimento médico em que as redes 5G e B5G oferecerão suporte de conectividade para salvar vidas durante o deslocamento emergencial dos pacientes ao hospital.

4.5.1 Estudo de Caso: Serviço de Atendimento Ultraconectado Móvel de Urgência

O Serviço de Atendimento Ultraconectado Móvel de Urgência (SAUMU) refere-se a um caso de uso hipotético, porém plausível, ora proposto neste trabalho, o qual visa melhorar a eficácia de atendimento médico de urgência. Para tanto, será necessário o transporte de pacientes através da implementação de veículos equipados com conectividade 5G/B5G ou Wi-Fi 6/6E (podendo ser também novas tecnologias futuras de Wi-Fi), utilizando-se equipamentos médicos como raio X, ultrassom, eletrocardiograma, monitores de sinais vitais e outros. Esses equipamentos comunicar-se-ão com a rede privada 5G/B5G de um centro médico de referência ou hospital através da rede pública 5G/B5G ou por conexão NTN, onde a equipe médica especialista dará apoio à equipe dos veículos e preparará a emergência do hospital para a recepção do paciente.

A rede privada 5G/B5G tem como principal objetivo garantir a segurança da informação e administração da rede. Todavia, diversos casos de uso demandarão integração entre as redes 5G/B5G privada e pública. Um desses casos de uso, o SAUMU, representado na [Figura 21](#), possibilitará, portanto, que veículos equipados com multitecnologia e serviços avançados de comunicações móveis 5G/B5G recebam suporte médico especializado em caso de emergência médica complexa ou quando um certo nível de especialização for necessário.

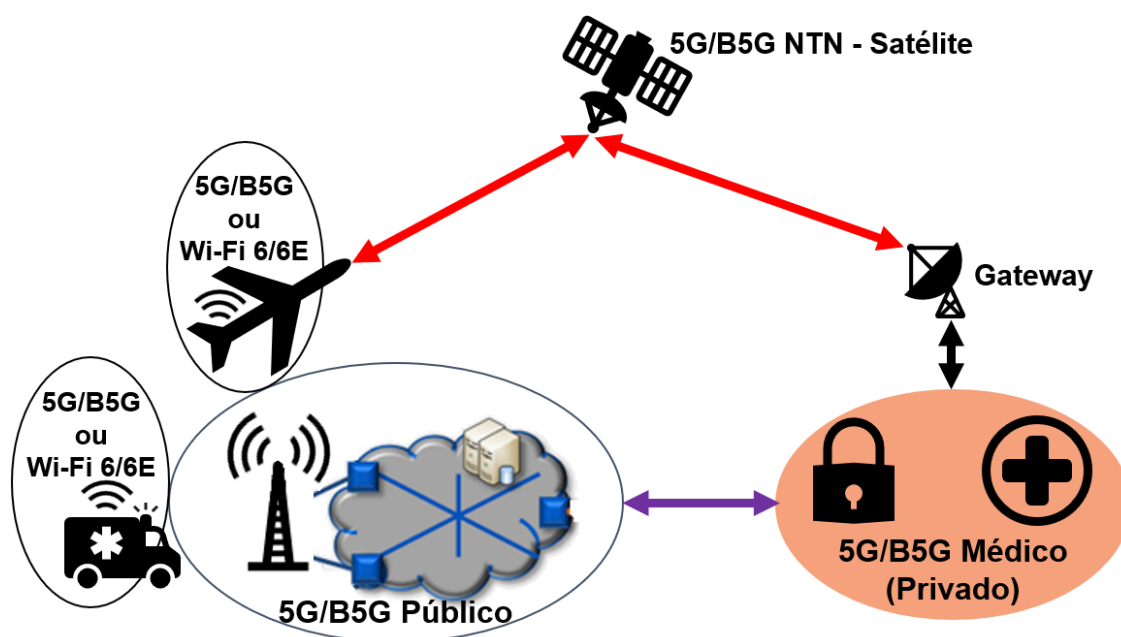


Figura 21 – Cenário do Serviço de Atendimento Ultraconectado Móvel de Urgência

O SAUMU poderá tratar um parto em andamento, um paciente crítico complexo, uma suspeita de ataque cardíaco ou acidente vascular cerebral remotamente, com vídeo de alta definição durante o atendimento ao paciente no veículo ultraconectado (ambulância ultraconectada ou avião ultraconectado). Poderá, ainda, oferecer comunicação com outros veículos (*Vehicle-to-Vehicle* — V2V) ou infraestruturas (*Vehicle-to-Infrastructure* — V2I) para abrir passagem e poupar tempo à chegada ao hospital.

Um exemplo de equipamentos adicionais conectados no veículo ultraconectado poderá ser uma câmera onde a imagem, que será enviada através de um *tablet*, será dupla: de um lado será observada a aparência do paciente na unidade do veículo e, do outro, a do monitor com os sinais vitais de a pessoa afetada, imagens de ultrassom, raio X, eletrocardiograma etc.

Da mesma forma, além do que expõem [ABDi \(2022\)](#), [Matsubayashi \(2021\)](#), [Oliveira, Batista Jr, Novais, Takashima, Stange, Martucci Jr, Cugnasca e Bressan \(2023\)](#), e [Tomás \(2023\)](#), será estabelecida uma conversa entre a equipe no veículo ultraconectado e o médico especialista, que estará conectado à rede privada do hospital e dará instruções para colaborar no atendimento ao paciente. Vale salientar que, internamente no veículo ultraconectado, todos os dispositivos estarão

conectados diretamente por 5G/B5G ou via Wi-Fi 6/6E e o veículo ultraconectado, à rede pública 5G/B5G ou NTN.

A principal inovação neste caso de uso será a implementação do próprio veículo ultraconectado com sua rede interna conectada aos equipamentos e instrumentos médicos. Os principais desafios serão:

- a conexão redes 5G/B5G pública e privada ou rede 5G/B5G NTN e rede privada, onde será necessário validar os parâmetros de latência, banda e continuidade de serviço nas operações de trocas de domínio e/ou região, o uso de O-RAN, computação de borda e nuvem distribuída;
- a viabilização de conectividade com garantia de serviço, através do *network slicing* e orquestração dos serviços nas redes pública, NTN e privadas, além de contribuição para as ações de regulação.

O SAUMU proporcionará um grande avanço tecnológico que demandará o 5G-Tvs trabalhar os *slices* com operação eficiente das redes móveis virtuais dedicadas às emergências médicas e assistência para garantir o atendimento e a capacidade de comunicação, independentemente do número de usuários existentes na mesma célula de comunicação.

Para, então, contribuir com a execução das demandas do SAUMU, a [Figura 22](#) mostra o fluxograma das operações de todo o processo estocástico de interação necessário entre os Orquestradores do 5G-Tvs tanto para a criação quanto modificação de um ou mais *slices*. Destaca-se que os losangos representam as tomadas de decisões e os retângulos, os estados resultantes das respectivas decisões.

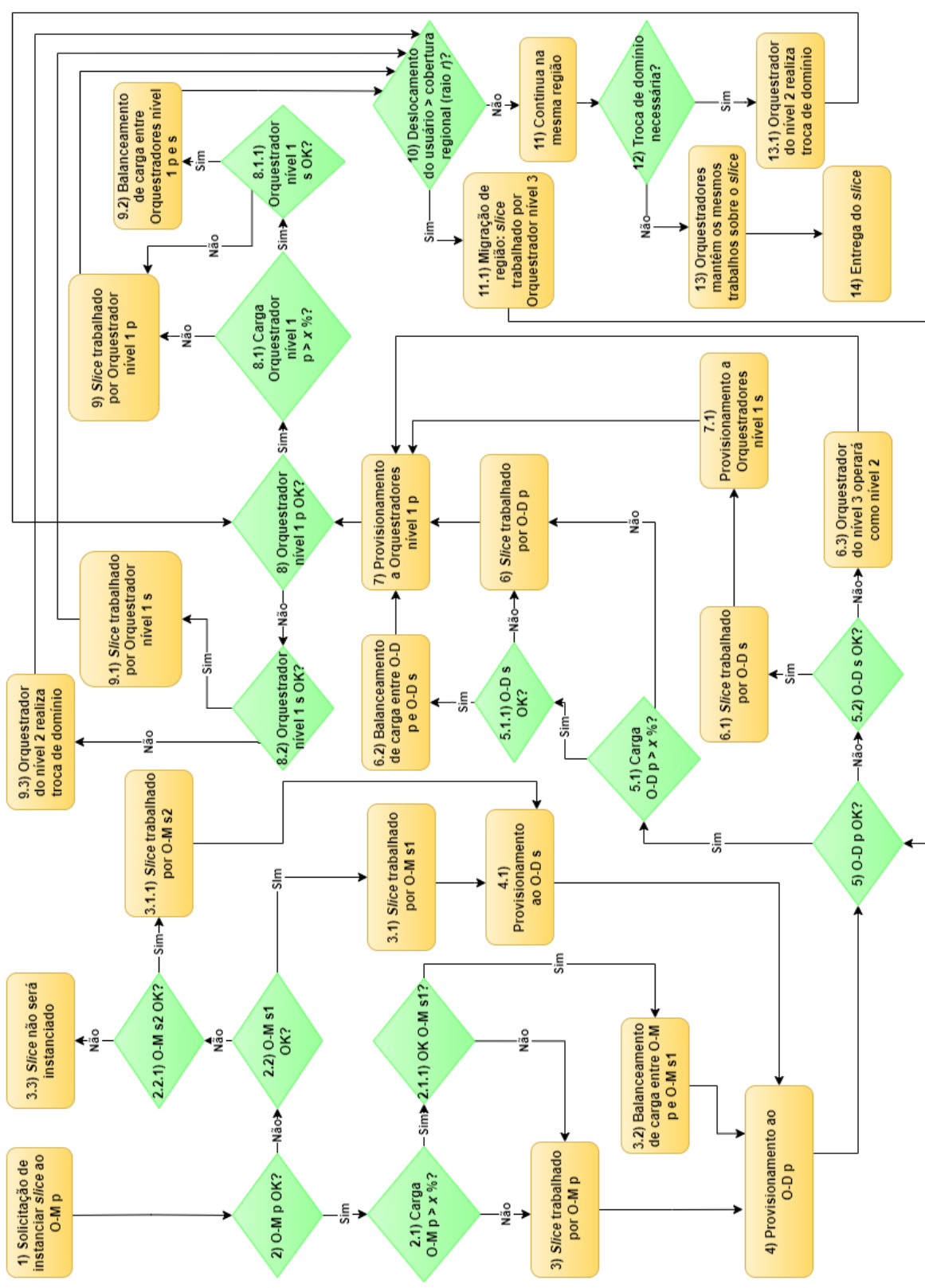


Figura 22 – Processo de interação entre os Orquestradores do 5G-Transversal

Este processo ocorrerá em 14 (catorze) etapas principais, a saber:

- 1) Inicia-se o SAUMU e segue a solicitação de instanciar o *slice*²⁵ ao Orquestrador de Serviços, seguindo pelo O-M p;
- 2) Processo de checagem dos estados de operação dos três Orquestradores de nível 3 em relação a estarem operantes e à carga de trabalho do O-M p;
- 3) Existem 5 (cinco) possibilidades: se o O-M p estiver operante e sem sobrecarga (carga maior do que x %) de trabalho, a solicitação recebida no item 1 segue por ele;
 - 3.1) se o O-M p não estiver operante e o O-M s1 estiver (operante), a solicitação recebida no item 1 segue pelo O-M s1;
 - 3.1.1) se o O-M p, nem o O-M s1 estiverem operantes, mas o O-M s2 estiver operante, a solicitação recebida no item 1 segue pelo O-M s2;
 - 3.2) se o O-M p estiver operante e com sobrecarga de trabalho em qualquer um de seus módulos e se o O-M s1 estiver operante, o O-M p dividirá as tarefas de orquestração com o O-M s1 quanto ao(s) módulo(s) do O-M p que estiver(em) sobrecarregado(s);
 - 3.3) se o O-M p, nem o O-M s1 e nem o O-M s2 estiverem operantes, a solicitação recebida no item 1 será abortada e o(s) *slice*(s) não será(ão) instanciado(s)²⁶;
- 4) De acordo com o que ocorrer no item 3, o provisionamento de confecção do *slice* segue ao O-D p;
 - 4.1) ou o provisionamento do *slice* segue ao O-D s;
- 5) Processo de checagem dos estados de operação dos Orquestradores nível 2;

²⁵ Criar ou modificar um único *slice* ou mais de um *slice*, dependendo da(s) demanda(s) do(s) serviço(s).

²⁶ Esta situação caracteriza uma interrupção total da prestação dos serviços de orquestração. Por isso, há dois metaorquestradores secundários previstos a serem instalados em localidades distintas.

- 6) Se o O-D p estiver operante e sem sobrecarga de trabalho ou se se o O-D p estiver operante com sobrecarga de trabalho, mas o O-D s não estiver operante, a solicitação recebida no item 1 segue pelo O-D p. Existem mais 3 (três) possibilidades, como seguem nos itens 6.1, 6.2 e 6.3;
- 6.1) se o O-D p não estiver operante, mas o O-D s estiver, a solicitação recebida no item 1 segue pelo O-D s;
 - 6.2) se o O-D p estiver operante, com sobrecarga de trabalho em qualquer um de seus módulos, e se o O-D s estiver operante, o O-D p dividirá a orquestração com o O-D s sobre o(s) módulo(s) que estiver(em) sobrecarregado(s);
 - 6.3) se o O-D p, nem o O-D s estiverem operantes, a solicitação recebida no item 1 será trabalhada diretamente pelo Orquestrador(es) de nível 3 operante(s);
- 7) O provisionamento do *slice* segue aos Orquestradores do nível 1 (O-R p, O-R s, O-T p, O-T s, O-C p e/ou O-C s). Caso o *slice* esteja sendo trabalhado pelo O-D p, a solicitação seguirá aos Orquestradores primários do nível 1;
- 7.1) se o *slice* estiver sendo trabalhado pelo O-D s, a solicitação seguirá aos Orquestradores secundários do nível 1 e, então, aos Orquestradores primários do nível 1;
- 8) Processo de checagem dos estados de operação dos Orquestradores de nível 1 em relação a estarem operantes e às suas respectivas cargas de trabalho;
- 9) Se um determinado Orquestrador de nível 1 p estiver operante e sem sobrecarga de trabalho, a solicitação recebida no item 1 segue por ele. Existem mais 3 (três) possibilidades, como seguem nos itens 9.1, 9.2 e 9.3;
- 9.1) se um determinado Orquestrador de nível 1 p não estiver operante e seu respectivo Orquestrador de nível 1 s estiver, a solicitação seguirá por este Orquestrador de nível 1 s;

- 9.2) se um determinado Orquestrador de nível 1 p estiver operante e com sobrecarga de trabalho em qualquer um de seus módulos, este Orquestrador dividirá a orquestração com o Orquestrador de nível 1 s correspondente sobre o(s) módulo(s) sobrecarregado(s), caso o respectivo Orquestrador de nível 1 s estiver também operante;
- 9.3) se um determinado Orquestrador de nível 1 p, nem o seu respectivo Orquestrador de nível 1 s estiverem operantes, o Orquestrador de nível 2 operante fará, então, o *handover* horizontal;
- 10) Processo de checagem de mobilidade regional;
- 11) Se o usuário não estiver saindo da cobertura regional (círculo de raio r sobre o centro de cada Orquestrador-D p) de Orquestração, não haverá troca de região;
- 11.1) porém, se o usuário estiver saindo da cobertura regional, o Orquestrador de nível 3 operante fará a migração de região, orquestrando o *slice* juntamente com os Orquestradores de níveis 1 e 2 da nova região;
- 12) Processo de checagem da necessidade de migração de domínio;
- 13) Se não for necessária a migração de domínio, os Orquestradores nível 1 seguem trabalhando;
- 13.1) caso seja necessária, o Orquestrador de nível 2 operante fará o *handover horizontal*, verificando o melhor Orquestrador de nível 1 que poderá atender as demandas, sendo ele primário ou secundário;
- 14) Por fim, ocorrerá a entrega do *slice* de acordo com os requisitos e continuidade solicitados pelo(s) serviço(s) do(s) Usuário(s) Final(is).

