Projeto Brasil 6G

Relatório Técnico das Atividades 5.1 e 5.2 - Projeto e Seleção de Componentes, Plataformas, Ferramentas e Especificação

19/12/2022

Histórico de Atualizações:

Versão	Data	Autor(es)	Notas
1	05/12/2022	Alex Vidigal Bastos (UFSJ) Antonio Marcos Alberti (Inatel) Carlos Eugênio Benício Duarte (Inatel) Cláudio Carter Erazzo (Inatel) Cristiano Bonatto Both (Unisinos) Daniel Ricardo de Oliveira (UFU) Diego Gabriel Soares Pivoto (Inatel) Felipe Augusto Pereira de Figueiredo (Inatel) Fernando Farias (RNP) Flávio de Oliveira Silva (UFU) Gustavo Araújo (RNP) Juliano Silveira Ferreira (Inatel) Kleber Vieira Cardoso (UFG) Luciano Leonel Mendes (Inatel) Maurício Amaral Gonçalves (UFU) Michelle Soares Pereira Facina (CPQD) Natal Vieira de Souza Neto (UFU) Rodrigo Moreira (UFU) Rogério S. Silva (UFG/IFG) Samuel Baraldi Mafra (Inatel) Sand Luz Correa (UFG) Tibério Tavares Rezende (Inatel)	Elaboração de conteúdo
2	19/12/2022	Luciano Leonel Mendes	Revisão de texto

Lista de Tabelas

1 Sumário dos escopos relacionados a arquitetura 6G. 8
2 Comparação Funcional e Técnica das opções de código aberto para núcleo de 5G. 20
3 Levantamento de Arquiteturas 6G com *Network Data Analytics Function* (NWDAF) 23
4 Configurações para os experimentos. 26
5 Testes de conformidade realizados para comparar 3 núcleos de 5G. 27
6 Resultados numéricos dos testes de conformidade. 28
7 Testes de robustez. 29
8 Sumário dos aspectos levados em conta na decisão sobre qual o melhor *open source* para o núcleo do Proto 6G. 31
9 Resumo sobre os caminhos possíveis para integração de redes de acesso não-*3rd Generation Partnership Project* (3GPP) a um núcleo 3GPP. 42
10 Características relacionadas ao servidor para o 5G *Core* do projeto 6G desenvolvido pela UC3M. 48
11 Características de servidores em projetos relacionados. 49
12 Lista interna de recomendações de características para o servidor. 51
13 Lista de recomendações de características para o servidor a ser adquirido. 52
14 Comparação de Especificação de Processadores. 53
15 Mapeamento de demandas das aplicações em relação ao núcleo 6G. 59
16 Resumo dos Trabalhos relacionados a fatiamento de recursos em 5G. 65
17 Estado da arte da aplicação de *Artificial Intelligence* (AI) na arquitetura do 6G. 81

Acrônimos

3GPP *3rd Generation Partnership Project*

5G Quinta Geração de Rede Móvel Celular

5G-AKA *5G-Authentication and Key Agreement*

5GC 5G Core

5GS Sistema 5G

6G Sexta Geração de Rede Móvel Celular

AI *Artificial Intelligence*

AMF *Access and Mobility Management Function*

AP *Access Point*

AR *Augmented Reality*

AUSF *Authentication Server Function*

BS *Base Station*

BSS *Business Support System*

CDN *Content Distribution Network*

CN *Core Network*

CNI *Container Network Interface*

CRR *Centro de Referência em Radiocomunicações*

CSP *Communication Service Provider*

DApp *Decentralized Application*

DLT *Distributed Ledger Technologies*

DOCSIS *Data Over Cable Service Interface Specification*

E-UTRAN *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*

FIA *Future Internet Architecture*

FSO *Free-space Optical Communication*

GFDM *Generalized Frequency Division Multiplexing*

GPS *Global Positioning System*

GTP *GPRS Tunnelling Protocol*

GTP-U *GPRS Tunnelling Protocol for User Data*

HPC *High Performance Computing*

IA Inteligencia Artificial

IaaS *Infrastructure as a Service*

IBN *Intent-Based Network*

ICT Lab. *Information Communications Technology Laboratory*

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

Inatel *Instituto Nacional de Telecomunicações*

IoT *Internet of Things*

IP *Internet Protocol*

IPSec *Internet Protocol Security*

IRS *Intelligent Reflecting Surface*

ITU *International Telecommunication Union*

ITU-T *International Telecommunication Union - Telecommunication*

LaMCAD Laboratório Multiusuário de Computação de Alto Desempenho

LiDAR *Light Detection and Ranging*

LoRa *Long Range*

LPWAN *Low Power Wide Area Network*

LPWAN *Low-Power Wide-Area Network*

LTE *Long Term Evolution*

MANO *Management and Orchestration*

MIMO *Multiple-Input and Multiple-Output*

ML *Machine Learning*

N3A *Non-3GPP Access*

N3IWF *Non-3GPP Interworking Function*

N5CW *Non-5G Capable over WLAN*

NTN *Non-Terrestrial Networks*

NS *Networking Slicing*

NSI *Networking Slice Instance*

NSSF *Networking Slice Selection Function*

NSSI *Networking Slice Subnet Instance*

NAS *Non-Access Stratum*

NFV *Network Function Virtualization*

NIP *Network Infrastructure Provider*

NFV *Network Functions Virtualization*

NFVI *NFV Infrastructure*

NG *NovaGenesis*

NGAP *NG Application Protocol*

NGMN *Next Generation Mobile Networks*

NG-RAN *Next Generation RAN*

NR *New Radio*

NRF *Network Repository Function*

NS *Network Slicing*

NSMF *Network Slice Management Function*

NSSMF *Network Slice Subnet Management Function*

NTN *Non-Terrestrial Network*

eNWDAF *Evolved Network Data Analytics Function*

NWDAF *Network Data Analytics Function*

OAI *OpenAirInterface*

OAM *Network Operations, Administration and Maintenance*

O-RAN *Open RAN*

ONAP *Open Network Automation Platform*

O-RAN *Open RAN*

OSM *Open Source* Management and Orchestration *(MANO)*

OSS *Operations Support System*

PaaS *Platform as a Service*

PFCP *Packet Forwarding Control Protocol*

RAN *Radio Access Network*

RF *Radio Frequency*

RoF *Radio over Fiber*

SaaS *Software as a Service*

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

SBA *Service-based Architecture*

SCEF *Service Capability Exposure Function*

SDN *Software Defined Networking*

SDR *Software Defined Radio*

SLR *Service Level Requirement*

SMF *Session Management Function*

SMO *Service Management and Orchestration*

TNGF *Trusted Non-3GPP Gateway Function*

TCP *Transmission Control Protocol*

TN *Transport Network*

TNAP *Trusted Non-3GPP Access Point*

TNGF *Trusted Non-3GPP Gateway Function*

TWAP *Trusted WLAN Access Point*

TWIF *Trusted WLAN Interworking Function*

UDM *Unified Data Management*

UDR *Unified Data Repository*

UE *User Equipment*

UPF *User Plane Function*

UTRAN *UMTS Terrestrial Radio Access Network*

VLAN *Virtual Local Area Network*

VLC *Visible Light Communications*

VM *Virtual Machine*

VMs *Virtual Machines*

VNF *Virtual Network Function*

Wi-Fi *Wireless Fidelity*

XaaS *Everything as a Service*

Sumário

1 Introdução **1**
1.1 Objetivos Gerais . . . 1
1.2 Atividades Previstas . . . 1
1.2.1 Atividade 5.1 - Projeto do 6G . . . 1
1.2.2 Atividade 5.2 - Seleção de Componentes, Plataformas, Ferramentas e Especificação . . . 2
1.2.3 Atividade 5.3 - Integração de Componentes, Ferramentas, Plataformas e Novas Implementações . . . 2
1.3 Objetivos Específicos . . . 2
1.4 Conjunto de Ações . . . 3
1.5 Divisão de Responsabilidades . . . 4
1.6 Estrutura do Restante do Documento . . . 4

2 Ação 1 - Arquitetura do 6G **6**
2.1 Princípios de Desenho do 6G . . . 6
2.2 Escopos do 6G a Ser Realizado . . . 8
2.3 Decisões de Projeto . . . 14
2.3.1 Decisão 1: Arquitetura Evolucionária . . . 14
2.3.2 Decisão 2: Seguir os avanços do 3GPP . . . 14
2.3.3 Decisão 3: Incorporar avanços em *Open Source* . . . 14
2.3.4 Decisão 4: Plataforma comum . . . 15
2.3.5 Decisão 5: Integração do transceptor 6G GFDM do Inatel . . . 15
2.3.6 Decisão 6: Integração da rede satelital . . . 15
2.3.7 Decisão 7: Automação de tarefas . . . 15
2.3.8 Decisão 8: Simplicidade . . . 15
2.3.9 Decisão 9: Aproveitamento de trabalhos já realizados . . . 16
2.3.10 Decisão 10: Escolha de componentes . . . 16
2.3.11 Decisão 11: Integração de *data centers* . . . 16
2.3.12 Decisão 12: Suporte a múltiplas tecnologias de acesso . . . 16

3 Ação 2 - Núcleo do Proto 6G **17**
3.1 Cores 5G Open Source . . . 18
3.1.1 Free5GC . . . 18
3.1.2 Open5GS . . . 19
3.1.3 OAI - 5G Core Network . . . 19
3.2 Comparação Entre os Cores Funcional e Técnica . . . 20
3.2.1 Análise Funcional . . . 21
3.2.2 Análise Técnica . . . 21
3.3 Análise de Núcleos 5G Frente ao Estado da Arte . . . 22
3.3.1 Inteligência Artificial . . . 22
3.3.2 Fatiamento . . . 23
3.3.3 Suporte a Múltiplas Redes de Acesso . . . 24
3.4 Análise Experimental dos Núcleos 5G . . . 25
3.4.1 Cenários para Experimentação . . . 26
3.4.2 Testes . . . 26
3.5 Conclusão . . . 31

4 Ação 3 - Acesso do Proto 6G **33**
4.1 Levantamento dos caminhos possíveis para integração do acesso via transceptor 6G de longa distância . . . 34
4.1.1 Caminho 1: Tunelamento no Acesso 3GPP . . . 34
4.1.2 Caminho 2: Acesso Não-3GPP Não-confiável com UE no dispositivo . . . 35
4.1.3 Caminho 3: Acesso Não-3GPP Não-confiável com UE na BS . . . 36
4.2 Levantamento dos caminhos possíveis para integração do acesso via Wi-Fi . . . 37
4.2.1 Caminho 1: Acesso Não-3GPP Confiável . . . 37
4.2.2 Caminho 2: Acesso Não-3GPP Não-confiável . . . 38
4.2.3 Caminho 3: Acesso via AP Wi-Fi conectado ao UE transceptor 6G de longa distância . . . 39
4.3 Levantamento dos caminhos possíveis para integração do acesso IoT LPWAN . . . 39
4.3.1 Caminho 1: Acesso via IoTSDGw – variante do acesso Não-3GPP Não-confiável . . . 40
4.3.2 Caminho 2: Acesso via gateway IoT conectado ao UE transceptor 6G de longa distância . . . 41
4.4 Comparação e determinação de caminho preferencial . . . 41

5 Ação 4 - Plataforma da META 2 **43**
5.1 Levantamento de Caminhos para Integração com FIBRE RNP . . . 43
5.2 Levantamento de Caminhos para Integração com *Cloud Computing* . . . 45
5.2.1 Caminho 1: Cloud Universidade Federal de Goiás (UFG) . . . 45
5.3 Levantamento de Caminho Local *Standlone* para a Plataforma . . . 47
5.4 Levantamento de Possíveis Componentes Adicionais . . . 47
5.5 Levantamento de Características Desejáveis para Servidor Brasil 6G . . . 47
5.5.1 Especificação Final . . . 49
5.6 *Feedback* de Requisitos da META 5 para a META 2 . . . 55

6 Ação 5 - Suporte às Aplicações da META 6 **56**
6.1 Levantamento e descrição de Aplicações da META 6 . . . 56
6.2 Mapeamento de demandas das aplicações em relação ao núcleo da rede . . . 58
6.3 Detalhamento de possíveis caminhos ótimos para integração entre aplicações, rede de acesso e núcleo . . . 60

7 Ação 6 - Fatiamento Fim a Fim **64**
7.1 Levantamento de Possíveis Caminhos para Fatiamento Fim a Fim . . . 64
7.1.1 Caminho 1: . . . 66
7.1.2 Caminho 2: . . . 66
7.1.3 Caminho 3: . . . 66
7.1.4 Comparação e Determinação de Caminho Preferencial . . . 66
7.2 Relações Macro entre Núcleo, Transporte, Acesso e Aplicações . . . 66
7.3 Seleção de Componentes para o Fatiamento Fim a Fim: Laboratório . . . 68
7.4 Especificação Final das Interações com Demais Componentes do 6G . . . 69

8 Ação 7 - Rede Satelital **73**
8.1 Levantamento de Possíveis Caminhos para Integração da Rede Satelital . . . 73
8.1.1 Caminho 1: *Untrusted* N3A com Satélite em Backhaul e Transceptor 6G 73
8.1.2 Caminho 2: *Untrusted* N3A com Satélite em Fronthaul e Transceptor 6G 77

8.1.3 Comparação e Determinação de Caminho Preferencial 79

9 Ação 8 - Inteligência Artificial **80**
9.1 Estado da Arte 80
9.2 Levantamento de Possíveis Caminhos para Integração da AI 82
9.2.1 Caminho 1: Centralizado 83
9.2.2 Caminho 2: Distribuído 83
9.2.3 Caminho 3: Híbrido 84
9.2.4 Comparação e Determinação de Caminho Preferencial 85
9.3 Relações Macro entre Núcleo, Acesso e Aplicações 87

10 Ação 9 - Distributed Ledger Technologies **88**
10.1 Levantamento de Possíveis Caminhos para Integração de DLTs 88
10.1.1 Visão do 3GPP 88
10.1.2 DLTs (*Distributed Ledger Technologies*) 89
10.1.2.1 Blockchain 89
10.1.2.2 Smart contracts 90
10.1.2.3 IOTA 90
10.1.3 Núcleos de Rede *Open Sources* 91
10.1.3.1 Free5GC 91

11 Considerações Finais **92**
11.1 Considerações Finais por Ação Desenvolvida 92
11.2 Visão Consolidada do Proto 6G 95

1 Introdução

Novas tecnologias vão sendo sistematicamente integradas às comunicações móveis: Estado da arte em computação, tecnologias quânticas, sensoriamento ubíquo, novos materiais, coleta e otimização do uso de energia, inteligência artificial, programabilidade, softwarização, servitização, registro distribuído de informações, computação imutável, tokenização, superfícies inteligentes, redes 3D, computação na rede, redes centradas em informação, virtualização de funções de rede, gêmeos digitais e segurança.

Novos elementos potencializarão a infraestrutura física e cibernética do 6G, visando oferecer capacidades que estendam as gerações predecessoras (4G e 5G). Isso trará a habilitação de novos serviços de diferentes tipos. Tais elementos compõem as funcionalidades do *core* do 6G que, além de cobrir os aspectos tradicionais (e.g. mobilidade, configuração de terminais, segurança, comutação, roteamento, gerência de tráfego e QoS, etc.), passam a incorporar novas soluções para potencializar casos de uso (*top-down*) e tecnologias catalizadoras (*bottom-up*).

1.1 Objetivos Gerais

O objetivo é projetar soluções técnicas (habilitadores tecnológicos) integradas a partir do estado da arte de 5G/6G, incluindo alguns novos desenvolvimentos quando possível e necessário. Ao final das atividades, espera-se experimentar com elementos do núcleo, acesso e aplicações que façam sentido para uma arquitetura orientada ao 6G, testando-os e avaliando-os. O trabalho visa tirar proveito da flexibilidade inerente dos componentes softwarizados, aproveitando dos habilitadores orientados a serviços. Espera-se avaliar a interoperabilidade mínima com as redes de acesso e de transporte. Vale ressaltar que não teremos uma arquitetura completa de 6G, mas sim orientada ao 6G. Adicionalmente, poderão ser desenvolvidos componentes que permitam a integração dos elementos selecionados para experimentação, caso se mostre necessário.

1.2 Atividades Previstas

A META 5 se divide nas 3 atividades comentadas a seguir. Esse relatório cobre as Atividades 5.1 e 5.2 em sua totalidade. Entretanto, cobre apenas os levantamentos iniciais relativos a Atividade 5.3, que são detalhados no contexto das Atividades 5.1 e 5.2. Ou seja, o relatório final da Atividade 5.3 será entregue em dezembro de 2023.

1.2.1 Atividade 5.1 - Projeto do 6G

Visa refinar o projeto do 6G que desejamos demonstrar. O entregável da Atividade 5.1 é esse relatório técnico. Mais especificamente, a Atividade 5.1 prevê:

- 5.1.A — Determinar um conjunto de princípios de desenho, o escopo do projeto a ser realizado e como as decisões de projeto serão efetivadas;
- 5.1.B — Realizar um desenho de arquitetura orientada para o 6G (evolucionária) a partir do que existe hoje no 5G e *beyond 5G*, com foco no núcleo, camada de rede e superiores;
- 5.1.C — Integrar minimamente a solução de núcleo com as de acesso e transporte que sejam consideradas neste projeto;
- 5.1.D — Desenhar interações entre componentes nos vários escopos de acordo com as decisões de projeto adotadas.

1.2.2 Atividade 5.2 - Seleção de Componentes, Plataformas, Ferramentas e Especificação

Visa definir como será o 6G em termos dos componentes a serem implantados, suas interações, componentes adicionais, etc. Os resultados também farão parte desse relatório. A Atividade 5.2 visa:

- 5.2.A — Selecionar os componentes do núcleo que farão parte dessa meta dentro do escopo de experimentação com componentes 5G e *beyond* 5G, especificando como componentes existentes globalmente de *software* aberto serão integrados, suas interações funcionais, interfaces necessárias, etc.;
- 5.2.B — Especificar eventuais novos componentes a serem integrados e suas implementações;
- 5.2.C — Selecionar plataformas e ferramentas necessárias para testes unitários, testes integrados de componentes e testes básicos de determinadas funcionalidades;
- 5.2.D — Especificar como se darão as interações com os componentes fora do núcleo e que estejam dentro do escopo desse projeto como um todo;
- 5.2.E — Especificar como se dará o uso de plataformas e ferramentas.

1.2.3 Atividade 5.3 - Integração de Componentes, Ferramentas, Plataformas e Novas Implementações

Essa atividade visa integrar os componentes do 6G em laboratório. Nesse relatório, apenas uma parte inicial da Atividade 5.3 será reportada. A maior parte dessa atividade será realizada em 2023. Essa atividade se embasa na plataforma alvo da META 2. Ela visa também realizar testes e demonstrações. A Atividade 5.3 cobre:

- 5.3.A - Integrar e configurar os componentes, ferramentas e plataformas conforme selecionado na Atividade 5.2;
- 5.3.B - Implementar novos componentes especificados (se houverem).

Vale observar que o relatório final da Atividade 5.3 será entregue em dezembro de 2023.

1.3 Objetivos Específicos

No inicio dos trabalhos, foram feitas três reuniões de alinhamento e equalização, das quais refinamos os seguintes objetivos específicos para a META 5:

- Trazer componentes inovadores para o núcleo do 6G;
- Mostrar a integração de diversos acessos;
- Integrar o transceptor MIMO-GFDM e seus componentes de *software*;
- Integrar *Open Radio Access Network* Open RAN com outros componentes;
- Identificar e resolver problemas do 5G;

- Suportar diversas aplicações inovadoras de 6G;
- Desenvolver componentes adicionais, se necessário;
- Configurar e prover fatiamento de recursos;
- Integração de redes e componentes com satélite;
- Prover suporte à Inteligência Artificial (IA).

1.4 Conjunto de Ações

A partir desses objetivos específicos, um conjunto de ações foi criado para cumprir as atividades da META 5 da FASE 2 do Projeto Brasil 6G. A Figura 1 ilustra como cada ação contribui nas Atividades da META 5. As Atividades 5.1 e 5.2 dependem somente das Ações 1 até 9. Já as Ações 10 e 11 são parte da Atividade 5.3, cujo escopo e prazo de entrega estão fora desse relatório (serão entregues em 2023). A seguir detalhamos todas as ações da META 5:

- **Ação 1** - Arquitetura do 6G e Problemáticas do 5G: cuida dos aspectos macro do 6G;
- **Ação 2** - Núcleo do 6G: cuida do núcleo e possibilidades de integração, componentes, interfaces, relação com RAN, etc.;
- **Ação 3** - Acesso do 6G: cuida da rede de acesso e possibilidades de integração, componentes, interfaces, relação com núcleo, etc. Cobre RAN, *Open RAN* e transceptor MIMO-GFDM;
- **Ação 4** - Plataforma da META 2: cuida do relacionamento com a META 2. A plataforma do 6G é definida na META 2, mas os requisitos da META 5 são *inputs* importantes;
- **Ação 5** - Aplicações da META 6: cuida do relacionamento com a META 6. Os casos de uso são definidos na META 6, mas a META 5 deve suportá-los;
- **Ação 6** - Fatiamento fim-a-fim: cuida do fatiamento de recursos no 6G;
- **Ação 7** - Rede satelital: cuida do relacionamento com a rede satelital e sua integração com as outras redes e serviços;
- **Ação 8** - Inteligência Artificial: cuida da relação do núcleo, acesso e demais redes e serviços com IA;
- **Ação 9** - *Distributed Ledger Technologies* (DLT): cuida da relação dos componentes com *Blockchain*, IOTA, etc.;
- **Ação 10** - Integração completa em laboratório: cuida da integração final dos componentes em um ou mais *setups* de experimentação;
- **Ação 11** - Testes Unitários, Integrados e Demonstrações: cuida dos cenários de experimentação/testes e demostrações.

Ação	Nome	5.1.A	5.1.B	5.1.C	5.1.D	5.2.A	5.2.B	5.2.C	5.2.D	5.2.E	5.3.A	5.3.B
1	Arquitetura do 6G e Problemáticas do 5G	x	x	x	x	x			x			
2	Núcleo do 6G			x	x	x	x	x	x		x	
3	Acesso do 6G			x	x	x	x	x	x		x	
4	Plataforma da META 2				x	x	x	x		x	x	
5	Aplicações da META 6				x		x				x	
6	Fatiamento fim a fim			x	x	x	x	x	x		x	
7	Rede Satelital			x	x	x	x	x	x		x	
8	Inteligência Artificial			x	x	x	x	x	x		x	
9	Distributed Ledger			x	x	x	x	x	x		x	
10	Integração Completa em Laboratório										x	x
11	Testes Unitários e Integrados											x

Figura 1: Divisão para realização das atividades da META 5 através das Ações 1 a 11.

1.5 Divisão de Responsabilidades

A seguinte divisão de responsabilidades foi democraticamente acordada para efetivar os trabalhos no contexto desse relatório:

- Alex Vidigal Bastos (UFSJ) - Responsável pela Ação 9;
- Antonio Marcos Alberti (Inatel) - Responsável pela META 5 e Ações 1, 4, 7, 10 e 11;
- Cristiano Bonatto Both (Unisinos) - Responsável pela Ação 6;
- Diego Gabriel Soares Pivoto (Inatel) - Responsável pela Ação 5;
- Flávio de Oliveira Silva (UFU) - Responsável pelas Ações 2 e 8;
- Kleber Cardoso (UFG) - Responsável pela Ação 3.

1.6 Estrutura do Restante do Documento

A Seção 2 descreve as atividades da Ação 1. Ela 2 trata da arquitetura do 6G em relação aos princípios de projeto para o 6G desenvolvidos conforme a Atividade 3.2 da Fase 1 do projeto Brasil 6G e, também, várias decisões de projeto tomadas ao longo do ano de 2022. Apresenta uma consolidação final de toda a arquitetura de 6G do projeto. Os detalhes serão apresentados ao longo das demais seções do relatório. Na Seção 3 são descritos os estudos e as atividades da Ação 2 que abordam o núcleo e um protótipo de arquitetura para 6G; nessa Seção 3 são destacadas as buscas em relação ao estado da arte, e a seleção dos núcleos de 5G a serem explorados em *beyond* 5G e 6G. Várias análises são realizadas para determinar a melhor opção de núcleo para o projeto. A Seção 4 aborda a Ação 3 em relação à rede de acesso para o protótipo da arquitetura do 6G; essa Seção 4 procurou aprofundar a discussão sobre o suporte a múltiplas redes com a integração de diversas tecnologias de acesso 5G e os avanços necessários rumo ao 6G. A Seção 5 deste documento descreve as atividades da Ação 4 sobre os possíveis caminhos para a plataforma do Projeto Brasil 6G visando suporte ao núcleo, acesso e aplicações, ou seja, ao protótipo da arquitetura 6G como um todo. A Seção 5 cobre o suporte a META 2. Na Seção 6 são relatados os trabalhos da Ação 5 no suporte de aplicações da META 6 em relação aos caminhos para integração, as concordâncias macro entre núcleo, rede de acesso e aplicações. A Seção 6 discute o suporte do *core* e acesso às aplicações que serão

utilizadas para demonstrar o projeto. A descrição e os trabalhos executados em fatiamento fim-a-fim de recursos físicos e cibernéticos são apresentados na Seção 7. A Seção 8 descreve o levantamento de possíveis caminhos para integração da rede satelital com a rede de acesso, com o núcleo e demais serviços do 6G. Na Seção 9 objetiva-se traçar os possíveis caminhos para integração de IA com os componentes da rede 6G (acesso, núcleo, aplicações). A Seção 10 tem como finalidade avaliar os possíveis caminhos que nortearão a utilização das DLTs em uma arquitetura de 6G. Por fim, a Seção 11 relata as considerações de cada ação da META 5 e conclui o documento.

2 Ação 1 - Arquitetura do 6G

Nessa ação, exploramos atividades macro relativas ao 6G. Iniciamos com uma releitura dos princípios de projeto do 6G, seguida de um discussão sobre os escopos do 6G a ser realizado, incluindo uma revisão da arquitetura evolucionária de 6G proposta no ano passado. Por fim, apresentamos as principais decisões de projeto tomadas esse ano com relação a continuação das atividades de melhoria do 5G na direção do 6G.