Assim, o SAUMU trará os seguintes principais avanços:

- a) inovação dos serviços médicos: (i) possibilidade de tratamento especializado antes da chegada do paciente ao hospital, o que implicará reduzir o número de sequelas e mortes; e (ii) possibilidade de diversos exames, teleconsultas e

- telecirurgias fora de ambientes controlados, utilizando-se redes 5G/B5G e NTN, pública e/ou privada com garantia de serviço assegurada;
- b) inovação tecnológica: (i) aumento da taxa de transmissão e recepção de dados; (ii) redução do tempo de resposta nas comunicações em relação às redes 4G; (iii) melhorias de segurança das informações; e (iv) utilização de O-RAN, computação de borda e nuvem distribuída;
- c) superação de desafios científicos e tecnológicos: (i) integração entre redes 5G/B5G NTN, pública e/ou privada com resiliência de rede crítica para execução de serviços concorrentes e avançados ocorrendo simultaneamente com qualidade e continuidade de serviços, visando a uma experiência e controle de serviço perfeitos, garantindo o controle de fluxo das diversas aplicações que compõem cada serviço, incluindo a utilização de RICs da O-RAN; (ii) possibilidade de proposição para alteração e melhoria da legislação vigente dos serviços de telecomunicações; (iii) *network slicing* e NSO; (iv) granularidade de controle e operação da rede; (v) garantia dos SLAs; e (vi) melhoria de CAPEX e OPEX.

4.6 ASPECTOS CONTRIBUTOS

Podem-se inferir os seguintes argumentos que não apenas complementam a motivação deste trabalho e o justificam de maneira original, mas sobre os quais há as principais contribuições:

4.6.1 Avanço no estado da arte

A implementação do *network slicing* deve ser realizada utilizando-se todos os recursos, físicos ou virtuais, presentes na área de prestação do serviço, independentemente da tecnologia utilizada, mas que atendam aos requisitos exigidos pela aplicação. Dentre os que atenderem aos requisitos, será escolhido o de menor custo, com a garantia dos SLAs estabelecidos.

Para realizar o *network slicing*, a virtualização é necessária, pois permite desempenho, escalabilidade e agilidade aprimorados. A característica mutável de um componente virtual contribui em reduzir o gerenciamento do ciclo de vida ao suporte a elementos físicos da rede (RODRIGUEZ; GUILLEMIN; BOUBENDIR, 2020). Entretanto, a infraestrutura virtual é deveras difícil de gerenciar e praticamente impossível de dimensionar, pois um grande volume de componentes virtuais poderá existir à medida que os serviços forem demandados (MUNALINGAL, 2020).

Se não houver automação E2E, será difícil resolver os problemas que surgirão à medida que as redes 5G e B5G forem escaladas (QUINTANA-RAMIREZ et al., 2018). Nesse sentido, a filosofia adotada para a arquitetura do 5G prevê que o Orquestrador dos Serviços de Rede implemente os *slices* para cada serviço, automatizadamente, garantindo os requisitos necessários para o provimento do serviço ao Usuário Final, de acordo com o contratado, o que é corroborado pelo *framework* 5G-Tvs.

O 5G-Tvs oferece suporte para arquiteturas de rede escaláveis, aproximando os recursos de processamento do Usuário Final, distribuindo o processamento em nuvem pela borda inteligente conectada. Dessa forma, atende às necessidades das aplicações sob topologias desagregadas e segregadas, ou seja, escaláveis, econômicas e adaptáveis.

A resiliência das comunicações E2E é outro ponto notável: o 5G-Tvs propõe um sistema de próxima geração sobre uma base sólida para aumentar resiliência em antecipação aos desafios futuros, em termos de segurança, privacidade, disponibilidade etc., a partir do dispositivo do Usuário Final até o *Core* da rede.

4.6.2 Progresso social e econômico

Com o 5G-Tvs, ter-se-á uma solução de orquestração capaz de realizar os *slices* sob diferentes tecnologias de telecomunicações entre diferentes Telcos em redes públicas e/ou privadas, de forma aberta e contínua. Pretende-se, assim, impactar a Rede de Gerência de Telecomunicações (*Telecommunications Management Network* — TMN) através de futuras proposições de melhorias em normas para padronização e regulação de telecomunicações.

O novo modelo de negócios proposto poderá reduzir custos ao Usuário Final (possibilitando que tenha maior conectividade), assim como melhorias de CAPEX e OPEX às Telcos, em que o Usuário Final (contratante do serviço) contrata diretamente um Prestador de Serviços, que se responsabiliza pela entrega do serviço e contratação da infraestrutura física e/ou lógica necessária.

Assim, não será necessário que o Usuário Final gerencie contratos diferentes, seguindo, como ponto de partida, o modelo estabelecido por [Serra \(2007\)](#). Neste modelo, o Prestador de Serviços entrega as demandas do serviço ao Orquestrador de Serviços, que, por sua vez, responsabiliza-se pela conexão E2E, garantindo a QoS de comunicações necessária ao(s) serviço(s) contratado pelo Usuário Final.

Haverá uma melhoria de OSS e BSS: no 5G-Tvs, diferentemente dos modelos atuais, a Telco será transparente ao Usuário Final, deixando clara as responsabilidades do Prestador de Serviços ao Usuário Final. Isto eliminará os conflitos atuais sobre o(s) responsável(is) no caso da descontinuidade na prestação de um dado serviço.

5 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões do presente trabalho. Ele contém as considerações iniciais; o resumo das principais contribuições; as limitações associadas a esta pesquisa; as perspectivas de continuidade e sugestões de trabalhos futuros; e as ponderações finais.

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Prevê-se que o 5G seja uma rede multisserviço que suporte uma ampla gama de verticais com um conjunto diversificado de requisitos de desempenho e serviços, baseando-se na divisão de uma rede física em várias redes lógicas isoladas. Torna-se necessária e desafiadora a tarefa de orquestrar os serviços dessa rede.

A concepção do 5G-Tvs é emergente e futurista, pois objetiva oferecer ao mercado uma tecnologia que inexiste atualmente. Diferencia-se de soluções para orquestração vertical que realizam o *network slicing* sempre considerando a mesma tecnologia e Telco. Portanto, a inovação deste trabalho encontra-se na maneira que traz a horizontalidade do *framework* de Orquestração proposto e no novo modelo de negócios que pode ser ofertado.

Fundamentalmente, o 5G-Tvs é uma solução automatizada de orquestração hierárquica federada dos serviços de redes 5G e B5G em domínios heterogêneos, que traz controle e gerenciamento avançados. A nuvem distribuída tem um papel de protagonista no 5G-Tvs. A flexibilidade, confiabilidade, resiliência e extensibilidade necessárias só podem ser fornecidas pela nuvem distribuída. O 5G-Tvs, então, expande o 5G para uma nova classe de experiências de computação distribuída de baixa latência. Atuando sobre o *network slicing* de forma consistente em regiões e domínios distintos, o 5G-Tvs vem para:

- a) reduzir os tempos de resposta e os de operação com a execução mais rápida das tarefas;
- b) reduzir erros manuais de configuração dos elementos;

- c) obter maior eficiência para lidar com tarefas cada vez mais dinâmicas e complexas, permitindo novos casos de uso em redes 5G/B5G;
- d) manter a conformidade das configurações;
- e) fornecer granularidade de controle de rede sob ferramentas que forneçam visibilidade completa do ciclo de vida dos *slices* e sinalizem erros e interrupções;
- f) suportar a telemetria;
- g) fornecer aos desenvolvedores de aplicativos a visibilidade e controle sobre os serviços, com camadas de gerenciamento, dados e cobrança conforme o necessário;
- h) melhorar o faturamento dos serviços oferecidos ao Usuário Final;
- i) oferecer tantas redes quanto forem necessárias ao Usuário Final, como parte de sua mesma contratação (sem a necessidade de *roaming*), avançando sobre as propostas de desenvolvimentos nos cartões do Módulo de Identidade do Assinante embutido (*embedded Subscriber Identity Module* — eSIM) ou integrado (*integrated Subscriber Identity Module* — iSIM), e tecnologias associadas como Cartão de Circuito Integrado Universal (*Universal Integrated Circuit Card* — UICC) e Múltiplas Identidades de Assinantes Móveis Internacionais (*Multiple International Mobile Subscriber Identities* — Multi-IMSI) (KALEIDO INTELLIGENCE, 2023; MALIM, 2023; SHRIVASTAVA, 2023);
- j) permitir Telcos diferentes trabalharem numa mesma solução sob gerenciamento hierárquico;
- k) suportar processos estáveis com relação à engenharia de tráfego das redes 5G/B5G;
- l) reduzir os custos operacionais;
- m) potencializar a integração e escalabilidade frente à demanda de novos serviços;
- n) melhorar a disponibilidade e confiabilidade da NSO;
- o) garantir a continuidade dos serviços E2E;

p) promover a resiliência da solução como um todo.

Os objetivos propostos foram alcançados e as questões de pesquisa, respondidas, pois se apresentou detalhadamente o 5G-Tvs e sua aplicabilidade através de um Estudo de Caso em atendimento médico ultraconectado.

Apresentou-se e se discutiu, no decorrer do [Capítulo 4](#) (Resultados e discussão), a necessidade da interação de diversos Orquestradores dos serviços de redes 5G e B5G em orquestração dinâmica e horizontal para se alcançar a relação custo x benefício no *network slicing* adequada aos requisitos dos serviços e respectivas aplicações fora de um ambiente controlado em laboratório ou afim.

Mostrou-se, sob a [Figura 20](#), como poderá ser implementado um novo modelo de prestação de serviços E2E, de forma a garantir a continuidade dos serviços.

5.2 CONTRIBUIÇÕES

Na revisão da literatura científica, foram encontrados alguns modelos que constam na [Seção 3.2](#) (Avaliação de modelos de orquestração similares da literatura), prezando pela solução de NSO de forma a estendê-la integradamente e garantir uma solução que possa ser implementada fora de um ambiente controlado em redes móveis.

Assim, além do exposto na [Seção 5.1](#) (Considerações iniciais) e discutido na [Seção 4.6](#) (Aspectos contributos), a presente tese apresenta uma solução que parte do avanço científico ao tecnológico, implicando uma contribuição original e inovadora sob os seguintes principais aspectos:

a) proposta de um metamodelo aberto, tal como de arquiteturas de orquestração integradas E2E, o qual suporta balanceamento de carga entre os orquestradores, contextualização de regiões de orquestração, metaorquestração em terceiro nível e redundância parcial e total dos orquestradores. Isso viabiliza, por exemplo, a redução da sobrecarga de infraestrutura, assim como as características do modelo de negócios

proposto, associando, de forma transparente ao Usuário Final, os Prestadores de Serviços às Telcos por meio de um Orquestrador de Serviços;

- b) um novo modelo de negócios em que o Usuário Final aproveitará melhor as características das redes convergentes, poderá monitorar os serviços contratados e entender o relatório apresentado pelo Prestador de Serviços, assim como contribuir, por exemplo, às ações da ITU.

5.3 CUMPRIMENTO DA PESQUISA

Este trabalho foi desenvolvido com base numa pesquisa aplicada, ou seja, visando à resolução de problemas práticos e à inovação disruptiva (não apenas incremental), de modo a criar novos mercados, transformando o setor de telecomunicações. Todavia, consiste num primeiro passo para o endereçamento completo da questão da continuidade de serviços em redes 5G e B5G. Os resultados do 5G-Tvs são apresentados a partir de fundamentos em conceitos teóricos.

Em se considerando o nível de maturidade tecnológica até 9 (nove), de acordo com os Níveis de Prontidão de Tecnologia (*Technology Readiness Levels* — TRLs) da Administração Nacional Aeronáutica e Espacial norte-americana (National Aeronautics and Space Administration — NASA) (LAVIN, et al., 2022; SALAZAR; RUSSI-VIGOYA, 2021), este trabalho atinge, até então, o nível TRL-3, estabelecendo função crítica de forma analítica rumo a uma PoC.

A pesquisa fora limitada, propositadamente, ao estado da arte das redes 5G e B5G no que tange aos aspectos de *network slicing* e NSO, bem como nas lacunas de pesquisa em questão, visualizando-se um panorama de entendimento conceitual do que se tem e poderá ter. Contudo, apesar desta limitação teórica, foi possível atingir plenamente os objetivos propostos.

5.4 PERSPECTIVAS DE CONTINUIDADE E TRABALHOS FUTUROS

Esta tese de doutorado é aderente ao modelo tripla hélice de inovação (BASSO; PEREIRA; PORTO, 2021; FIGUEIREDO; FERNANDES; ABRANTES, 2023). Por conseguinte, poderá ser estendida através do conjunto de interações aqui

descrito entre academia, indústria e governo para a real promoção do desenvolvimento econômico e social.

Cientificamente, o 5G-Tvs traz uma vasta quantidade de tecnologias que devem ser introduzidas para suportar todo o processo de *network slicing* em redes 5G e B5G. Isso representa um desafio de pesquisa na definição do método para avaliar com precisão a funcionalidade e o desempenho E2E do sistema como um todo quando todas essas tecnologias forem interligadas em redes reais ou ambientes de simulação computacional.

A combinação de novas frequências, formatos e códigos de camada física, funções de rede virtualizadas, computação em nuvem distribuída etc. trazem uma cadeia de interações complexas, quiçá imprevisíveis, que demandarão uma metodologia eficiente de pesquisa para a extensão prática do 5G-Tvs.

É, portanto, importante que esta extensão seja multidisciplinar e temática, visando mitigar os desafios em Engenharia de Computação no que tange aos aspectos de orquestração dinâmica em tempo de operação, computação em nuvem distribuída, BD distribuído e algoritmos de gestão com IA, relacionados vitalmente à orquestração dos serviços de redes 5G e B5G.

Além do que que foi apresentado até então, os seguintes aspectos devem também ser considerados para, futuramente, serem validados num protótipo, de tal forma a promover uma grande transformação digital, tornar os resultados do 5G-Tvs mais significativos e promover a sua massificação:

- a) arquiteturas dos Orquestradores intra-regionais locais (Telcos);
- b) possível melhoria das arquiteturas dos Orquestradores federados com a implementação, por exemplo, do Encadeamento de Funções de Serviço (*Service Function Chaining* — SFC) (ADOGA; PEZAROS, 2022; BARI; CHOWDHURY; BOUTABA, 2019; CHEN et al., 2022; GHARBAOUI et al., 2022; KIBALYA et al., 2020; MATOS, 2021; PAGANELLI; CAPPANERA; CUFFARO, 2021; TOUMI et al., 2021; WU; ZHOU, 2021);

- c) descrição da integração lógica de todos os Orquestradores;
- d) exploração das definições de [ETSI \(2022b\)](#) para uma definição em detalhes do mapeamento do CISM à estrutura NFV-MANO;
- e) definição das APIs para comunicação do sistema. Destaca-se que o 5G-Tvs não atuará diretamente no HW, mas deverá invocar os orquestradores nos respectivos domínios, isto é, invocar as APIs de cada solução local para estabelecer os slices E2E;
- f) descrição dos programas e algoritmos relacionados aos módulos das arquiteturas, incluindo a utilização de IA;
- g) implementação criteriosa de *testbeds* e/ou simulações computacionais ([ETSI, 2023c](#); [FREE5GC, 2022a, 2022b](#); [LEE, 2022](#); [LINUX FOUNDATION NETWORKING, 2023a, 2023b](#); [OPENINFRA PROJECT, 2023](#));
- h) formulação e modelagem matemáticas para avaliação do desempenho da solução proposta no 5G-Tvs, de maneira, por exemplo, análoga à realizada por [Tinini \(2019\)](#);
- i) capacidade de resiliência do 5G-Tvs sobre o comportamento dinâmico dos Orquestradores;
- j) segurança sobre os Orquestradores e o sistema como um todo;
- k) sustentabilidade direta e indireta relacionada às melhorias de comunicações: papel do 5G-Tvs em colaborar com a eficiência energética dos equipamentos e serviços. Como, efetivamente, o 5G-Tvs pode impulsionar o crescimento das redes com melhor sustentabilidade? Como medir as reduções energéticas das redes e serviços com o 5G-Tvs, tanto no consumo de eletricidade quanto nas emissões de de carbono? Quais considerações poderão aumentar (ou diminuir) o impacto potencial do 5G-Tvs, ou aumentar (ou diminuir) o valor de tais impactos sobre o meio ambiente direta (redes de telecomunicações) e indiretamente (por exemplo, em casos de uso como cidades inteligentes)?;
- l) análise regulatória para suportar a transformação digital. As Agências Reguladoras de Telecomunicações, tais quais a Anatel, têm o desafio de regular e monitorar as redes de telecomunicações que suportem todas essas aplicações, definindo *frameworks* conceituais que possam ser aplicados,

considerando-se o dinamismo dos serviços ao Órgão Regulador para implantar modelos de negócios alternativos;

m) estudo aprofundado e crível dos processos, atividades, investimentos, custos e receitas esperadas em modelos de negócios alternativos.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A demanda de novos serviços faz com que as tecnologias de redes móveis tenham de evoluir para atender um mundo cada vez mais conectado. A O-RAN, funções de rede 5GC e aplicativos de borda trazem uma abordagem nativa da nuvem com *containerização* e orquestração do Kubernetes, que deve incluir estruturas de IA.

O agrupamento dessas tecnologias num mesmo cenário traz a necessidade de implementar novas arquiteturas de redes, que implicam novas estruturas de negócios. A convergência das engenharias de computação e telecomunicações é, pois, vital num ambiente heterogêneo.

Diversas questões são provocadas e podem ser levantadas a partir do 5G-Tvs, tais como:

- haverá novos relacionamentos entre as Telcos, os Prestadores de Serviços e Órgãos Reguladores para atender às demandas nacionais de cobertura?;
- o que se poderá aprender com modelos de negócios alternativos para implantação de infraestrutura?;
- quais serão as implicações de como as redes 5G e B5G deverão ser implantadas em diferentes regiões?;
- quem deverá possuir espectro de frequência e como serão os leilões?;
- as Telcos e os Prestadores de Serviços poderão trabalhar de forma totalmente independente e o que isso implicaria no ato regulatório?

De qualquer forma, o 5G-Tvs tenciona e ratifica a possibilidade de causar os seguintes impactos:

- a) científico, com o avanço no estado da arte. O *network slicing* será trabalhado sobre as Telcos que atenderem aos requisitos dos serviços com o menor custo, considerando o monitoramento dos parâmetros de forma preditiva e, se necessário, realizando a troca de domínio e/ou migração de região para garantir a continuidade de serviço E2E;
- b) tecnológico, trazendo inovação ao catalisar o processo de desagregação de redes e simplificar a coleta de dados para regulação, de modo que o Órgão Regulador possa melhor auferir a qualidade de serviço das concessionárias de telecomunicações envolvidas, o que também implicará avanços em padronização;
- c) social, implicando melhor sustentabilidade e caracterizando-se por ser um ponto relevante em tempos de distanciamento e/ou isolamento social (pandemia de COVID-19) e outros afins, uma vez que poderá ampliar a cobertura e capacidade de tráfego, ou seja, melhorar a oferta de Internet aos Usuários Finais;
- d) econômico, melhorando o universo da concorrência entre os Prestadores de Serviços ou as Telcos, por exemplo. A desagregação de rede é, novamente, outro ponto a se considerar, pois deverá aumentar o número de *players* no mercado e o 5G-Tvs poderá ser uma espécie de “catalisador” para o processo de desagregação, criando novas oportunidades de negócios;
- e) sustentável, tendo em vista a maneira e tempo de uso racionalizados e aprimorados aos quais serão submetidos os diversos recursos de HW das Telcos em todos os segmentos (RAN, TN, Core e DCN) de suas redes de telecomunicações, implicando a redução no consumo energético ([KESHISHYAN, 2023](#));

f) político, com aderência às políticas nacionais em telecomunicações. A definição do *slice* poderá considerar o estabelecimento da utilização das redes, de acordo com a política de cada país no mercado de telecomunicações. Isso se aplica aos fabricantes e fornecedores de equipamentos de redes em cada segmento, visto os entraves existentes mundialmente na área de telecomunicações quanto à preocupação sobre a possível utilização de dados internos governamentais e outros. Dessa forma, caracterizando-se por ser uma solução técnico-científica para as “batalhas” comerciais e outras que, atualmente, estendem-se entre as principais nações detentoras da tecnologia 5G ou que estão em vias de obter tal tecnologia.

REFERÊNCIAS

- 3GPP – 3rd Generation Partnership Project. **3GPP TS 23.032 V17.2.0 (2021-12)** – 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification group services and system aspects; universal Geographical Area Description (GAD) (release 17). Dec. 2021. Disponível em: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=742>. Acesso em: 28 out. 2022.
- 3GPP – 3rd Generation Partnership Project. **3GPP TS 28.541 V18.3.1 (2023-04)** – 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification group services and system aspects; management and orchestration; 5G Network Resource Model (NRM); stage 2 and stage 3 (release 18). Apr. 2023. Disponível em: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3400>. Acesso em: 11 abr. 2023.
- 3GPP – 3rd Generation Partnership Project. **About 3GPP**. 2022a. Disponível em: <https://www.3gpp.org/about-us/>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- 3GPP – 3rd Generation Partnership Project. **Specifications & technologies**. 2022b. Disponível em: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/specifications-by-series>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- 5G AMERICAS. **5G & non-terrestrial networks** – a 5G Americas white paper. Feb. 2022. Disponível em: <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2022/01/5G-Non-Terrestrial-Networks-2022-WP-Id.pdf>. Acesso em: 11 out. 2022.
- 5G AMERICAS. **Mission**. 2023. Disponível em: <https://www.5gamericas.org/about/mission/>. Acesso em: 14 fev. 2023.
- 5G BRASIL. **Trabalhos**. 2018. Disponível em: <https://5gbrasil.telebrasil.org.br/trabalhos>. Acesso em: 14 fev. 2023.
- 5G EVE – 5G European Validation Platform for Extensive Trials. **Public deliverables**. 2021. Disponível em: <https://www.5g-eve.eu/deliverables/>. Acesso em: 14 fev. 2023.
- 5G EXCHANGE. **5GEx project**. 2023. Disponível em: <http://www.5gex.eu/>. Acesso em: 14 fev. 2023.
- 5G FORUM. **Who we are?** 2023. Disponível em: <http://www.5gforum.org/html/en/main.php>. Acesso em: 18 fev. 2023.

5G NORMA – 5G Novel Radio Multiservice Adaptive Network Architecture. **D3.3: 5G NORMA network architecture – final report.** Oct. 2017. Disponível em: https://www.it.uc3m.es/wnl/5gnorma/pdf/5g_norma_d3-3.pdf. Acesso em: 11 out. 2022.

5G NORMA – 5G Novel Radio Multiservice Adaptive Network Architecture. **Deliverables.** 2018. Disponível em: <https://www.it.uc3m.es/wnl/5gnorma/deliverables.html>. Acesso em: 18 fev. 2023.

5G!PAGODA. **Public deliverables.** 2023. Disponível em: <https://5g-pagoda.aalto.fi/delivrables>. Acesso em: 2 abr. 2023.

5GENESIS – 5th Generation End-to-end Network, Experimentation, System Integration, and Showcasing. **Published articles.** 2022. Disponível em: <https://5genesis.eu/published-articles/>. Acesso em: 18 fev. 2023.

5GINFIRE. **5GINFIRE deliverables.** 2022. Disponível em: <https://5ginfire.eu/deliverables/>. Acesso em: 22 fev. 2023.

5GMF – Fifth Generation Mobile Communications Promotion Forum. **Document.** 2023. Disponível em: <https://5gmf.jp/en/download/>. Acesso em: 18 fev. 2023.

5G-MONARCH – 5G Mobile Network Architecture. **Events and publications.** 2019. Disponível em: <https://5g-monarch.eu/events-and-publications/>. Acesso em: 23 fev. 2023.

5G-PPP – 5G Infrastructure Public Private Partnership. **About us.** 2022a. Disponível em: <https://5g-ppp.eu/>. Acesso em: 24 fev. 2023.

5G-PPP – 5G Infrastructure Public Private Partnership. **Top recent technical documents.** 2022b. Disponível em: <https://5g-ppp.eu/top-ten-papers/>. Acesso em: 23 fev. 2023.

5G-PPP – 5G Infrastructure Public Private Partnership. **View on 5G architecture.** Oct. 2021. DOI: [10.5281/zenodo.5155657](https://doi.org/10.5281/zenodo.5155657). Disponível em: <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2021/11/Architecture-WP-V4.0-final.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.

5GROWTH – 5G-enabled Growth in Vertical Industries. **Journals and magazines.** 2023. Disponível em: <https://5growth.eu/journals-and-magazines/>. Acesso em: 22 fev. 2023.

5GTANGO – 5G Development and Validation Platform for Global Industry. **Deliverables.** 2020. Disponível em: <https://www.5gtango.eu/project-outcomes/deliverables.html>. Acesso em: 23 fev. 2023.

5G-TRANSFORMER – 5G Mobile Transport Platform for Verticals. Deliverables. **CORDIS European Commission** – results, Aug. 16, 2022. Disponível em: <https://cordis.europa.eu/project/id/761536/results>. Acesso em: 24 fev. 2023.

5G-VICTORI – 5G Solutions for Verticals. **Deliverables**. 2023. Disponível em: <https://www.5g-victori-project.eu/project-outcomes/deliverables/>. Acesso em: 23 fev. 2023.

5G-VINNI – 5G Verticals Innovation Infrastructure. **Public deliverables**. 2021. Disponível em: <https://www.5g-vinni.eu/deliverables>. Acesso em: 25 fev. 2023.

AARNA NETWORKS. **E2E network slicing** – 5G network slicing management. 2022. Disponível em: <https://www.aarnanetworks.com/solutions/e2e-network-slicing>. Acesso em: 15 fev. 2023.

ABDI – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **Tecnologia 5G**: acesso e cuidado com as populações vulneráveis. 2022. Disponível em: <https://www.abdi.com.br/postagem/tecnologia-5g-acesso-e-cuidado-com-as-populacoes-vulneraveis>. Acesso em: 27 fev. 2023.

ABOUAOMAR, A. *et al.* Federated deep reinforcement learning for Open RAN slicing in 6G networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 61, n. 2, p. 126–132, 2023. DOI: [10.1109/MCOM.007.2200555](https://doi.org/10.1109/MCOM.007.2200555).

ACENTURY. **Part 1**: how 5G/O-RAN and cloud native architectures introduce new complexities for testing labs. Feb. 2023. Disponível em: <https://acentury.co/ca/resources/b/part-1-how-5go-ran-and-cloud-native-architectures-introduce-new-complexity-testing-labs>. Acesso em: 17 fev. 2023.

ADOGA, H. U.; PEZAROS, D. P. Network function virtualization and service function chaining frameworks: a comprehensive review of requirements, objectives, implementations, and open research challenges. **Future Internet**, v. 14, n. 2, 2022. DOI: [10.3390/fi14020059](https://doi.org/10.3390/fi14020059).

AFOLABI, I. *et al.* Dynamic resource provisioning of a scalable E2E network slicing orchestration system. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 19, n. 11, p. 2594–2608, 2020. DOI: [10.1109/TMC.2019.2930059](https://doi.org/10.1109/TMC.2019.2930059).

AFOLABI, I. *et al.* Network slicing and softwarization: a survey on principles, enabling technologies, and solutions. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 20, n. 3, p. 2429–2453, 2018. DOI: [10.1109/COMST.2018.2815638](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2815638).

AFOLABI, I. *et al.* Towards 5G network slicing over multiple-domains. **IEICE Transactions on Communications**, E100B v. 11, p. 1992–2006, 2017. DOI: [10.1587/transcom.2016NNI0002](https://doi.org/10.1587/transcom.2016NNI0002).

ALCATEL-LUCENT ENTERPRISE. **Highly efficient and secure Wi-Fi** – improve your mobile and IoT connectivity with a smarter, more secure and resilient Wi-Fi network. 2023. Disponível em: <https://www.al-enterprise.com/en/solutions/wifi-solutions>. Acesso em: 10 mar. 2023.

ALMOG, R. DriveNets: network cloud as a catalyst for innovation. *In: STL Partners – webinars – the road to cloud-native disaggregation: do's and don'ts from lessons learned*. [S. l.: s. n.], July 2022. Disponível em: <https://stlpartners.com/webinar/the-road-to-cloud-native-disaggregation-webinar/>. Acesso em: 12 out. 2022.

AMDOCS. **Flip the network script** – network trends and innovations to watch. 2023a. Disponível em: <https://www.amdocs.com/sites/default/files/2023-06/eBook-Flip-The-Network-Script-061423.pdf>. Acesso em: 22 maio 2023.

AMDOCS. **Smart, efficient and dynamic end-to-end 5G network slicing management**. 2020. Disponível em: <https://www.amdocs.com/insights/article/smart-efficient-and-dynamic-end-end-5g-network-slicing-management>. Acesso em: 12 out. 2022.

AMDOCS. **The journey to telco cloud** – what to consider when evolving networks to the cloud. Sept. 2022. Disponível em: <https://www.amdocs.com/insights/whitepaper/journey-telco-cloud>. Acesso em: 17 fev. 2023.

AMDOCS. **Wi-Fi 7** – what is it all about? Whitepaper. 2023b. Disponível em: <https://www.amdocs.com/sites/default/files/2023-03/Wi-Fi-7-Whitepaper-032723.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2023.

AMICE, G.; LEGAULT, S. Navigating the 5G frontier: overcoming challenges to successfully deploy next-generation wireless networks. *In: Exfo – webinars*. [S. l.: s. n.], April 11, 2023. Disponível em: <https://www.exfo.com/en/resources/webinars/navigating-5g-frontier/>. Acesso em: 11 abr. 2023.

ANDERSON, K. Rethinking NaaS as a journey to openness and automation. **Blueplanet Insights**, Aug. 12, 2020. Disponível em: <https://www.blueplanet.com/blog/rethinking-naas-network-service-virtualization-automation.html>. Acesso em: 12 out. 2022.

ANRITSU. **The evolving hyperscaler/cloud-based telecom networks**: design and testing challenges. Dec. 2022. Disponível em: <https://resources.goanritsu.com/white-papers/the-evolving-hyperscaler-cloud-based-telecom-networks-design-and-testing-challenges>. Acesso em: 14 fev. 2023.

ANTIPOLIS, S. ETSI NFV releases architecture enhancements to support cloud-native network functions. **ETSI** – press releases, Jan. 26, 2023. Disponível em: <https://www.etsi.org/newsroom/press-releases/2180-etsi-nfv-releases-architecture-enhancements-to-support-cloud-native-network-functions>. Acesso em: 27 jan. 2023.

AORA – Asia Open Radio Access Network Academy. The Asia Open RAN Academy. **USAID** – technology, Dec. 2022. Disponível em: <https://www.usaid.gov/digital-development/asia-open-ran-academy-factsheet>. Acesso em: 17 abr. 2023.