2.1 Princípios de Desenho do 6G

Nesta seção, revisitamos os princípios de projeto para o 6G desenvolvidos conforme a Atividade 3.2 da Fase 1 do projeto Brasil 6G. O nível de adesão a cada princípio depende da compatibilidade retroativa com a geração atual de redes móveis. Novamente, a definição e a inspiração destes princípios levou em conta outras experiências do grupo envolvido no que diz respeito a arquiteturas de rede. Cabe destacar o projeto NovaGenesis [1], o qual é uma alternativa à Internet baseada da pilha *Transmission Control Protocol* (TCP)/*Internet Protocol* (IP). E ainda salientar a *Entity Title Architecture (ETArch)* [2], que é uma arquitetura disruptiva em relação à pilha TCP/IP, baseada na premissa de que a rede deve ser capaz de suportar e se adaptar aos diferentes requisitos de comunicação das entidades, ou seja, os seres envolvidos. A seguir, são apresentados os onze (11) princípios tal qual definidos e ajustados para a Fase 2 do *Brasil 6G*:

- ***Princípio 1: Integrar Habilitadores de Forma Coesa, Desacoplada e Sinérgica*** – todos os habilitadores da arquitetura devem operar de forma sinérgica e integrada entre si. Os habilitadores não devem incluir funções de rede existentes em outros habilitadores e devem definir interfaces desacopladas e sem duplicação de funcionalidades;

- ***Princípio 2: Virtualizar Sempre que Possível*** – objetiva virtualizar tudo o que pode ser virtualizado com bom desempenho. Além disso, todos os recursos de infraestrutura física do 6G podem (e dentro do possível, devem) ser representados por elementos virtuais;

- ***Princípio 3: Flexibilizar a Interface com os Recursos de Infraestrutura*** – recursos de infraestrutura (tanto físicos, quanto virtuais) devem ser controlados por serviços da arquitetura. Isso se justifica dadas as escalas no número de dispositivos e a necessidade de estabelecer uma forma de configurá-los através de funções de rede. Toda a infraestrutura física deve ser programável;

- ***Princípio 4: Gerir Componentes e Recursos de Rede de Maneira Autônoma*** – a auto-organização é exigência de uma arquitetura 6G, devido às suas escalas, complexidade e requisitos de desempenho. As interferências humanas devem ser minimizadas. Além disso, a operação e a gerência devem ser baseadas nas intenções dos responsáveis humanos. Informações provenientes do mundo físico devem ser utilizadas para tomar decisões aprimoradas. O mundo físico deve ser auto-organizado através de gêmeos digitais que os representam no ambiente de serviços;

- ***Princípio 5: Utilizar uma Abstração de Serviços para Integrações e Configurações*** – todo o processamento de informações da arquitetura deve ser definido como um serviço. Por esse motivo, implementações de funções de rede voltadas para comunicação,

armazenamento de dados e até troca de conteúdos devem ser realizados através de serviços. O ciclo de vida dos microsserviços deve ser contemplado como uma funcionalidade arquitetural. Isso inclui a composição dinâmica de serviços;

- ***Princípio 6: Priorizar uma Solução Sustentável*** – projetar para economizar energia. O planejamento, a implantação e a operação da infraestrutura devem ter como um dos objetivos principais o uso eficiente da energia. A adoção de fontes limpas e renováveis deve ser incentivada. Sempre que possível, técnicas de coleta de energia do meio devem ser adotadas;

- ***Princípio 7: Oferecer Segurança Intrínseca*** – a segurança, a privacidade e a confiança são preceitos de qualquer sistema da atualidade. Esse princípio defende que sempre devemos projetar considerando os requisitos de segurança, desde o início do projeto de 6G. Acredita-se que a aplicação de técnicas de imutabilidade da informação e computação, sobretudo com o advento das DLTs, seja fundamental para validação de contratos digitais e garantia de consistência de transações;

- ***Princípio 8: Garantir Ciência sobre o Estado da Rede e dos Sistemas Interconectados*** – a semântica de contexto pode ser extrapolada para qualquer contexto da arquitetura, tais como: redes, funções físicas, funções virtuais, contratos, ambientes, recursos, entidades, etc. Diversas ciências de contextos devem ser implementadas: ciência do ambiente (*situation awareness*), ciência de si próprio (*self awareness*), ciência da rede de comunicação (*network awareness*), ciência dos serviços (*service awareness*), dispositivos sociais, etc. As ciências de contextos devem alimentar os procedimentos de tomada de decisão, auxiliando na gestão e ainda contribuindo para que a rede seja resiliente e capaz de manter uma qualidade aceitável do sistema face a problemas ou falhas na rede;

- ***Princípio 9: Favorecer a Inovação e a Criação de Novos Modelos de Negócio*** – utilizando interfaces abertas entre diversos componentes, sejam eles de hardware ou software, permitir que diferentes interessados possam inovar dentro da arquitetura e monetizar sobre recursos e funcionalidades. Isso poderá viabilizar a criação de novos mercados envolvendo, por exemplo, recursos físicos, coisas conectadas, dados, funções de rede e serviços, entre outros. A rede se comportará como um ecossistema onde diferentes interessados, de diferentes áreas, poderão de forma cooperativa inovar e ampliar as potencialidades e a escala da rede tanto em termos de serviços, como de usuários;

- ***Princípio 10: Ter a Capacidade de Satisfazer os Diferentes Requisitos das Aplicações Atuais e Futuras*** – a rede deve ser capaz de atender aos diferentes requisitos definidos pelas aplicações, sejam em termos de latência, vazão, qualidade de serviço e experiência, como também em aspectos como segurança da comunicação. Esse suporte deve se dar de maneira fim-a-fim, ou seja, independente da infraestrutura subjacente, de maneira transparente para os sistemas finais e a qualidade e confiabilidade esperada em todos os segmentos da rede. Por outro lado, a rede deverá oferecer um substrato comum capaz de acomodar novas necessidades, considerando as novas realidades físicas e virtuais, como o metaverso, por exemplo.

- ***Princípio 11: Focar em simplicidade e levar em conta a escalabilidade*** – todas as soluções e decisões de projeto devem ter o foco na simplicidade. A simplicidade busca facilitar o gerenciamento da rede, a busca de soluções menos sujeitas a possíveis falhas

ou erros e que, no geral, possam contribuir para maximizar a eficiência da rede. A busca da simplicidade também deve levar em conta a escalabilidade da rede, utilizando estratégias como hierarquia e estratificação da rede que permitam a distribuição de cargas em diferentes partições e o seu crescimento de acordo com as demandas de tráfego ou de expansão.

2.2 Escopos do 6G a Ser Realizado

Esta seção revisita a arquitetura da rede 6G desenvolvida na fase 1 desse projeto. Esta abordagem considera a especificação da arquitetura 6G no âmbito do 3GPP levando em conta a compatibilidade com o 5G e os próximos *Releases* do 5G já previstos como o *Release-18* e *Release 19* [3], bem como considera outros estudos em andamento de rede futura além do 5G [4]. Esse desenho foi incluído originalmente no relatório da Atividade 3.2 da Fase 1 do Projeto *Brasil 6G*, e novamente abordado no inicio da Fase 2 para aprimoramento e consenso.

A proposta de Arquitetura 6G Evolucionária leva em conta uma extensa avaliação da literatura disponível no que diz respeito ao estado da arte nesta área, e que foi apresentada no Relatório 2.3 [5] produzido pelo projeto *Brasil 6G*. Além disso, a arquitetura leva em conta as famílias de casos de uso apresentadas e discutidas na Fase 1 do projeto, juntamente com cada um de seus requisitos também detalhados anteriormente. O processo para definição da arquitetura considerou ainda os habilitadores tecnológicos selecionados e os princípios de projeto para a arquitetura 6G apresentados na Subseção 2.1.

Nem todos os habilitadores explorados na Fase 1 do projeto *Brasil 6G* foram selecionados. Do conjunto de habilitadores disponíveis nesta seleção, a escolha levou em conta os fundamentos de Comunicação, Softwarização e Inteligência que foram aqueles mais aderentes aos diferentes escopos de projeto, conforme mostra a Tabela 1 também proveniente dos trabalhos anteriores.

Tabela 1: Sumário dos escopos relacionados a arquitetura 6G.

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

Uma outra premissa essencial para o desenvolvimento desta arquitetura 6G é o princípio de que os serviços envolvidos devem ser prestados na forma fim-a-fim, envolvendo pelo menos duas partes (entidades comunicantes) localizadas em pontos distintos da arquitetura. Isto remete a necessidade de considerarmos detalhes da infraestrutura da rede física, ou seja, como ela é

formada fisicamente no cenário atual e como será no futuro, e junto inclui a necessidade de considerarmos os atores envolvidos nesta infraestrutura.

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

- Provedor de Infraestrutura de Rede (*Network Infrastructure Provider* (NIP) - Aquele que possui o controle e a gestão de uma infraestrutura física que pode ser utilizada por outros atores. O NIP pode também oferecer uma infraestrutura virtualizada sobre a sua infraestrutura física.

- Provedor de Serviço de Comunicação (*Communication Service Provider* (CSP) - Utiliza a infraestrutura de um ou mais NIP para oferecer serviços de comunicação. Do ponto de vista administrativo, um CSP pode possuir uma ou mais infraestruturas de rede. Neste caso, um CSP pode oferecer um serviço fim-a-fim utilizando parte de sua infraestrutura própria, ou seja, um NIP sob a mesma administração, bem como utilizar infraestrutura de diferentes NIP para oferecer um *slice* fim-a-fim.

Além disso, a arquitetura da rede evoluirá do padrão atual, onde cada um dos CSP opera em um único domínio administrativo, para um cenário onde será necessário suportar a administração do mesmo serviço por diversos domínios administrativos. Isto permitirá o provimento destes novos serviços de modo fim-a-fim. Assim, evoluindo as possibilidades de negociação, configuração, controle e gerenciamento de serviços da forma que se conhece.

Caminha-se também para uma alta heterogeneidade e pluralidade de infraestruturas de rede, computação e armazenamento com diferentes características. Com isto, novos atores poderão surgir com papéis específicos e diferenciados dentro do escopo de serviços, de provimento de conectividade, e de provimento de infraestrutura de rede, computação e armazenamento. Dessa forma, para a arquitetura de rede 6G, devemos incluir a análise dos habilitadores, seus impactos e desdobramentos; e dos princípios de projeto apresentados anteriormente. Além disso, considerações de provimento dos serviços fim-a-fim dentro das novas infraestruturas convergentes físicas com:

- Rede estratificada em camadas atendendo ao princípio de projeto de escalabilidade.

- Rede orientada para serviços atendendo ao princípio de projeto de criação de novos modelos de negócio.

- Alta heterogeneidade de redes e com múltiplos domínios, e rede distribuída, com complexidade muito mais alta comparada ao que existe atualmente [4].

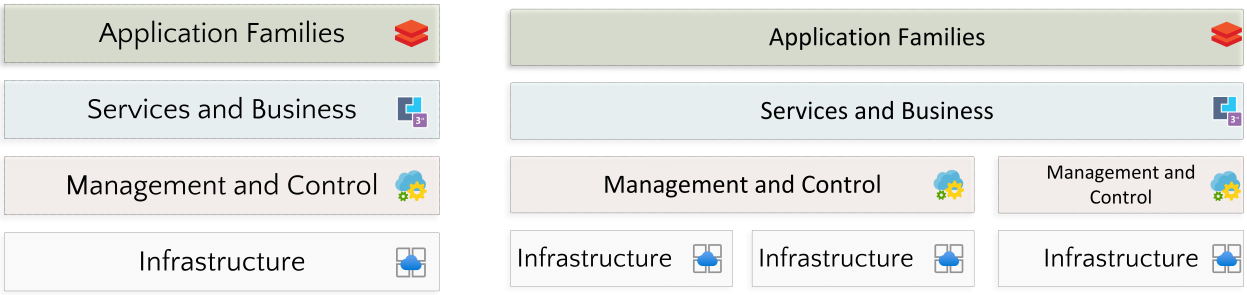
- *Data centers* locais, regionais e de grande escala. Computação centralizada e distribuída para RAN.

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

Levando em conta o Princípio P11 de projeto, que trata de hierarquia e simplicidade da arquitetura, o uso de diferentes camadas a fim de segregar seus componentes em conjuntos relacionados de funções com oferecimento de funções para outras camadas é adotado. Isso cria baixo acoplamento e alta coesão dos componentes. Com isto, novas camadas são propostas para a arquitetura 6G evolucionária. São elas:

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

A Figura 2 apresenta as camadas da Arquitetura Evolucionária para dois cenários. A Figura 2a mostra as camadas da arquitetura para um único provedor de rede, assim com um único domínio de gerenciamento e controle administrativo, com sua própria infraestrutura de TIC. A camada de Serviços e Negócios provê suporte para as Família de Aplicações dentro do seu próprio domínio. Neste cenário, o CSP oferece o serviço utilizando um único NIP, sendo que ambos estão sob o mesmo domínio administrativo.



(a) Um único domínio.

(b) Diferentes Domínios.

Figura 2: Visões das Camadas da Arquitetura Evolucionária.

A Figura 2b mostra um cenário com as mesmas camadas anteriores mas contendo dois provedores serviços de comunicação (CSP) com administração e controle distintos. A parte esquerda contém duas infraestruturas sendo administradas por uma mesma camada de controle. Isso significa que esse CSP contrata infraestrutura de dois provedores de infraestrutura (NIP) distintos. Alternativamente, o outro provedor possui sua própria infraestrutura. Desta forma, este cenário inclui múltiplos domínios com heterogeneidade e pluralidade de infraestruturas provendo suporte para a camada de Família de Aplicações, com a camada de Serviços e Negócios desempenhando papel intermediário de forma agnóstica aos Provedores neste suporte.

A camada de Famílias de Aplicações considera os casos de uso resumidos em famílias conforme desenvolvido nos relatórios da Fase 1 deste projeto e é apresentada na Figura 3. Basicamente, esta camada indica os serviços característicos do 6G que serão disponibilizados com o suporte das camadas inferiores.

A camada de Serviços e Negócios, apresentada na Figura 4, realiza a intermediação e gerenciamento dos serviços. Relacionando esta camada com a Figura 2a nota-se que a intermediação do serviço de conectividade pode estar sob controle dentro de um único domínio administrativo, ou, conforme Figura 2b sob mais domínios administrativos. Portanto, o aspecto evolucionário

Figura 3: Famílias de Aplicações para o 6G.

proposto refere-se à camada de Serviços e Negócios realizar a intermediação dos serviços dentro de dois domínios administrativos distintos.

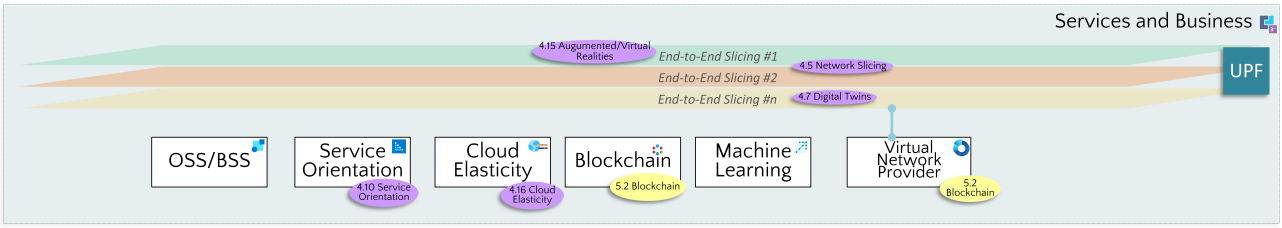


Figura 4: Camada de Serviços e Negócios.

A camada de Serviços e Negócios da Figura 4 apresenta a configuração dos *Network Slicing* que desempenham um papel crucial e básico para a realização do 6G. Ela considera a premissa de estas novas infraestruturas suportarem diferentes serviços, com requisitos diversos, sobre uma mesma infraestrutura de TIC comum. Esse suporte é mandatório na evolução das redes móveis para o 6G, especificamente para a multiplexação de redes lógicas virtualizadas, cada uma provendo serviços *over the top* para uma camada de serviços dentro de uma arquitetura voltada para serviços [6].

Para o 5G, a implementação do *Network Slicing* está sendo desafiador, mesmo considerando um único domínio de rede, dada a diversidade e heterogeneidade das tecnologias das infraestruturas físicas, especificamente no acesso (RAN), distribuição ou agregação, e de núcleo, possuindo requisitos técnicos distintos dentro do conceito de *Network Slicing*. A camada de acesso RAN possui requisitos de latência da ordem de microssegundos, bem menor que as latências das camadas de agregação e de núcleo, e além disso a RAN possui recursos restritos de comunicação em interface aérea, de forma que é desafiador o aspecto de alocação de recursos para cada um dos *Slices*, de acordo com os SLAs contratados, estando ainda em fase de maturidade na definições de procedimentos e padronizações.

A funcionalidade de *Network Slicing* tem dependência da rede 5G, como apresentado na Figura 4, com o elemento *User Plane Function* (UPF) sendo um dos extremos da comunicação fim-a-fim do serviço provido pelos diferentes *Slices*. No 6G, esta dependência poderá ser mantida, mas já com maturidade em relação aos procedimentos que envolvem o seu ciclo de vida e comportamento dinâmico, e há a possibilidade de haver uma padronização na rede para que esta funcionalidade possa ser configurada fora dos domínios da tecnologia 6G. Outro desafio no 6G, ainda necessário de ser endereçado, é a sua configuração multidomínio, indo além dos desafios do 5G encontrados atualmente, dentro ainda de um domínio de rede único.

A Figura 4 apresenta alguns dos habilitadores que serão responsáveis pelos serviços oferecidos por esta camada. Estes habilitadores englobam *Network Slicing*, *Digital Twins*, *Service Orientation*, *Augmented/Virtual Realities*, *Cloud Elasticity* e *Blockchain*. Estes habilitadores são oferecidos como serviços para a camada superior, a fim de suportar as famílias de aplicações indicadas na Figura 3. Nesta camada também existem os sistemas de suporte à operação (*Operations Support System* (OSS)) e ao negócio (*Business Support System* (BSS)).

A camada de Gerenciamento e Controle é mostrada na Figura 5 para o cenário com 2 provedores de rede. Como mencionado anteriormente, cada provedor gerencia e controla a sua rede, através de suas plataformas de gerência, incluindo o BSS e OSS, e suas plataformas de Orquestração. Esta camada possui habilitadores ligados aos fundamentos de comunicação, softwarização, imutabilidade e inteligência. Inclui ainda a *Elastic-RAN*. Já os fundamentos da softwarização englobam: *Software Defined Networking*; *Network Function Virtualisation*; *Multi-access Edge Computing*; *Open RAN Service Orientation*; *Cloud Elasticity*. Para o 6G o fundamento de softwarização da rede será ainda mais intenso e responsável por suportar os *slices* fim-a-fim envolvendo diferentes domínios administrativos.

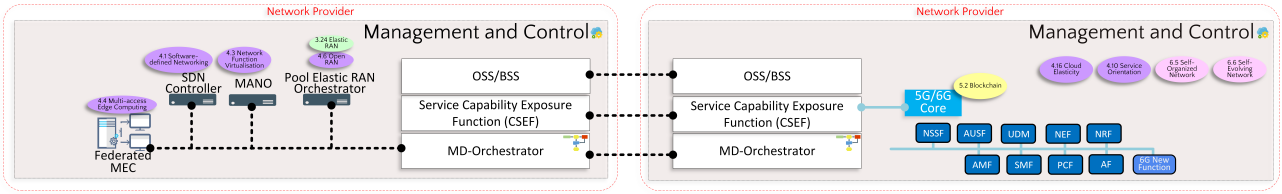


Figura 5: Camada de Gestão e Controle.

Para a imutabilidade o habilitador relevante é a *Blockchain*. Este habilitador é visto como um componente utilizado para a gestão e controle da rede, enquanto na camada de Serviços e Negócios este habilitador é fornecido como um serviço para as aplicações. Em relação ao fundamento de inteligência, a camada compreende serviços para viabilizar *Self-Organizing Network* e *Self-Evolving Network*. Neste caso, o habilitador de *Machine Learning* é utilizado internamente na própria rede. Da mesma forma, na camada de Serviços e Negócios, este habilitador é fornecido como serviço para as famílias de aplicações.

Os conceitos OSS e BSS são os pontos determinantes das operações de telecomunicações e permitem que as Operadoras ofereçam serviços de forma eficiente para seus assinantes. O OSS descreve sistemas de processamento de informação das operadoras para gerenciar a operação de suas redes de comunicação. Já o BSS é o termo utilizado para descrever uma funcionalidade voltada para o cliente no plano de serviços e negócios. Essas plataformas permitem que uma Operadora coordene recursos de infraestrutura, serviços, clientes, negócios e processos [7].

A função denominada por *Service Capability Exposure Function* (SCEF) definida na *Release* 13 do 3GPP [8] foi criada com objetivo de expor de forma segura as informações dos serviços e capacidades/recursos da rede 4G, 5G e agora se estendendo para o 6G, além dos limites de um domínio, com definição de protocolo e interface de comunicação. Sem isto, não haveria meios de entidades fora de um determinado domínio conhecer estas informações.

Na Figura 5, para o cenário com 2 provedores de infraestrutura, a camada de Serviços e Negócios faz a intermediação e gerenciamento dos serviços, simultaneamente com estes dois domínios. Isto é possível com uma rede distribuída e Federalizada, onde neste último, as plataformas OSS/BSS e de Orquestração comunicam-se através de um protocolo e interface de comunicação. E uma exposição dos serviços comercializados da infraestrutura é implementada através da função SCEF.

Considerando os serviços fim-a-fim dentro do 6G, há a necessidade de comunicação coordenada multidomínio, nos planos de orquestração, operação, e negócios, para resultar na configuração do *Slicing* de rede fim-a-fim com o SLA conforme negociado e contratado. O modelo de rede Federalizada é importante neste caso, para a orquestração dos potenciais recursos distribuídos em redes multidomínio para o atendimento de serviços-fim-a fim [9][10]. A

inclusão deste modelo de infraestrutura Federalizada atende ao princípio de simplicidade no projeto, introduzindo a criação de um conjunto de interfaces ou protocolos padrão únicos.

A Figura 6 apresenta a arquitetura completa. Com as redes orientadas à *software* (*Software Defined Networking* (SDN)) e com computação em nuvem, os recursos de infraestrutura irão migrar para o provimento de serviços e aplicações, com diferentes atores possuindo multiplicidade de infraestruturas e recursos de rede, armazenamento e computação. Além da multiplicidade de domínios anteriormente apresentada, espera-se uma alta heterogeneidade e pluralidade de ofertas de infraestruturas de redes com diferentes características. Também é incluída na arquitetura a proposta das redes distribuídas, que possibilitam o atendimento ao princípio de projeto de redes autônomas. Isto tudo traz uma alta complexidade para a nova rede 6G no atendimento do serviço fim-a-fim. Também é esperado o surgimento de novos atores nesta camada: Provedor não Terrestres; Provedor de Nuvem; Provedor de infraestruturas especializadas.

Os habilitadores relevantes para a camada de infraestrutura envolve os fundamentos de sensoriamento e atuação, comunicação e softwarização. Os fundamentos de sensoriamento e atuação levam em conta o suporte ao *IoT-based Sensing*. Esta camada acomodará diversos novos habilitadores para suportar os novos tipos de comunicação sendo importante destacar: *Unmanned Aerial Vehicle*; *THz Communications*; *Visible Light Communications*; *Optical Wireless Communications*; *Disruptive Waveforms*; Redes 3D e *Elastic-RAN*.

Em relação ao fundamento de softwarização, esta camada conterá os seguintes habilitadores: *Open RAN*; *Network Caching*; *Augmented/Virtual Realities* e *Cloud Elasticity*. As grandes operadoras terrestres regionais e nacionais possivelmente manterão a sua infraestrutura estratificadas nas camadas de acesso (atendendo a uma localidade), de agregação (atendendo a uma região), e de núcleo (atendendo a comunicação de longa distância e conexão com outras operadoras). Neste cenário também poderão coexistir as operadoras de rede *Space-Air-Terrestrial-Sea Integrated Networks* (SATSI) que fornecerão outros tipos de infraestrutura de comunicação tanto para acesso, quanto também para a integração de diferentes provedores de rede, seja no plano de dados ou de controle. Na parte da RAN, com a rede desagregada e a arquitetura *Open RAN* (O-RAN), podemos ter diferentes atores atuando no *Fronthaul*, *Midhaul*, e *Backhaul*. Também podemos ter atores provendo redes especializadas *Visible Light Communications* (VLC), ou poderemos ter provedores para acesso a redes 3D ou redes *Cell Free*. É provável que as redes 6G com as suas interfaces RAN se posicionem na camada de acesso e agregação, a menos de cenários específicos onde ela vai desempenhar o papel no núcleo da rede.

Um aspecto relevante é que os fundamentos de segurança e inteligência estão presentes em todas as camadas de forma ortogonal e portanto são representados como dois barramentos na lateral da Figura 6. No caso do fundamento de inteligência, os habilitadores envolvem Inteligência Artificial e *Machine Learning*. Para o fundamento de segurança, os habilitadores compreendem tecnologias de privacidade, confiança/Reputação e identificação. Isso em adendo às tecnologias atuais de segurança. Ao acomodar esses habilitadores, espera-se um impacto na arquitetura das redes móveis atuais, exigindo que as futuras versões sejam projetadas sob essa perspectiva, considerando os habilitadores tecnológicos e seus impactos evolucionários desde sua concepção.

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

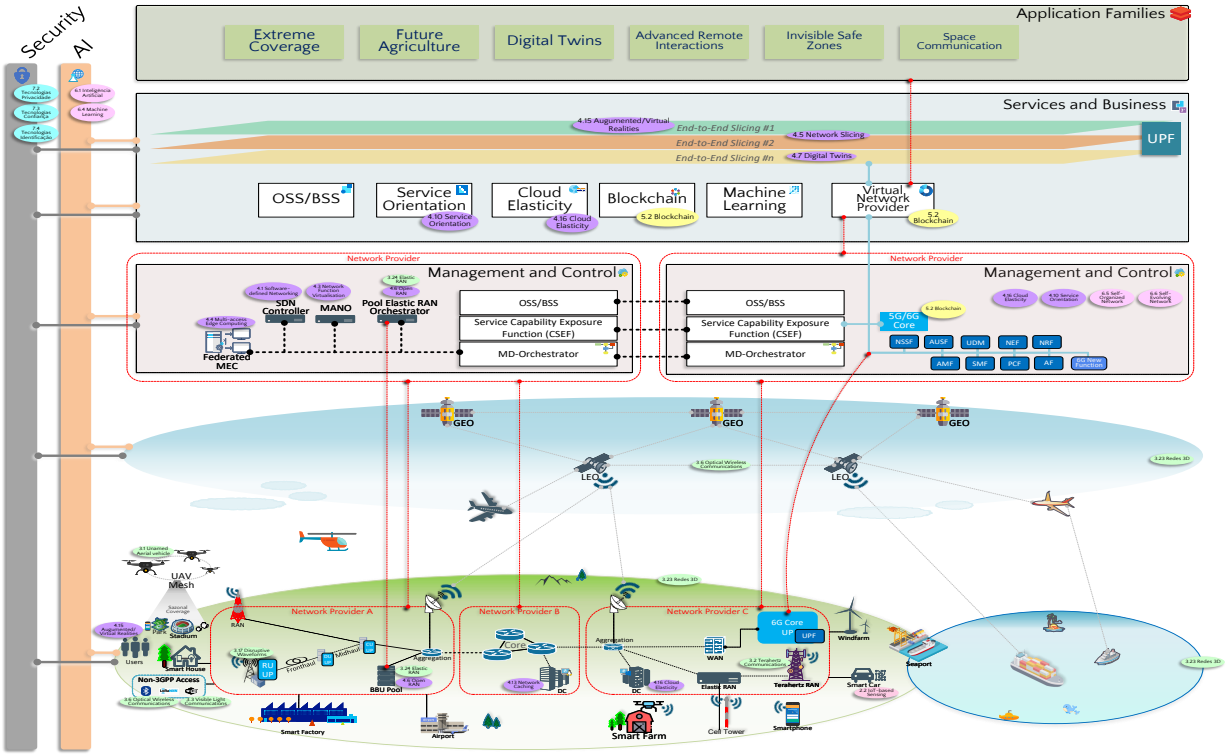


Figura 6: Visão Geral da Arquitetura Evolucionária.

2.3 Decisões de Projeto

A seguir, apresentamos algumas decisões tomadas para o projeto da arquitetura Proto 6G (como estamos chamando nossa arquitetura *beyond* 5G com ingredientes de 6G) que iremos configurar e demonstrar na prática nessa Fase 2 do Projeto Brasil 6G.

2.3.1 Decisão 1: Arquitetura Evolucionária

Foi consenso no grupo da META 5 que deveríamos projetar o 6G de forma evolucionária, ou seja, seguindo a linha natural de evolução do que já existe no 5G do 3GPP. Para isso, muitos trabalhos de revisão a partir dos avanços do 3GPP e da literatura publicada foram feitos.

2.3.2 Decisão 2: Seguir os avanços do 3GPP

Após inúmeras reuniões, ficou claro que deveríamos considerar em nossa proposta os avanços da padronização do 3GPP a partir da *Release* 16. Ou seja, por se tratar de uma arquitetura evolucionária, devemos incorporar os avanços possíveis já previstos pelo 3GPP na direção do 6G.