ARTIGIANI, A. *et al.* Unlocking digital transformation with autonomous networks – ETSI perspectives and major achievements. ETSI white paper no. 56. **ETSI** – press releases, Mar. 23, 2023. Disponível em: <https://www.etsi.org/newsroom/press-releases/2207-new-etsi-white-paper-unlocking-digital-transformation-with-autonomous-networks>. Acesso em: 10 abr. 2023.

AVIDTHINK. **Intent-based assurance** – ensuring end-to-end service quality at scale. 2023. Disponível em: <https://go.accedian.com/ent/analyst-report/avid-think/intent-based-assurance>. Acesso em: 2 abr. 2023.

BADMUS, I. **End-to-end network slicing architecture and implementation for 5G micro-operator leveraging multi-domain and multi-tenancy**. Nov. 2019. Master's thesis - Faculty of information technology and electrical engineering, degree programme in electronics and communications engineering, University of Oulu, 2019. Disponível em: <http://jultika.oulu.fi/Record/nbnfioulu-201912213416>. Acesso em: 11 out. 2022.

BARAKABITZE, A. A. *et al.* 5G network slicing using SDN and NFV: a survey of taxonomy, architectures and future challenges. **Computer Networks**, n. 167, 2020a. DOI: [10.1016/j.comnet.2019.106984](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.106984).

BARAKABITZE, A. A. *et al.* QoE management of multimedia streaming services in future networks: a tutorial and survey. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 22, n. 1, p. 526–565, 2020b. DOI: [10.1109/COMST.2019.2958784](https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2958784).

BARI, M. F.; CHOWDHURY, S. R.; BOUTABA, R. ESSO: an energy smart service function chain orchestrator. **IEEE Transactions on Network and Service Management**, IEEE, v. 16, n. 4, p. 1345–1359, 2019. ISSN 19324537. DOI: [10.1109/TNSM.2019.2944170](https://doi.org/10.1109/TNSM.2019.2944170).

BASSO, F. G.; PEREIRA, C. G.; PORTO, G. S. Cooperation and technological areas in the state universities of São Paulo: an analysis from the perspective of the triple helix model. **Technology in Society**, v. 65, n. 101566, 2021. ISSN 0160-791X. DOI: [10.1016/j.techsoc.2021.101566](https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101566).

BASUMALLICK, C. What is a Cloud Native Network Function (CNF)? Meaning, architecture, and examples. **Spiceworks** – cloud, Dec. 7, 2022. Disponível em: <https://www.spiceworks.com/tech/cloud/articles/cloud-native-network-function/>. Acesso em: 20 jan. 2023.

BATISTA JR, J. O. R.; MOSTAÇO, G. M.; SILVA, R. F. D.; BRESSAN, G.; MARTUCCI JR, M.; CUGNASCA, C. E. Distributing the cloud towards autonomous resilient 5G networking. *In: ICTC 2019 – 10th International Conference on ICT Convergence: Leading the Autonomous Future. Proceedings* [...]. Jeju: IEEE, p. 854–859, 2019a. DOI: [10.1109/ICTC46691.2019.8939762](https://doi.org/10.1109/ICTC46691.2019.8939762). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8939762>. Acesso em: 12 out. 2022.

BATISTA JR, J. O. R.; MOSTAÇO, G. M.; SILVA, R. F. D.; BRESSAN, G.; MARTUCCI JR, M.; CUGNASCA, C. E. Evaluating the performance of a simulated softwarized agricultural wireless sensor network. **Information and Communication Technologies for Agriculture — Theme I: Sensors**. Cham: Springer International Publishing, v. 182, p. 121–137, 2022. ISBN 978-3-030-84144-7. DOI: [10.1007/978-3-030-84144-7_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-84144-7_5). Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-84144-7_5. Acesso em: 20 jan. 2023.

BATISTA JR, J. O. R.; MOSTAÇO, G. M.; SILVA, R. F. D.; BRESSAN, G.; MARTUCCI JR, M.; CUGNASCA, C. E. Towards 5G requirements: performance evaluation of a simulated WSN using SDN technology. *In: 12th EFITA (European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and the Environment) HAICTA-WCCA Congress. Proceedings* [...]. Rhodes: EFITA, p. 24–29, 2019b. Disponível em: https://efita2021.com/wp-content/uploads/2021/12/EFITA_Proceedings_e-book.pdf. Acesso em: 30 jan. 2023.

BATISTA JR, J. O. R.; SILVA, D. C. d.; MARTUCCI JR, M.; SILVEIRA, R. M.; CUGNASCA, C. E. A multi-provider end-to-end dynamic orchestration architecture approach for 5G and future communication systems. **Applied Sciences**, v. 11, n. 24, 2021. Special issue “5G and beyond fiber-wireless network communications”. ISSN 2076-3417. DOI: [10.3390/app112411914](https://doi.org/10.3390/app112411914). Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/24/11914>. Acesso em: 10 out. 2022.

BERNINI, G. *et al.* Multi-domain orchestration of 5G vertical services and network slices. *In: 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICCWorkshops. Proceedings* [...]. Dublin: IEEE, 2020. DOI: [10.1109/ICCWorkshops49005.2020.9145221](https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops49005.2020.9145221).

BICS. **Enabling seamless global connectivity for private networks** – white paper. Feb. 2023. Disponível em: https://content.rcrwireless.com/bics_global_connectivity_wp. Acesso em: 13 fev. 2023.

BLACKMAN, J. 5G and Wi-Fi will coexist – as ‘gory detail’ of the tech fades (federated wireless on 2022). **RCR Wireless News**, Feb. 14, 2022. Disponível em: <https://enterpriseiotinsights.com/20220214/wi-fi/5g-wi-fi-will-coexist-as-gory-detail-of-tech-gets-less-relevant-federated-wireless-on-2022>. Acesso em: 12 out. 2022.

BLACKMAN, J. Major telcos move to open network APIs to developers – to drive innovation, revenues. **RCR Wireless News**, Feb. 27, 2023a. Disponível em: <https://www.rcrwireless.com/20230227/5g/major-telcos-move-to-open-network-apis-to-developers-to-drive-innovation-revenues>. Acesso em: 28 fev. 2023.

BLACKMAN, J. What is Industry 5.0? (and what’s the beef with Industry 4.0?). **RCR Wireless News**, Feb. 7, 2023b. Disponível em: <https://www.rcrwireless.com/20230207/internet-of-things-4/what-is-industry-5-0-and-whats-the-beef-with-industry-4-0>. Acesso em: 10 fev. 2023.

BLUEPLANET. **NaaS demystified**: unlock the full potential of Network as a Service. 2021. Disponível em: <https://www.blueplanet.com/resources/naas-demystified.html/>. Acesso em: 10 out. 2022.

BOLAN, D. 5G Core – are we ready? **Dell’Oro Group**, May 6, 2020. Disponível em: <https://www.delloro.com/5g-core-are-we-ready/>. Acesso em: 11 out. 2022.

BONATI, L. *et al.* Open, programmable, and virtualized 5G networks: state-of-the-art and the road ahead. **Computer Networks**, n. 182, July 2020. DOI: [10.1016/j.comnet.2020.107516](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107516). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128620311786?via%3Dihub>. Acesso em: 11 out. 2022.

BORSANELLI, R. Think Tank em implantação de 5G no Brasil. **Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo (IEA-USP)** – pesquisa, 28 mar. 2023. Disponível em: <http://www.iea.usp.br/pesquisa/projetos-institucionais/think-tank-em-implantacao-de-5g-no-brasil>. Acesso em: 13 abr. 2023.

BOURDOT, L. F. Como fatiar uma rede. *In: 5G e Transformação Digital 2022*, [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://telecomwebinar.com/webinar/como-fatiar-uma-rede/>. Acesso em: 10 out. 2022.

BROWN, G. Why is 5G SA taking so long? **Light Reading** – 5G, Sept. 23, 2022. Disponível em: <https://www.lightreading.com/5g/why-is-5g-sa-taking-so-long/a/d-id/780586>. Acesso em: 12 out. 2022.

BROWN, R.; MUFTI, S.; LARSON, B. 5G, from connectivity pipe to Network-as-a-Platform: a transformative approach to designing, deploying and operating modern 5G multi-cloud networks from core-to-edge. *In: Light Reading – webinar archives*. [S. l.: s. n.], April 2023. Disponível em: https://www.lightreading.com/webinar.asp?webinar_id=2223. Acesso em: 11 abr. 2023.

CAI, X. *et al.* **Evolving NFV towards the next decade** – ETSI white paper no. 54. Sophia Antipolis: ETSI, 2023. 22 p. Disponível em: https://www.etsi.org/images/files/ETSIWhitePapers/ETSI-WP-54-Evolving_NFV_towards_the_next_decade.pdf. Acesso em: 22 maio 2023.

CAMARGO JR, J. B. **Sistemas tolerantes a falhas**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2020. 148 p. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5698190/mod_folder/content/0/Apostila%20Sistemas%20Tolerantes%20a%20Falhas%20-Gradua%C3%A7%C3%A3o-Vers%C3%A3o%202020.pdf. Acesso em: 26 dez. 2022.

CARVALHO, M. A. **Framework conceitual para ambiente virtual colaborativo das comunidades virtuais de prática nas universidades no contexto de e-gov**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia e Gestão do Conhecimento) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/107069>. Acesso em: 18 maio 2023.

CASTAÑEDA, J. *et al.* VNF-based network service consistent reconfiguration in multidomain federations: a distributed approach. **Journal of Network and Computer Applications**, Elsevier Ltd, v. 195, p. 103226, 2021. ISSN 1084-8045. DOI: [10.1016/j.jnca.2021.103226](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103226).

CELONA. **Private wireless for the enterprise**. 2023. Disponível em: <https://www.celona.io/>. Acesso em: 21 fev. 2023.

CHAHBAR, M. *et al.* A comprehensive survey on the E2E 5G network slicing model. **IEEE Transactions on Network and Service Management**, v. 18, n. 1, p. 49–62, 2021. DOI: [10.1109/TNSM.2020.3044626](https://doi.org/10.1109/TNSM.2020.3044626).

CHEN, C. *et al.* Distributed federated service chaining: a scalable and cost aware approach for multi-domain networks. **Computer Networks**, Elsevier B.V., v. 212, n. May, p. 109044, 2022. DOI: [10.1016/j.comnet.2022.109044](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109044).

CHEN, J. *et al.* ClusVNFI: a hierarchical clustering-based approach for solving VNFI dilemma in NFV orchestration. **IEEE Access**, v. 7, p. 173257–173272, Nov. 2019. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2956502](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2956502).

CHIRIVELLA-PEREZ, E. *et al.* Orchestration architecture for automatic deployment of 5G services from bare metal in mobile edge computing infrastructure. **Wireless Communications and Mobile Computing**, 2018. DOI: [10.1155/2018/5786936](https://doi.org/10.1155/2018/5786936).

CHOI, J. S. Hierarchical distributed orchestration framework for multi-domain SDTNs. **Journal of Optical Communications and Networking**, v. 9, n.12, p. 1125–1135, June 2022. DOI: [10.1364/JOCN.9.001125](https://doi.org/10.1364/JOCN.9.001125).

CHOI, J. S.; CHUN, S. J.; LEE, S. Hierarchical distributed overarching architecture of decoupled federation and orchestration frameworks for multidomain NFV MANOs. **IEEE Communications Magazine**, p. 1–7, June 2022. DOI: [10.1109/MCOM.005.20949](https://doi.org/10.1109/MCOM.005.20949).

CISCO. **Wi-Fi 6 and private LTE/5G technology and business models in industrial IoT**. 2019. Disponível em: <https://cloudmanaged.ca/wp-content/uploads/2020/05/Cisco-Wi-Fi-6-and-Private-LTE-5G-Technology-and-Business-Models-in-Industrial-IoT.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

CISNEROS, J. C. *et al.* Coordination-free multi-domain NFV orchestration for consistent VNF forwarding graph reconfiguration. **IEEE Transactions on network and service management**, IEEE, 2022. DOI: [10.1109/TNSM.2022.3192328](https://doi.org/10.1109/TNSM.2022.3192328).

CLIFT, T. ETSI adopts software-centric standardization approach. **Sdxcentral – news**, Feb. 7, 2023. Disponível em: <https://www.sdxcentral.com/articles/news/etsi-adopts-software-centric-standardization-approach/2023/02/>. Acesso em: 10 fev. 2023.

COHEN, D. A slice of cloud: implementing network slicing with network cloud. **DriveNets Blog**, Sept. 8, 2021. Disponível em: <https://drivenets.com/blog/industry-outlook/a-slice-of-cloud-implementing-network-slicing-with-network-cloud/>. Acesso em: 12 out. 2022.

COHEN, P. How to transition from non-standalone 5G to standalone 5G. **RCR Wireless News**, Apr. 1, 2022. Disponível em: <https://rcrwireless.com/20220401/uncategorized/how-to-transition-from-non-standalone-5g-to-standalone-5g>. Acesso em: 12 out. 2022.

COLLINS. **Definition of 'proof of concept'**. 2023. Disponível em: <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/proof-of-concept>. Acesso em: 8 abr. 2023.

CORDIS – Community Research and Development Information Service. **Remote area access network for 5th Generation – results**. 2022. Disponível em: <https://cordis.europa.eu/project/id/777137/results>. Acesso em: 2 abr. 2023.

- CRAVEN, C. What Is Open RAN (Radio Access Network)? **Sdxcentral**, Feb. 1, 2021. Disponível em: <https://www.sdxcentral.com/5g/ran/definitions/what-is-open-ran-radio-access-network/>. Acesso em: 12 out. 2022.
- CROUCH, M.; LAIDLER, P.; OSBORNE, H. Service and business model innovation: why agility will be key in enabling new revenue streams from 5G. *In: STL Partners – webinars*. [S. l.: s. n.], May 10, 2023. Disponível em: <https://stlpartners.com/webinar/service-and-business-model-innovation/>. Acesso em: 11 maio 2023.
- CRUZ, H. A. A. C. da. **Gestor de slices de rede 5G**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Eletrônica, Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro, 2019. Disponível em: https://ria.ua.pt/bitstream/10773/29573/1/Documento_Henrique_Cruz.pdf. Acesso em: 11 out. 2022.
- DALGKITSIS, A. *et al.* Sche2ma: scalable, energy-aware, multidomain orchestration for beyond-5G uRLLC services. **IEEE transactions on intelligent transportation systems**, IEEE, p. 1–11, 2022. DOI: [10.1109/TITS.2022.3202312](https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3202312).
- DEACON, M.; CHIRALA, K. Programmable 5G Private Networks. *In: The Programmable Telco Digital Symposium*. [S. l.: s. n.], May 10, 2023. Disponível em: https://www.lightreading.com/webinar.asp?webinar_id=2205. Acesso em: 11 maio 2023.
- DIKMEN, C.; HERRICK, L.; MACAULAY, J. The emerging impact of network slicing on lawful intelligence. **SS8 (Securing Societies Always)** – blog, Jan. 4, 2023. Disponível em: <https://www.ss8.com/the-emerging-impact-of-network-slicing-on-lawful-intelligence/>. Acesso em: 10 fev. 2023.
- DIOGO, I. S. Cloud computing: características e tendências. **Portal Teleco** – tutoriais infraestrutura, 22 maio 2023. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialcloudcaracten/default.asp>. Acesso em: 22 maio 2023.
- DOGRA, A.; JHA, R. K.; JAIN, S. A survey on beyond 5G network with the advent of 6G: architecture and emerging technologies. **IEEE Access**, v. 9, p. 67512–67547, 2021. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3031234](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031234).
- DRÄXLER, S. *et al.* 5G OS: control and orchestration of services on multi-domain heterogeneous 5G infrastructures. *In: 2018 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). Proceedings [...]*. Ljubljana: IEEE, June 18–21, 2018. DOI: [10.1109/EuCNC.2018.8443210](https://doi.org/10.1109/EuCNC.2018.8443210).

DRIF, Y *et al.* An extensible network slicing framework for satellite integration into 5G. **International Journal of Satellite Communications and Networking**, v, 39, n. 4, p. 339–357, 2021. DOI: [10.1002/sat.1387](https://doi.org/10.1002/sat.1387).

DUKE-WOOLLEY, R. Uni5G private networks: a simplified path to deployment. *In: MFA webinar*. [S. l.: s. n.], July 21, 2021. Disponível em: <https://www.mfa-tech.org/event/webinar-uni5g-private-networks-a-simplified-path-to-deployment/>. Acesso em: 12 out. 2022.

ECC – Electronic Communications Committee. **Europe prepares to shape the radiocommunications of the future at WRC-19**. Dec. 2018a. Disponível em: <https://450alliance.org/wp-content/uploads/2019/03/ECC-Newsletter-December-2018.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2022.

ECC – Electronic Communications Committee. **Harmonised technical conditions for the 24.25-27.5 GHz ('26 GHz') frequency band**. CEPT Report 68, p. 3–64, July 2018b.

EISELE, M. 5 Ways to build sustainability into your software architecture. **Red Hat**, July 5, 2022. Disponível em: <https://www.redhat.com/architect/sustainable-software-architecture>. Acesso em: 2 abr. 2023.

EKBATANI, M. Amdocs partners with CSPs to address 5G ecosystem complexity. **VanillaPlus Magazine**, n. 1, p. 12–13, 2023. ISSN 1745-1736. Disponível em: <https://www.vanillaplus.com/2023/02/21/77005-vanillaplus-magazine-issue-1-2023-are-we-nearly-there-yet>. Acesso em: 23 fev. 2023.

ERICSSON. **5G and Wi-Fi**: charting a path towards superior indoor connectivity. 2020a. Disponível em: <https://www.ericsson.com/4ac68e/assets/local/reports-papers/5g/doc/5g-and-wi-fi-path-toward-superior-indoor-connectivity.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2023.

ERICSSON. **6G** – connecting a cyber-physical world. Feb. 2022a. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/a-research-outlook-towards-6g>. Acesso em: 10 out. 2022.

ERICSSON. **Ericsson mobility report** – business review edition. Feb. 2023a. Disponível em: <https://www.ericsson.com/48fef3/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2023br/emr-monetization-driving-revenue-growth.pdf>. Acesso em: 18 maio 2023.

ERICSSON. **Ericsson mobility report**. Nov. 2022b. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report>. Acesso em: 22 dez. 2022.

ERICSSON. **Ericsson orchestrator**. 2023b. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/portfolio/digital-services/automated-network-operations/orchestration/ericsson-orchestrator>. Acesso em: 19 fev. 2023.

ERICSSON. **Harnessing the 5G consumer potential** – the consumer revenue opportunity uncovered. 2020b. Disponível em: <https://www.ericsson.com/4ac9d8/assets/local/reports-papers/consumerlab/reports/2020/harnessing-the-5g-consumer-potential.pdf>. Acesso em: 16 maio 2023.

ERICSSON. **On the road to breaking the energy curve** – a key building block for a net zero future. 2022c. Disponível em: <https://www.ericsson.com/4aa14d/assets/local/about-ericsson/sustainability-and-corporate-responsibility/documents/2022/breaking-the-energy-curve-report.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2022.

ESFANDIARI, S. Integrating automation and analytics at the 5G core. **RCR Wireless News** – reader forum, Jan. 31, 2023. Disponível em: <https://www.rcrwireless.com/20230131/uncategorized/integrating-automation-and-analytics-at-the-5g-core-reader-forum>. Acesso em: 31 jan. 2023.

ESMAEILY, A.; KRALEVSKA, K.; GLIGOROSKI, D. A Cloud-based SDN/NFV testbed for end-to-end network slicing in 4G/5G. **29–35arXiv:2004.10455**, 2020. DOI: [10.1109/netsoft48620.2020.9165419](https://doi.org/10.1109/netsoft48620.2020.9165419).

ESRI. **ESRI shapefile technical description, ESRI white paper**. July 1998. Disponível em: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/sitecore-archive/Files/Pdfs/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>. Acesso em: 28 out. 2022.

ETNO – European Telecommunications Network Operators' Association. **State of digital communications 2023**, Jan. 2023. Disponível em: <https://etno.eu/downloads/reports/etno-state%20of%20digital%20communications%202023.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2023.

ETSI – European Telecommunications Standards Institute. **5G**. 2023a. Disponível em: <https://www.etsi.org/technologies/5g>. Acesso em: 15 fev. 2023.

ETSI – European Telecommunications Standards Institute. **Enjoy!** the ETSI mag. sustainability – lead the standardization, make it clean, keep it green. April 2023b. Disponível em: <https://www.etsi.org/e-brochure/Magazine/2304/pdf/Enjoy-Mag-April-2023.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2023.

ETSI – European Telecommunications Standards Institute. **ETSI GR NFV 003 V1.5.1 (2020-01)** – Network Functions Virtualisation (NFV); terminology for main concepts in NFV. Jan. 2020a. Disponível em:

https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/NFV/001_099/003/01.05.01_60/gr_NFV003v010501p.pdf. Acesso em: 12 dez. 2022.

ETSI – European Telecommunications Standards Institute. **ETSI GR NFV-IFA 015 V3.4.1 (2020-06)** – Network Functions Virtualisation (NFV) release 3; management and orchestration; report on NFV information model. June 2020b. Disponível em:

https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/NFV-IFA/001_099/015/03.04.01_60/gr_NFV-IFA015v030401p.pdf. Acesso em: 12 dez. 2022.

ETSI – European Telecommunications Standards Institute. **ETSI GR NFV-IFA 029 V3.3.1 (2019-11)** – Network Functions Virtualisation (NFV) release 3; architecture; report on the enhancements of the NFV architecture towards "cloud-native" and "PaaS". Nov. 2019. Disponível em:

https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/NFV-IFA/001_099/029/03.03.01_60/gr_NFV-IFA029v030301p.pdf. Acesso em: 30 nov. 2022.

ETSI – European Telecommunications Standards Institute. **ETSI GR ZSM 004 V2.1.1 (2022-01)** – Zero-touch network and Service Management (ZSM); landscape disclaimer. Jan. 2022a. Disponível em:

https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/ZSM/001_099/004/02.01.01_60/gr_ZSM004v020101p.pdf. Acesso em: 30 nov. 2022.

ETSI – European Telecommunications Standards Institute. **ETSI GS NFV 006 V4.4.1 (2022-12)** – Network Functions Virtualisation (NFV) release 4; management and orchestration; architectural framework specification. Dec. 2022b. Disponível em:

https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/NFV/001_099/006/04.04.01_60/gs_NFV006v040401p.pdf. Acesso em: 12 dez. 2022.

ETSI – European Telecommunications Standards Institute. **Welcome to Open Source MANO's documentation!** 2023c. Disponível em:

<https://osm.etsi.org/docs/user-guide/latest/#/>. Acesso em: 19 fev. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **Radio Spectrum Policy Group (RSPG)** – strategic roadmap towards 5G for Europe – spectrum related aspects for next-generation wireless systems and 5G implementation challenges. RSPG19-036. Oct. 2019.

FELLENBAUM, A.; TAYLOR, H.; CREANER, M. The importance of environmental sustainability in telecom service providers' strategy. **Light Reading**, Dec. 2022.

Disponível em:

https://www.lightreading.com/lg_redirect.asp?pidl_lgid_docid=782073. Acesso em: 26 dez. 2022.

FIGUEIREDO, N. d. L.; FERNANDES, C. I.; ABRANTES, J. L. Triple helix model: cooperation in knowledge creation. **Journal of the Knowledge Economy**, v. 14, p. 854–878, June 2023. DOI: [10.1007/s13132-022-00930-1](https://doi.org/10.1007/s13132-022-00930-1).

FINEGOLD, E. Network lifecycle automation: can CSPs optimize 5G investment? **Inform TM Forum**, Sept. 19, 2022. Disponível em: <https://inform.tmforum.org/research-and-analysis/reports/network-lifecycle-automation-can-csps-optimize-5g-investment/>. Acesso em: 2 abr. 2023.

FRANCESCON, A. *et al.* X-MANO: An open-source platform for cross-domain management and orchestration. *In*: 2017 IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft). **Proceedings** [...]. Bologna: IEEE, July 03–07, 2017. DOI: [10.1109/NETSOFT.2017.8004236](https://doi.org/10.1109/NETSOFT.2017.8004236).

FREE5GC – Free 5G Core Networks. **Installing UERANSIM** – a UE/RAN simulator. 2022a. Disponível em: <https://www.free5gc.org/installations/stage-3-sim-install/>. Acesso em: 27 out. 2022.

FREE5GC – Free 5G Core Networks. **Publications using Free5GC**: 2022b. Disponível em: <https://www.free5gc.org/relaventPub/>. Acesso em: 27 out. 2022.

G-ESTEVEZ, D. M. *et al.* Artificial intelligence for elastic management and orchestration of 5G networks. **IEEE Wireless Communications**, v. 26, n. 5, p. 134–141, Oct. 2019. DOI: [10.1109/MWC.2019.1800498](https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800498).

GHARBAOUI, M. *et al.* An experimental study on latency-aware and self-adaptive service chaining orchestration in distributed NFV and SDN infrastructures. **Computer Networks**, Elsevier B.V., v. 208, n. March, p. 108880, 2022. DOI: [10.1016/j.comnet.2022.108880](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.108880).

GILLIS, A. S. Definition – Proof of Concept (PoC). **Techtarget** – IT applications, infrastructure and operations, 2023. Disponível em: <https://www.techtarget.com/searchcio/definition/proof-of-concept-POC>. Acesso em: 8 abr. 2023.

GILLMAN, J. Why the telecom industry must address its energy consumption. **Rakuten Symphony** – Spotlight on Tech, Feb. 22, 2023. Disponível em: <https://symphony.rakuten.com/blog/why-the-telecom-industry-must-address-its-energy-consumption>. Acesso em: 23 fev. 2023.

GLASS, G.; NIEMÖLLER, J.; MCDONNELL, K. Intent-driven autonomous networks. *In*: **Global Architecture Forum** – TM Forum labs. [S. l.: s. n.], Mar. 8, 2023. Disponível em: https://info.tmforum.org/rs/021-WLD-815/images/TM_Forum-GAF-Webinar-Intent-driven-Autonomous-Networks_8_March_2023.pdf. Acesso em: 10 mar. 2023.

GORDON, D. Slicing and private networks: substitutes or complementary? **STL Partners** – reports, Dec. 2022. Disponível em: https://stlpartners.com/free_reports/slicing-and-private-networks-substitutes-or-complementary/. Acesso em: 19 jan. 2023.

GRAMAGLIA, M. *et al.* Design and validation of a multi-service 5G network with QoE-aware orchestration. *In: Proceedings of the 12th International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation Characterization*. New York: ACM, p. 11–18, 2018. (WiNTECH '18). ISBN 9781450359306. DOI: [10.1145/3267204.3267216](https://doi.org/10.1145/3267204.3267216).

GUERZONI, R. *et al.* Analysis of end-to-end multi-domain management and orchestration frameworks for software defined infrastructures: an architectural survey. **Transactions on Emerging Telecommunications Technologies**, v. 28 n. 4, 2017. DOI: [10.1002/ett.3103](https://doi.org/10.1002/ett.3103).

HABIBI, M. A. *et al.* A comprehensive survey of RAN architectures toward 5G mobile communication system. **IEEE Access**, v. 7, p. 70371-70421, 2019. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2919657](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919657).

HADIWARDYOYO, S. D. *et al.* 5G CARMEN deliverable D4.2 – advanced prototype for secure, cross-border, and multi-domain service orchestration. **5G CARMEN**, 2021. Disponível em: <https://5gcarmen.eu/wp-content/uploads/2021/10/D4.2-May-2021.pdf>. Acesso em: 29 out. 2022.

HAGA, S. *et al.* 5G network slice isolation with WireGuard and Open Source MANO: a VPNaaS proof-of-concept. *In: 2020 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks, NFV-SDN 2020. Proceedings* [...]. Leganes - Madrid: IEEE, Nov. 10–12, p. 181–187, 2020. DOI: [10.1109/NFV-SDN50289.2020.9289900](https://doi.org/10.1109/NFV-SDN50289.2020.9289900). Acesso em: 6 set. 2022.

HAMITI, S. The importance of network APIs to 5G monetization. **RCR Wireless News** – reader forum, Feb. 16, 2023. Disponível em: <https://www.rcrwireless.com/20230216/opinion/readerforum/the-importance-of-network-apis-to-5g-monetization-reader-forum>. Acesso em: 18 fev. 2023.

HATT, T. *et al.* Global mobile trends 2023: navigating an uncertain world. **GSMA Intelligence** – research, Feb. 2023. Disponível em: <https://data.gsmaintelligence.com/research/research/research-2023/global-mobile-trends-2023>. Acesso em: 10 abr. 2023.

HILL, K. Six operational challenges for 5G. **RCR Wireless News**, May 4, 2022a. Disponível em: <https://www.rcrwireless.com/20220504/5g/six-operational-challenges-for-5g>. Acesso em: 12 out. 2022.

HILL, K. The future of 5G: what's left to do, and what lies ahead in 6G? **RCR Wireless News**, May 5, 2022b. Disponível em: <https://www.rcrwireless.com/20220505/test-and-measurement/the-future-of-5g-whats-left-to-do-and-what-lies-ahead-in-6g>. Acesso em: 12 out. 2022.

HILSON, G. What is 5G network slicing? **Verizon**, 2023. Disponível em: <https://www.verizon.com/business/resources/articles/s/5g-network-slicing-do-you-have-the-team-you-need/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

HOOD, I. *et al.* Telco cloud: what MWC reveals about operator strategies. *In: STL Partners webinar*. [S. l.: s. n.], Mar. 29, 2023. Disponível em: <https://stlpartners.com/webinar/telco-cloud-what-mwc-reveals-about-operator-strategies/>. Acesso em: 2 abr. 2023.

HORTIGÜELA, J. B. **End-to-end network service orchestration in heterogeneous domains for next-generation mobile networks**. 2022. Tese (Doutorado em Ciências) – CERCA Communication Networks Division, Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya – CTTC, Barcelona, 2022. Disponível em: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/356735>. Acesso em: 8 set. 2022.

HPE – Hewlett Packard Enterprise; INTEL. **5G orchestration and automation toward zero-touch service** – 5G core operational aspects. Business white paper. July 2020. Disponível em: <https://www.hpe.com/psnow/doc/a50002293enw>. Acesso em: 25 out. 2022.

HUAWEI. Investment & Holding. **2022 Annual report**. 2023a. Disponível em: <https://www.huawei.com/br/annual-report>. Acesso em: 10 abr. 2023.

HUAWEI. **MANO solution**. 2023b. Disponível em: <https://carrier.huawei.com/en/solutions/cloud-enabled-digital-operations/mano-solution>. Acesso em: 28 fev. 2023.

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers. **Mission & vision**. 2023. Disponível em: <https://www.ieee.org/about/vision-mission.html>. Acesso em: 18 fev. 2023.

IETF – Internet Engineering Task Force. **Introduction to the IETF**. 2023. Disponível em: <https://www.ietf.org/about/introduction/>. Acesso em: 15 fev. 2023.

IMT-2020 PROMOTION GROUP. **Research production**. 2022. Disponível em: <https://www.imt2020.org.cn/html/default/en/RP/VisionRequirements/index.html?index=3>. Acesso em: 19 fev. 2023.

ITU – International Telecommunication Union. **About International Telecommunication Union (ITU)**. 2023. Disponível em: <https://www.itu.int/en/about/Pages/default.aspx>. Acesso em: 19 fev. 2023.

ITU-R – International Telecommunication Union Radiocommunication Sector. **Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond**. 2015. Disponível em: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!!!PDF-E.pdf. Acesso em: 12 out. 2022.