2.3.3 Decisão 3: Incorporar avanços em *Open Source*

Outra decisão para o projeto de nosso 6G foi utilizar avanços ocorridos nos diversos softwares de código aberto desenvolvidos para o *core 5G*, acesso (non-3GPP e 3GPP) nos modos *trusted* e *untrusted*, IA, etc. Por exemplo, o free5GC core foi utilizado por diversos trabalhos na área

para desenvolver novos componentes ou melhorias ao 5G. Assim sendo, decidimos olhar esses adendos feitos aos principais projetos de software livre e discutir se poderiam ser utilizados em nosso 6G.

2.3.4 Decisão 4: Plataforma comum

Decidiu-se pelo uso de uma plataforma comum a todas as instituições participantes do projeto. Isso facilitará todas as atividades de integração, implantação, configuração, teste e demonstração. Foi consenso no grupo que o uso da rede FIBRE da RNP poderia ser essa plataforma comum. Ferramentas de software livre compatíveis com essa plataforma também se tornaram preferíveis por facilitar os trabalhos.

2.3.5 Decisão 5: Integração do transceptor 6G GFDM do Inatel

A integração do transceptor GFDM desenvolvido pelo Inatel à plataforma do projeto foi outra decisão de projeto importante. Dado que o mesmo não segue o padrão 3GPP para 5G, decidimos integrá-lo como uma tecnologia Non-3GPP Access, assim como o Wi-Fi, Ethernet e LoRaWAN. Entretanto, o mesmo continua em constante apropriamento, sendo adequado inclusive para o 6G. Assim sendo, usaremos o termo *Transceiver* 6G para designá-lo.

2.3.6 Decisão 6: Integração da rede satelital

A integração de uma rede satelital em parceira com o Projeto C financiado pelo SINDISAT/ABRASAT em conjunto com o Inatel foi outra decisão de projeto realizada. Entretanto, essa integração demandará acomodar requisitos do projeto SINDISAT dentro do Brasil 6G. O grupo entendeu que era totalmente viável fazer tal integração, que seria benéfica aos dois projetos. O Projeto C termina em Março de 2023, porém acreditamos ser possível estender o uso do enlace de satélite até meados de 2023 ou além.

2.3.7 Decisão 7: Automação de tarefas

Outra decisão diz respeito ao uso de plataformas e ferramentas para automação de tarefas, como gerenciamento de contêineres, configuração de interfaces entre contêineres, orquestração e implantação de funções virtuais de rede. O grupo decidiu pelo uso de ferramentas de software livre com as quais já tinham pesquisa em andamento e que se mostraram completamente adequados ao desafio de: (i) virtualizar recursos de infraestrutura física; (ii) cuidar do ciclo de vida de contêineres e máquinas virtuais; (iii) conectar interfaces de redes em contêineres e VMs; (iv) medir o desempenho da solução final.

2.3.8 Decisão 8: Simplicidade

Optar por soluções mais simples, ao invés de grandes plataformas e ferramentas foi outra decisão tomada. Nem sempre soluções simples estão disponíveis. A comparação entre soluções tradicionais prontas e muitas vezes mais complexas, com soluções novas recém descobertas foi uma decisão realizada.

2.3.9 Decisão 9: Aproveitamento de trabalhos já realizados

Outra decisão foi aproveitar trabalhos já realizados pelo grupo e que pudessem encaixar no 6G a ser construído. Isso incluiu a *expertise* do grupo em virtualização, *core* 5G, RAN, fatiamento de redes, fatiamento como um serviço e diversas aplicações.

2.3.10 Decisão 10: Escolha de componentes

Adotamos um método de escolha que se baseia em uma verificação baseada em: (i) fundamentos conceituais; (ii) tecnologias utilizadas na implementação; (iii) popularidade na comunidade de pesquisa; (iv) interoperabilidade. A ideia foi escolher componentes prontos do 5G e que o estendem usando esses critérios. Ou seja, um bom componente de software a ser integrado no projeto é aquele que segue os fundamentos esperados adequadamente; que utiliza tecnologias compatíveis com a plataforma adotada (FIBRE RNP) e com o restante dos componentes em seleção; que tenha massa crítica de usuários para facilitar a resolução de problemas; e que seja interoperável conforme as especificações do 3GPP.

2.3.11 Decisão 11: Integração de *data centers*

Decidimos integrar *data centers* de parceiros do projeto tanto através da plataforma FIBRE da RNP, quanto via Internet. Tal decisão permite a participação de ilhas do FIBRE das instituições Unisinos, UFG e UFU no projeto, além da ilha do Inatel. A integração com *data centers* contratados via Internet, como AWS, também é desejável, mas até o momento da escrita desse relatório não se mostrou viável.

2.3.12 Decisão 12: Suporte a múltiplas tecnologias de acesso

Outra decisão importante realizada pelo grupo foi o suporte a múltiplas tecnologias de acesso, tanto 3GPP, quanto não-3GPP, como por exemplo Wi-Fi, LoRaWAN e SigFox. O Transceptor 6G do Inatel é considerado um acesso não-3GPP por utilizar tecnologia não padronizada pelo 3GPP (GFDM).

3 Ação 2 - Núcleo do Proto 6G

A partir das decisões de projeto, apresentadas na Seção 2.3 esta ação descreve como o trabalho foi conduzido em relação ao núcleo proposto para nosso Proto 6G. Uma decisão de projeto que traz um grande impacto sobre a condução deste trabalho é a abordagem evolutiva. Neste contexto, a atual arquitetura do core 5G chamada *Service-based Architecture* (SBA) [11] é o ponto de partida para a evolução. Assim sendo, a Figura 6 apresenta uma visão, em alto nível, da arquitetura da rede 6G. Além da premissa de evolução a partir da arquitetura atual, a condução deste trabalho foi realizada em uma abordagem iterativa e incremental. Desta forma, os habilitadores tecnológicos inicialmente mapeados estão sendo incorporados de forma gradativa.

Levando em conta que a AI está presente em todas as camadas da arquitetura, este habilitador está sendo integrado ao *core* do Quinta Geração de Rede Móvel Celular (5G) pelo 3GPP. Assim sendo, deverá fazer parte de nosso Proto 6G. Alinhado a esse habilitador, tem-se o fatiamento de redes - *Network Slicing* (NS). O fatiamento é um conceito que já está presente no 5G. Entretanto, ainda há desafios para o fatiamento tanto no domínio do 5G [12], como em outros domínios relacionados, como *Internet of Things* (IoT) [13]. De fato, o suporte ao fatiamento de recursos (dinâmico ou como um serviço) nos atuais *softwares* livres para o *core* do 5G é precário. Muito do que se padroniza não é de fato implementado nas opções de *core open source*.

Considerando que na rede 6G haverá diversos acessos de rádio, a primeira versão do core do Proto 6G deve levar em conta dois tipos de acesso de rádio: um baseado em bandas não licenciadas pelo 3GPP e o outro levando em conta redes não terrestres - *Non-Terrestrial Network* (NTN)-, baseadas em satélites. As redes não terrestres estão na rota do 5G [14] [15]. Na visão da arquitetura 6G há outros tipos de acesso, porém, estes serão explorados na Ação 3 da META 5 (Seção 4).

A decisão de utilizar bandas não licenciadas permite uma ação exploratória e experimental em campo da arquitetura da rede 6G proposta, mesmo sem a definição das bandas que serão posteriormente definidas pelos órgãos de padronização. Outro fato é que uso de bandas não licenciadas já é algo nativo no 5G [16] e é natural que esteja presente na evolução para a rede 6G. Ou seja, o Proto 6G deve ser uma arquitetura que oportuniza múltiplas tecnologias de acesso em diversas bandas.

Ainda na visão evolutiva, um outro aspecto relevante é levar em conta todos os avanços que já estão mapeados ou considerados no 3GPP [17]. Neste caso, o caminho para o núcleo 6G deve levar em conta os próximos *Releases* da especificação relacionada ao 5G já vislumbrados. Isto leva em conta o chamado *5G Advanced* [18] que considera o *Release* 17 e o *Release* 18 [19] do 3GPP.

Além de considerar habilitadores claramente identificados e alinhados com o 6G, tais como a AI, o NS, as NTN e as bandas não licenciadas, uma outra escolha que se mostrou relevante é adoção das *Distributed Ledger Technologies* (DLT) implementadas com o conceito de *blockchain*. A *blockchain* é vislumbrada como um habilitador que poderá contribuir na arquitetura 6G [20] e poderá contribuir tanto em aspectos como privacidade [21], como na gestão e compartilhamento de recursos [22]. Neste momento, *blockchain* ainda não é um habilitador considerado no âmbito do 3GPP. Neste caso, nossos estudos indicam que sua inclusão é relevante mesmo que ainda não seja parte da arquitetura atual. Ela também já é vislumbrada em futuros *releases* do 3GPP já divulgados.

A decisão de projeto relacionada ao uso de tecnologias *open source* indica que implementa-

ções disponíveis de um core 5G serão um ponto de partida para a evolução. Nesse contexto, levando-se em conta o reuso de trabalhos já realizados para o seguimento da META 5 é necessário a escolha, entre as implementações de core 5G disponíveis, aquela que é mais adequada levando em conta as decisões de projeto. Para isto foi realizada uma busca exaustiva das implementações disponíveis de um *core* 5G *open source*.

Após ter revisado este conjunto de implementações disponível atualmente, o método de trabalho adotado nesse relatório consistiu em uma análise tanto do ponto de vista funcional, quanto do ponto de vista de tecnologia das implementações de *core open source* disponíveis. O passo seguinte foi uma avaliação de como cada núcleo *open source* está posicionado em relação ao estado da arte levando em conta os seguintes habilitadores tecnológicos que foram selecionados e que estão na proposta do Proto 6G:

- Inteligência Artificial;
- Fatiamento dinâmico e como um serviço (*as-a-service*);
- Suporte a Múltiplas Redes de Acesso em particular ligado à acesso não licenciado e acesso via satélite;
- *Blockchain*.

A seguir aprofundamos a apresentação e discussão dos levantamentos feitos nessa Ação 2 relacionada ao núcleo do Proto 6G.

3.1 Cores 5G Open Source

Após uma busca extensiva das implementações disponíveis de núcleo que podem ser expandidas para o 6G, foram identificadas as seguintes implementações: Free5GC [23], Magma Core [24], Open5gCore [25], open5gs [26], OpenAirInterface 5G Core Network [27] e sd-core [28]. O Magma *core* na realidade não é um núcleo 5G, mas sim um conjunto de interfaces e uma arquitetura padronizada para interfacear com um núcleo de rede 5G. Por outro lado, o projeto SD-CORE é um conjunto de componentes e uma arquitetura que inclui um núcleo 4G e também 5G. Neste caso, o SD-CORE utiliza o Free5GC. Em relação ao Open5GCore, não há um código-fonte disponível, mas o acesso à implementação é aberto para membros. Diante disto, o Open5GCore, o Magma e o SD-CORE não serão considerados para uma avaliação detalhada.

3.1.1 Free5GC

O Free5GC é um projeto open-source com o objetivo de implementar o núcleo 5G (5GC) definido pelo *Release 15+* do 3GPP. Em seu estagio atual, este projeto já contempla as principais NFs definidas pelo 3GPP, incluindo: AMF, AUSF, N3IWF, NRF, NSSF, PCF, SMF, UDM, UDR e UPF. O código fonte deste projeto (majoritariamente escrito em Go) é hospedado no *Github* sob a licença Apache 2.0. Trata-se de um projeto ativo com cerca de 27 desenvolvedores diretos e com *commits* diários. Acredita-se que este projeto tenha relevância no contexto acadêmico, haja vista a quantidade de citações em publicações cientificas encontradas no momento da escrita deste relatório (149 referências foram encontradas através da ferramenta *Google Acadêmico)*.

Por utilizar o paradigma SBA (*Service-Based Architecture*) o Free5GC é altamente modular e pode ser utilizado como um todo ou em partes, o que é ainda mais simples devido a

especificação 3GPP e as interfaces definidas por ela. Encontramos casos de uso das funções implementadas pelo Free5GC com projetos como Magma e ONAP, o que demostra uma boa inserção do projeto na área de 5G.

3.1.2 Open5GS

O Open5GS é uma implementação em linguagem C tanto do núcleo do 5G, quanto do EPC em código aberto, em conformidade com o padrão 3GPP *Release* 16 e distribuída sob licença GNU AGPL 3.0. É um esforço importante, que conta com oito *sponsors* e 45 contribuintes. O projeto é maduro e ainda ativo, com o código bem organizado.

Atualmente, o núcleo de 5G oferecido pelo projeto está bem completo, contando com as seguintes funções de redes implementadas: AMF (Access and Mobility Management Function), SMF (Session Management Function), UPF (User Plane Function), NRF (Network Repository Function), AUSF (Authentication Server Function), UDM (Unified Data Management), UDR (Unified Data Repository), NSSF (Network Slice Selection Function, PCF (Policy Control Function) e BSF (Binding Support Function). Além disso, também são implementadas as seguintes funções de rede do EPC: HSS (Home Subscriber Server), MME (Mobility Management Entity) e os Serving/PDN Gateways (S-GW e P-GW). Essa última em implementações separadas para planos de usuário e de controle.

Algumas limitações conhecidas são a ausência da função para conexão em redes não-3GPP (N3IWF) e de coleta e agregação de dados para *analytics* (NWDAF), além de não suportar o modo Narrow Band IoT (NB-IoT), funcionalidade de *roaming* ou chamadas de emergência.

3.1.3 OAI - 5G Core Network

O objetivo do projeto OAI-5G Core Network é o de prover uma implementação de núcleo 5G SA de acordo com as normas 3GPP. O *design* e a implementação foram realizadas de modo a flexibilizar a adaptação aos diversos casos de uso encontrados no 5G. Os programas são publicados sob a licença "*OAI Public License V1.1*" [29].

Como definido na Rel-16 do 3GPP, a arquitetura do OAI 5G CN é também baseada no modelo SBA e as funções de rede do plano de controle são diferentes das do plano de usuário. No estágio atual, as seguintes funções de rede estão disponíveis: *Access and Mobility Management Function* (AMF), *Session Management Function* (SMF), UPF, *Network Repository Function* (NRF), *Authentication Server Function* (AUSF), *Unified Data Management* (UDM), *Unified Data Repository* (UDR) e *Networking Slice Selection Function* (NSSF).

Sua implantação pode ser feita de três modos distintos, aqui resumidos:

- Minimalista: a implementação do 5GC restringe-se às seguintes funções de rede: AMF, SMF e UPF, ou seja, o mínimo para ter-se um core funcional. Opcionalmente, pode ser acrescentado um NRF.

- Básico: Além das funções de rede do modo minimalista, também são implementados as funções UDM, AUSF e UDR, que permitem a autenticação do dispositivo, gerenciamento de seus atributos e a aplicação de políticas específicas.

- Com suporte a *slicing*: Inclui, além de todas funções acima, a função NSSF, que permite a seleção de instâncias de *network slices*.

Uma descrição mais abrangente pode ser encontrada em [29].

No repositório do projeto verifica-se que as linguagens de programação usadas variam de acordo com a função de rede. Por exemplo, enquanto que para a AMF 55% do código é escrito em C, 42% é escrito em C++, a UPF já é implementada 48% em Python e 29% em Shell. Porém, observa-se uma preponderância de C/C++ no projeto em geral.

3.2 Comparação Entre os Cores Funcional e Técnica

Com objetivo de avaliar as opções de 5GC *open-source* descritas anteriormente, foram utilizadas dois tipos de análise: (i) técnica, na qual foram verificados detalhes sobre a implementação, tais como tipo de licença, linguagem de programação, versão, número de *issues* (pendências no código), número de forks (versionamento de código) e cobertura de testes; e, (ii) funcional, na qual foi verificado o quão aderentes essas implementações são em relação as especificações do 3GPP. O objetivo destas analises é: a) mensurar o nível de maturidade e complexidade das soluções; b) nível de engajamento e atividade nos projetos; c) completude e aderência ao 3GPP; e por fim, d) flexibilidade para novas funções (o que é essencial durante a efetiva implementação da nossa proposta de Proto 6G). Considerando o livre acesso ao código como fator determinante para a escolha de um 5GC base, bem como uma licença não restritiva que permitisse a livre utilização dessas implementações, foram selecionados apenas 3 opções para serem avaliadas nesta etapa do trabalho: Free5gc, open5gs e cn5g. Os resultados desta análise são reproduzidos na Tabela 2.

Tabela 2: Comparação Funcional e Técnica das opções de código aberto para núcleo de 5G.

		Free5gc	open5gs	cn5g (OAI)
FUNCIONAL	Release	15+	16	15+
	5G VNFs / CNFs	AMF; SMF; UPF; PCF; AUSF; UDM; NRF; NSSF; N3IWF; UDR	AMF; SMF; UPF; PCF; AUSF; UDM; NRF; NSSF; UDR; BSF	AMF; AUSF; FED; FED; NRF; NSSF; SMF; UDM; UDR; UPF
	4G VNFs / CNFs		HSS; MME; SGW-C; SGW-U; PCRF; PGW-C; PGW-U	
	Funções do R16 não Disponíveis	BSF; NWDAF	N3IWF; NWDAF	BSF; N3IWF; NWDAF
TÉCNICO	Open Source	sim	sim	sim
	Linguagem	go	C	C/C++
	Licença	Apache 2.0	GNU AGPL 3.0	OAI Pub. 1.1
	Versão	3.1.0	2.4.5	1.1.3
	Status	Ativo (atualizações diárias)	Ativo (atualizações diárias)	Ativo (atualizações diárias)
	Atividade	25 contribuidores; 426 forks; 80 observadores; 1.3K estrelas; 86 confirmações; 7 ramos; 8 etiquetas; 206 itens fechados e 72 itens abertos	8 patrocinadores; 45 contribuidores; 356 bifurcações; 86 observadores; 821 estrelas; 3481 confirmações; 2 ramos; 56 etiquetas; 517 itens abertos e 588 itens fechados	75 membros; 9 projetos/repositorios; 590 confirmações (amf); 23 ramos (amf); 12 etiquetas (amf); 0 itens fechados e 1 itens abertos
	Docker	sim	sim	sim
	Kubernetes	sim	sim	sim

3.2.1 Análise Funcional

Na análise funcional foram verificados os seguintes pontos: a) qual é a *release* 3GPP suportada; b) quais são as funções do 5G implementadas; c) quais são as funções do 4G implementadas; e, d) quais são as funções da *release* 16 do 3GPP não implementadas. Como pode ser observado na Tabela 2, Free5gc e open5gs despontam em nível de suporte às funções especificadas pelo 3GPP. open5gs tem a vantagem de suportar também funções do 4G, o que pode representar uma vantagem considerando o requisito de retro-compatibilidade para a nossa proposta evolutiva de Proto 6G. Se considerarmos o suporte a funções 4G como algo extra, mas que não deve impactar na escolha de um 5GC devido a ampla disponibilidade de funções 4G já em uso em ambientes reais, conclui-se que houve um empate entre open5gs e Free5gc. Entretanto, ao considerar o suporte a funções sendo propostas pela academia fora da especificação do 3GPP, verifica-se uma vantagem para o free5gc, que no momento da escrita deste relatório conta com 134 resultados no Google Acadêmico, enquanto o open5gs conta com 99 citações. A análise destas alternativas em relação ao estado da arte de funções essenciais para a proposta de Proto 6G sendo concebida neste projeto é apresentada em detalhes na Seção 3.3.

3.2.2 Análise Técnica

Na análise técnica foram verificados os seguintes pontos: a) disponibilidade do código-fonte; b) linguagem utilizada na implementação (bem como popularidade da linguagem e conhecimento da equipe); c) licença para utilização, redistribuição e comercialização; d) versão atual do código; e) análise do estado de desenvolvimento do projeto; f) análise do nível de atividade e engajamento do projeto; e por fim, g) suporte ao *Docker* e h) suporte a plataforma *Kubernetes*. Por se tratar de um critério de seleção anterior a análise técnica apresentada nesta seção, todas as implementações avaliadas disponibilizam o código fonte, o que permite uma melhor avaliação, bem como evidencia a possibilidade de extensão. Todas as opções contam com licenças que permitem sua utilização e distribuição. No entanto, a licença do Free5gc (Apache 2.0) e do cn5g (OAI Pub Lic 1.1) são mais permissivas, enquanto a do open5gs (AGPL 3.0) exige que as modificações sejam tornadas públicas para que o código possa ser utilizado com intuito comercial.

O Free5gc foi implementado na linguagem go, que tem uma gama mais limitada de desenvolvedores, enquanto open5gs e cn5g foram implementados majoritariamente em C e C++. Quanto ao versionamento, o Free5gc se encontra na versão 3.1.0, open5gs na versão 2.4.5 e cn5g na 1.1.3. Embora não se possa afirmar sobre a maturidade do projeto apenas pela versão, versões iniciais como no caso do cn5g são indícios de projetos novos e que carecem de mais tempo para serem lapidados e testados. Todos os três projetos encontram-se ativos, o que é facilmente verificável ao checar a frequência de *commits* (publicações de código) em seus repositórios. Isso fica mais claro ao verificarmos mais indícios de atividade, tais como o número de *forks*, número de contribuidores, número de observadores, número de *sponsors* (patrocinadores do projeto), dentre outros. Nesse quesito, observa-se que mais uma vez free5gc e open5gs levam vantagem, principalmente o free5gc, que como constatado na análise funcional, conta com mais patrocinadores, pesquisadores e desenvolveres envolvidos. Por fim, como esperado, todos os projetos apresentam suporte a utilização de contêineres via Docker e Kubernetes, o que é uma tendência para as redes futuras e vem sendo empregado na maioria dos projetos desta área.

3.3 Análise de Núcleos 5G Frente ao Estado da Arte

Nesta subseção, reproduzimos os resultados de um estudo sobre como IA, fatiamento e suporte a múltiplas redes de acesso se relacionam com o núcleo do 5G e com o Proto 6G.

3.3.1 Inteligência Artificial

A Inteligencia Artificial (IA) é uma técnica que visa replicar a lógica do pensamento humano nas máquinas [30], considerando suas limitações computacionais. Ao longo da evolução tecnológica, a IA tem sido aplicada em diversos contextos e em aplicações como saúde, transporte, engenharia, etc., realizando tarefas de classificação, agrupamento e regressão [31, 32]. Dentre os fatores que tecnicamente suportam tamanha evolução registram-se os circuitos integrados menores e melhores, tecnologias de suprimento de energia com alto desempenho e a computação em nuvem [33, 34, 35, 36]. Esse conjunto de tecnologias criado para responder com eficácia às demandas dos usuários permite aplicações em áreas diversas. Assim, registra-se avanços tecnológicos sem paralelos nas redes móveis [37].

As redes móveis estão sob constante evolução e aprimoramento dado sua pervasividade e ao seu desempenho satisfatório para os usuários e aplicações [38]. Nesse sentido, a IA foi amplamente considerada como habilitador tecnológico para as rede móveis de quinta geração 5G [39]. No processo de padronização e desenvolvimento desta rede móvel, diversos paradigmas e técnicas de aprendizado como: aprendizado *online* e *off-line*, aprendizado de máquina supervisionado, não supervisionado e por reforço [40] foram considerados. Técnicas de IA compuseram inúmeras soluções visando aprimorar o desempenho, gestão e operação de redes móveis nos níveis de acesso, núcleo e transporte [41]. Assim, a comunidade científica empenhou-se e ainda persiste em aprimorar tarefas humanamente difíceis, atribuindo-as às máquinas, visando melhor desempenho [42].

No processo de desenvolvimento e padronização da rede móvel de sexta geração que se avizinha, a IA exercerá um papel ainda mais proeminente para responder a requisitos para além da comunicação entre entidades comunicantes [43]. Espera-se que a rede 6G suporte comunicação próxima à instantânea envolvida, enquanto suporta conectividade integrada e transparente entre espaço, ar, terra e água. Para tanto, as técnicas de IA hão de suportar uma capacidade analítica, aprendizado de máquina, otimização para o projeto, implantação e operação da rede 6G [44, 45]. Assim, destaca-se que a comunidade científica, indústria e entidades de padronização empenham-se e submetem-se à prova arquiteturas e conceitos que aprimoram e evidenciam o papel da inteligência computacional no suporte de uma conectividade de alta *performance* e customizada ao usuário, haja vista que espera-se que a rede 6G seja a rede centrada em pessoas [46].

A utilização da IA no ecossistema das redes móveis é algo tecnicamente incontestável e bem aceito no estado da arte. Mas, a rede 6G propõe ressignificar o uso da IA, fazendo-a útil não como aplicação, mas como serviço nativo suportado pela rede [47, 48]. Para que a tecnologia seja ofertada nesses moldes, prevê-se a construção e validação da entidade NWDAF responsável por construir um mecanismo de coleta e consumo de dados gerados pela infraestrutura para suportar modelos de IA pertencentes a mecanismos de gestão e operação da conectividade, adaptando-se às demandas do usuário, da rede [49], do processamento e transporte de dados. Nesse contexto, a Tabela 3 traz alguns esforços da literatura na direção de arquiteturas que possuem serviço de IA nativo para melhoramento da conectividade e da gestão.

Cabe destacar que neste momento o Free5gc é a única implementação que possui a função NWDAF disponível.

Tabela 3: Levantamento de Arquiteturas 6G com NWDAF

Proposta	Ideia Geral
[50]	Criação de uma estrutura NWDAF distribuída com base no aprendizado federado.
[51]	Construção um mecanismo de lógica fuzzy para lidar com streaming de vídeo em 360º. Além disso, eles propuseram um mecanismo para calcular a alocação de taxa ideal entre as células 4G e 5G para a transmissão de video vídeo. Esses dados são passados para o NWDAF para dar suporte à coleta de dados em tempo real das entidades da rede e à correção de vídeo.
[52]	Eles projetaram uma plataforma de rede baseada em intenção (IBN) de circuito fechado, que garante automaticamente o provisionamento de recursos para fatias de rede.
[53]	Este artigo explora uma arquitetura NWDAF capaz de usar Machine Larning (ML) para estimativa de QoE e avalia o desempenho de um caso de uso de streaming de vídeo móvel. Este artigo teve como objetivo correlacionar estatísticas de rede NWDAF com métricas de aplicativos e a QoE correspondente em sistemas 5G. Neste experimento, um locatário de terceiros inicialmente comunica dados de desempenho de streaming de vídeo ao NWDAF via AF. Essas informações auxiliam na QoE das sessões.
[54]	Este artigo traz como novidade um mecanismo para garantia e suporte de QoE no streaming de vídeo embutido no NWDAF.

3.3.2 Fatiamento

O termo "fatiamento de rede" (*network slicing*) foi cunhado e introduzido pela *Next Generation Mobile Networks* (NGMN) para representar redes lógicas fim-a-fim executando em uma infraestrutura (física ou virtual) subjacente comum, porém isoladas uma das outras, com controle e gestão independentes, podendo ser criadas sob demanda [55]. Cada rede lógica, denominada *network slice* (ou fatia de rede), consiste em um conjunto de funções de redes (físicas e/ou virtuais), bem como recursos de computação, armazenamento e transferência de dados para executá-las. Essas funções e recursos, por sua vez, atendem, de forma otimizada, as características específicas (em termos de funcionalidade, desempenho e isolamento) do serviço associado ao *network slice* [56].

O conceito de *network slicing* ganhou força e se viabilizou com o advento de tecnologias como *Network Functions Virtualization* (NFV) e SDN. NFV permite que o serviço fim-a-fim, representado pelo *network slice*, seja criado como um conjunto de VNFs encadeadas, aliviando os custos de implantação. SDN explora a separação entre o plano de controle e plano de dados para facilitar o encaminhamento de dados entre *Virtual Network Function*s (VNFs) encadeadas, facilitando a programabilidade da rede.