ITU-R – International Telecommunication Union Radiocommunication Sector. **Minimal requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interfaces** – working party 5D. Nov. 2017. Disponível em: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2410-2017>. Acesso em: 12 out. 2022.

ITU-R – International Telecommunication Union Radiocommunication Sector. **Radiocommunication sector**. 2023. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-R/Pages/default.aspx>. Acesso em: 19 fev. 2023.

ITU-R – International Telecommunication Union Radiocommunication Sector. **Recommendation ITU-R M.2150-1** – detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunications-2020 (IMT-2020). Feb. 2022. Disponível em: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2150-1-202202-!!!PDF-E.pdf. Acesso em: 28 fev. 2023.

ITU-T – International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector. **About ITU telecom**. 2023a. Disponível em: <https://www.itu.int/en/itutelecom/Pages/default.aspx>. Acesso em: 28 fev. 2023.

ITU-T – International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector. **Over-the-top communications**. 2023b. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2013-2016/03/Pages/ott.aspx>. Acesso em: 10 mar. 2023.

ITU-T – International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector. **Recommendation ITU-T Y.4482** – requirements and framework for smart livestock farming based on the Internet of Things. Aug. 2022. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.4482-202208-I/en>. Acesso em: 11 abr. 2023.

JABAREEN, Y. Building a conceptual framework: philosophy, definitions, and procedure. **International Journal of Qualitative Methods**, SAGE Publications Sage, Los Angeles, v. 8, n. 4, p. 49–62, 2009. DOI: [10.1177/160940690900800406](https://doi.org/10.1177/160940690900800406).

JUNIPER NETWORKS. **Juniper automation**. 2023. Disponível em: <https://www.juniper.net/us/en/solutions/automation.html>. Acesso em: 18 maio 2023.

JUNIPER NETWORKS. **Key considerations for assuring differentiated, end-to-end 5G services** – automated active assurance ensures that operators can turn up new 5G network slices properly and meet committed quality levels. 2022. Disponível em: <https://www.juniper.net/content/dam/www/assets/white-papers/us/en/key-considerations-for-assuring-differentiated-end-to-end-5g-services.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2023.

KAGAN, J. Why 5G wireless is not meeting user expectations. **RCR Wireless News**, Feb. 20, 2023. Disponível em: <https://www.rcrwireless.com/20230220/opinion/kagan-why-5g-wireless-is-not-meeting-user-expectations>. Acesso em: 21 fev. 2023.

KALEIDO INTELLIGENCE. **International active roaming trips set to approach pre-covid levels in 2023, exceeding 1.3 billion in global volume**. March 2023. Disponível em: <https://roaming.kaleidointelligence.com/roaming-data-h1-2023-press-release/>. Acesso em: 2 abr. 2023.

KAR, B.; WU, E. H.; LIN, Y. Communication and computing cost optimization of meshed hierarchical NFV datacenters. **IEEE Access**, v. 8, p. 94795–94809, 2020. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.2995384](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2995384).

KATSALIS, K. *et al.* Multi-domain orchestration for NFV: challenges and research directions. *In*: 2016 15th International Conference on Ubiquitous Computing and Communications and 2016 International Symposium on Cyberspace and Security (IUCC-CSS). **Proceedings** [...]. Granada: IEEE, Dec. 2016, p. 189–195. DOI: [10.1109/IUCC-CSS.2016.034](https://doi.org/10.1109/IUCC-CSS.2016.034).

KAUR, K. *et al.* Edge computing in the industrial Internet of Things environment: software-defined networks-based edge-cloud interplay. **IEEE Communications Magazine**, v. 56, n. 2, p. 44–51, Feb. 2018. DOI: [10.1109/MCOM.2018.1700622](https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700622).

KESHISHYAN, A. Driving sustainability in telco metro networks – how can operators apply best practice principles from the cloud and leading operators as they plan their metro network for growth? **Sdxcentral** – syndicated downloads, Apr. 6, 2023. Disponível em: <https://www.sdxcentral.com/resources/sponsored/syndicated/downloads/driving-sustainability-in-telco-metro-networks-2/>. Acesso em: 11 abr. 2023.

KIBALYA, G. *et al.* A multi-stage graph based algorithm for survivable service function chain orchestration with backup resource sharing. **Computer Communications**, Elsevier B.V., v. 174, n. May 2020, p. 42–60, 2021. DOI: [10.1016/j.comcom.2021.04.008](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.04.008).

KINNEY, S. How will Open RAN inform the development of 6G? **RCR Wireless News**, Aug. 26, 2022a. Disponível em: https://www.rcrwireless.com/20220826/open_ran/how-will-open-ran-inform-the-development-of-6g. Acesso em: 12 out. 2022.

KINNEY, S. Open RAN in 2022 – enabling a continuous flow of innovation. **RCR Wireless News** – reports, Aug. 23, 2022b. Disponível em: https://content.rcrwireless.com/open_ran_22_report. Acesso em: 19 out. 2022.

KINNEY, S. Three megatrends shaping 5G monetization efforts. **RCR Wireless News** – 5G, Feb. 21, 2023. Disponível em: <https://www.rcrwireless.com/20230221/5g/three-megatrends-shaping-5g-monetization-efforts>. Acesso em: 12 mar. 2023.

KINNEY, S. Will open RAN be foundational to 6G? **RCR Wireless News**, Sept. 20, 2021. Disponível em: https://www.rcrwireless.com/20210920/open_ran/will-open-ran-be-foundational-to-6g. Acesso em: 12 out. 2022.

KSENTINI, A.; FRANGOUDIS, P. A. Toward slicing-enabled multi-access edge computing in 5G. **IEEE Network**, v. 34, n. 2, p. 99–105, Apr. 2020. DOI: [10.1109/MNET.001.1900261](https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900261).

KUKLIŃSKI *et al.* 5G!PAGODA D2.5: final report on the overall system architecture definition. **5G!PAGODA**, 2019. Disponível em: https://5g-pagoda.aalto.fi/assets/demo/attachement/delivrables/D2.5_Final_report_on_the_over_all_system_architecture_definition_V1.0.pdf. Acesso em: 20 set. 2022.

KUKLIŃSKI *et al.* MonB5G: AI/ML – capable distributed orchestration and management framework for network slices. *In: 2021 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom). Proceedings [...]*. Athens: IEEE, Sept. 2021. DOI: [10.1109/MeditCom49071.2021.9647681](https://doi.org/10.1109/MeditCom49071.2021.9647681). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9647681>. Acesso em: 25 out. 2022.

KUNNAPPILLY, A.; BACKEMAN, P.; SECELEANU, C. From UML modeling to UPPAAL model checking of 5G dynamic service orchestration. *In: 7th Conference on the Engineering of Computer Based Systems*. New York: ACM, 2021. (ECBS 2021). ISBN 9781450390576. DOI: [10.1145/3459960.3459965](https://doi.org/10.1145/3459960.3459965).

LAHLOU, L.; KARA, N.; EDSTROM, C. DAVINCI: online and dynamic adaptation of evolvable virtual network services over cloud infrastructures. **Future Generation Computer Systems**, Elsevier B.V., v. 127, p. 396–408, 2022. DOI: [10.1016/j.future.2021.09.017](https://doi.org/10.1016/j.future.2021.09.017).

LAVIN, A. *et al.* Technology readiness levels for machine learning systems. **Nature Communications**, v. 13, n. 6039, p. 1–19, 2022. DOI: [10.1038/s41467-022-33128-9](https://doi.org/10.1038/s41467-022-33128-9).

LAWRENCE, A. **Trust and the ethics of future networks**. April 2023. Disponível em: <https://www.6gworld.com/exclusives/trust-and-the-ethics-of-future-networks/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

LEE, S. **About Open5GS**. 2022. Disponível em: <https://open5gs.org/open5gs/about/>. Acesso em: 27 out. 2022.

LENAHA, G.; HAYSOM, F. Beyond OSS: the sea change in OSS, and the realization of Network-as-a-Service. **Blueplanet Resources**, Aug. 2020. Disponível em: <https://www.blueplanet.com/resources/beyond-oss-the-sea-change-in-oss-and-the-realization-of-network-as-a-service.html>. Acesso em: 12 out. 2022.

LI, X. *et al.* Automated service provisioning and hierarchical SLA management in 5G systems. **IEEE Transactions on Network and Service Management**, v. 18, n. 4, p. 4669–4684, dez. 2021. DOI: [10.1109/TNSM.2021.3102890](https://doi.org/10.1109/TNSM.2021.3102890).

LINUX FOUNDATION NETWORKING. **About ONAP**. 2023a. Disponível em: <https://www.onap.org/about/>. Acesso em: 18 fev. 2023.

LINUX FOUNDATION NETWORKING. **About Opendaylight**. 2023b. Disponível em: <https://www.opendaylight.org/about/>. Acesso em: 15 fev. 2023.

LIYANAGE, M. *et al.* A survey on Zero touch network and Service Management (ZSM) for 5G and beyond networks. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 203, p. 103362, 2022. ISSN 1084-8045. DOI: [10.1016/j.jnca.2022.103362](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2022.103362). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804522000297>. Acesso em: 7 abr. 2023.

LUO, H. *et al.* Very-low-earth-orbit satellite networks for 6G – communications of Huawei research. **Huawei – HuaweiTech**, Sept. 2022. Disponível em: <https://www.huawei.com/en/huaweitech/future-technologies/very-low-earth-orbit-satellite-networks-6g/>. Acesso em: 19 mar. 2023.

MA, T. *et al.* Slicing resource allocation for eMBB and uRLLC in 5G RAN. **Wireless Communications and Mobile Computing**, 2020. DOI: [10.1155/2020/6290375](https://doi.org/10.1155/2020/6290375).

MALIM, G. What's an iSIM and why should you know about it? **IoT Now**, v. 13, n. 1, p. 14–15, 2023. ISSN 2397-2793. Disponível em: <https://www.iot-now.com/2023/02/16/127851-iot-now-magazine-q1-2023-could-2023-be-the-year-of-making-it-easy/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

MANNWEILER, C. *et al.* 5G-MONARCH deliverable D2.3 – final overall architecture. **5G-MONARCH**, 2019. Disponível em: https://5g-monarch.eu/wp-content/uploads/2019/05/5G-MoNArch_761445_D2.3_Final_overall_architecture_v1.0.pdf. Acesso em: 29 out. 2022.

MANSO, C. *et al.* End-to-end SDN/NFV orchestration of multi-domain transport networks and distributed computing infrastructure for beyond-5G services. **IEICE transactions on communications**, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Tokyo, E104.B, n. 3, p. 188–198, 2021. DOI: [10.1587/transcom.2020NVI0001](https://doi.org/10.1587/transcom.2020NVI0001).

MARINOVA, S. *et al.* End-to-end network slicing for future wireless in multi-region cloud platforms. **Computer Networks**, v. 177, p. 107–298, Mar. 2020. DOI: [10.1016/j.comnet.2020.107298](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107298).

MARTIN, D. Telco cloud manifesto 2.0: do the work before shifting the workloads. **STL Partners**, Jan. 2023. Disponível em: <https://stlpartners.com/research/telco-cloud-manifesto-2-0/>. Acesso em: 20 jan. 2023.

MARTINI, B.; GHARBAOUI, M.; CASTOLDI, P. Intent-based network slicing for SDN vertical services with assurance: context, design and preliminary experiments. **Future Generation Computer Systems**, v. 142, p. 101–116, 2023. ISSN 0167-739X. DOI: [10.1016/j.future.2022.12.033](https://doi.org/10.1016/j.future.2022.12.033).

MARTUCCI JR, M.; RODRIGUES, O.; CUGNASCA, C. E. Distributed cloud: a modern computing paradigm towards 5G networks. *In: XVII Workshop em Clouds e Aplicações - Em conjunto com SBRC. Anais [...]*. Gramado: WCGA, p. 1–31, 2019. Disponível em: <http://wcga.incc.br/2019/>. Acesso em: 26 out. 2022.

MATILDA. **Public deliverables reports**. 2023. Disponível em: <https://www.matilda-5g.eu/index.php/outcomes>. Acesso em: 15 fev. 2023.

MATOS, G. M. V. de. **In-network identification and chaining**: um mecanismo de identificação de tráfego e encadeamento no plano de dados. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Centro de Ciências e Gestão em Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/15424>. Acesso em: 13 abr. 2023.

MATSUBAYASHI, M. O. OpenCare5G transformando a saúde através do 5G. *In: Telco Club 2021*. São Paulo: [s. n.], 2021. Disponível em: <https://telecomwebinar.com/webinar/opencare5g-transformando-a-saude-atraves-do-5g/>. Acesso em: 27 out. 2022.

MATTISSON, S. An overview of 5G requirements and future wireless networks: accommodating scaling technology. **IEEE Solid-State Circuits Magazine**, v. 10, n. 3, p. 54–60, 2018. DOI: [10.1109/MSSC.2018.2844606](https://doi.org/10.1109/MSSC.2018.2844606).

MAULE, M.; VARDAKAS, J. S.; VERIKOUKIS, C. Multi-service network slicing 5G NR orchestration via tailored HARQ scheme design and hierarchical resource scheduling. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, p. 1–14, 2022. DOI: [10.1109/TVT.2022.3223252](https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3223252).

MAVENIR. **Network automation**. 2023. Disponível em: <https://www.mavenir.com/solutions/network-automation/>. Acesso em: 22 fev. 2023.

MEF – Metro-Ethernet Forum. **About MEF**. 2023. Disponível em: <https://www.mef.net/about-mef/>. Acesso em: 19 fev. 2023.

MENA, M. P. *et al.* Enhancing the performance of 5G slicing operations via multitier orchestration. *In: 2020 23rd Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks and Workshops, ICIN 2020. Proceedings [...]*. Paris: IEEE, 2020, p. 131–138. DOI: [10.1109/ICIN48450.2020.9059546](https://doi.org/10.1109/ICIN48450.2020.9059546).

MENDES, A. A. **Uma contribuição para a análise da confiabilidade de sistemas redundantes com inspeção periódica**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/108501>. Acesso em: 22 dez. 2022.

MERRIAM-WEBSTER. **Proof of concept**. 2023. Disponível em: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/proof%20of%20concept>. Acesso em: 8 abr. 2023.

MICHAELIS. **Dicionário brasileiro da Língua Portuguesa**. 2023 – tese. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/busca?r=0&f=0&t=0&palavra=tese/>. Acesso em: 11 maio 2023.

MISHRA, S. Only industry collaboration can unlock the true potential of 5G O-RAN. **RCR Wireless News** – reader forum, Sept. 1, 2022. Disponível em: https://www.rcrwireless.com/20220901/open_ran/only-industry-collaboration-can-unlock-the-true-potential-of-5g-o-ran-reader-forum. Acesso em: 12 out. 2022.

MISHRA, S. The roadmap to fully automated 5G network slicing. **RCR Wireless News** – reader forum, Jan. 30, 2023. Disponível em: <https://www.rcrwireless.com/20230130/5g/the-roadmap-to-fully-automated-5g-network-slicing-reader-forum>. Acesso em: 31 jan. 2023.

MORRISH, J.; DHINGRA, S. Will digital transformation save the planet? **Transforma Insights webinar**, Nov. 17, 2022. Disponível em: <https://transformainsights.com/research/reports/webinar-sustainability-with-dx-november22>. Acesso em: 22 dez. 2022.

MOURAD, A. *et al.* The ITU vision and alignment with international bodies. *In: 6G Symposium 2023 – beyond the hype*. London: [s. n.], April 24, 2023. Disponível em: <https://www.6gworld.com/6gsymposium-spring-2023-recorded-sessions/>. Acesso em: 27 abr. 2023.

MUNALINGAL, K. Why automation is required for 5G. **The Fast Mode**, Mar. 6, 2020. Disponível em: <https://www.thefastmode.com/expert-opinion/16594-why-automation-is-required-for-5g>. Acesso em: 12 out. 2022.