O 5G utiliza do fatiamento para a viabilização do conceito de SBA e na garantia de *Service Level Requirements* (SLRs), o que é um desafio considerando os requisitos de flexibilidade propostos por esta arquitetura. A especificação 3GPP na *Release* 15 propôs o uso de 2 componentes específicos para o gerenciamento de fatias: *Network Slice Management Function* (NSMF), responsável pelo gerenciamento de *Networking Slice Instances* (NSIs), que representam instâncias de serviços; e *Network Slice Subnet Management Function* (NSSMF), responsável pelo gerenciamento de *Networking Slice Subnet Instances* (NSSIs), que compõe uma NSI como entidades do serviço. Na *Release* 16 é especificado outro importante componente para a utilização de fatias: o NSSF, responsável por selecionar e consultar fatias existentes.

Considerando o suporte as funções de gerenciamento e seleção de fatias como propostas pelo 3GPP como uma vantagem capaz de influenciar na escolha de 5GC base, podemos classificar assim as implementações:

- Free5GC: possui o NSSF como uma função de rede implementada.
- Open5GS: possui o NSSF como uma função de rede implementada.
- CN5G: possui o NSSF como uma função de rede implementada.

- Magma Core: não tem nenhuma das funções implementadas, apenas a definição de interfaces do NSSF.
- SD-Core: não tem o NSSF implementado
- Open5GCore: possui o NSSF como uma função de rede implementada.

Logo, verifica-se que Free5GC, Open5GCore, CN5G e Open5GCore disponibilizam a função NSSF. Já o Magma-Core embora não inclua implementação do NSSF de fato, suporta a integração com esta função como cliente, e o SD-Core se limita a *Release* 15 do 3GPP. Desta forma, conclui-se que a escolha deve-se guiar pelo grau de complexidade das soluções que incluem o NSSF, bem como pelo nível de esforço necessário para criar novas funções.

3.3.3 Suporte a Múltiplas Redes de Acesso

Pela sua versatilidade em termos de gerenciamento de recursos de rede, mais especificamente o *network slicing* e a *edge computing*, é esperado que o 5G possa ser interoperável com outras redes de acesso não-3GPP, de forma a oportunizar seus recursos para uso também em outras tecnologias. Ainda mais, a partir da especificação 3GPP Rel-17, é esperada uma integração das redes terrestres tradicionais com redes não-terrestres (*non-terrestrial networks*, ou NTN), com grande foco em acesso via satélites de órbita baixa, média ou geoestacionária (*low, mid, geostationary Earth Orbit*, ou LEO, MEO e GEO) [57].

De acordo com [58] há três níveis possíveis de interoperabilidade de redes:

- Nível "cloud/app", ou seja, acima de camada L3, que é implementado via aplicações e protocolos superiores.
- Nível RAN, onde há uma interoperabilidade de tecnologias de acesso, o que foi padronizado no 4G com a chamada *LTE-WLAN Aggregation* (LWA).
- Nível núcleo de rede, no qual o core da rede padrão 3GPP pode ser interoperado por diferentes redes de acesso.

Neste tópico, abordaremos somente esse último nível, uma vez que o primeiro pode ser desenvolvido por qualquer terceiro (e assim não depende de padronização) e o segundo não evoluiu no LTE por não ter obtido sucesso comercial. Também não iremos tratar da integração com NTN porque, até o momento da escrita dessa seção, a 3GPP Rel-17 ainda não foi estabilizada (congelada).

No padrão 3GPP Rel-16, a interoperabilidade no nível de núcleo de rede pode ser implementada através de uma WLAN confiável (*trusted*) ou não-confiável (*untrusted*), sendo o último modo o mais genérico e o que iremos tratar mais especificamente aqui (e em outras seções desse relatório). Nesse caso, o acesso WLAN *untrusted* é implementado através de uma função de rede denominada *Non-3GPP Interworking Function*, ou N3IWF. O N3IWF comunica-se com o 5GC através das interfaces N2 e N3 (nos planos de controle e usuário, respectivamente), as mesmas usadas pelo 5G NR; e através da interface Y2 com a rede de acesso não-3GPP (WLAN). A segurança é garantida na interface NWu, que estabelece uma conexão segura IPSec entre o UE e a N3IWF. Um esquemático da forma de implementação da interoperabilidade de redes através do N3IWF é mostrado na Figura 7.

Nesse contexto, consideramos como condição suficiente para que uma implementação do 5GC suporte a interoperabilidade de redes, o fato dela ter o N3IWF disponível em sua distribuição. Desta forma, podemos classificar assim as implementações:

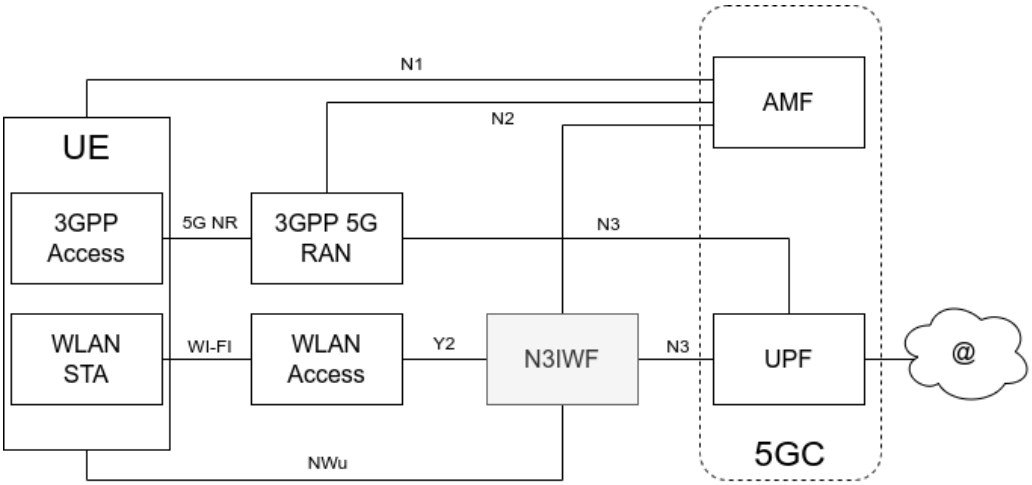


Figura 7: Implementação de interoperabilidade de redes de acesso através da N3IWF.

- Free5GC: possui o N3IWF como uma função de rede implementada.
- Open5GS: não tem o N3IWF implementado.
- CN5G: não tem o N3IWF implementado.
- Magma Core: não tem o N3IWF implementado.
- SD-Core: não tem o N3IWF implementado.
- Open5GCore: possui o N3IWF como uma função de rede implementada.

Logo, de todos os projetos analisados, apenas o Free5GC e o Open5GCore disponibilizaram o N3IWF em suas implementações. Assim sendo, consideramos que apenas os dois, no momento desta análise, suportam a interoperabilidade com redes de acesso não-3GPP.

3.4 Análise Experimental dos Núcleos 5G

Nessa subseção apresentamos uma comparação experimental de alguns núcleos 5G *open source*. Dado que o Proto 6G será uma evolução do atual 5G, a decisão de qual implementação de núcleo *open source* que melhor atende as demandas do Brasil 6G passou também por um conjunto de testes realizados utilizando a ferramenta my5G-RANTester[1] [59]. Essa ferramenta foi desenvolvida para testes e monitoramento de funções dos protocolos *Non-Access Stratum* (NAS) e *NG Application Protocol* (NGAP) em núcleos 5G. Nesta subseção há o detalhamento do ambiente de experimentos e avaliação de alguns projetos *open-source* 5G Core (5GC), incluindo todos os experimentos realizados e seus respectivos resultados.

Os casos de uso para os cenários avaliados baseiam-se nas especificações 3GPP, as quais descrevem detalhadamente as entradas suportadas pelo núcleo e suas respectivas saídas. O my5G-RANTester foi projetado considerando as entradas e saídas esperadas nos cenários de experimentação, tal qual está disponível no repositório da ferramenta no *Github*.

[1]https://github.com/my5G/my5G-RANTester

Projetos *Open-source*	Versão
free5GC	v3.0.6
Open5GS	v2.3.6
OAI	v1.3.0
my5G-RANTester	v1.0.0
Infraestrutura	**Configuração**
Memória RAM	16GB
Processador	Intel Core i5
Sistema Operacional	Ubuntu 20.04
Núcleo do SO	5.4.90-050490-generic

Tabela 4: Configurações para os experimentos.

3.4.1 Cenários para Experimentação

Os experimentos foram planejados para utilizarem três projetos *open-source* 5GC: Free5GC, Open5GS e *OpenAirInterface* (OAI). Até o momento da escrita deste relatório, os três projetos mencionados foram os únicos 5GC disponíveis publicamente. Os núcleos 5G dos projetos foram analisados com o my5G-RANTester na versão v1.0.0, através do envio e recebimento de mensagens *uplink* e *downlink* entre a rede de acesso e o 5GC, utilizando os protocolos NAS e NGAP. Os experimentos foram executados em um servidor com processador Intel Core i5@1.6GHz, 16GB de memória RAM e sistema operacional Ubuntu 20.04 64 bit (com kernel 5.4.90-050490-generic). A Tabela 4 contém informações sobre os cenários experimentais com o my5G-RANTester. Ressalta-se que no OAI apenas o módulo 5GC foi habilitado.

3.4.2 Testes

Os testes de comparação realizados consideraram dois grupos de testes para cada avaliação de núcleo de 5G. O primeiro grupo trata de testes de conformidade para verificar o conjunto de software e requisitos de qualidade definidos pelo 3GPP, enquanto o segundo trata de testes de robustez utilizando diversas entradas com o objetivo de averiguar o comportamento do sistema (por exemplo, buscar por erros e instabilidade do sistema).

Testes de Conformidade

A Tabela 5 apresenta as onze funções testadas e o conjunto de mensagens trocadas para os três projetos 5GC *open-source*. Para cada função apresentada na Tabela 5, verificou-se a reposta de cada 5GC de acordo com as seguintes regras: (i) o estado do my5G-RANTester é compatível com a mensagem recebida; (ii) a mensagem recebida contém todos os parâmetros obrigatórios; (iii) a informação na mensagem pode ser compreendida de acordo com a função testada; (iv) a informação na mensagem é válida de acordo com a função testada. Para atingir os testes de conformidade, implementou-se as máquinas de estados e fluxos na ferramenta my5G-RANTester. Além disso, analisou-se a autenticação primária e troca de chaves através do método *5G-Authentication and Key Agreement* (5G-AKA) e o gerenciamento de contexto do *User Equipment* (UE) com e sem informações para estabelecimento da sessão PDU. Todas as funções testadas nos três projetos 5GC tiveram o comportamento esperado conforme o padrão 3GPP, exceto a função *Generic UE configuration update*. Para essa função, apenas o projeto Open5GS enviou a mensagem *Configuration Update Command* para o my5G-RANTester no

Funções para os testes	Protocolos	Mensagens	Free5GC	Open5GS	OAI
Registration	NAS	*Registration Request, Registration Accept, and Registration Complete*	✓	✓	✓
Primary authentication and key agreement	NAS	*Authentication Request and Authentication Response*	✓	✓	✓
Identification	NAS	*Identity Request and Identity Response*	✓	✓	✓
Transport	NAS	*UL NAS transport and DL NAS transport*	✓	✓	✓
Security mode	NAS	*Security Mode Command and Security Mode Complete*	✓	✓	✓
Generic UE configuration update	NAS	*Configuration Update Command*	✗	✓	✗
Session management	NAS	*PDU Establishment Request and PDU Establishment Accept*	✓	✓	✓
Interface management	NGAP	*NG Setup Request and NG Setup Response*	✓	✓	✓
Transport NAS messages	NGAP	*Initial UE Message, Downlink NAS Transport and Uplink NAS Transport*	✓	✓	✓
UE context management	NGAP	*Initial Context Setup Request and Initial Context Setup Response*	✓	✓	✓
PDU session management	NGAP	*PDU Session Resource Setup Request and PDU Session Resource Setup Response*	✓	✓	✓

Tabela 5: Testes de conformidade realizados para comparar 3 núcleos de 5G.

fluxo de registro do UE conforme era esperado. Os demais núcleos 5G falharam em cumprir esse requisito do padrão.

A Tabela 6 apresenta os resultados numéricos relativos aos testes listados na Tabela 5, ou seja, as onze funções levantadas para os testes de conformidade. A análise mostra o número de mensagens (coluna **Msgs**) e a quantidade média de bytes (coluna **Bytes**) trocados entre cada projeto (Free5GC, Open5GS e OAI) e o my5G-RANTester. A tabela ainda apresenta a duração média dos testes (coluna **Time**), em milissegundos, para cada função em cada projeto 5GC. Ressalta-se que todos os testes foram executados isoladamente no mesmo ambiente virtual descrito na Tabela 4.

O número de mensagens é similar nas três soluções 5GC apresentadas na Tabela 5, podendo-se afirmar que a variação é insignificante visto que a transmissão da mensagem *Configuration Update Command* incrementa o número de mensagens de algumas funções em cada 5GC. A quantidade média de *bytes* e a duração do teste apresenta valores similares para os núcleos Free5GC e Open5GS. No entanto, o OAI mostrou um comportamento diferente. Por exemplo, a quantidade média de *bytes* do OAI é duas vezes maior se comparado ao Free5GC e ao Open5GS. Ainda, a duração do teste com o OAI apresenta tempos maiores em relação aos outros núcleos para algumas funções. É importante mencionar que o núcleo OAI 5G é novo e está em desenvolvimento, o que pode explicar o comportamento apresentado pois, em geral, na etapa de desenvolvimento o *software* costuma apresentar mensagens extras para *debug* e verificações – trata-se de uma suposição, uma vez que uma investigação detalhada das implementações de

Funções testadas	Protocolos	Free5GC			Open5GS			OAI		
		Msgs	Bytes	Time	Msgs	Bytes	Time	Msgs	Bytes	Time
Registration	NAS	12	1701	127	12	1693	50	12	4207	247
Primary authentication and key agreement	NAS	8	1056	59	8	1060	27	8	2482	238
Identification	NAS	6	780	42	6	792	16	6	1899	146
Transport	NAS	14	2075	414	15	2240	274	14	4618	475
Security mode	NAS	10	1484	127	10	1476	49	10	3990	247
Generic UE configuration update	NAS	14	2075	414	14	1952	255	14	4618	475
Session management	NAS	14	2075	414	15	2240	274	14	4618	475
Interface management	NGAP	2	240	5	2	252	2	2	704	3
Transport NAS messages	NGAP	14	2075	412	15	2240	272	14	4618	474
UE context management	NGAP	11	1584	127	11	1576	50	11	4090	247
PDU session management	NGAP	15	2195	415	16	2344	276	15	4738	476

Tabela 6: Resultados numéricos dos testes de conformidade.

5GC está fora do escopo deste documento.

Testes de robustez

Os testes de robustez foram executados para avaliar a qualidade dos projetos 5GC no que tange o nível de aderência de cada projeto aos padrões 3GPP. Para tal, definiu-se seis testes de robustez relevantes para funções NAS e um para funções NGAP. A Tabela 7 apresenta os resultados dos testes para cada um dos três projetos 5GC avaliados. A seguir discute-se os valores apresentados.

Para o teste de registro, avaliou-se dois casos utilizando a mensagem *Registration Request* da função *Registration*, sendo: (i) envio da requisição sem a identidade móvel (campo obrigatório); e (ii) envio da requisição com informação confidencial. Em ambos os casos, o my5G-RANTester espera o AMF para retornar a mensagem *Registration Reject*, interrompendo o fluxo de registro. Os resultados revelaram que apenas o Open5GS respondeu conforme esperado nas duas trocas de mensagens. o Free5GC e o OAI não enviaram a mensagem *Registration Reject* no caso (i), mas interromperam o fluxo de registro. No caso (ii), o Free5GC e o OAI aceitaram a requisição de registro contendo texto não claro como informação de texto claro e persistiu o registro do UE sem nenhum erro ou alerta.

Para o processo de autenticação, definiu-se dois testes para analisar respectivamente as funções de autenticação primária e a troca de chaves. Primeiramente, utilizou-se uma informação inválida na mensagem *Authentication Response* do método 5G-AKA. O resultado esperado era que o AMF abortasse as funções, rejeitando a autenticação ou registro para as operações. Para este teste de robustez, apenas o OAI não cumpriu com o esperado, ou seja, não rejeitou a mensagem. Logo em seguida, forçou-se a situação de falha de sincronização através do envio de uma mensagem *Authentication Failure*. Neste caso, esperava-se que o 5GC iniciasse uma re-sincronização do SQN para continuar a autenticação e troca de chaves, enviando uma nova mensagem de *Authentication Request*. Todos os projetos 5GC responderam as duas operações

Nome	Protocolos	Funções envolvidas	Mensagens	Free5GC	Open5GS	OAI
Registration	NAS	Registration	Registration Request, Registration Reject	✗	✓	✗
Authentication	NAS	Primary authentication and key agreement	Authentication Request, Authentication Response, Authentication Failure, Authentication Reject, Registration Reject	✓	✓	✗
Security	NAS	Security mode, Registration and Identification	Security Mode Command, Security Mode Complete, Registration Reject, Identity Request, Identity Response	✗	✗	✗
SMF selection	NAS	Transport	UL NAS Transport, DL NAS Transport	✓	✗	✗
UPF selection	NAS	Transport, Session management	UL NAS Transport, DL NAS Transport, PDU Establishment Request, PDU Establishment Reject	✓	✓	✓
NAS flow validate	NAS	Security mode, Transport, Session management and Registration	Security Mode Command, UL NAS Transport, PDU Session Establishment Request, Security Mode Complete, Registration Accept	✓	✓	✗
Interface management	NGAP	Interface Management	NG Setup Request, NG Setup Failure	✗	✓	✗

Tabela 7: Testes de robustez.

de acordo com o padrão 3GPP neste segundo caso.

Para o teste de segurança, projetou-se duas configurações incorretas na mensagem *Security Mode Complete* da função de segurança. Na primeira configuração, o my5G-RANTester recebe a mensagem *Security Mode Command* do AMF e responde com *Security Mode Complete* sem a informação IMEISV requisitada. De acordo com essa resposta, é esperado do AMF uma notificação para o my5G-RANTester, através da mensagem *Registration Reject*, interrompendo o processo de registro ou enviando uma mensagem *Identity Request* para obter a informação de IMEI. Para este teste de robustez, o Open5GS e o OAI ignoraram a mensagem faltando a informação IMEISV. Por outro lado, o Free5GC enviou a mensagem *Identity Request* sem o estabelecimento de segurança NAS completo. Na segunda configuração, o my5G-RANTester recebe a mensagem *Security Mode Command* do AMF e responde com a mensagem *Security Mode Complete* sem a re-transmissão requisitada da informação *Registration Request*. Neste caso, o AMF deve interromper o processo de registro com a mensagem *Registration Reject*. Os resultados mostram que o OAI e o Free5GC ignoraram a mensagem sem re-transmitir a *Registration Request*, enquanto o Open5GS enviou a mensagem para abortar o registro.

Para o teste de seleção de SMF, definiu-se uma alteração na mensagem *UL NAS Transport* da função de transporte. Neste teste de robustez, o my5G-RANTester envia a mensagem *UL NAS Transport* para o 5GC, encapsulando a *PDU Establishment Request* e demandando uma

sessão PDU com informações de DNN e S-NSSAI incompatíveis. Esta informação incorreta não permite que o AMF selecione um SMF disponível para a sessão PDU requisitada. Portanto, o AMF deve deve responder o my5G-RANTester com uma mensagem *DL NAS Transport* com a *PDU Establishment Request*, informando que o AMF não encaminhou a requisição para o SMF (com a mensagem 5gsm). Observou-se que o Free5GC enviou as mensagens conforme esperado. Porém, o Open5GS e o OAI não trataram a seleção de SMF como S-NSSAI ou DNN incompatíveis e o teste foi simplesmente interrompido sem nenhuma informação adicional.

Para o teste de seleção da UPF, alterou-se a mensagem *UL NAS Transport* da função de transporte. Essa alteração fez com que o my5G-RANTester enviasse a mensagem *UL NAS Transport* para o 5GC com *PDU Establishment Request*, consultando pela sessão PDU com informação incorreta (DNN incompatível). Esta informação incorreta não permite que o SMF selecione um UPF disponível para a sessão PDU requisitada. Neste caso, o 5GC deve responder com uma mensagem *DL NAS Transport* encapsulando a *PDU Establishment Reject* para informar que a operação não foi completada com sucesso. Neste teste de robustez, os três projetos 5GC enviaram a mensagem conforme especificado no padrão 3GPP.

Para o teste de validação do fluxo NAS (último teste com o protocolo NAS), definiu-se uma alteração no fluxo do NAS. Neste caso, o my5G-RANTester envia a mensagem *UL NAS Transport message* com o *PDU Establishment Request* em uma ordem incorreta, isto é, antes de receber a mensagem *Registration Accept* e após receber a mensagem *Security Command Mode*. Nesta situação, o AMF deveria ignorar a mensagem, re-enviar a mensagem *Security Mode Command* após o tempo de expiração de seis segundos e aguardar pela mensagem *Security Mode Complete* (ao invés da mensagem *UL NAS Transport*). De acordo com o padrão 3GPP, este procedimento deveria ser repetido quatro vezes a cada seis segundos. Neste teste de robustez, o free5GC e o Open5GS responderam conforme o padrão 3GPP. No entanto, o OAI aceitou a mensagem *UL NAS Transport* sem proteção NAS, incluindo o *PDU Establishment Request*, e respondeu com a mensagem *DL NAS Transport* com o *PDU Establishment Accept* antes da mensagem de *Registration Accept*.

Por fim, utilizou-se o protocolo NGAP no teste de gerenciamento de interface para completar os testes de robustez. Neste teste, o my5G-RANTester modifica a mensagem *NG Setup Request* da função de gerenciamento de interface, enviando a informação que o AMF não suporta PLMN, TAC ou S-NSSAI. Neste contexto, o my5G-RANTester espera que o AMF responda com a mensagem *NG Setup Failure*. Neste teste de robustez, o OAI e o Free5GC ignoraram a mensagem *NG Setup Request* com informação de incompatibilidade associada a PLMN, enviando que S-NSSAI não era suportado pelo AMF, enquanto o AMF não retornou nenhuma mensagem de erro. O Open5GS passou nos testes sem maiores adversidades.

O my5G-RANTester permite estressar o NAS e o NGAP com avaliações de robustez através de testes que avaliam as implementações desses protocolos além dos limites padrões. Portanto, o my5G-RANTester pode contribuir na identificação de defeitos (*bugs*) nas implementações dos protocolos que possam levar a falhas nos sistemas ou brechas de segurança. Além disso, o my5G-RANTester pode ser utilizado para verificar a conformidade das implementações com os padrões 3GPP. Ressalta-se que essas checagens de conformidade são práticas comuns nas soluções 5GC proprietárias.

Esta seção mostrou que o desenvolvimento dos projetos *open-source* pode ser considerado promissor. Por um lado, todos os projetos tiveram desempenho satisfatório para operação regular. Por outro lado, erros básicos implicaram em comportamento inesperado das soluções.

3.5 Conclusão

A Subseção 3.2 realizou uma comparação teórica (baseada em aspectos técnicos e funcionais) entre 3 núcleos de 5G considerados com código abertos disponíveis, sendo portanto, possíveis candidatos para uso pelo projeto Brasil 6G. Foram então considerados: Free5GC, Open5GS e CN5G (OAI). De todos os projetos analisados, apenas o Free5GC possui a função N3IWF em suas implementações. Assim sendo, no momento desta análise, apenas o Free5gc suporta a interoperabilidade com redes de acesso não-3GPP. Tal aspecto é fundamental no projeto Brasil 6G, dadas as aplicações consideradas na META 6 e o Transceptor 6G do Inatel que oferece conectividade a rede via acesso não-3GPP. A análise teórica apontou a solução Free5GC como a mais adequada para ser usada no Projeto Brasil 6G.

Já a Subseção 3.4 realizou uma comparação experimental para três núcleos de 5G acessíveis ao projeto Brasil 6G no inicio de 2022. Embora os resultados tenham mostrado uma leve vantagem para a solução Open5GS, a proposta Free5GC teve desempenho similar nos resultados numéricos do teste de conformidade. É importante destacar que as avaliações experimentais foram realizadas utilizando a ferramenta my5G-RANtester [59], desenvolvida por membros do projeto Brasil 6G. O objetivo desses experimentos foi analisar como se comportam as diferentes implementações de código aberto dos núcleos de redes free5GC, Open5GS e NC5G, para a execução de procedimentos em escala. Nesse contexto, foram executados distintos experimentos, medindo o tempo de registro de cada equipamento de usuário e a largura de banda do plano de dados entre o equipamento de usuário e o núcleo da rede. Dentre os principais resultados obtidos, foi possível observar que o free5GC apresenta melhor desempenho em relação à largura de banda disponível para os equipamentos de usuários, enquanto o Open5GS apresenta melhor estabilidade durante o processo de registro de múltiplos equipamentos de usuários.

A Tabela 8 apresenta um breve sumário com os três projetos de código-aberto para o núcleo de redes móveis. Para cada projeto foram analisados aspectos funcionais, técnicos, destacando funcionalidades de Inteligência Artificial, Múltiplos Acessos, conformidade e Robustez. Além disso, foram atribuídos pesos para cada um desses aspectos. Somado a esses resultados de desempenho e aos aspectos funcionais apresentados na Tabela 8, optou-se por utilizar o núcleo free5GC para o projeto Brasil 6G. Esse projeto obteve a maior pontuação, alcançando 35 pontos. Além disso, essa escolha foi baseada na qualidade do código disponível por essa comunidade, onde esse projeto obteve a nota máxima. Por exemplo, o projeto utiliza a linguagem Go, aplicando boas práticas de programação orientada a eventos e micro serviços.

Tabela 8: Sumário dos aspectos levados em conta na decisão sobre qual o melhor *open source* para o núcleo do Proto 6G.

Aspecto	**Free5GC**	**Open5GS**	**CN5G (OAI)**	**Peso**
Funcional	2 funções do R16 não disponíveis	2 funções do R16 não disponíveis	3 funções do R16 não disponíveis	5
Técnico	Código Aberto, Comunidade muito ativa, alto número de cenários experimentais	Código Aberto, Comunidade em atividade média, médio número de cenários experimentais	Código Aberto, Comunidade em atividade baixa, baixo número de cenários experimentais	10
Inteligência Artificial	NWDAF não disponível	NWDAF não disponível	NWDAF não disponível	5
Múltiplos Acessos	N3IWF disponível	NA	NA	10
Conformidade	Apenas uma falha	Total	Apenas uma falha	5
Robustez	Estável	Estável	Instável	5
Conclusão (peso)	**35**	**30**	**25**	**40**

Finalmente, destaca-se que os projetos de código aberto analisados são, de fato, implementações para núcleos de redes 5G. Entretanto, esses projetos são baseados na arquitetura de micro

serviços (*Service Based Architecture* - SBA) que será utilizada nas redes 6G. Dessa forma, todos os testes e demonstrações que serão desenvolvidos ao longo do projeto Brasil 6G são baseados em um núcleo SBA, com suas funções aperfeiçoadas, estendidas seguindo os padrões 3GPP, ETSI e ITU. Além disso, baseado nesse núcleo SBA é possível propor novas funções disruptivas para suportar as demandas das redes 6G.

4 Ação 3 - Acesso do Proto 6G

Nesta seção, aprofundamos a discussão sobre o suporte a múltiplas redes de acesso no 5G rumo ao Proto 6G. Conforme descrito em [60], um dos princípios de projeto para redes 6G é a *superconvergência*, na qual redes de acesso 3GPP e não-3GPP, com ou sem fio, serão partes integrais de um único ecossistema. Nesse contexto, os aspectos de segurança e autenticação são críticos, tendo o núcleo 3GPP como a escolha natural para um caminho inicial da convergência. Isso se deve ao fato do próprio núcleo 5G já possuir componentes previstos para uma integração inicial e a possibilidade de sua extensão para um núcleo 6G superconvergente. Além disso, o núcleo de redes 3GPP é tradicionalmente projetado seguindo boas práticas no que diz respeito aos aspectos de segurança e autenticação, sendo, portanto, uma opção adequada para integração das redes de acesso. Usar um núcleo 3GPP para integração traz ainda a vantagem de ter disponível outras tecnologias que já vêm sendo integradas às redes 5G e posteriores, tais como fatiamento de rede, computação de borda e IA.