NEC. **Montando o quebra-cabeça do futuro das redes com a automação**. Abr. 2023. Disponível em: <https://blog.nec.com.br/montando-o-futuro-das-redes-com-a-automacao>. Acesso em: 12 abr. 2023.

NECOS – Novel Enablers for Cloud Slicing. **Project deliverables**. 2019. Disponível em: <http://www.h2020-necos.eu/documents/deliverables/>. Acesso em: 28 out. 2022.

NENCIONI, G.; GARROPPO, R. G.; GONZALEZ, A. J.; HELVIK, B. E.; PROCISSI, G. Orchestration and control in software-defined 5G networks: research challenges. **Wireless Communications and Mobile Computing**, 2018. DOI: [10.1099/ijsem.0.001252](https://doi.org/10.1099/ijsem.0.001252).

NGMN ALLIANCE – Next Generation Mobile Networks Alliance. **5G end-to-end architecture framework – version 4.3.1**. Nov. 2020. Disponível em: <https://www.ngmn.org/publications/5g-end-to-end-architecture-framework-v4-31.html>. Acesso em: 12 out. 2022.

NGMN ALLIANCE – Next Generation Mobile Networks Alliance. **Vision & mission**. 2023. Disponível em: <https://www.ngmn.org/about-us/vision-mission.html>. Acesso em: 23 fev. 2023.

NIN, C. S. What will the wireless workforce look like in 2030? **RCR Wireless News – reports**, April 3, 2023. Disponível em: <https://www.rcrwireless.com/free-reports/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

NOGALES, B. *et al.* Design and deployment of an open management and orchestration platform for multi-site NFV experimentation. **IEEE Communications Magazine**, v. 57, n. 1, p. 20–27, 2019. DOI: [10.1109/MCOM.2018.1800084](https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1800084).

NOKIA. **Convergent charging solutions – take advantage of 5G monetization opportunities in converged charging with Nokia convergent charging solutions**. 2023a. Disponível em: <https://www.nokia.com/networks/bss-oss/converged-charging/>. Acesso em: 13 fev. 2023.

NOKIA. **How can CSPs improve network energy efficiency?** 2023b. Disponível em: <https://www.nokia.com/networks/services/NokiaAVA/energyefficiency/GSMA-energy-survey/>. Acesso em: 18 fev. 2023.

NOKIA. **Networks in 2030**: why an open future is essential. 2023c. Disponível em: <https://www.nokia.com/thought-leadership/articles/networks-2030-open-telecoms-future/>. Acesso em: 17 fev. 2023.

NTT DOCOMO. **5G Open RAN ecosystem whitepaper**. June 2021. Disponível em: https://www.docomo.ne.jp/english/corporate/technology/whitepaper_5g_open_ran/. Acesso em: 31 out. 2022.

OASIS – Organization for the Advancement of Structured Information Standard. **About us**. 2023. Disponível em: <https://www.iso.org/about-us.html>. Acesso em: 12 dez. 2022.

ODINI, Marie-Paule. Network slice configuration and service slice lifecycle management. White paper. **Hewlett Packard Enterprise (HPE)**, Feb. 2019.

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development. **The road to 5G networks**: experience to date and future developments. OECD Digital Economy Papers, Paris, n. 284, p. 1–86, July 2019. DOI: [10.1787/2f880843-en](https://doi.org/10.1787/2f880843-en). Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/paper/2f880843-en>. Acesso em: 11 out. 2022.

OLIMPIO, J.; CUGNASCA, C.; MARTUCCI, M. Towards 5G: a projection of autonomous networks supported by cloud & edge computing. *In*: VII Workshop de Pós-Graduação em Engenharia de Computação – WPGEC, nov. 2018. **Anais** [...]. São Paulo: WPGEC, p. 15–19, nov. 2018. ISBN 978-85-5338-002-2. Disponível em: <https://pcs.usp.br/wpgec/wp-content/uploads/sites/18/2019/05/WPGEC-2018-v.2018.12.19.pdf>. Acesso em: 26 out. 2022.

OLIVEIRA, J. V. de. **Orquestração de serviços de rede com múltiplos pontos de presença**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Eletrônica, Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro, 2019. Disponível em: <https://ria.ua.pt/handle/10773/29586>. Acesso em: 11 out. 2022.

OLIVEIRA, W. de; BATISTA JR, J. O. R.; NOVAIS, T.; TAKASHIMA, S. T.; STANGE, L. R.; MARTUCCI JR, M.; CUGNASCA, C. E.; BRESSAN, G. OpenCare5G: O-RAN in private network for digital health applications. **Sensors**, v. 23, n. 2, 2023. Special issue “Experimentation in 5G and beyond networks: state of the art and the way forward (volume II)”. ISSN 1424-8220. DOI: [10.3390/s23021047](https://doi.org/10.3390/s23021047). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/2/1047>. Acesso em: 2 abr. 2023.

ONF – Open Network Foundation. **Our mission**. 2023. Disponível em: <https://opennetworking.org/mission/>. Acesso em: 15 fev. 2023.

OPENINFRA PROJECT. **Openstack** – the most widely deployed open source cloud software in the world. 2023. Disponível em: <https://www.openstack.org/>. Acesso em: 17 fev. 2023.

O-RAN ALLIANCE. **O-RAN architecture description** – O-RAN.WG1.O-RAN-architecture-description-v06.00. Mar. 2022. Disponível em: <https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/specifications>. Acesso em: 11 out. 2022.

ORDONEZ-LUCENA, J. *et al.* On the rollout of network slicing in carrier networks: a technology radar. **Sensors**, MDPI AG, Basel, v. 21, n. 23, p. 8094, 2021. DOI: [10.3390/s21238094](https://doi.org/10.3390/s21238094).

PAGANELLI, F.; CAPPANERA, P.; CUFFARO, G. Tenant-defined service function chaining in a multi-site network slice. **Future Generation Computer Systems**, Elsevier B.V., v. 121, p. 1–18, 2021. DOI: [10.1016/j.future.2021.03.002](https://doi.org/10.1016/j.future.2021.03.002).

PAGÈS, A.; AGRAZ, F.; SPADARO, S. SDN-based band-adaptive quality assurance scheme in support of heterogeneous B5G services over sliceable multi-band optical networks. **Optical Switching and Networking**, v. 47, p. 100721, 2023. ISSN 1573-4277. DOI: [10.1016/j.osn.2022.100721](https://doi.org/10.1016/j.osn.2022.100721). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427722000571>. Acesso em: 7 abr. 2023.

PAOLINI, M. Wider horizons for next-generation testing – the evolution from drive testing to multi-level automated testing in 5G. **Senza Fili**, Infovista white paper. 2023. Disponível em: https://senzafili.com/publications/nextgen_5g_testing/. Acesso em: 10 mar. 2023.

PARVEZ, I. *et al.* A survey on low latency towards 5G: RAN, core network and caching solutions. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 20, n. 4, p. 3098–3130, May 2018. DOI: [10.1109/COMST.2018.2841349](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2841349).

PAVÓN, I. L. *et al.* **Hexa-X deliverable D6.2** – design of service management and orchestration functionalities. 2022. Disponível em: https://hexa-x.eu/wp-content/uploads/2022/05/Hexa-X_D6.2_V1.1.pdf. Acesso em: 30 out. 2022.

PETERSON, L. *et al.* Central office re-architected as a data center. **IEEE Communications Magazine**, v. 54, n. 10, p. 96-101, Oct. 2016. DOI: [10.1109/MCOM.2016.7588276](https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7588276).

PLUMB, T. What the Metaverse's infrastructure will look like (and why your virtual life depends on it). **Sdxcentral** – analysis, Mar. 15, 2023. Disponível em: <https://www.sdxcentral.com/articles/analysis/what-metaverses-infrastructure-will-look-like-and-why-your-virtual-life-depends-on-it/2023/03/>. Acesso em: 2 abr. 2023.

PRIBERAM. **Dicionário Priberam da Língua Portuguesa**. 2023 – tese. Disponível em: <https://dicionario.priberam.org/tese/>. Acesso em: 11 maio 2023.

QUADRI, C.; CESELLI, A.; ROSSI, G. P. Multi-user edge service orchestration based on deep reinforcement learning. **Computer Communications**, v. 203, p. 30–47, 2023. ISSN 0140-3664. DOI: [10.1016/j.comcom.2023.02.027](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.02.027). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366423000737>. Acesso em: 7 abr. 2023.

QUALCOMM. **Enabling the metaverse with 5G**. Nov. 2022. Disponível em: <https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/Presentation-Enabling-the-metaverse-with-5G.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2022.

QUINTANA-RAMIREZ, I. *et al.* The Making of 5G: Building an end-to-end 5G-enabled system. **IEEE Communications Standards Magazine**, v. 2, n. 4, p. 88–96, 2018. DOI: [10.1109/MCOMSTD.2018.1800024](https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2018.1800024).

RAFIQ, A. *et al.* Intent-based end-to-end network service orchestration system for multi-platforms. **Sustainability**, v. 12, n. 7, 2020. DOI: [10.3390/su12072782](https://doi.org/10.3390/su12072782).

RAMSAY, D. **Autonomous networks**: from concept to reality. Parsippany: TM Forum, 4 Century Drive, Aug. 2022. *E-book*. ISBN 978-1-955998-25-3. Disponível em: <https://inform.tmforum.org/research-and-analysis/reports/autonomous-networks-from-concept-to-reality/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

RAMSAY, D.; GUPTA, R. **5G core**: exploring CSP approaches. Parsippany: TM Forum, 4 Century Drive, Nov. 2022. *E-book*. ISBN 978-1-955998-36-9. Disponível em: <https://inform.tmforum.org/research-and-analysis/reports/5g-core-exploring-csp-approaches/>. Acesso em: 22 jan. 2023.

RAZA, M. R. **Orchestration strategies for slicing in 5G networks**. 2018. Doctoral Thesis in Information and Communication Technology - School of Electrical Engineering and Computer Science, KTH Royal Institute of Technology. 2018. Disponível em: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1249414/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

RCR WIRELESS NEWS (org.); ERICSSON. **The climate science is clear** — 5G operators have a key role to play in meeting global sustainability goals. Jan. 2023. Disponível em: <https://www.rcrwireless.com/20230117/5g/the-climate-science-is-clear-5g-operators-have-a-key-role-to-play-in-meeting-global-sustainability-goals>. Acesso em: 10 abr. 2023.

RCR WIRELESS NEWS. 5G Monetization Forum 2023 – key findings. Mar. 2023. **RCR Wireless News** – reports, April, 3 2023. Disponível em: https://content.rcrwireless.com/5g_monetization_report_23. Acesso em: 8 abr. 2023.

RED HAT. **Reinventing telecommunications with open innovation**. Feb. 14, 2023. Disponível em: <https://www.redhat.com/en/resources/reinventing-telecommunications-open-innovation>. Acesso em: 11 abr. 2023.

RIEKSTIN, A. C. *et al.* A survey on metrics and measurement tools for sustainable distributed cloud networks. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 20, n. 2, p. 1244–1270, 2018. DOI: [10.1109/COMST.2017.2784803](https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2784803).

RIGGIO, R. *et al.* Programming abstractions for software-defined wireless networks. **IEEE Transactions on Network and Service Management**, v. 12, n. 2, p. 146–62, 2015. DOI: [10.1109/TNSM.2015.2417772](https://doi.org/10.1109/TNSM.2015.2417772).

RODRIGUEZ, V. Q.; GUILLEMIN, F.; BOUBENDIR, A. 5G E2E Network slicing management with ONAP. *In*: 2020 23rd Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks and Workshops, ICIN 2020. **Proceedings** [...]. Paris: IEEE, 2020, p. 87–94. DOI: [10.1109/ICIN48450.2020.9059507](https://doi.org/10.1109/ICIN48450.2020.9059507).

ROSTAMI, A. *et al.* Orchestration of RAN and transport networks for 5G: an SDN approach. **IEEE Communications Magazine**, v. 55, n. 4, p. 64–70, 2017. DOI: [10.1109/MCOM.2017.1600119](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600119).

SAKURAI, C. A. **Proposta de uma arquitetura para o fornecimento de serviços móveis em redes convergentes heterogêneas com foco no usuário**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2010. DOI: [10.11606/T.3.2010.tde-22022010-130526](https://doi.org/10.11606/T.3.2010.tde-22022010-130526). Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3141/tde-22022010-130526/publico/Tese_Cledson_Akio_Sakurai.pdf. Acesso em: 11 out. 2022.

SALAZAR, G.; RUSSI-VIGOYA, M. N. Technology readiness level as the foundation of human readiness level. **Ergonomics in Design**, v. 29, n. 4, p. 25–29, 2021. DOI: [10.1177/10648046211020527](https://doi.org/10.1177/10648046211020527).

SÁNCHEZ *et al.* Deliverable D1.5 5G-VINNI E2E network slice implementation and further design guidelines. V. 2. **5G-VINNI**, Oct. 2020. DOI: [10.5281/zenodo.4067793](https://doi.org/10.5281/zenodo.4067793).

SANDANO, I. The self-driven network. *In*: **Juniper Networks** – a trajetória rumo à automação e seus estágios (webinar). [S. l.: s. n.], 2018.

SANTHANAM, A.; MISHRA, S. How sustainability can shape the telecommunications sector. **RCR Wireless News** – reader forum, May 3, 2023. Disponível em: https://www.rcrwireless.com/20230503/social_initiatives/how-sustainability-can-shape-the-telecommunications-sector-reader-forum. Acesso em: 10 maio 2023.

SANTOS, J. F. *et al.* Breaking down network slicing: hierarchical orchestration of end-to-end networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 58, n. 10, p. 16–22, Oct. 2020. DOI: [10.1109/MCOM.001.2000406](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000406).

SCF – Small Cell Forum. **About us**. 2023. Disponível em: <https://www.smallcellforum.org/about-us/>. Acesso em: 26 fev. 2023.

SCHMITZ, A. **A inovação e o empreendedorismo na universidade**: um *framework* conceitual sistêmico para promover desenvolvimento socioeconômico regional e sustentabilidade institucional. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia e Gestão do Conhecimento) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em: <http://www.uniedu.sed.sc.gov.br/wp-content/uploads/2017/10/Tese-Ademar-Schmitz.pdf>. Acesso em: 19 maio 2023.

SERRA, A. P. G. **Método para identificação de parâmetros de qualidade de serviços aplicados a serviços móveis e interativos**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2007. DOI: [10.11606/T.3.2007.tde-26072007-175442](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3141/tde-26072007-175442). Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3141/tde-26072007-175442/publico/TeseAnapaulaGoncalvesSerra.pdf>. Acesso em: 11 out. 2022.

SERVICENOW. **Fuel growth and lower costs in telecom** – accelerate innovation and speed to market. 2023. Disponível em: <https://www.servicenow.com/lpebk/fuel-growth-and-lower-costs-in-telecom.html>. Acesso em: 2 abr. 2023.

SHARIAT, M. *et al.* A flexible network architecture for 5G systems. **Wireless Communications and Mobile Computing**, Feb. 2019. DOI: [10.1155/2019/5264012](https://doi.org/10.1155/2019/5264012).

SHEHABUDDEEN, N. *et al.* **Representing and approaching complex management issues**: part 1– role and definition. Centre for Technology Management (CTM) working paper, 1999. Disponível em: <https://www.repository.cam.ac.uk/items/530fe23e-ce20-48ab-8d81-9fafc2873744/>. Acesso em: 19 mar. 2023.

SHRIVASTAVA, M. eSIMs: an alternative to conventional telecom service providers. **IoT Now** – blogs, Feb. 13, 2023. Disponível em: <https://www.iot-now.com/2023/02/13/127745-esims-an-alternative-to-conventional-telecom-service-providers/>. Acesso em: 11 mar. 2023.

SILVA, A. P. da. **A questão do humano em Nietzsche**: entre o homem moral e o super homem. 2012. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/10655>. Acesso em: 11 out. 2022.

SILVA, D. C. da; BATISTA JR, J. O. R.; SOUSA, M. A. F. de; MOSTAÇO, G. M.; MONTEIRO, C. de C.; BRESSAN, G.; CUGNASCA, C. E.; SILVEIRA, R. M. A novel approach to multi-provider network slice selector for 5G and future communication systems. **Sensors**, v. 22, n. 16, p. 1–33, 2022. Special issue "Towards next generation beyond 5G (B5G) networks". ISSN 1424-8220. DOI: [10.3390/s22166066](https://doi.org/10.3390/s22166066). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/16/6066>. Acesso em: 2 abr. 2023.

SILVEIRA, P. D. N. **Um framework conceitual para a concepção de ecossistemas inteligentes de aprendizagem**. 2022. Tese (Doutorado em Informática) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/1731>. Acesso em: 16 maio 2023.

SLICENET. **Deliverables**. 2020. Disponível em: <https://slicenet.eu/deliverables/>. Acesso em: 29 out. 2022.

SONKOLY, B. *et al.* 5G Applications from vision to reality: multi-operator orchestration, **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 38 n. 7, p. 1401–1416, 2020. DOI: [10.1109/JSAC.2020.2999684](https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.2999684).

SOUSA, N. D.; PEREZ, D.; ROSA, R.; SANTOS, M.; ROTHENBERG, C. Network service orchestration: a survey. **Computer Communications**, v. 142–143, p. 69–94, 2019. ISSN 0140-3664. DOI: [10.1016/j.comcom.2019.04.008](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.04.008).

SPERA, L. Desagregação de rede: o que é e quais seus benefícios. **Teleco**, 2022. Disponível em: https://www.teleco.com.br/tip/publicacoes/publ_20210310.asp. Acesso em: 10 out. 2022.

SPIRENT. **5G 2023** – market drivers, insights, and considerations. Feb. 2023. Disponível em: https://www.lightreading.com/lg_redirect.asp?pidl_lgid_docid=783531. Acesso em: 2 abr. 2023.

STERN, M. 4 Crucial principles for successful implementation of 5G network slicing. **Itential Blog**, Oct. 6, 2021. Disponível em: <https://www.itential.com/blog/4-crucial-principals-for-successful-implementation-of-5g-network-slicing/>. Acesso em: 12 out. 2022.

STUHLFAUTH, R. 5G NTN takes flight: technical overview of 5G non-terrestrial networks – version 01.00, July 2022. **Rohde & Schwarz** – white paper, 2022. Disponível em: https://www.rohde-schwarz.com/us/solutions/test-and-measurement/aerospace-defense/satellite-test/white-paper-5g-ntn-takes-flight-technical-overview-of-5g-non-terrestrial-networks_255919.html. Acesso em: 22 dez. 2022.

TAAFFE, J. **50 shades of green**: using data to drive sustainability. Parsippany: TM Forum, 4 Century Drive, Nov. 2022. *E-book*. ISBN 978-1-955998-41-3. Disponível em: <https://inform.tmforum.org/research-and-analysis/ebooks/50-shades-of-green-using-data-to-drive-sustainability/>. Acesso em: 21 jan. 2023.

TALEB, T. *et al.* On multi-domain network slicing orchestration architecture and federated resource control. **IEEE Network**, v. 33, n. October, p. 242-252, 2019. DOI: [10.1109/MNET.2018.1800267](https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1800267).

TALEB, T.; AFOLABI, I.; BAGAA, M. Orchestrating 5G network slices to support industrial Internet and to shape next-generation smart factories. **IEEE Network**, v. 33, n. 4, p. 146-154, Jan. 2019. DOI: [10.1109/MNET.2018.1800129](https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1800129).

TANG, Y.; DANANJAYAN, S.; HOU, C.; GUO, Q.; LUO, S.; HE, Y. A survey on the 5G network and its impact on agriculture: challenges and opportunities. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 180, 2021. DOI: [10.1016/j.compag.2020.105895](https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105895).

THE LINUX FOUNDATION. **Technical charter (the “charter”) for Nephio Project a series of LF projects, LLC**. June 2022. Disponível em: <https://nephio.org/wp-content/uploads/sites/6/2022/06/Nephio-Project-Technical-Charter-Amended-6-9-2022.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2023.

THOTTAN, M. Future of network and service automation. *In*: **The International Federation for Information Processing (IFIP) Networking**. Paris: [s. n.], June 2020.

TININI, R. I. **Alocação de recursos em uma arquitetura óptica cloud-fog RAN para o suporte da Internet 5G**. 2019. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, 2019. DOI: [10.11606/T.45.2019.tde-04112019-172447](https://doi.org/10.11606/T.45.2019.tde-04112019-172447). Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/45/45134/tde-04112019-172447/publico/teseTininiFinal.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2023.

TM FORUM. Autonomous Networks Project. **Autonomous networks**: empowering digital transformation – from strategy to implementation. Sept. 2022a. <https://www.tmforum.org/resources/whitepaper/autonomous-networks-empowering-digital-transformation-from-strategy-to-implementation/>. Acesso em: 2 abr. 2023.

TM FORUM. **Explore by theme to find what you need**. 2022b. Disponível em: <https://inform.tmforum.org/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

T-NOVA. **Publications**. 2016. Disponível em: <http://www.t-nova.eu/papers-in-journals/>. Acesso em: 28 out. 2022.

TOMÁS, J. P. KPMG targets healthcare sector with Verizon's 5G private network. **RCR Wireless News**, Feb. 24, 2023. Disponível em: <https://www.rcrwireless.com/20230224/private-5g/kpmg-targets-healthcare-sector-verizon-5g-private-network>. Acesso em: 12 mar. 2023.

TOOSI, A. N. *et al.* Management and orchestration of network slices in 5G, fog, edge and clouds. *In: Fog and Edge Computing: Principles and Paradigms. Proceedings [...]*. New York: Wiley, p. 79–101, 2019. DOI: [10.1002/9781119525080.ch4](https://doi.org/10.1002/9781119525080.ch4). Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1812.00593>. Acesso em: 10 out. 2022.

TOUMI, N. *et al.* On cross-domain service function chain orchestration: an architectural framework. **Computer networks**, Elsevier B.V, v. 187, p. 1–15, 2021. DOI: [10.1016/j.comnet.2021.107806](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.107806).

TRIPATHY, S. Overview of network automation. **Enterprise Networking Planet**, Oct. 19, 2022. Disponível em: <https://www.enterprisenetworkingplanet.com/data-center/network-automation/>. Acesso em: 26 out. 2022.

VALCARENGHI, L. *et al.* A framework for orchestration and federation of 5G services in a multi-domain scenario. *In: Proceedings of the Workshop on Experimentation and Measurements in 5G*. New York: Association for Computing Machinery, p. 19–24, 2018. (EM-5G'18). ISBN 9781450360838. DOI: [10.1145/3286680.328668](https://doi.org/10.1145/3286680.328668). Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3286680.3286684>. Acesso em: 10 abr. 2023.

VARGA, P. *et al.* 5G Support for Industrial IoT applications – challenges, solutions, and research gaps. **Sensors**, v. 20, n. 3, 2020. DOI: [10.3390/s20030828](https://doi.org/10.3390/s20030828).

VELASQUEZ, K. *et al.* Resource orchestration in 5G and beyond: challenges and opportunities. **Computer Communications**, v. 192, p. 311–315, 2022. ISSN 0140-3664. DOI: [10.1016/j.comcom.2022.06.019](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.06.019). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366422002213>. Acesso em: 8 abr. 2023.

VENNAM, S. Distributed cloud vs. hybrid cloud vs. multicloud vs. edge computing (part 1). **IBM Blog – cloud**, Sept. 29, 2020a. Disponível em: <https://www.ibm.com/cloud/blog/distributed-cloud-vs-hybrid-cloud-vs-multicloud-vs-edge-computing-part-1>. Acesso em: 26 dez. 2022.

VENNAM, S. Distributed cloud vs. hybrid cloud vs. multicloud vs. edge computing (part 2). **IBM Blog – cloud**, Oct. 14, 2020b. Disponível em: <https://www.ibm.com/cloud/blog/distributed-cloud-vs-hybrid-cloud-vs-multicloud-vs-edge-computing-part-2>. Acesso em: 26 dez. 2022.

VIAVI. **Poster**: 5G architecture and specifications. 2023. Disponível em: <https://comms.viavisolutions.com/5G-Architecture-Specifications-Poster-vi76947>. Acesso em: 19 fev. 2023.

VITAL5G – Vertical Innovations in Transport and Logistics over 5G Experimentation Facilities. **Publications**. 2023. Disponível em: <https://www.vital5g.eu/publications/>. Acesso em: 22 fev. 2023.

WAINER, J. **Métodos de pesquisa quantitativa e qualitativa para a Ciência da Computação**. 2007. Disponível em: https://www.ic.unicamp.br/~wainer/cursos/1s2018/metodologia/Metodos_de_pesquisa_quantitativa_e_qualitativa_par.pdf. Acesso em: 22 dez. 2022.

WALIA, J. S. *et al.* Network slicing strategies for a smart factory. **Computers in Industry**, v. 111, p. 108–120, Oct. 2019. DOI: [10.1016/j.compind.2019.07.006](https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.07.006).

WASLAWICK, R. S. **Metodologia de pesquisa para Ciência da Computação**. 3. ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2020. 152 p. ISBN 978-85-95151-0-93.

WEN, R. *et al.* On robustness of network slicing for next-generation mobile networks. **IEEE Transactions on Communications**, v. 67, n. 1, p. 430–442, Jan. 2019. DOI: [10.1109/TCOMM.2018.2868652](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2868652).

WICK, B.; XAVIER, L. The O-RAN SMO – why an open, vendor neutral approach is a must for flexible component choices and CAPEX reduction in 5G O-RAN deployments. **Aarna Networks**, 2023. Disponível em: <https://www.aarnanetworks.com/whitepapers/o-ran-smo>. Acesso em: 17 fev. 2023.

WONG, I. Moving beyond 5G: what lies ahead. *In*: **What problems will the next generation of cellular solve?** [S. l.: s. n.], Aug. 2022. Disponível em: https://content.rcrwireless.com/6g_report. Acesso em: 23 dez. 2022.

WOOD, N. For some applications, one network slice is never enough. **Telecoms.com**, Dec. 19, 2022. Disponível em: <https://telecoms.com/519039/for-some-applications-one-network-slice-is-never-enough/>. Acesso em: 23 dez. 2022.

WOODEN, A. What is 6G? **Telecoms.com** – news, May 8, 2023. Disponível em: <https://telecoms.com/521550/what-is-6g/>. Acesso em: 12 maio 2023.

WU, Y *et al.* Network slicing for mMTC and uRLLC using software-defined networking with P4 switches. **Electronics**, v. 11, n. 14, p. 1–17, 2022. DOI: [10.3390/electronics11142111](https://doi.org/10.3390/electronics11142111).

WU, Y.; ZHOU, J. Dynamic service function chaining orchestration in a multi-domain: a heuristic approach based on srv6. **Sensors**, MDPI AG, Basel, v. 21, n. 19, p. 1–21, 2021. DOI: [10.3390/s21196563](https://doi.org/10.3390/s21196563).

YALA, L. *et al.* 5G mobile network orchestration and management using open-source. *In: IEEE 5G World Forum, 5GWF 2019. Proceedings* [...]. Dresden: IEEE, p. 421–426, 2019. DOI: [10.1109/5GWF.2019.8911690](https://doi.org/10.1109/5GWF.2019.8911690).

YI, B. *et al.* A comprehensive survey of network function virtualization. **Computer Networks**, v. 133, p. 212–262, 2018. DOI: [10.1016/j.comnet.2018.01.021](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.01.021).

YOU, X. *et al.* Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts. **Science China Information Sciences**, v. 64, n. 110301, 2021. DOI: [10.1007/s11432-020-2955-6](https://doi.org/10.1007/s11432-020-2955-6). Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11432-020-2955-6>. Acesso em: 6 abr. 2023.

YUAN, J. *et al.* Hierarchical federated learning through LAN-WAN orchestration. *In: Conference'17. Proceedings* [...]. Washington: ARXIV, July 2017. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2010.11612>. Acesso em: 4 set. 2022.

ZAHOOR, S. *et al.* Comprehensive analysis of network slicing for the developing commercial needs and networking challenges. **Sensors**, MDPI AG, Basel, v. 22, n. 17, p. 6623, 2022. DOI: [10.3390/s22176623](https://doi.org/10.3390/s22176623).

ZETHZON, M. Six key elements of an optimized 5G architecture. **RCR Wireless News** – reader forum, June 21, 2022. Disponível em: <https://rcrwireless.com/20220621/architecture/%ef%bf%bcsix-key-elements-of-an-optimized-5g-architecture-reader-forum>. Acesso em: 12 out. 2022.

ZHANG, P. *et al.* Space-air-ground integrated multi-domain network resource orchestration based on virtual network architecture: a DRL method. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, IEEE, v. 23, n. 3, p. 2798–2808, 2022. DOI: [10.1109/TITS.2021.3099477](https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3099477).

ZHAO, T.; HE, L. DRL-based joint resource allocation and device orchestration for hierarchical federated learning in NOMA-enabled Industrial IoT. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, Apr. 2022. DOI: [10.1109/TII.2022.3170900](https://doi.org/10.1109/TII.2022.3170900).

ZHOU, X. *et al.* Network slicing as a service: enabling enterprises' own software-defined cellular networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 54, n. 7, p. 146–153, 2016. DOI: [10.1109/MCOM.2016.7509393](https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7509393).

APÊNDICE – Publicações realizadas

Este apêndice apresenta os trabalhos científicos que, direta ou indiretamente, foram publicados a partir do desenvolvimento desta tese, como sintetiza a [Tabela 8](#).

| Trabalho | Em | Congresso | Livro | Periódico | Outros | Local |
|---|--|-----------|-------|-----------|--------|----------------------------|
| Olimpio, Cugnasca e Martucci (2018) | VII Workshop de Pós-Graduação em Engenharia de Computação (EP-USP) | √ | x | x | x | São Paulo, Brasil |
| Martucci Jr, Rodrigues e Cugnasca (2019) | XVII Workshop em <i>Clouds</i> e Aplicações — Em conjunto com SBRC | √ | x | x | x | Gramado, Brasil |
| Batista Jr et al. (2019a) | ICTC 2019 - 10 th <i>International Conference on ICT Convergence: Leading the Autonomous Future</i> | √ | x | x | x | Jeju Island, Coréia do Sul |
| Batista Jr et al. (2019b) | 12 th EFITA (European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and the Environment) HAICTA-WCCA | √ | x | x | x | Rhodes Island, Grécia |
| Batista Jr et al. (2021) | Applied Sciences – ed. especial “5G and Beyond Fiber-Wireless Network Communication” | x | x | √ | x | Basel, Suíça |
| Batista Jr et al. (2022) | <i>Information and Communication Technologies for Agriculture—Theme I: Sensors</i> | x | √ | x | x | Cham, Suíça |
| ITU-T (2022)* | Recomendação ITU-T Y.4482 | x | x | x | √ | Geneva, Suíça |
| Silva, Batista Jr, Sousa, Mostaço, Monteiro, Bressan, Cugnasca e Silveira (2022) | Sensors – ed. especial "Towards Next Generation beyond 5G (B5G) Networks" | x | x | √ | x | Basel, Suíça |
| Oliveira, Batista Jr, Novais, Takashima, Stange, Martucci Jr, Cugnasca e Bressan (2023)** | Sensors – ed. especial "Experimentation in 5G and beyond Networks: State of the Art and the Way Forward (Volume II)" | x | x | √ | x | Basel, Suíça |

Tabela 8 – Publicações dos trabalhos científicos decorrentes desta tese de doutorado

* Como contribuidor

** Como consta no trabalho, os dois primeiros autores contribuíram igualmente para o mesmo.