A arquitetura de referência do Sistema 5G (5GS) [61] prevê a integração de redes de acesso 3GPP e não-3GPP a partir do núcleo. Até o momento, o acesso 3GPP foi especificado para suportar as tecnologias 5G-*New Radio* (NR) e E-UTRA (*Long Term Evolution* (LTE)). O suporte às outras tecnologias de acesso é realizado através do modo não-3GPP que basicamente corresponde a outras tecnologias de comunicação que não foram especificadas pelo 3GPP, por exemplo, *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e *Data Over Cable Service Interface Specification* (DOCSIS) do *International Telecommunication Union - Telecommunication* (ITU-T). De acordo com o 3GPP [61, 62], a integração com o núcleo de redes de acesso não-3GPP pode ocorrer de três formas: confiável, não-confiável ou com fio (redes cabeadas). A principal diferença entre o acesso confiável e o não-confiável está no tipo de relação que existe entre o ponto de acesso sem fio não-3GPP e o núcleo 3GPP. No acesso confiável, o ponto de acesso sem fio pode garantir que a comunicação com o UE ocorre de acordo com os padrões 3GPP para segurança e autenticação. Assim, o UE pode realizar a sinalização de controle com o núcleo 5G de maneira similar a que faria em um acesso 3GPP, sem necessidade de procedimentos adicionais. No acesso não-confiável, não se sabe se o ponto de acesso sem fio pode garantir que a comunicação com o UE ocorre de acordo com os padrões 3GPP para segurança e autenticação, logo ele é declarado *não-confiável*. Portanto, o UE deve criar um canal seguro diretamente com o núcleo 3GPP e apenas sobre esse canal realizar sua sinalização de controle. Além disso, nativamente, apenas o acesso não-3GPP confiável oferece suporte a dispositivos que não são capazes de fazer sinalização NAS com o núcleo 3GPP, os quais são chamados de dispositivos *Non-5G Capable over WLAN* (N5CW). O acesso não-3GPP com fio parte da mesma premissa que o acesso confiável, mas adiciona componentes específicos ao núcleo 3GPP para realizar a integração. Neste relatório, esse tipo de acesso não será abordado por não ser um caminho adequado para as tecnologias que se tem interesse para avaliação do Proto 6G. Conforme será descrito posteriormente, há componentes distintos no núcleo 3GPP para lidar com acesso confiável e o acesso não-confiável.

A seguir, apresentamos os caminhos possíveis para integração das principais tecnologias de acesso exploradas no Proto 6G com um núcleo 3GPP, a saber: transceptor 6G de longa distância, Wi-Fi e IoT LPWAN. Ao final da seção, resumimos a discussão sobre o caminho preferencial e apresentamos informações adicionais sobre os demais componentes envolvidos.

4.1 Levantamento dos caminhos possíveis para integração do acesso via transceptor 6G de longa distância

A seguir, apresentamos três caminhos para integração do transceptor 6G a um núcleo 3GPP, considerando duas possibilidades através do acesso não-3GPP descrito previamente, mas também comentando sobre a possibilidade de criar um túnel 3GPP.

4.1.1 Caminho 1: Tunelamento no Acesso 3GPP

O acesso 3GPP é previsto para interligar redes como *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN) (3G), *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) (4G), *Next Generation RAN* (NG-RAN) (5G) e a provável evolução para redes 6G, ou seja, tecnologias propostas pelo próprio 3GPP. No entanto, utilizar uma rede de acesso 3GPP para transportar tráfego de tecnologias não-3GPP já foi explorado anteriormente na literatura [63, 64]. Para utilizar esse caminho para integração, é necessário conectar o UE 3GPP (através de qualquer tipo de tecnologia de camada de enlace que suporte a pilha IP sobre ela) ao computador que controla o transceptor 6G do lado *Base Station* (BS), identificado como BS-T6G, conforme ilustrado na Figura 8.

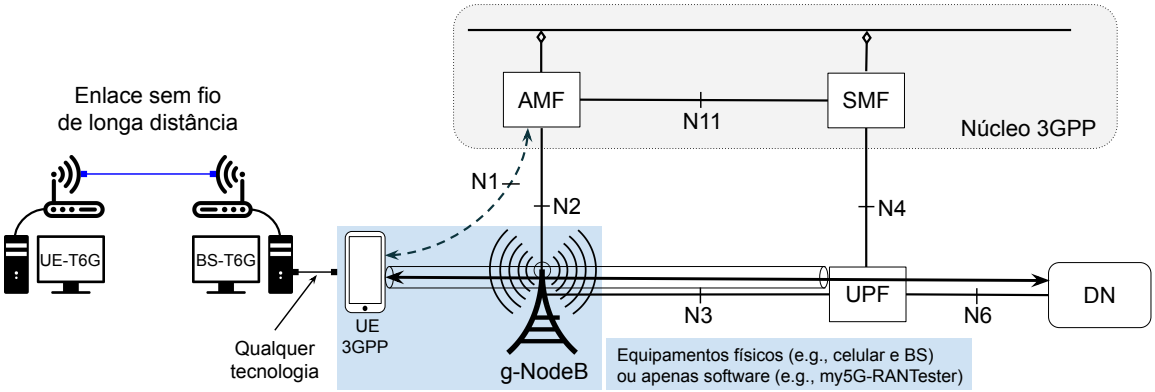


Figura 8: Comunicação vinda do Transceptor 6G passando por túnel em acesso 3GPP.

Tradicionalmente, o UE pode ser um dispositivo móvel celular ou um computador com modem que utiliza tecnologia 3GPP, por exemplo. Esse equipamento deve se comunicar com a rede de acesso 3GPP através uma BS também de tecnologia 3GPP, por exemplo, uma g-NodeB no caso de uma rede 5G, conforme ilustrado na Figura 8. No entanto, é possível implementar a sinalização entre UE e BS 3GPP sem a interface aérea e em software, conforme ilustrado pela ferramenta my5G-RANTester [59]. Ou seja, há grande flexibilidade para implementação do UE e da BS 3GPP, por exemplo, ambos podem executar em um único computador, conforme ilustrado também na Figura 8. Por um lado, esse caminho tem as vantagens de ser uma abordagem já adotada na literatura e de já existir software disponível para integração. Por outro lado, essa abordagem não é aderente ao projeto previsto para as redes de acesso 3GPP e isso pode trazer algumas consequências. Por exemplo, o tráfego não-3GPP passa a ser transportado como tráfego 3GPP, violando aspectos de segurança. Além disso, recursos reservados para tráfego 3GPP passam a ser inadvertidamente cedidos para tráfego não-3GPP.

4.1.2 Caminho 2: Acesso Não-3GPP Não-confiável com UE no dispositivo

No acesso não-confiável, não há garantia sobre o nível de segurança oferecido pela rede de acesso não-3GPP. Portanto, devem ser tomadas ações para garantir que o tráfego de controle com o núcleo 3GPP seja transportado sobre uma conexão segura. O principal componente para suportar a rede de acesso não-3GPP não-confiável é a função *Non-3GPP Interworking Function* (N3IWF), a qual foi introduzida no lançamento 15 do 3GPP [65] e visa atuar como um *gateway* para comunicação entre UE e o núcleo 3GPP. O principal uso previsto para a N3IWF é em conjunto com o Wi-Fi, mas outras tecnologias não-3GPP podem também se beneficiar dessa componente para realizar a integração com o núcleo 3GPP. Portanto, é uma opção viável para o transceptor 6G de longa distância, conforme ilustrado na Figura 9. A configuração apresentada é a mais aderente aos padrões, pois considera que o software do UE não-3GPP será executado no computador que controla o transceptor 6G do lado UE, o qual é identificado como UE-T6G.

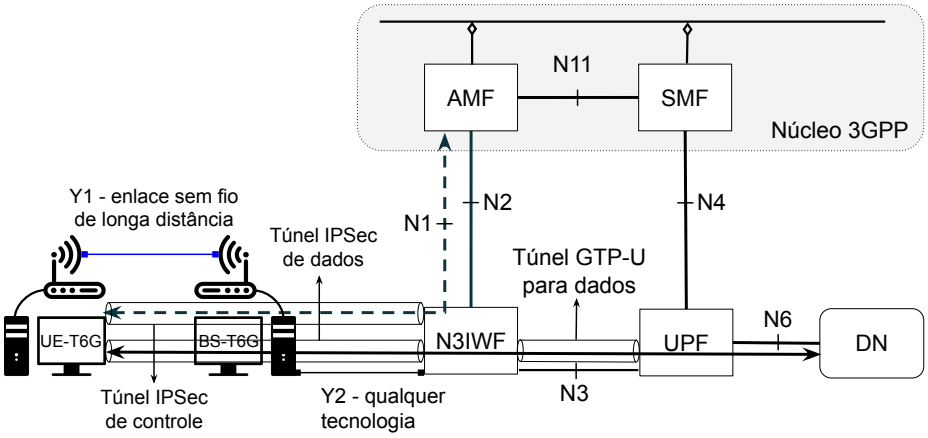


Figura 9: Acesso não-3GPP não-confiável com UE (lógico) no dispositivo.

Conforme ilustrado na Figura 9, a N3IWF se conecta à AMF via interface N2 no plano de controle. Para tráfego de dados no plano de usuário, a interface N3 conecta a N3IWF à UPF. Após o processo de autenticação e autorização, os dispositivos não-3GPP acessam o núcleo 3GPP através de uma rede de acesso não-3GPP para realizar a sinalização NAS através da interface N1. Neste contexto, a transferência de pacotes de dados entre UE e uma rede de dados qualquer (por exemplo, a Internet) usa um túnel *Internet Protocol Security* (IPSec) entre o UE e a N3IWF. Além disso, é estabelecido um túnel *GPRS Tunnelling Protocol for User Data* (GTP-U) para transporte de dados entre a N3IWF e a UPF. O computador que controla o transceptor 6G realiza tarefas de processamento de sinal que são altamente demandantes e, portanto, pode não ser adequado executar o software do UE não-3GPP neste computador. Se esse for o caso, uma alternativa é conectar a ele outro computador através de uma tecnologia de enlace qualquer (e.g., Ethernet) que suporte sobre ela uma pilha IP para execução do UE não-3GPP, conforme ilustrado na Figura 10. Conceitualmente, essa configuração separa o UE lógico (i.e., o software do UE não-3GPP) do UE físico (i.e., o UE-T6G), mas oferece as mesmas funcionalidades.

Este caminho baseado no acesso não-3GPP não-confiável com UE no dispositivo foi identificado como o mais adequado para integrar o transceptor 6G a um núcleo 3GPP. Qualquer uma das configurações apresentadas nas Figuras 9 e 10 pode fornecer a conectividade necessária e se beneficiar das características do acesso não-3GPP não-confiável. Por exemplo, todo o tráfego

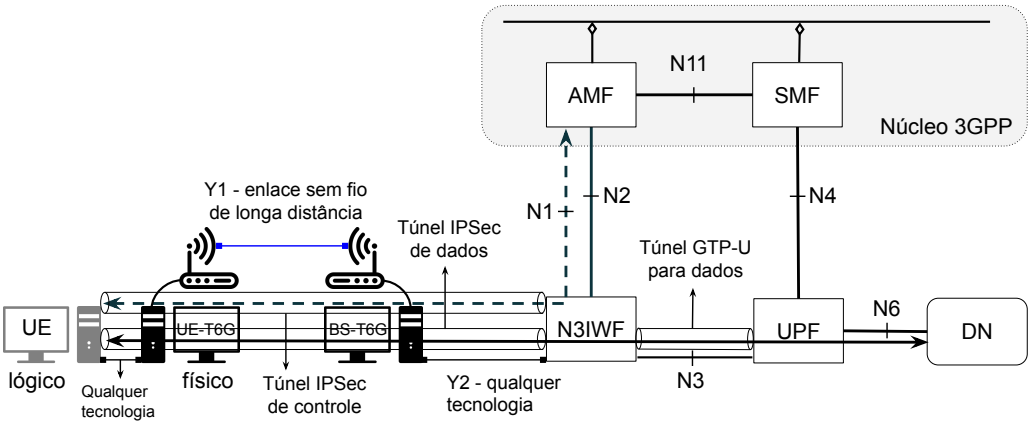


Figura 10: Acesso não-3GPP não-confiável com UE (lógico) em dispositivo extra.

não-3GPP é transportado de forma segura desde o UE até a UPF. Adicionalmente, passa a ser possível configurar adequadamente parâmetros de QoS para os fluxos entre essas extremidades, i.e., entre UE e UPF.

4.1.3 Caminho 3: Acesso Não-3GPP Não-confiável com UE na BS

Dada a flexibilidade do software do UE não-3GPP, é possível executá-lo também no computador que controla o transceptor 6G do lado BS, i.e., no BS-T6G, conforme ilustrado na Figura 11. A figura mostra que, nessa configuração, a separação entre UE lógico e UE físico e a colocação do UE lógico no BS-T6G leva à terminação dos túneis para tráfego de controle e de dados nesse computador.

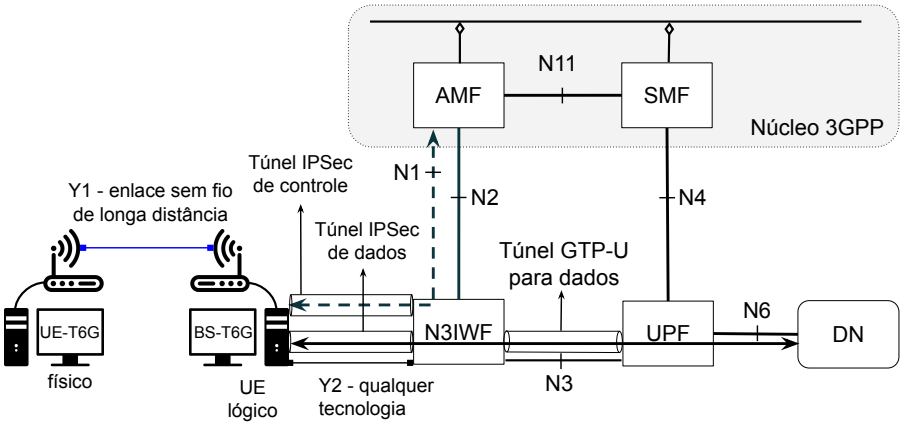


Figura 11: Acesso não-3GPP não-confiável com UE (lógico) na BS.

Apesar da configuração apresentada na Figura 11 ter o potencial de realizar a integração entre os transceptores 6G com um núcleo 3GPP, esse caminho apresenta mais pontos negativos que positivos. Por um lado, é positivo o fato do enlace sem fio formado entre os transceptores 6G não sofrer com a sobrecarga de controle e comunicação segura utilizada pelo UE não-3GPP. Por outro lado, isso significa também que não há qualquer garantia sobre a segurança dessa comunicação, expondo eventualmente o tráfego que será injetado através do acesso não-3GPP e, portanto, não aderindo ao projeto sugerido pelo 3GPP e às expectativas com relação à segurança e privacidade em redes 6G [60, 66]. Além disso, o BS-T6G já tende a ser mais

demandado em termos de processamento, pois eventualmente pode atender múltiplos UEs, logo, é negativo também o fato de aumentar a chance de haver necessidade de um computador auxiliar adicional, similar ao que foi ilustrado na Figura 10, mas do lado da BS. Caso haja múltiplos UEs físicos conectados à BS, há outro ponto negativo, pois essa configuração também cria mais uma tarefa a ser realizada caso se queira separar o tráfego dos UEs físicos em diferentes túneis de dados ou em diferentes UEs lógicos. A separação é útil por aspectos de segurança e, eventualmente, de qualidade de serviço e ocorreria de maneira mais simples se cada UE físico tivesse um UE lógico (i.e., um UE não-3GPP) associado a ele. No entanto, realizar essa separação no BS-T6G é complexa, se precisar ser dinâmica, ou limitada, se puder ser feita de maneira estática. Basicamente, o problema se trata de criar regras de encaminhamento de tráfego IP vindo de diferentes UEs físicos para diferentes túneis de dados ou diferentes UEs lógicos. Ou seja, uma complicação adicional que pode ser evitada.

4.2 Levantamento dos caminhos possíveis para integração do acesso via Wi-Fi

Conforme descrito anteriormente, a integração de uma rede sem fio não-3GPP ao núcleo 3GPP pode ser realizada através de acesso confiável ou não-confiável. Além disso, para Wi-Fi, também é possível utilizar a conectividade oferecida pela integração do transceptor 6G para intermediar a comunicação com o núcleo 3GPP. A seguir, apresentamos mais detalhes a respeito desses três caminhos e discutimos os aspectos positivos e negativos de cada um no contexto do Proto 6G.

4.2.1 Caminho 1: Acesso Não-3GPP Confiável

O padrão 3GPP não define o nível de confiança satisfatório para uma rede não-3GPP, mas podemos inferir que é esperado um comportamento semelhante ao de uma rede 3GPP [67]. A Figura 12 ilustra os principais componentes de hardware e software envolvidos no acesso não-3GPP confiável. No acesso não-3GPP confiável, o operador da infraestrutura tem controle total do *Trusted Non-3GPP Access Point* (TNAP) e do acesso ao enlace de rádio. Portanto, a criptografia é controlada pelo operador ou há confiança na segurança oferecida pela rede de acesso não-3GPP. O componente TNAP permite que os UEs acessem a rede de acesso confiável usando tecnologia de acesso sem fio ou com fio não-3GPP. A componente de software *Trusted Non-3GPP Gateway Function* (TNGF) expõe as interfaces N2 e N3 para permitir a conexão do UE ao núcleo 3GPP pela rede de acesso confiável. O acesso não-3GPP confiável também pode ser oferecido para dispositivos incapazes de realizar a sinalização NAS, i.e., dispositivos N5CW. Esse tipo de acesso é oferecido através de um *Trusted WLAN Access Point* (TWAP) e de uma *Trusted WLAN Interworking Function* (TWIF). Nessa configuração, a TWIF realiza a sinalização NAS "em nome" do dispositivo N5CW, através do ponto de referência N1.

Há dois fatores que tornam desfavorável a adoção desse caminho para o Proto 6G. O primeiro fator é que, até o momento, não há implementações de código aberto das componentes TNGF e TWIF. Portanto, a adoção desse caminho implicaria em um significativo esforço de desenvolvimento de software de pelo menos um desses componentes e sua integração com o seu componente correspondente, i.e., TNAP ou TWAP. O segundo fator é que a adoção do acesso não-3GPP confiável significa que os pontos de acesso Wi-Fi utilizados são sempre dispositivos com nível de segurança satisfatório de acordo com o padrão 3GPP. Considerando que segurança desde o projeto é outro aspecto importante para redes 6G, avaliamos que o Proto 6G pode se

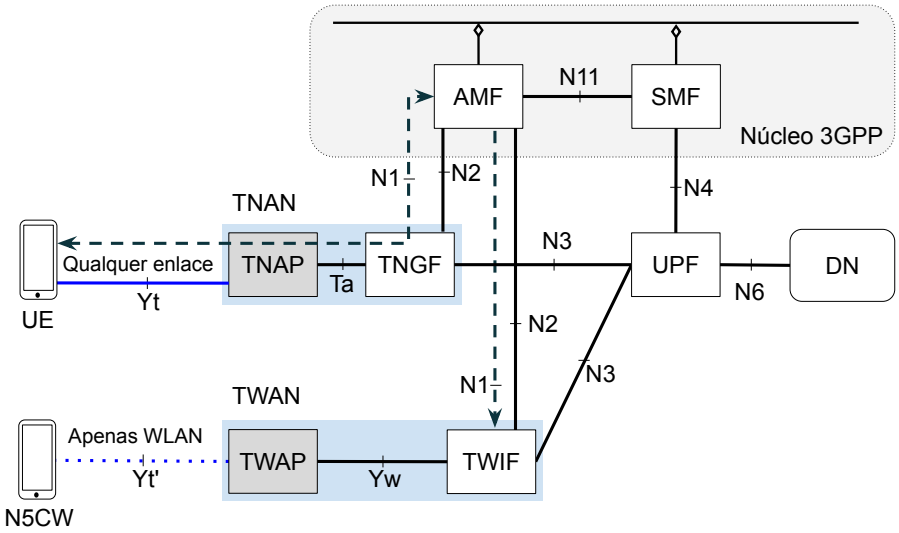


Figura 12: Acesso não-3GPP confiável.

beneficiar de uma abordagem conservadora que considera redes não-3GPP inerentemente não confiáveis e, portanto, precisam de medidas adicionais para a garantia dessa segurança.

4.2.2 Caminho 2: Acesso Não-3GPP Não-confiável

A Figura 13 ilustra como o acesso não-3GPP não-confiável pode ser utilizado para integrar um dispositivo de usuário que utiliza Wi-Fi a um núcleo 3GPP. Naturalmente, é similar ao que foi apresentado na Figura 9, porém, neste contexto, o enlace sem fio utiliza o padrão IEEE 802.11 (i.e., Wi-Fi).

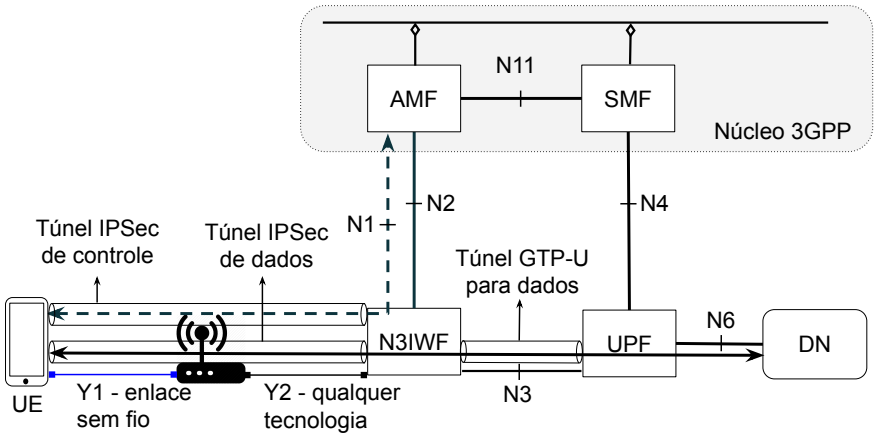


Figura 13: Acesso não-3GPP não-confiável.

Conforme descrito anteriormente, utilizar o acesso não-3GPP não-confiável, sobretudo com o UE lógico sendo executado no UE físico é o caminho que se mostrou mais adequado. No entanto, a Figura 13 ilustra uma dificuldade que pode surgir em um cenário relevante: o uso de dispositivos móveis celulares. Atualmente, o código aberto disponível do UE não-3GPP foi desenvolvido e testado em computadores convencionais com arquitetura x86 e, portanto, não foi embarcado e nem avaliado em outras plataformas, por exemplo, ARM executando sistema operacional Android. Assim, consideramos que esse é um caminho viável, caso o UE físico seja

um computador convencional. No entanto, não é um caminho adequado se o UE físico for um dispositivo móvel celular, como um *smartphone* ou um *tablet*.

4.2.3 Caminho 3: Acesso via AP Wi-Fi conectado ao UE transceptor 6G de longa distância

Conforme mostrado em [68], uma versão anterior dos transceptores 6G foi utilizada para criar um *backhaul* sem fio para transportar o tráfego de múltiplas tecnologias (e.g., Wi-Fi, LoRa e Sigfox). No entanto, os componentes foram desenvolvidos com a finalidade de dar suporte aos processos de teste e experimentação na prova de conceito realizada. Ou seja, eles não se destinavam a fornecer uma implementação completa do UE e do núcleo 5G, o que significa que recursos como QoS e fatiamento de rede não podiam ser explorados. Agora, nosso intuito é usar um núcleo 3GPP mais avançado e uma versão do UE mais completa. A Figura 14 ilustra como os transceptores 6G podem ser utilizados para estabelecer um *backhaul* sem fio para transportar o tráfego advindo de um *Access Point* (AP) Wi-Fi, usando o acesso não-3GPP não-confiável.

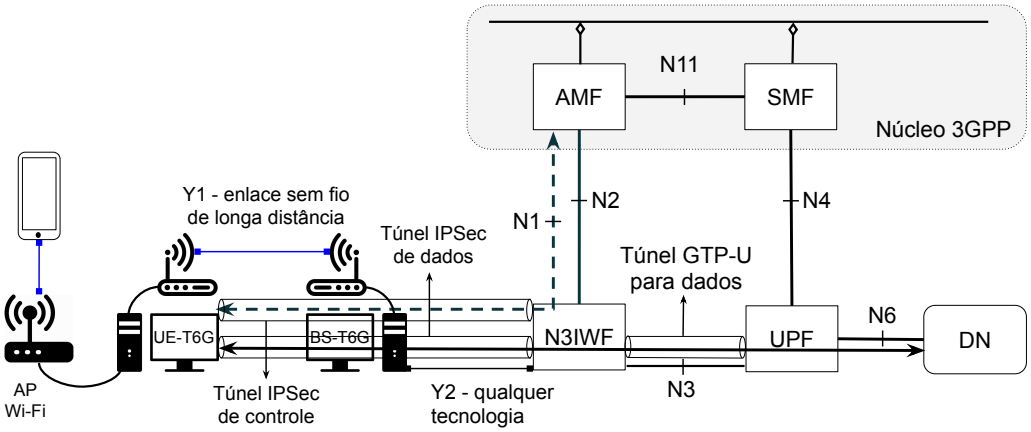


Figura 14: Acesso via AP Wi-Fi conectado ao UE transceptor 6G de longa distância.

O caminho ilustrado pela Figura 14 é adequado quando a estação (ou cliente) Wi-Fi é um *smartphone* ou um *tablet*, mas também pode ser usado se a estação for um computador convencional. A conectividade entre o AP Wi-Fi e o UE-T6G pode ser estabelecida usando uma tecnologia de enlace qualquer (e.g., Ethernet) que suporte sobre ela uma pilha IP. Caso seja necessário o uso de um computador adicional para execução do software do UE não-3GPP, como ilustrado na Figura 10, também não há restrições. Portanto, esse caminho é o mais adequado para integração de dispositivos com conectividade Wi-Fi a um núcleo 3GPP no Proto 6G.

4.3 Levantamento dos caminhos possíveis para integração do acesso IoT LPWAN

A integração de tecnologias de acesso não-3GPP do tipo IoT *Low-Power Wide-Area Network* (LPWAN) são especialmente importantes devido ao grande número de dispositivos que dependem dessas tecnologias para se comunicar. Além disso, sobretudo do ponto de vista do operador de infraestrutura de comunicações, a integração dessas tecnologias pode trazer benefícios relevantes, como o monitoramento centralizado do tráfego. Por outro lado, conforme descrito a seguir, o 3GPP não descreve de maneira explícita como tecnologias de acesso não-3GPP do tipo IoT LPWAN podem ser integradas a um núcleo 3GPP.

4.3.1 Caminho 1: Acesso via IoTSDGw – variante do acesso Não-3GPP Não-confiável

A ausência de clareza do 3GPP sobre como a integração de tecnologias de acesso não-3GPP do tipo IoT LPWAN com um núcleo 3GPP motivou alguns trabalhos na literatura [63, 69, 70]. No entanto, nenhum dos trabalhos disponibilizou o software que permitisse a efetiva integração de uma rede IoT LPWAN com um núcleo 3GPP de uma rede 5G ou posterior. Isso motivou o desenvolvimento do software IoT *Software-Defined Gateway*, ou simplesmente IoTSDGw[2]. A Figura 15 ilustra os principais componentes do IoTSDGw e sua integração com um núcleo 3GPP. O intuito do IoTSDGw é oferecer uma integração entre uma rede de acesso IoT LPWAN com um núcleo 3GPP através de uma extensão do *gateway* da tecnologia IoT LPWAN de interesse e de um controlador SDN que passa a compor a parte de *Service Management and Orchestration* (SMO), além de interagir com o núcleo 3GPP. A Figura 15 mostra uma instância do IoTSDGw projetada para uma rede LoRaWAN. Nesse contexto, o *gateway* LoRaWAN é modificado para receber um agente IoTSDGw que é responsável por criar sob demanda instâncias de UE não-3GPP e associá-las com dispositivos IoT, ou seja, com os UEs físicos. As associações são comandadas pelo controlador IoTSDGw, o qual também tem entre suas tarefas interagir com o núcleo 3GPP cadastrar os dispositivos e com serviços LoRaWAN para identificar como as associações devem ser realizadas e eventuais parâmetros de QoS necessários pelas aplicações.

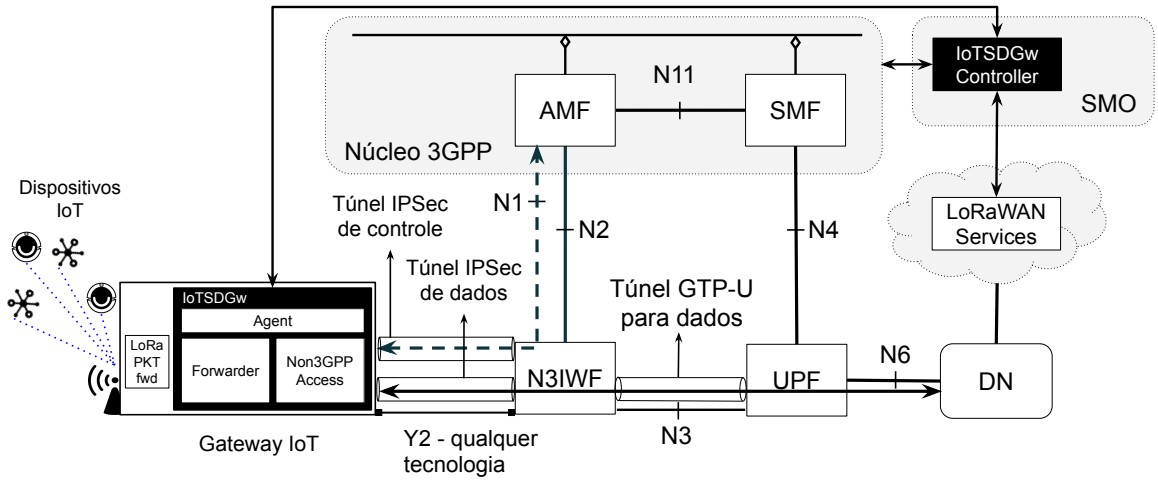


Figura 15: Acesso via IoTSDGw, o qual é uma variante do acesso Não-3GPP Não-confiável.

A principal desvantagem desse caminho baseado no IoTSDGw é a dificuldade de generalização da solução. Embora tenha sido projetado conceitualmente para diferentes tecnologias de acesso não-3GPP do tipo IoT LPWAN, apenas uma implementação para LoRaWAN foi realizada, usando como base o software de código aberto ChirpStack[3]. Ou seja, atualmente, o IoTSDGw não é capaz de integrar outras tecnologias IoT LPWAN, e.g., Sigfox. Além disso, o IoTSDGw foi pouco testado e possui uma comunidade muito restrita de mantenedores, tornando lenta a correção de falhas e implementação de eventuais funcionalidades que se mostrem necessárias. Portanto, o caminho baseado no IoTSDGw não parece ser adequado no curto prazo, podendo ser reavaliado em outro momento no contexto do Proto 6G.

[2]https://github.com/my5G/IoTSDGw_orchestrator
[3]https://www.chirpstack.io/

4.3.2 Caminho 2: Acesso via gateway IoT conectado ao UE transceptor 6G de longa distância

Conforme descrito anteriormente, os transceptores 6G podem ser utilizados para criar um *backhaul* sem fio para transportar o tráfego de múltiplas tecnologias (e.g., Wi-Fi, LoRa e Sigfox). A Figura 15 ilustra esse caminho com um *gateway* IoT LPWAN genérico, o qual é conectado ao UE-T6G. Novamente, essa conexão pode ser estabelecida usando uma tecnologia de enlace qualquer (e.g., Ethernet) que suporte sobre ela uma pilha IP. Também não há restrições caso seja necessário o uso de um computador adicional para execução do software do UE não-3GPP, conforme ilustrado na Figura 10.

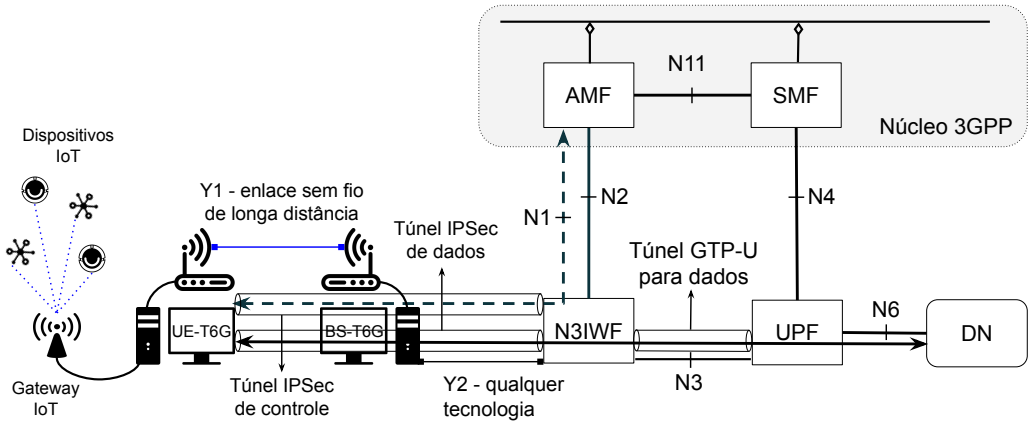


Figura 16: Acesso via gateway conectado ao UE transceptor 6G de longa distância.

Assim como descrito para a tecnologia Wi-Fi, esse caminho é o mais adequado para integração de dispositivos que utilizam tecnologias de acesso não-3GPP do tipo IoT LPWAN com um núcleo 3GPP no Proto 6G. Afinal, esse caminho pode ser usado por diferentes tecnologias IoT LPWAN, inclusive simultaneamente. Além disso, esse caminho ilustra o potencial dos transceptores 6G e se baseia em software que está mais estável. Vale destacar que a adoção desse caminho não inviabiliza a adoção de outros futuramente, pois é possível combinar múltiplas soluções de integração de redes de acesso não-3GPP a um núcleo 3GPP.

4.4 Comparação e determinação de caminho preferencial

Em linhas gerais, a determinação de caminho preferencial tem como motivações principais mostrar o potencial do projeto de avançar o estado da arte e aumentar a chance de sucesso do Proto 6G, i.e., minimizar riscos. Na Tabela 9, apresentamos os principais critérios usados para a determinação de caminho preferencial para integração de redes de acesso não-3GPP a um núcleo 3GPP. O critério **Generalidade** diz respeito à capacidade atender diferentes configurações em uma dada tecnologia de acesso. Por exemplo, o Caminho 2 para Wi-Fi tem média generalidade porque não atende dispositivos móveis celulares, enquanto o Caminho 1 para IoT LPWAN baixa generalidade porque atende apenas LoRaWAN. O critério **Estabilidade/Disponibilidade** se refere ao software, o qual pode estar diferentes estágios de desenvolvimento e maturidade, ou simplesmente não estar disponível publicamente. O critério **Coerência** está ligado aos conceitos e aos padrões. Por exemplo, o Caminho 1 tem baixa coerência para adoção nos transceptores 6G de longa distância porque se propõe a transportar tráfego não-3GPP como se fosse 3GPP. Por fim, o critério **Funcionalidades** se refere as recursos que podem estar disponíveis no núcleo 3GPP e, eventualmente, também na rede de transporte ao se escolher um determinado caminho.

Tabela 9: Resumo sobre os caminhos possíveis para integração de redes de acesso não-3GPP a um núcleo 3GPP.

Rede não-3GPP Caminhos	**Generalidade**	**Estabilidade/ Disponibilidade**	**Coerência**	**Funcionalidades**
Transceptores 6G de longa distância				
Caminho 1: Tunelamento no Acesso 3GPP	Alta	Adequada	Baixa	Várias
Caminho 2: Acesso Não-3GPP Não-confiável com UE no dispositivo	Alta	Adequada	Alta	Várias
Caminho 3: Acesso Não-3GPP Não-confiável com UE na BS	Média	Adequada	Média	Poucas
Wi-Fi				
Caminho 1: Acesso Não-3GPP Confiável	Alta	Inexistente	Alta	Várias
Caminho 2: Acesso Não-3GPP Não-confiável	Média	Adequada	Alta	Várias
Caminho 3: Acesso via AP Wi-Fi conectado ao UE transceptor 6G de longa distância	Alta	Adequada	Alta	Várias
IoT LPWAN				
Caminho 1: Acesso via IoTSDGw - variante do acesso Não-3GPP Não-confiável	Baixa	Média	Alta	Várias
Caminho 2: Acesso via gateway IoT conectado ao UE transceptor 6G de longa distância	Alta	Adequada	Alta	Várias

Assim, a Tabela 9 resume as motivações para escolher o acesso não-3GPP não-confiável (Caminho 2 em conectividade dos Transceptores 6G) para integrar os transceptores 6G ao núcleo 3GPP, assim como utilizar o enlace formado por esses transceptores para fornecer um *backhaul* sem fio para transportar o tráfego das demais tecnologias, e.g., Wi-Fi, LoRa e Sigfox (Caminho 3 em conectividade Wi-Fi e Caminho 2 em conectividade LPWAN). Vale relembrar que esse caminho preferencial escolhido inicialmente não torna inviável a adoção futura de outros caminhos listados na tabela. Também é interessante observar que é possível conectar simultaneamente múltiplas tecnologias a um único UE-T6G, assim como é possível ter tecnologias diferentes conectadas a computadores diferentes, cada um controlando um transceptor 6G do lado UE diferente, ou seja, usar múltiplos computadores atuando como UE-T6G.

5 Ação 4 - Plataforma da META 2

Nessa seção, apresentamos alguns caminhos possíveis para a plataforma do Projeto Brasil 6G visando suporte ao núcleo, acesso e aplicações, ou seja, ao Proto 6G como um todo. A plataforma é a infraestrutura física e cibernética sobre a qual a integração de componentes, implantação, experimentação e demonstração do Proto 6G que será realizada na Atividade 5.3. O levantamento dos caminhos possíveis incluiu:

- Integração com a Rede FIBRE da RNP - Essa opção se mostrou ser de consenso nas reuniões das METAS 5, 2 e 6.
- Integração com *Cloud Computing* - Dois caminhos possíveis apareceram e passaram a ser investigados: *Cloud privada* e *cloud* da Universidade Federal de Goiás.
- Caminho Local *Standlone* - Essa opção apareceu nas reuniões das METAS 5, 2 e 6. Trata-se de uma alternativa à integração com o FIBRE RNP. Só será utilizado em caso de não ser possível continuar com o projeto no FIBRE por motivo desconhecido nesse momento. Tal caminho é muito semelhante ao FIBRE RNP, sendo em essência uma adaptação do mesmo com outras máquinas dos laboratórios participantes. Pode haver perda no escopo da Plataforma devido a falta de recursos de infraestrutura duplicados no Inatel.

5.1 Levantamento de Caminhos para Integração com FIBRE RNP

Um levantamento dos possíveis caminhos para a integração das instituições participantes ao Projeto FIBRE da RNP foi feito. A partir desse levantamento, um esforço de modernização da ilha FIBRE do Inatel que já estava em andamento foi concluído em Abril de 2022. Um trabalho de integração interna dos laboratórios do Inatel a essa ilha foi também realizado. Os primeiros testes de conectividade interna foram concluídos em Abril de 2022. A Figura 17 ilustra o cenário de conectividade desenvolvido para a Plataforma da META 2 do Projeto Brasil 6G - Fase 2.

Os seguintes componentes fazem parte da infraestrutura do projeto:

- **CRR** - Possui disponível transceptores 6G com *Software Defined Radio* (SDR) USRP MIMO 2x2 com largura de banda de 24 MHz. Dois drones também já encontram disponíveis. Em termos de conectividade *Non-3GPP Access* (N3A) tem-se LoRaWAN, Wi-Fi e Sigfox (que demanda ativação de licença). A introdução de outro SDR, o XTRX/LIME MIMO 2x2 é prevista a acontecer. Dois servidores para IA serão adquiridos, bem como um servidor *edge* FIBRE 5. Associado ao CRR, tem-se o terminal de satélite em parceira com o Projeto SINDISAT C, em execução com o Inatel. É no CRR que os cenários de *fronthaul* e *backhaul* possíveis de serem construídos com o transceptor *Generalized Frequency Division Multiplexing* (GFDM) serão desenvolvidos. O CRR também traz algumas aplicações para o projeto.
- **WOCA** - Possui diversos cenários *Free-space Optical Communication* (FSO), VLC, ondas milimétricas e *central office* desenvolvidos com o estado da arte para 6G. Esses cenários sem somam aos demais e poderão ser combinados com enlaces de fibra óptica para emular redes metropolitanas, incluindo novos tipos de antenas e sistemas rádio sobre fibra. Um servidor *edge* FIBRE 6 é previsto para interconectar o WOCA ao restante da ilha FIBRE no Inatel.

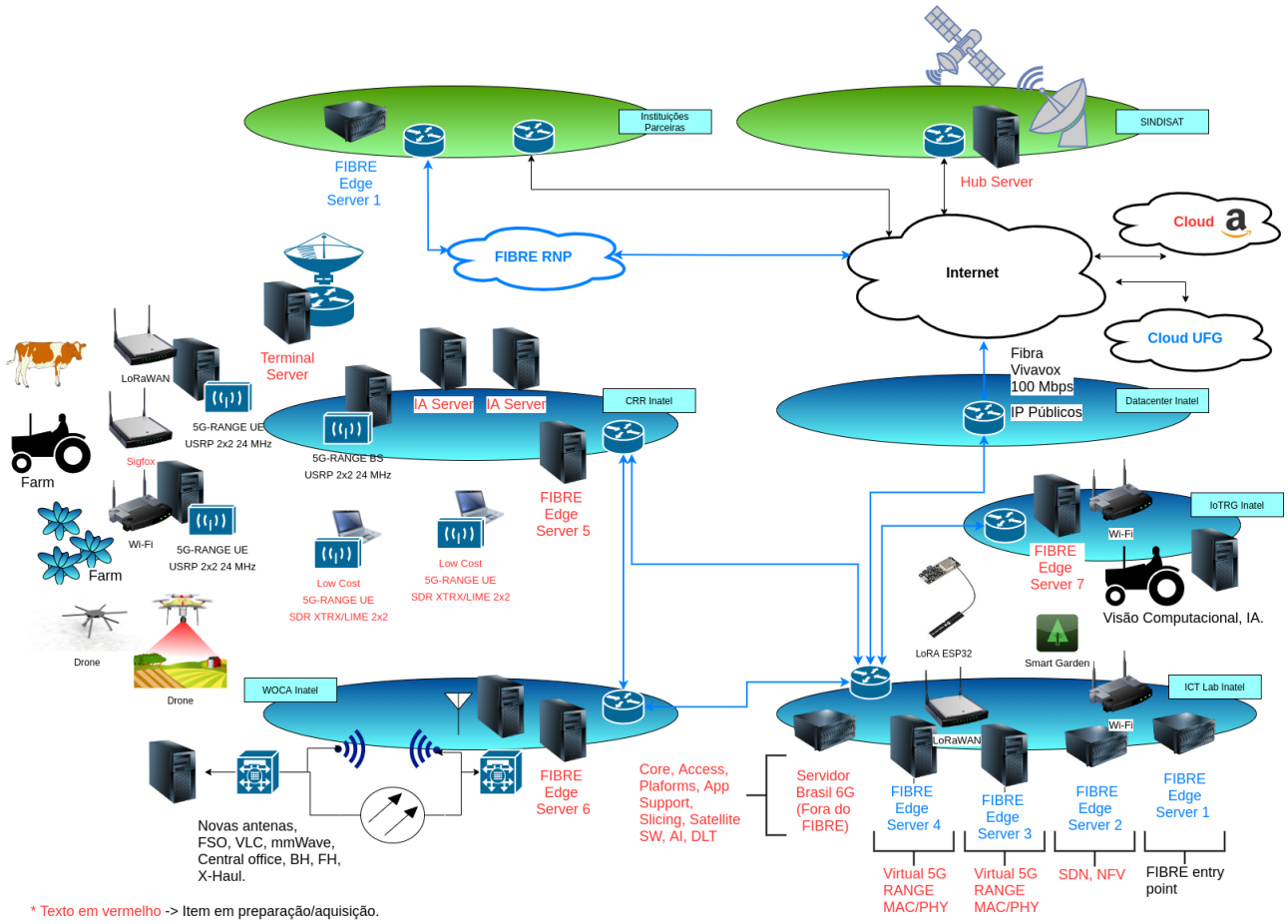


Figura 17: Cenário de conectividade desenvolvido para a Plataforma da META 2 integrada ao FIBRE RNP. Os itens em preto/azul já se encontravam disponíveis na Plataforma em Abril de 2022. Os itens em vermelho estavam em preparação/aquisição na data desse desenho.

- **ICT Lab** - Possui um pequeno *datacenter* usado pela pesquisa, onde são acomodados os servidores *edge* 1-4 do FIBRE. O servidor *edge* FIBRE 1 é ponto de entrada da ilha Inatel. Inicialmente, o servidor *edge* FIBRE 2 está previsto para suportar SDN/NFV. Os servidores *edge* FIBRE 3 e 4 suportarão um ou mais enlaces conteinerizados e emulados do transceptor do Inatel. Ou seja, enlace virtuais com MAC/PHY idênticos ao desenvolvido na contraparte física do transceptor. Entretanto, a parte de RF não é disponibilizada, sendo substituída pelas placas de rede Ethernet dos respectivos servidores. O servidor Brasil 6G irá hospedar a maioria do software da META 5, incluindo Proto 6G núcleo, acesso, plataformas, suporte a aplicações da META 6, fatiamento fim a fim, software dos cenários com satélite, IA e DLT. Este servidor não fará parte da ilha FIBRE, sendo cascateado no servidor *edge* FIBRE 1. O servidor Brasil 6G é especificado na Subseção 5.5 desse relatório. O ICT Lab contribui com algumas aplicações da META 6. Por fim, é no ICT Lab que chega a conexão externa da ilha FIBRE oferecida pelo operador parceiro do laboratório, a Vivavox. A taxa da conexão é de 100 Mbps entregue no laboratório por uma *Virtual Local Area Network* (VLAN) a partir do *datacenter* do Inatel.

- **IoT RG** - Sua participação é focada nas aplicações da META 6. Hospeda o servidor *edge* FIBRE 6.

- **Datacenter** - Oferece passagem para o acesso do ICT Lab a Internet, bem como os IPs públicos usados na ilha do FIBRE.
- **FIBRE RNP** - Interconecta as ilhas da UFG, Unisinos e Inatel, dentre outras instituições participantes do projeto.
- **Cloud Privada** - Possível de ser integrada ao projeto. Até o momento de fechamento desse relatório tal possibilidade não foi a frente, infelizmente.
- **Cloud UFG** - Cloud da Universidade de Goiás integrada ao projeto.
- **SINDISAT** - Parceiro do Inatel no Projeto C. Oferece enlace de satélite a esse projeto, integrado ao Brasil 6G. Oferece *hub* satelital onde o sinal de satélite é desembarcado e pode seguir viagem pela Internet fechando um laço até a UFG, cloud privada ou Inatel. Através da Internet, o ICT Lab poderá configurar componentes, experimentos, etc. no *hub* satelital do(s) parceiro(s) SINDISAT. O enlace entrou em instalação em outubro de 2022. Devido a problemas burocráticos de licenças necessárias para instalação no campus do Inatel, ainda não foi finalizada.

5.2 Levantamento de Caminhos para Integração com *Cloud Computing*

5.2.1 Caminho 1: Cloud Universidade Federal de Goiás (UFG)

O paradigma de computação em nuvem introduziu um novo modelo de entrega de serviços onde *data centers* que hospedam um conjunto de recursos de Tecnologia da Informação atendem múltiplas demandas de serviços diferentes, atribuindo recursos de processamento e armazenamento às aplicações de forma dinâmica e elástica. Nos últimos anos, operadores de redes móveis vem evoluindo suas infraestruturas para ambientes de execução similares ao encontrados nos *data centers* de computação em nuvem. Essa evolução é motivada em grande parte por novos modelos de negócios, bem como a necessidade de reduzir custos pelo uso de *hardware* de proposito geral e funções de redes virtualizadas. Uma consequência dessa evolução é que a rede móvel de próxima geração traz a possibilidade de implantar serviços em larga escala e envolvendo múltiplos sites, como a rede de acesso.

O Laboratório Multiusuário de Computação de Alto Desempenho (LaMCAD) é um centro multiusuário voltado para atender à demanda por computação científica da Universidade Federal de Goiás (UFG) e de universidades parceiras com as quais o laboratório pode estabelecer colaborações. O objetivo do laboratório é oferecer à comunidade acadêmica da UFG e instituições parceiras recursos computacionais voltados para computação científica que demandam alto poder de processamento, bem como serviços de computação em nuvem. Para atingir esse objetivo, o Laboratório provê dois ambientes distintos: um ambiente de *High Performance Computing* (HPC) e um ambiente de *Cloud Computing*.

No projeto, usamos recursos do ambiente de *Cloud Computing*, como ilustrado na Figura 18. Esses recursos são acessados pela Internet e consistem em 4 *Virtual Machines* (VMs), cada uma com as seguintes configurações de hardware: 2 vCPUS, 12 GB RAM e 100GB HD. Em cada *Virtual Machine* (VM), implantamos o sistema operacional Ubuntu 20.04 com módulo *GPRS Tunnelling Protocol* (GTP) para 5G, um kernel Linux customizado para tratar pacotes do protocolo *Packet Forwarding Control Protocol* (PFCP). Usando as 4 VMs, implantamos um *cluster* Kubernetes com 4 nós, sendo 1 nó *master* e 3 nós *workers*. Sobre o *cluster* Kubernetes,

implantamos o banco de dados Mongo DB e a plataforma free5GC [71]. Esta última consiste em um projeto de código aberto que implementa *Core Network* (CN) para o 5G segundo especificações definidas no *Release* 15 do 3GPP [72]. Para gerenciar redes e subredes necessárias para a comunicação interna nos protocolos NGAP e NAS com a CN 5G, utilizamos dois *Container Network Interface* (CNI), a saber: Multus [73] e flannel [74].

As VMs descritas acima estão disponível publicamente através dos seguintes endereços:

- Endereço IP da VM1: 200.137.215.86/24.
- Endereço IP da VM2: 200.137.215.87/24.
- Endereço IP da VM3: 200.137.215.88/24.
- Endereço IP da VM4: 200.137.215.89/24.

O acesso às VMs acontece via SSH pela porta 42112. A escolha dessa porta é um protocolo do LaMCAD para VMs de pesquisa e não pode ser alterada. No contexto do projeto, a implantação ilustrada na Figura 18 vem sendo usada para emular uma CN e demonstrar cenários de fatiamento de rede relacionados à META 2.

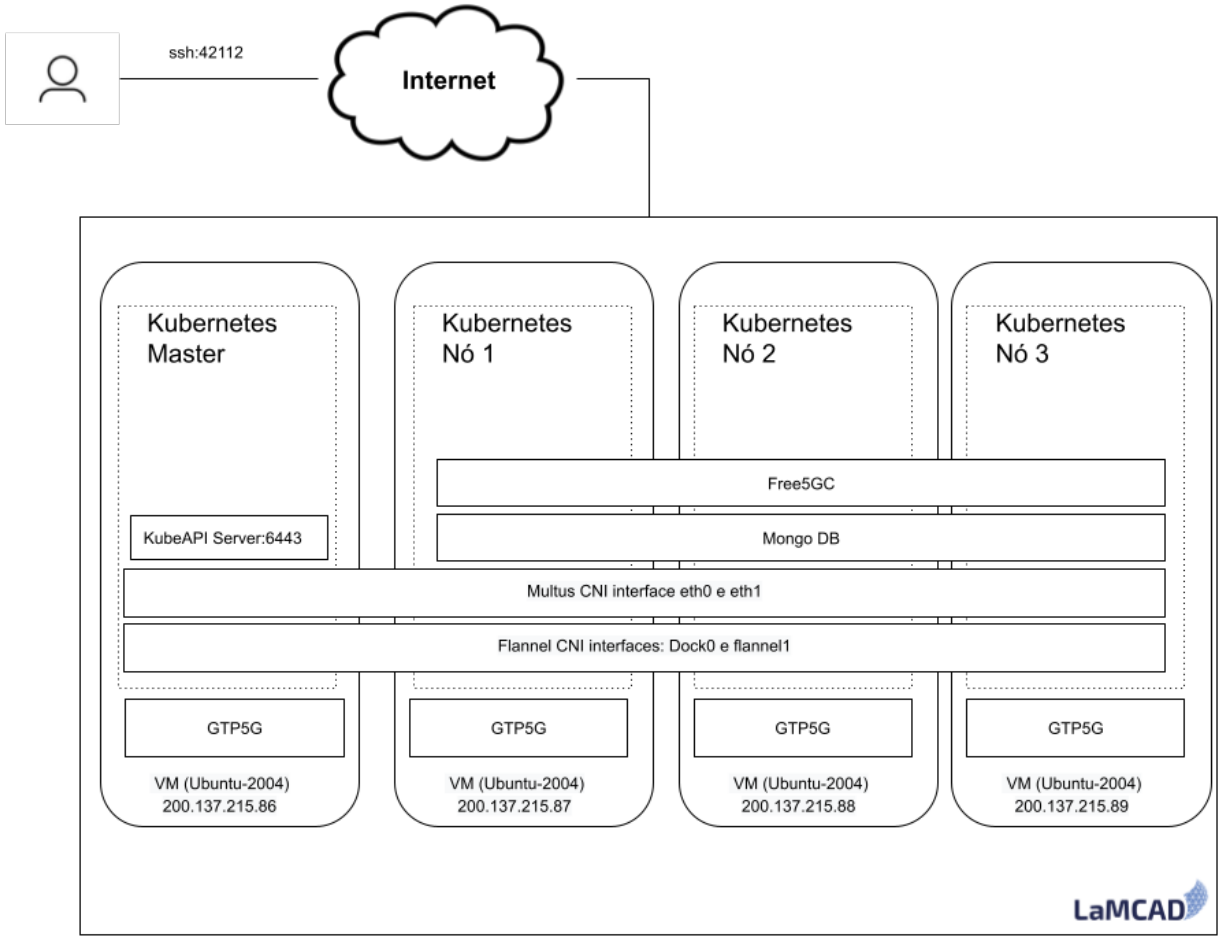


Figura 18: Cenário de conectividade desenvolvido para a Plataforma da META 2 segundo o Caminho 2.

5.3 Levantamento de Caminho Local *Standlone* para a Plataforma

A Figura 19 ilustra o cenário independente da rede FIBRE (somente será implantado em caso de dificuldade intransponível com a rede FIBRE). Ao invés dos *edge nodes* da ilha Inatel, outros servidores já existentes (PCs convencionais, por razão de custo) podem ser usados. As alterações são pequenas, permitindo que boa parte do cenário com FIBRE seja aproveitada.

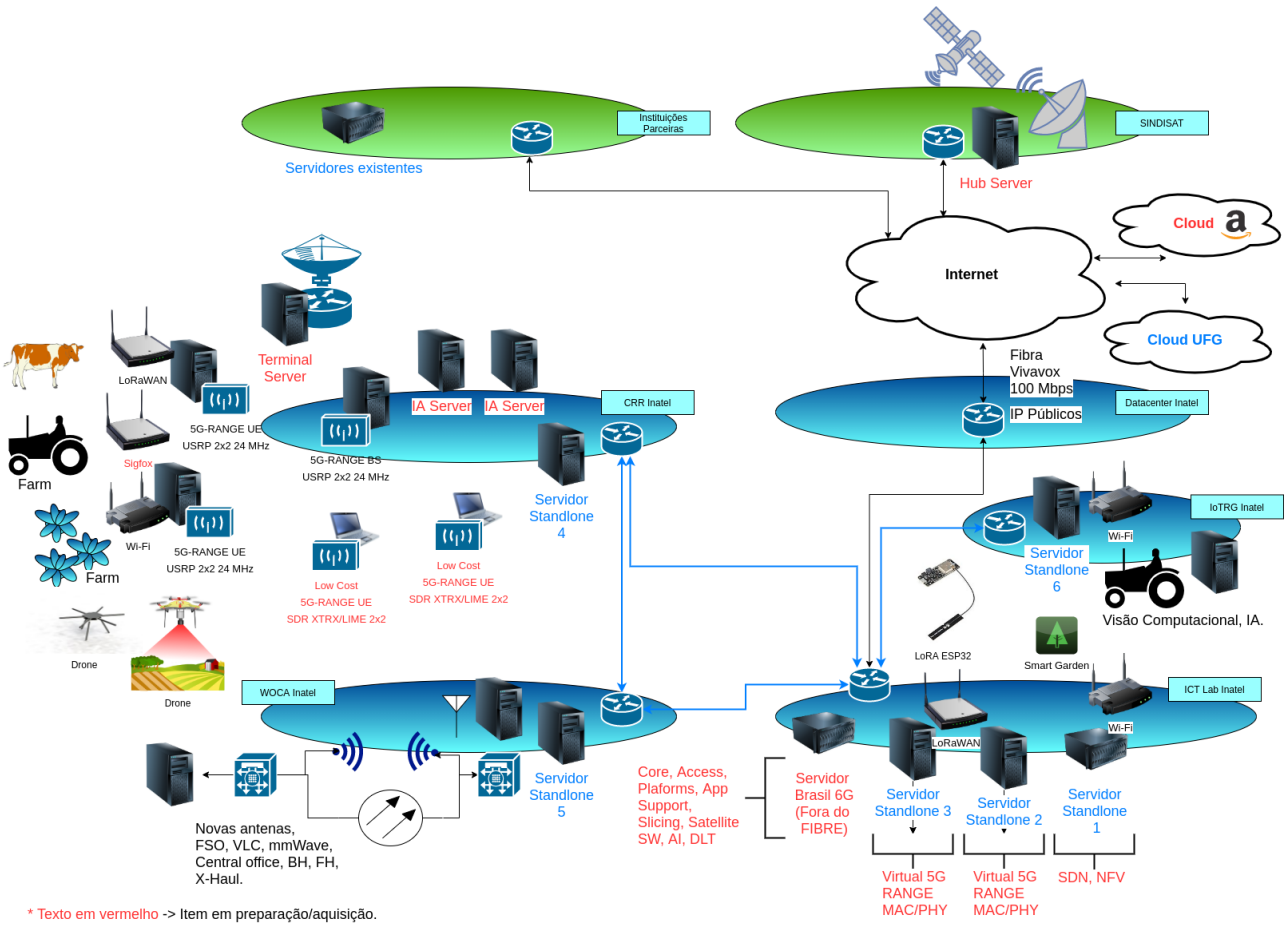


Figura 19: Cenário de conectividade desenvolvido para a Plataforma da META 2 independente do FIBRE RNP (somente será implantado em caso de dificuldade intransponível com a rede FIBRE).

5.4 Levantamento de Possíveis Componentes Adicionais

Em princípio, enxergou-se a necessidade de explorar componentes adicionais a serem integrados à plataforma da META 2. Entretanto, com o andamento do projeto tal demanda parece não ser mais necessária.

5.5 Levantamento de Características Desejáveis para Servidor Brasil 6G

Nessa subseção, trazemos um levantamento breve sobre a demanda computacional encontrada na literatura para alguns cenários similares a nossa plataforma de experimentação em

6G. A ideia não foi esgotar todas as possibilidades, mas sim listar algumas que apoiem nosso dimensionamento para o servidor principal do Projeto Brasil 6G e da proposta Proto 6G. As Tabelas 10 e 11 trazem algumas características de servidores que conseguimos determinar na literatura. Já a Tabela 12 traz sugestões das instituições parceiras nesse projeto. Os membros da META 5 foram convidados a manifestar suas preferências nessa tabela. As informações contidas nela são relativas àqueles que se manifestaram em tempo hábil e optaram por fazê-lo.

Tabela 10: Características relacionadas ao servidor para o 5G *Core* do projeto 6G desenvolvido pela UC3M.

Ref.	**CPU**	**RAM**	**HD**	**Vídeo**	**Rede**	**Uso**
UC3M 5G Core [75]	1 vCPU	1GB	15GB (5GB *Storage* + SO)	-	-	* Máquina usada como **5G Core**, implementando o *user-plane* para suportar conectividade de qualquer UE/GW através de redes de acesso *Untrusted* Non-3GPP.
	1 vCPU	1GB	15GB (5GB *Storage* + SO)	-	-	* Máquina usada para fornecer funções de uma **UE 3GPP**, implementando o *user-plane* para suportar o 5G Core através de redes de acesso *Untrusted* Non-3GPP.
	4 vCPU	12GB	100GB	-	Acesso à Internet.	** Máquina virtual para suportar **NFVO/VNFM** através do software ETSI OSM.
	4 vCPU	16GB	200GB	-	-	** Máquina virtual para suportar **VIM** através do software OpenStack.
	* *Tool packages* com suporte à Ubuntu 16.04 e 18.04 (*Ipsec-tools and racoon Linux packages*). ** Máquinas virtuais instanciadas em um **único** servidor (ex.: Rack Dell Power Edge R630). Obs.: É necessário especificar servidores para a alocação de recursos da NFVI para as VNFs.					

Tabela 11: Características de servidores em projetos relacionados.

Ref.	CPU	RAM	HD	Vídeo	Rede	Uso
ONOS [76]	2 vCPU	4GB	20GB	-	Placa de rede NIC 10/100/1000 Gigabit	Máquina de destino ou gerenciamento (nó) ONOS (cada nó deve ter essa configuração mínima)
OSM [77]	2 vCPU	8GB	40GB	-	Placa de rede NIC 10/100/1000 Gigabit	Máquina usada para suporte da aplicação OSM (requisitos recomendados)
[78]	Intel Core i7@1.6GHz	16GB	-	-	-	Máquina usada para instanciar free5GC, Open5GS e OAI, alternadamente e avaliar sinalização 5G.
-	Intel Xeon E5-2658 v3 (ou mais atual), com 12 *cores* e 24 *hyper-threads*	256 GB	Dois dispositivos de 1 TB (HD ou SSD) com recursos de inicialização ISO virtual ou um servidor de inicialização PXE separado (DHCP/tftp ou Cobbler)	-	-	Máquina média recomendada para instanciar *Open Network Automation Platform* (ONAP) segundo levantamento feito Projeto SINDISAT C.
-	Intel Core i3 2100 de quatro núcleos	8 GB	Um dispositivo de 2 TB (HD ou SSD)	-	-	Máquina média recomendada para instanciar GOHAN segundo levantamento feito Projeto SINDISAT C.

5.5.1 Especificação Final

Nesta subseção, descrevemos as características desejadas para o servidor a ser adquirido no projeto. A partir das duas tabelas anteriores, tem-se:

- Pode-se evidenciar grande heterogeneidade de demandas, sendo a plataforma ONAP a mais demandante, sendo portanto a referência.
- Diversos sistemas rodarão simultaneamente nesse servidor principal. Logo, as demandas se somam, dificultando ainda mais determinar os requisitos necessários como um todo.
- A maioria dos sistemas não consome grande quantidade de recursos, podendo ser atendidos pela mesma máquina.
- Já existe na ilha FIBRE da RNP no Inatel um servidor que pode hospedar o ONAP. Assim, o servidor principal seria usado para todos os outros sistemas.
- As demandas relativas a sistemas para DLT, IA e Acesso não foram estimadas, somando-se, portanto, às anteriores.

- As demandas relativas às aplicações finais da META 6 também não foram estimadas.
- Esperamos ter mais de um cenário para experimentação com 6G. Na verdade, se considerarmos as hipóteses levantadas até maio de 2022, certamente teremos diversos cenários com diferentes demandas de software neste servidor. Logo, devemos prever cenários alternativos rodando com diferentes sistemas na mesma máquina (importante para comparação de desempenho justa).

Considerando os pontos acima, a escolha das características do servidor foi feita visando maximar sua aplicação à demanda conhecida (com exceção de ONAP), bem como suportar com margem novas demandas. A Tabela 13 apresenta o consenso do grupo da META 5 com relação às características desejáveis do servidor a ser adquirido. Obviamente, a escolha também se deu em função dos recursos disponíveis para essa rubrica.

Tabela 12: Lista interna de recomendações de características para o servidor.

Inst.	CPU	RAM	HD	Vídeo	Rede	Energia	Justificativa
Inatel	Intel® Xeon® Gold 5217 3.0 GHz	128 GB	4 TB	Genérico	Placa de rede NIC 10/100/1000 Gigabit	Gabinete Single, Hot-plug Power Supply (1+0), 1100W. Nobreak	Nossa ideia é que o servidor cubra as necessidades presentes e futuras dos requisitos que nos permitem desenvolver com sucesso nossa proposta de tecnologia 6G. O levantamento feito pelo Inatel leva em conta os dados trazidos a partir do cenário da Plataforma na META 2, das discussões sobre o núcleo, acesso, arquitetura evolucionária da FASE 1 no contexto da META 5 e aplicações levantadas na META 6 do projeto.
CPqD	Intel® Xeon® Gold 6348 42 M de cache, 2,60 GHz	128 GB	2 TB	Genérico com espaço para placa de vídeo (GPU/ FPGA/ Pci-e x16) com conector de energia PCIe	Placa de rede de 10 Gigabit com potencial expansível QSFP de 100 Gigabit	A ser especificado pelo fornecedor do hardware	Apesar de não saber as especificações técnicas das aplicações futuras hospedadas, o servidor sugerido pode atuar tanto com processamento de *core* como de *edge*. A energia da placa mãe pode não ser suficiente, por isso a necessidade de haver potencial expansível. Além disso, espera-se que o *core* suporte várias gNodeB, sabendo que, hoje em dia, um terminal 5G chega a 1 Gigabit/s.
UFG	Intel Xeon da 3ª Gn, SKU 6346, 3.1 GHz	128 GB	480 GB	6 GB GDDR5	Placa de rede NIC 10/100/1000 Gigabit	-	Máquina usada como servidor da aplicação de Realidade Mista
Unisinos	Intel Xeon 4 vCPU	32 GB	256 GB	Genérico	Placa de rede NIC 10/100/1000 Gigabit	-	Não enxergamos demandas extras para o servidor. Basta que seja de propósito genérico. A capacidade computacional também não deve ser um limitante, pois não deveremos ter grandes demandas de usuários (milhares) utilizando os recursos.

Tabela 13: Lista de recomendações de características para o servidor a ser adquirido.

Item	**Qtd.**	**Descrição**
Gabinete	1	*Workstation* Modelo Rack 4U
Placa-Mãe	1	Compatível com o gabinete e com capacidade bi-processada
Processador	2	Intel Xeon Gold 6330
Placa de Vídeo	2	Nvidia Quadro RTX A4000 16GB 6144 cuda cores
Memória RAM	8	Pente de memória RAM de 32GB (256GB totais)
Armazenamento (HD)	2	HD SSD de 4TB (8TB totais)
Placa de Rede	1	Placa de rede com 2 portas RJ-45 de 10GbE
	1	Placa de rede com 2 Portas SFP+ de 10GbE
Fonte de Energia	1	Potência para suporte dos componentes adquiridos com margem para novas implementações e melhorias futuras.

Desta forma, a especificação do servidor principal Brasil 6G levou em consideração as Tabelas 10 e 11, referentes à características de servidores responsáveis pelo *core* e demais funcionalidades essenciais em projetos relacionados, sendo usados como fundamentação para a Tabela 12, que consiste de uma lista de possíveis características para o servidor, cujas instituições envolvidas nas recomendações foram o Inatel, CPqD, UFG e Unisinos.

Além disso, a justificativa de especificação do servidor também envolve o valor de aquisição do mesmo, e para isso foi necessário estabelecer um equilíbrio entre recomendações, custo e atendimento aos requisitos previamente solicitados pelas instituições parceiras do projeto.

As principais características do servidor foram classificadas em: gabinete, processador (CPU), memória RAM, armazenamento (HD), placa de vídeo, placa de rede e fonte de energia. A justificativa de especificação de cada uma dessas características está detalhada na Tabela 13 e é discutida a seguir.

A escolha do gabinete especificado foi motivada pelo local físico do servidor (ICT Lab) possuir um espaço alocado especificamente para servidores tipo *rack*, o que facilita a adequação da estrutura. Além disso, o *rack* adota o modelo 4U e permite a expansão de processamento e armazenamento para atender aplicações futuras ainda não previstas no projeto. Similar ao gabinete, a escolha de placa-mãe também leva em consideração atender aos requisitos de possibilidade de expansão futura de armazenamento e processamento. Para tal, foi especificado um modelo com características para uma *workstation* bi-processada, compatível com o gabinete previamente descrito. Este modelo possui compatibilidade com processadores Intel Xeon de 3ª Geração, que é a característica de processador recomendada pelas instituições envolvidas do projeto.

O processador escolhido foi baseado nas recomendações das instituições parceiras do Projeto Brasil 6G para lidar com aplicações e necessidade de processamento para tal, considerando o valor limite estabelecido pela aquisição do servidor. Dentre as recomendações previstas, os maiores processamentos sugeridos foram: Intel Xeon Gold 6348, 42 MB de cache, 2.60 GHz, sendo uma recomendação do CPqD considerando um servidor que possa atuar com processamento de *core* e de *edge*; e Intel Xeon Gold 6346, 3.1 GHz, recomendado pela UFG para uma máquina usada como servidor da aplicação de Realidade Mista. Baseados no gabinete e na placa-mãe especificados e na compatibilidade de uso de até 2 CPUs Intel Xeon de 3ª Geração pela *workstation* bi-processada, e considerando o valor limite para aquisição do servidor, foram especificados 2 processadores Intel Xeon de 3ª Geração (Intel Xeon Gold 6330), cujas características somadas garantem um melhor desempenho quando comparado com as sugestões das instituições parceiras mencionadas acima. A Tabela 14 compara as características do processador adotado para a especificação com os 2 processadores sugeridos na lista de recomendações.

Tabela 14: Comparação de Especificação de Processadores.

	Intel Xeon Gold 6346	**Intel Xeon Gold 6348**	**Intel Xeon Gold 6330**
Nº de Núcleos	16	28	28 (56 *cores* totais*)
Nº de *Threads*	32	56	56 (112 *threads* totais*)
Freq. Turbo Máx.	3,6GHz	3,5GHz	3,1GHz
Freq. Base do CPU	3,1GHz	2,6GHz	2GHz
Cache	36MB	42MB	42MB
TDP	205W	235W	205W (410W de consumo de energia totais*)

* *Valores considerando a característica Dual Processor.*

Para a especificação de memória RAM, o grupo de pesquisa do Inatel sugeriu uma ca-

pacidade de 128 GB, considerando os seguintes aspectos: o cenário previsto para o suporte da plataforma da META 2 do Projeto Brasil 6G; discussões sobre arquitetura geral, núcleo e acesso na Fase 1 e META 5 da Fase 2 do projeto; e aplicações levantadas à partir da META 6 do projeto. Além disso, apesar de não conhecer em detalhes as especificações técnicas das aplicações futuras para hospedagens no servidor, o CPqD recomendou uma memória RAM de 128GB considerando potencial expansível. Finalmente, a UFG também recomendou uma memória RAM de 128GB considerando a aplicação específica de Realidade Mista, enquanto que a Unisinos estipulou uma capacidade de 32GB devido à não enxergar demandas extras no servidor. Com base nas informações previamente coletadas, foi especificada uma memória RAM total de 256GB (8x 32GB). Com isso, é possível executar aplicações de diferentes instituições parceiras simultaneamente com uma boa margem.

Considerando o quesito de armazenamento, a recomendação do Inatel foi de 4 TB, enquanto que a do CPqD foi de 2 TB, partindo do princípio de cobrir necessidades presentes e futuras para desenvolver com sucesso a proposta do Projeto Brasil 6G. Em relação à aplicação de Realidade Mista proposta pela UFG, foi especificado um armazenamento de 480 GB, enquanto que a Unisinos especificou 256 GB a partir de um propósito genérico. Considerando o somatório de armazenamento sugerido pelas instituições parceiras e acrescentando uma margem para futuras implementações, foi especificado aproximadamente 8TB de armazenamento (2x 4TB SSD SATA).

A recomendação geral para placa de vídeo foi genérica, com sugestão do CPqD de espaço para GPU/FPGA/PCI x16 com conector de energia PCIe. Como recomendação mais específica, a maior exigência de vídeo é da UFG para a aplicação de Realidade Mista, com recomendação de memória de pelo 6GB GDDR5 para satisfazer o requisito de implementação do *software* ARENA no servidor. Assim sendo, foram especificadas duas placas de vídeo de 16GB considerando a aplicação de Realidade Mista, e principalmente a possibilidade de execução de aplicações futuras envolvendo Inteligência Artificial, visto que este é um habilitador essencial a ser implementado em todas as camadas de uma arquitetura 6G.

Em relação à placa de rede, as instituições Inatel, UFG e Unisinos recomendaram de forma genérica uma placa NIC 10/100/1000 (Gigabit), enquanto que o CPqD sugeriu uma placa de rede de 10 Gigabit com potencial expansão QSFP de 100 Gigabit, dada a observação de que o *core* deve oferecer suporte a várias gNodeBs. Visando atender à recomendação mínima de atendimento à uma NIC padrão Gigabit e ao custo limite para o servidor, foram especificados um *Network Card* com interface Ethernet (RJ-45) de 10GbE, considerando o suporte à diversas ERBs, além de uma placa com conectividade +SFP, dadas as aplicações futuras envolvendo fibra óptica.

Por fim, a justificativa do quesito de energia deve ser voltada à especificação do fornecedor do *hardware* considerando os componentes desejados para o servidor. Como componentes mais relevantes relacionados à potência, tem-se: o processador, cujo consumo médio de energia é de 205W; e a placa de vídeo, cujo valor unitário é de 140W de consumo de energia. Como foram especificados 2 processadores e 2 placas de vídeo, deve-se considerar o dobro de consumo para cada item. Portanto, como recomendação do Inatel, foi especificada uma fonte de energia de pelo menos 1100W, visando principalmente uma grande margem de potência para futuras implementações e melhorias no servidor. Desta forma, o *Power Supply* foi sugerido pelo fornecedor com base nos componentes escolhidos para a especificação do servidor de modo a atender às recomendações previstas pelo projeto.

5.6 *Feedback* de Requisitos da META 5 para a META 2

As demandas que o Proto 6G tem em relação a plataforma para integração de componentes, implantação, experimentação e demonstração do Proto 6G (que será realizada na Atividade 5.3) foram amplamente discutidas na META 5. Todas as ações da META 5 geraram *feedbacks* em reuniões que foram alimentadas para a META 2. Em particular, as escolhas feitas no contexto dessa Ação 4 foram extremamente importantes para as definições da META 2. Elas já foram inseridas nos relatórios da META 2, podendo, portanto, ser consultadas por lá.

6 Ação 5 - Suporte às Aplicações da META 6

A Ação 5 da META 5 tem como objetivo principal detalhar como a rede Proto 6G pode suportar as aplicações desenvolvidas na META 6 do Projeto Brasil 6G, tendo como foco principal a relação entre essas aplicações com a rede de acesso e o núcleo da arquitetura. Assim sendo, esta seção está organizada da seguinte forma: a subseção 6.1 descreve de forma sucinta as aplicações esperadas para serem executadas dentro da rede 6G; a subseção 6.2 realiza um mapeamento sobre as demandas exigidas pelas aplicações descritas na subseção 6.1 em relação ao núcleo da rede; por fim, a subseção 6.3 detalha os possíveis caminhos preferenciais para a integração entre as aplicações, a rede de acesso e o núcleo 3GPP, tendo como referência a Tabela 9 previamente detalhada na Seção 4.

6.1 Levantamento e descrição de Aplicações da META 6

Para a realização de testes da rede Proto 6G a ser implementada pelo Projeto Brasil 6G, foi feito um levantamento com um total de 10 aplicações a serem desenvolvidas. Essas aplicações serão submetidas a um cenário localizado em uma zona rural, cujo acesso ao núcleo deve ser realizado via uma rede de acesso *Untrusted Non-3GPP* através do uso de transceptores para enlace de longo alcance, permitindo fornecer conectividade à rede 6G para atender áreas remotas. Desta forma, os dispositivos das aplicações localizados na área rural serão conectados a um transceptor UE local (UE-T6G), capaz de se comunicar à uma longa distância com o transceptor BS (BS-T6G), que por sua vez fornece conectividade ao núcleo da rede 6G presente no *Information Communications Technology Laboratory* (ICT Lab.) do *Instituto Nacional de Telecomunicações* (Inatel), localizado na área urbana da cidade de Santa Rita do Sapucaí.

O levantamento de aplicações da META 6 foi organizado em *Application 1* (App 1) até *Application 10* (App 10) e são brevemente descritas abaixo. É importante ressaltar que há ainda a App 10, que envolve a implementação de um enlace satelital e será abordado com detalhes na Seção 8, além de outras aplicações que serão implementadas futuramente.

A App 1 consiste de uma aplicação envolvendo o uso de AI para processamento de imagem. Para isso, um dispositivo *drone* é inserido em um ambiente rural visando a captura de imagem/vídeo local. Estes dados são enviados para um servidor de AI com capacidade computacional suficiente para processar as imagens coletadas e detalhar o meio observado, identificando objetos e consequentemente realizando o mapeamento do ambiente de forma inteligente. O acesso à este servidor, por sua vez, é realizado através do núcleo da rede.

A App 2 utiliza a tecnologia *Augmented Reality* (AR) para uma aplicação onde o fazendeiro, usando a câmera de um celular, captura imagens em tempo real de sua plantação. Essas imagens são enviadas para um dispositivo remoto (um servidor na borda da rede ou na *cloud*), onde são processadas. Um *software* de reconhecimento de objetos (e.g., Yolo) recebe as imagens enviadas pela câmera de celular e identifica o tipo de colheita. A identificação é então passada para uma base de dados, onde estatísticas relacionadas à colheita, época de efetuar a colheita, informações meteorológicas e de mercado são associadas à plantação. Essas informações são enviadas para um componente de AR (e.g., ARCore) juntamente com as imagens capturadas pelo dispositivo do usuário através do núcleo da rede. O componente de AR é responsável pelo processamento da localização e pelo mapeamento do entorno, bem como a geração de uma nuvem de pontos das estruturas e determinação da posição do dispositivo e rotação no modelo. Com essas informações, o componente é capaz de adicionar as informações recebidas da base de dados com a imagem original recebida e a nuvem de pontos gerada. A imagem enriquecida

é enviada para o celular do usuário para ser exibida. O objetivo do caso de uso baseado na aplicação de AR é determinar onde (celular, borda ou *cloud*) executar os diversos componentes da aplicação de forma a assegurar a qualidade de experiência do usuário.

A App 3 refere-se à uma proposta de Economia das Coisas para uma horta comunitária urbana, ou *Smart Garden*, capaz de atender pequenos produtores rurais localizados em áreas remotas usando tecnologias de cripto-moeda IOTA para micro-pagamentos e software de monitoramento com lógica *Fuzzy* para tomar decisões das funções de controle da horta. Assim sendo, a aplicação consiste de um sistema de irrigação e iluminação artificial acionado mediante a transferência de IOTAs. Além disso, essa aplicação permite consultar o saldo da horta na rede IOTA e registrar periodicamente o seu estado atual nessa rede através de um *Smart Contract*, possibilitando o rastreamento do seu manejo. A irrigação consome IOTAs que representam o custo de irrigar as plantas.

Já a App 4 trata-se de uma solução para o transporte de vacinas que garante a transparência e imutabilidade dos dados das propriedades monitoradas durante o processo, proposto para atender uma área remota cuja conectividade com a Internet é obtida via uma rede 6G de longo alcance. Para tal, um dispositivo IoT está associado ao compartimento físico que transporta ou armazena os lotes de vacinas monitorados, cujos dados são registrados periodicamente em uma DLT para manter a rastreabilidade de forma transparente e imutável. A aplicação fornece uma *Decentralized Application* (DApp) que permitir a inserção de um novo lote de vacinas no sistema, mediante condições previamente estabelecidas; e outro DApp para o rastreamento e consulta de dados do usuário. Por fim, é empregado um *Smart Contract* para o auxílio no processo de entrada e verificação de dados sobre as condições de transporte e armazenamento das vacinas.

A App 5 tem como objetivo atender a todos os requisitos da logística remota de alimentos frescos, tais como o monitoramento em tempo real dos alimentos, rastreamento, etc. Para isso, a aplicação suporta a criação de gêmeos digitais de recursos logísticos (como armazéns, veículos e compartimentos de carga) em um ambiente baseado em DLT. Esta aplicação tem como componentes principais: um gêmeo digital do recurso logístico; um *Smart Contract* de gerenciamento; um dispositivo IoT de monitoramento e envio de informações para serem registradas na rede; uma DApp para visualização das informações e gerenciamento dos recursos logísticos; um histórico de transações; e um nó na DLT operando como uma interface entre o dispositivo IoT e a DApp com os *Smart Contracts*, onde os dados são registrados. É importante ressaltar que, no caso das aplicações App 3, App 4 e App 5, os dados coletados são enviados para uma rede de dados DLT via Internet.

A App 6 também é composta por uma aplicação de IoT *Smart Farming* usando um sistema de visão computacional para o controle de peste sustentável em plantações de café. Desta forma, um dispositivo móvel composto por uma armadilha de peste e um sistema *Global Positioning System* (GPS) é capaz de mover-se na área rural a ser monitorada. Esta armadilha contém uma câmera interna e um sistema de visão computacional para extrair informações relevantes das imagens e/ou vídeos coletados. Assim, o sistema de visão computacional identifica se foi realizada uma captura de broca do café (praga da lavoura) dentro da armadilha. Em caso negativo, o elemento identificado é expulso de dentro da mesma. Em contrapartida, caso o elemento identificado seja a broca, o sistema GPS é acionado para enviar o posicionamento da plantação de café com a praga para um servidor de monitoramento. Este servidor de monitoramento de dados pode ser acessado pela Internet, cuja conectividade é fornecida pelo núcleo da rede.

A App 7 realiza uma aplicação com o *Light Detection and Ranging* (LiDAR) cujo objetivo

é utilizar as informações captadas pelo mesmo no ambiente em que ele estiver inserido para identificar coisas e pessoas e estimar a sua posição e localização. Em uma primeira etapa, as informações disponibilizadas pelo LiDAR receberão um pré-processamento local e serão enviadas para serem processadas remotamente. As informações pré-processadas servirão como dados de entrada para um sistema inteligente capaz de identificar os objetos de interesse, bem como a estimativa de sua posição e localização. À partir das informações de posição, localização e classificação do objeto, o sistema de comunicação 6G poderá realizar ações como estabelecimento de enlaces, configuração de sistemas *Multiple-Input and Multiple-Output* (MIMO), configuração de sistemas com *Intelligent Reflecting Surface* (IRS), bem como definir estratégias de comunicação para atingir um determinado nível de qualidade de serviço especificada. Vale ressaltar que o LiDAR pode estar instalado em um ponto fixo ou em um veículo (terrestre ou aéreo, tripulado ou não).

A App 8 é responsável por uma aplicação de IoT *Smart Farming* para plantação de morango através do uso de sensores de temperatura, umidade, e controle, sendo este último usado para, por exemplo, realizar controle de irrigação. Visto que níveis extremos de temperatura, umidade e sensibilidade podem causar danos tanto à própria plantação como na qualidade das frutas, estes sensores são distribuídos em uma fazenda com o objetivo de coletar os dados necessários e enviar à um servidor de monitoramento via Internet. O acesso ao servidor é fornecido pelo núcleo da rede. Desta forma, o usuário pode ter acesso remoto à um *dashboard* contendo informações referentes aos dados coletados pelos sensores disponíveis na zona rural. Esse monitoramento de informações permite lidar com a coleta, análise, previsão e detecção de dados heterogêneos da plantação.

Já a App 9 consiste na implementação de uma *Future Internet Architecture* (FIA) denominada *NovaGenesis* (NG) em aplicações relacionadas à IoT, especialmente para LPWAN, usando tecnologia *Long Range* (LoRa). Para os testes, é proposto um cenário de avaliação experimental através da publicação de mensagens NG com medidas de temperatura geradas de maneira aleatória entre um computador servidor e um cliente. O objetivo é comprovar a viabilidade da FIA utilizando LoRa para aplicações IoT através de métricas relacionadas à perda de pacotes. Para a aplicação no cenário 6G, um sensor NG será inserido em uma área rural e seus dados transmitidos à uma aplicação NG cliente localizada em uma área urbana disponível através do acesso ao núcleo da rede.

Por fim, a App 10, assim como App 6 e App 8, também é focada em uma aplicação de *Smart Farming*. Para tal, são utilizadas coleiras que permitem o monitoramento remoto de gado. Estas coleiras viabilizam a identificação da geolocalização do gado, bem como de parâmetros comportamentais e fisiológicos, como a temperatura do animal. As informações das coleiras, que são coletadas localmente via tecnologia Sigfox, são transferidas para o servidor do fabricante do dispositivo, fazendo uso da conexão com a Internet que é, por sua vez, provida pela rede de acesso do projeto Brasil 6G.

6.2 Mapeamento de demandas das aplicações em relação ao núcleo da rede

Baseado no levantamento de aplicações a serem realizadas no Projeto Brasil 6G, é necessário que seus dispositivos apresentem conectividade e integração com o núcleo da rede. A Tabela 15 detalha o mapeamento de demandas de cada uma das aplicações descritas anteriormente em relação ao núcleo da rede 6G.

Baseado na Tabela 15, percebe-se que todas as demandas exigidas pelas aplicações envol-

Tabela 15: Mapeamento de demandas das aplicações em relação ao núcleo 6G.

		Demanda do Núcleo			
App	**Descrição**	Registro e Autenticação da UE	Encaminhamento da UPF para VMs	Encaminhamento da UPF para Internet	**Característica *End-Node***
App 1	Drone para captura de imagem/vídeo.	x	x		Processamento de imagem
App 2	Aplicação de Realidade Aumentada.	x	x		Componente de AR
App 3	Horta inteligente com Micro-Pagamentos.	x		x	Rede de dados DLT
App 4	Gerenciamento de dados de vacina baseado em DLT.	x		x	Rede de dados DLT
App 5	Gêmeos Digitais de logística alimentar baseados em DLT.	x		x	Rede de dados DLT
App 6	*Smart Trap* para controle de peste em plantações de café.	x		x	Monitoramento de dados
App 7	LiDAR para captura de informações do ambiente.	x	x		Processamento de LiDAR
App 8	IoT *Smart Farming* para monitoramento de plantação de morango.	x		x	Monitoramento de Dados
App 9	NovaGenesis sobre LoRa para publicação de dados de temperatura.	x	x		Cliente NovaGenesis
App 10	Colares de monitoramento remoto de gado para *Smart Farming*.	x		x	Monitoramento de dados

vidas no Projeto Brasil 6G relacionadas ao núcleo 3GPP envolvem o processo de inicialização da UE, como o registro e autenticação, e o encaminhamento de dados através de uma UPF, vista sua capacidade de gerenciamento de conectividade das UEs. Esta UPF, por sua vez, é responsável por direcionar os dados recebidos por determinada aplicação no ambiente de *Smart Farming* para um destinho específico que a atenda. Este direcionamento pode ser feito, por exemplo, para uma VM com um servidor na borda da rede, ou para um servidor disponível na rede de dados da Internet, de acordo com a demanda da aplicação.

O núcleo 3GPP da rede será alocado no computador Servidor Brasil 6G. Até o presente momento, foram consideradas 2 abordagens diferentes com relação à disposição dos componentes da rede Proto 6G. A primeira considera o núcleo 3GPP e os servidores de borda da rede responsáveis por atender algumas aplicações (App 1, App 2, App 7 e App 9) em computadores físicos distintos, sendo executados de forma isolada. A segunda abordagem propõe a virtualização destes componentes de modo a otimizar o uso do Servidor Brasil 6G, visto que ele possui alta capacidade computacional e de processamento. Desta forma, o núcleo 3GPP e os servidores de borda da rede das aplicações App 1, App 2, App 7 e App 9 podem estar no mesmo ambiente físico (Servidor Brasil 6G), porém sendo executadas em diferentes máquinas virtuais ou *containers*.

Como a abordagem a ser escolhida ainda não foi definida, para exemplificar a ideia proposta, as descrições a seguir consideram o uso da virtualização dos componentes da rede previamente mencionados em diferentes VMs. Porém, esta proposta ainda pode ser modificada de modo que a alocação destes servidores seja feita através de conteinerização ou servidores isolados.

O núcleo 3GPP da rede será alocado em uma VM disponível no Servidor Brasil 6G, especificamente na VM 1. As aplicações que demandam de um servidor na borda da rede serão alocadas no mesmo ambiente físico do núcleo (Servidor Brasil 6G), porém distribuídas em diferentes VMs. De acordo com as aplicações previamente detalhadas, a App 1, App 2, App 7 e

App 9 demandam o encaminhamento de dados da UPF para VMs específicas alocadas dentro do Servidor Brasil 6G que executam servidores na borda da rede. Assim sendo, a App 1 tem como objetivo encaminhar a coleta de dados de imagem/vídeo para um servidor de AI para processamento de imagens, que na Rede Proto 6G será alocado na VM 2. A App 2 necessita do encaminhamento de dados da UPF para a VM 3, que por sua vez irá alocar um servidor que executa um componente de AR para coletar dados referentes às imagens da plantação do ambiente de *Smart Farming* advindas de um dispositivo celular e realizar tarefas relacionadas à identificação de colheita, bem como processamento de localização e mapeamento. A App 7 tem como objetivo encaminhar as informações do ambiente capturadas na fazenda da UPF para um servidor na borda com processamento de LiDAR, presente na VM 4. Por fim, a App 9 visa realizar a publicação de mensagens NG de temperatura para um servidor na borda da rede alocado na VM 5, que instancia um cliente NG.

Já as demais aplicações necessitam que a UPF do núcleo 3GPP forneça conectividade à Internet. A App 6, App 8, e App 10 trabalham com, respectivamente, informações relacionadas ao posicionamento da plantação, dados relacionados à sensores de temperatura, umidade e controle; e monitoramento remoto de gado. Logo, elas necessitam de comunicação com servidores de monitoramento de dados disponíveis via Internet. Em contrapartida, as aplicações App 3, App 4 e App 5 relacionadas à, respectivamente, horta inteligente, gerenciamento de dados de vacina, e gêmeos digitais de logística alimentar, demandam conectividade com a rede de dados da Internet para se comunicar com plataformas DLT.

Conforme mencionado anteriormente, todas as aplicações serão executadas em uma fazenda cuja localização apresenta limitações relacionadas à conectividade. O núcleo da rede cujas UEs das aplicações necessitam de acesso, por sua vez, será alocado em uma área urbana localizada à uma distância considerável da zona rural. Para solucionar este problema, será implementada uma rede de acesso *Untrusted Non-3GPP* através dos transceptores disponíveis pelo *Centro de Referência em Radiocomunicações* (CRR) do Inatel, cujo objetivo é permitir um enlace de longo alcance de modo a fornecer conectividade à áreas remotas. Desta forma, estes transceptores serão responsáveis pela conectividade e integração dos dispositivos localizados na área rural com o núcleo da rede localizado no Inatel. Por se tratar de uma rede de acesso *Untrusted Non-3GPP*, é necessária a implementação da função de núcleo 3GPP N3IWF, previamente descrita na Seção 3. O detalhamento dos possíveis caminhos ótimos para a integração entre as aplicações, a rede de acesso e o núcleo da rede Proto 6G será apresentado na subseção a seguir.

6.3 Detalhamento de possíveis caminhos ótimos para integração entre aplicações, rede de acesso e núcleo

A Figura 20 ilustra um diagrama relacionando as aplicações do Projeto Brasil 6G com a rede de acesso *Untrusted Non-3GPP* e o núcleo da rede (VM 1 do Servidor Brasil 6G). Dada a necessidade de um enlace de rádio de longo alcance capaz de fornecer conectividade à áreas remotas, a rede Proto 6G faz uso de uma rede de acesso composta pelos transceptores UE-T6G e BS-T6G, cujo objetivo é permitir a integração entre as aplicações localizadas na zona rural e o núcleo da rede localizado no Inatel.

Para realizar a comunicação entre a BS-T6G e o núcleo 3GPP, existem algumas alternativas estudadas para prover conectividade entre as 3 Torres e o Inatel. Apesar de não ter sido definido o meio de comunicação a ser usado, possíveis caminhos ainda estão sendo discutidos, como por exemplo, através de um par de rádios transparentes ou por meio de fibra óptica.

Como estes transceptores são definidos como uma rede de acesso *Untrusted Non-3GPP*, é

necessária a utilização do componente N3IWF do núcleo, conforme detalhado na Seção 3, para que possa ser realizada a integração completa das UEs referentes às aplicações com o restante da rede 6G.

Analisando a Tabela 9 previamente detalhada na Seção 4, tem-se definidos 3 caminhos ótimos para a integração das UEs com o núcleo 3GPP: (i) acesso *Untrusted Non-3PP* com UE no dispositivo, sendo possível o uso de um dispositivo UE lógico extra desacoplado do transceptor UE-T6G; (ii) acesso via AP Wi-Fi conectado ao transceptor UE-T6G de longa distância; (iii) e acesso via *gateway* IoT conectado ao transceptor UE-T6G de longa distância.

Desta forma, a Figura 20 utiliza uma combinação dos caminhos ótimos citados na Tabela 9, usando diferentes tecnologias de comunicação que conectam os dispositivos das aplicações ao transceptor UE-T6G de longa distância. As aplicações App 1, App 2, App 3, App 4, App 5, App 6, e App 7 enviam os dados de seus dispositivos a um transceptor UE-T6G via rede Wi-Fi, através de, por exemplo, um AP Wi-Fi. App 8 e App 9 são aplicações que fazem uso de uma rede LoRa e, consequentemente, se conectam ao transceptor UE-T6G via um *gateway* LoRa. Por fim, a aplicação App 10 utiliza a tecnologia Sigfox e seu respectivo *gateway* para transmitir e receber dados para o rádio de longo alcance. É importante ressaltar que algumas aplicações, como por exemplo App 6 e App 8, podem usar diferentes tecnologias, não se limitando a apenas uma possibilidade.

É imprescindível destacar que esta é apenas uma possibilidade de modelo organizacional de distribuição das aplicações em relação à conectividade com os transceptores UEs (UE-T6G), visto que ainda não foi definida uma estrutura fixa para tal. Uma limitação deste modelo é que, tendo como base que o endereço visto pelo núcleo é o endereço do *UE Computer* do UE-T6G, todas as aplicações conectadas à esta UE serão atreladas a este endereço. Logo, se o núcleo 3GPP direciona através da função UPF um destino específico para esta UE, consequentemente, todas as aplicações conectadas à este transceptor serão direcionadas à este destino. Isto implica com a limitação de que cada UE deva executar uma única aplicação específica conectada ao seu transceptor por vez, ou um conjunto de aplicações que tenham o mesmo destino. Então, uma forma de contornar esta limitação é organizar a estrutura de correlação entre aplicações e transceptores de modo que seja atrelado à cada UE-T6G apenas um conjunto de aplicações cujos destinos de rede sejam iguais. Porém, é necessário avaliar esta alternativa, vista as limitações de quantidade de alocação de UEs no código e de recursos físicos de rádio disponíveis.

Esses transceptores UE-T6G, ainda localizados na zona rural, se comunicam via *Radio Frequency* (RF) com o transceptor BS-T6G, fornecendo comunicação ao núcleo da rede. Finalmente, o núcleo é capaz de realizar as demandas exigidas pelas aplicações, como registro e autenticação das UEs, e encaminhamento de dados da UPF para servidores que capazes de atendê-las, de modo que cada aplicação seja atendida com conectividade referente à rede de dados solicitada. Este encaminhamento de dados pode ser feito, por exemplo, para um servidor na borda da rede alocado em uma VM dentro do Servidor Brasil 6G para processamento de dados , ou para um servidor de monitoramento das informações do ambiente de *Smart Farming* disponível via Internet.

Além da rede de acesso, as UEs também não estão no padrão 3GPP, e portanto é necessário inserir um componente adicional na mesma capaz de realizar o processo de sinalização para o núcleo. Este componente está representado na Figura 20 como *UE Gateway - Signaling to Core*, destacado em blocos amarelos entre os *gateways* que enviam as informações dos dispositivos das aplicações e os computadores dos transceptores UE-T6G. Esta proposta trata-se de um caminho onde há um dispositivo UE lógico extra responsável por essa sinalização, desacoplado do transceptor UE-T6G. Desta forma, os dados enviados aos rádios de longo alcance localizados

na fazenda já estarão preparados e configurados com as pilhas de protocolo necessárias para que uma UE Não-3GPP possa se conectar ao núcleo 3GPP.

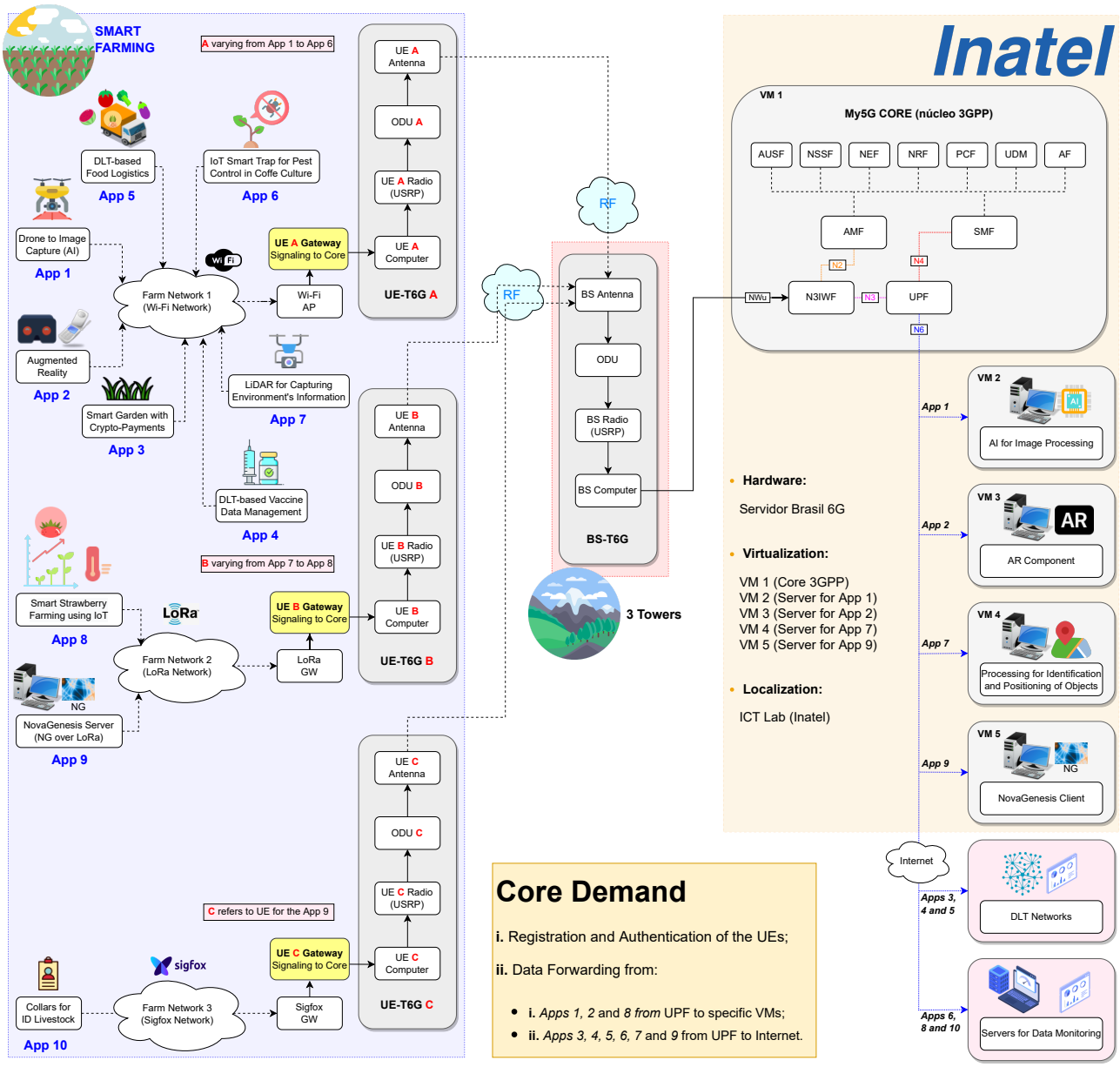


Figura 20: Diagrama de integração entre Núcleo, Rede de Acesso e Aplicações do Projeto brasil 6G.

7 Ação 6 - Fatiamento Fim a Fim

Nessa seção, abordamos o aspecto de fatiamento fim a fim de recursos físicos e cibernéticos no 5G e no Proto 6G. A seção inicia com um levantamento de possíveis caminhos para suportar o fatiamento de recursos fim a fim, classificando os tipos de orquestração utilizados na literatura. Em seguida, uma visão geral das relações macro entre núcleo, transporte, acesso e aplicações do Proto 6G é fornecida. A seleção de componentes para suportar o fatiamento fim a fim no laboratório é abordada na sequência. Por fim, é fornecida uma especificação final das interações com os demais componentes do Proto 6G.

7.1 Levantamento de Possíveis Caminhos para Fatiamento Fim a Fim

Atualmente, existem várias soluções de fatiamento de rede em 5G que utilizam infraestruturas virtualizadas baseadas em conceitos de computação em nuvem. Por exemplo, no cenário mais básico, a configuração estática replica exatamente os mesmos parâmetros da rede pré-estabelecidos no estado inicial do ciclo de vida de uma fatia de rede. Entretanto, essa revisão da literatura que trazemos nessa seção foi direcionada para trabalhos que apresentam as funções do núcleo 5G com suporte a arquitetura baseada em serviços (do inglês, *Architecture-based Service* - SBA), os quais possuem nativamente a função NSSF, bem como componentes para o gerenciamento de fatias de rede, como *Network Slice Subnet Management Function* (NSSMF) e *Network Slice Management Function* (NSMF). Além disso, existem soluções que apresentam projetos de criação de modelos (*templates*) de fatias de redes que permitem a modificação no estado de execução dessas fatias. Por fim, encontram-se trabalhos da literatura que referem-se a orquestração dinâmica das fatias de rede. Para tornar mais claro e organizado o grupo de trabalhos encontrado na literatura considerando esse tópico, introduziu-se o conceito de orquestração dinâmica de forma *Parcial* e *Total*. A orquestração *Parcial* refere-se às funcionalidades disponíveis nas ferramentas de computação em nuvem para auto-escala de recursos computacionais visando compartilhar a infraestrutura virtualizada com diferentes serviços ou configurações especializadas dentro do núcleo, sempre objetivando suportar o fatiamento de recursos. A orquestração *Total* diz respeito às soluções que permitem reconfigurar o núcleo 5G dinamicamente de forma integrada com os recursos da infraestrutura virtualizada.

As principais iniciativas de código aberto em computação em nuvem utilizadas pelas operadoras de telecomunicações são: *Open Network Automation Platform* (ONAP) e Open Source *Management and Orchestration* (MANO) (OSM). ONAP é uma plataforma abrangente da *The Linux Foundation*, composta por módulos para orquestração, gerenciamento e automação de serviços em tempo real. Essa plataforma é orientada a políticas de funções de rede físicas e virtuais, permitindo uma rápida automação de novos serviços e o gerenciamento do ciclo de vida dessas funções de redes. OSM é uma iniciativa da *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) que visa alinhar as atividades de desenvolvimento com a evolução do padrão ETSI *Network Function Virtualization* (NFV), permitindo que operadoras e fornecedores tenham um ecossistema baseado na arquitetura NFV MANO. As duas iniciativas possuem diversas funcionalidades considerando o escopo de fatiamento de rede, tais como suporte ao núcleo, possibilidade de utilização de modelos para a criação de fatias de redes e suporte a auto-escala de recursos computacionais utilizando funcionalidades de computação em nuvem baseadas no Kubernetes, por exemplo. Entretanto, apesar do ONAP e OSM implementarem *Virtual Network Functions* (VNFs) isoladas, essas plataformas não apresentam um controle adaptativo sobre essas funções, ou seja, não permitem a reconfiguração das funções do núcleo

dinamicamente e integradas com os recursos que gerenciam a infraestrutura virtualizada. Por exemplo, para aplicar uma nova configuração em uma fatia de rede, é necessário encerrar o ciclo de vida dessa fatia e iniciar uma nova fatia de rede, interrompendo o serviço prestado. Baseada nessa característica, a orquestração de fatias de rede dessas iniciativas é classificada como dinâmica *Parcial*, como pode ser observado na Tabela 16. O projeto Europeu 5G-TOURS possui as mesmas características das iniciativas ONAP e OSM.

Tabela 16: Resumo dos Trabalhos relacionados a fatiamento de recursos em 5G.

Trabalhos	Características		
	Núcleo 5G SBA	Projeto Modelo	Orquestração* Dinâmica
ONAP	●	●	◒
OSM	●	●	◒
5G-TOURS	●	●	◒
5GZORRO	○	●	◒
5Growth	○	●	◒
5G-COMPLETE	○	●	◒
5G-CLARITY	○	○	◒
DYSOLVE	○	○	◒
OpenSlice	○	●	●

*Orquestração dinâmica: Ausente (○) *Parcial* (◒) *Total* (●)

Trabalhos como 5GZORRO e 5Growth apresentam modelos de orquestração dinâmica *Parcial*, com elasticidade vertical e horizontal para o fatiamento de rede, utilizando a arquitetura MANO. 5GZORRO e 5Growth exploram o controle do ciclo de vida do fatiamento de rede considerando os três domínios, i.e., rede de acesso, transporte e núcleo, seguindo os padrões propostos pelas entidades 3GPP e ETSI. Entretanto, esses trabalhos abordam o núcleo 5G de forma única e imutável, limitando o gerenciamento dos recursos disponibilizados pela arquitetura SBA proposta pelo 3GPP. Neste contexto, a ferramenta 5G-COMPLETE também considera o núcleo 5G de forma única. Tais trabalhos não conseguem cumprir determinados acordos de nível de serviço, afetando a qualidade do serviço prestado.

A literatura sobre fatiamento de rede também apresenta trabalhos com uma perspectiva ampla. Por exemplo, o projeto Europeu 5G-CLARITY visa desenvolver um novo plano de gerenciamento baseado nos princípios de *Software-Defined Networking* (SDN), NFV e no uso de algoritmos de inteligência artificial para habilitar o fatiamento de rede em equipamentos neutros. Adicionalmente, DYSOLVE é uma proposta de alocação dinâmica de recursos para fatiamento dinâmico de rede 5G para um cenário de emergência veicular. Essa solução tem como objetivo alocar recursos de rádio e da rede de transporte de operadoras de forma cooperativa para otimizar o custo da fatia de rede, garantindo a disponibilidade do serviço. Nesses trabalhos, a orquestração da infraestrutura virtualizada está presente, i.e., auto-escala dos recursos computacionais caracterizando uma orquestração dinâmica *Parcial* do fatiamento de rede. Entretanto, devido à perspectiva ampliada, esses trabalhos não consideram as funcionalidades de fatiamento de rede do núcleo, nem os modelos de fatias definidos pela Global System for Mobile Communications Association (GSMA) para auxiliar no gerenciamento dessas fatias de redes.

Uma iniciativa que se destaca na orquestração dinâmica de fatias de rede é o projeto OpenSlice. Essa solução de código aberto é baseada no OSM e permite que usuário de diferentes fatias de rede explorem especificações de serviço oferecidas para infraestrutura de computação

em nuvem. Além disso, OpenSlice permite que desenvolvedores de NFV integrem e gerenciem artefatos de VNF e serviços de rede. Desta forma, o projeto OpenSlice é classificado com uma orquestração dinâmica *Total* para fatiamento de redes, como observado na Tabela 16. Entretanto, OpenSlice ainda não suporta características de funções especializadas do núcleo, restringindo sua aplicabilidade. Analisando a literatura de fatiamento de rede, percebe-se que não existem soluções que suportem a reconfiguração do núcleo 5G dinamicamente após a inicialização de uma fatia de rede para garantir o cumprimento dos acordos de nível serviço em uma rede. Tendo isso em mente, a seguir apresentamos possíveis caminhos para suportar o fatiamento de recursos fim a fim no 5G e Proto 6G.

7.1.1 Caminho 1:

Fatiamento estático: a configuração replica exatamente os mesmos parâmetros da rede pré-estabelecidos no estado inicial do ciclo de vida de uma fatia de rede.

7.1.2 Caminho 2:

Fatiamento dinâmico parcial: refere-se às funcionalidades disponíveis nas ferramentas de computação em nuvem para auto-escala de recursos computacionais para compartilhar a infraestrutura virtualizada com diferentes serviços ou configurações especializadas dentro do núcleo visando suportar o fatiamento de rede.

7.1.3 Caminho 3:

Fatiamento dinâmico total: diz respeito às soluções que permitem reconfigurar o núcleo dinamicamente de forma integrada com os recursos da infraestrutura virtualizada.

7.1.4 Comparação e Determinação de Caminho Preferencial

Sugere-se utilizar o fatiamento dinâmico total e avançar para um fatiamento como serviço, *i.e.*, mais alinhado com 6G e com um fatiamento fim-a-fim entre domínios administrativos.

7.2 Relações Macro entre Núcleo, Transporte, Acesso e Aplicações

A visão geral da arquitetura integrada para o gerenciamento dinâmico completo de fatias de rede é estruturada em duas camadas, conforme mostrado na Figura 21. Na camada inferior da arquitetura está a infraestrutura composta por redes de acesso, transporte e núcleo, incluindo várias fatias de rede virtual na infraestrutura física composta por equipamentos de rádio, roteamento, servidores e outros recursos de computação. A comunicação entre essas redes e seus UEs é realizada por meio de planos de controle e dados. *Operation Support Systems* (OSS) gerencia todos os recursos usados para provisionar e operar as fatias de rede em tempo de execução na camada superior. OSS segue o padrão ETSI NFV baseado na arquitetura NFV MANO com componentes definidos pelo padrão 3GPP.

A camada de infraestrutura pode ser vista como uma coleção de funções de rede modulares combinadas de forma flexível para construir fatias de rede além de equipamentos de rádio e encaminhamento. A Figura 21 apresenta um exemplo com três fatias de rede diferentes com a mesma finalidade de fornecer serviços de comunicação de *Ultra-Reliable Low-Latency Communication* (URLLC), ou seja, fornecer redundância e controle isolado para cada fatia específica.

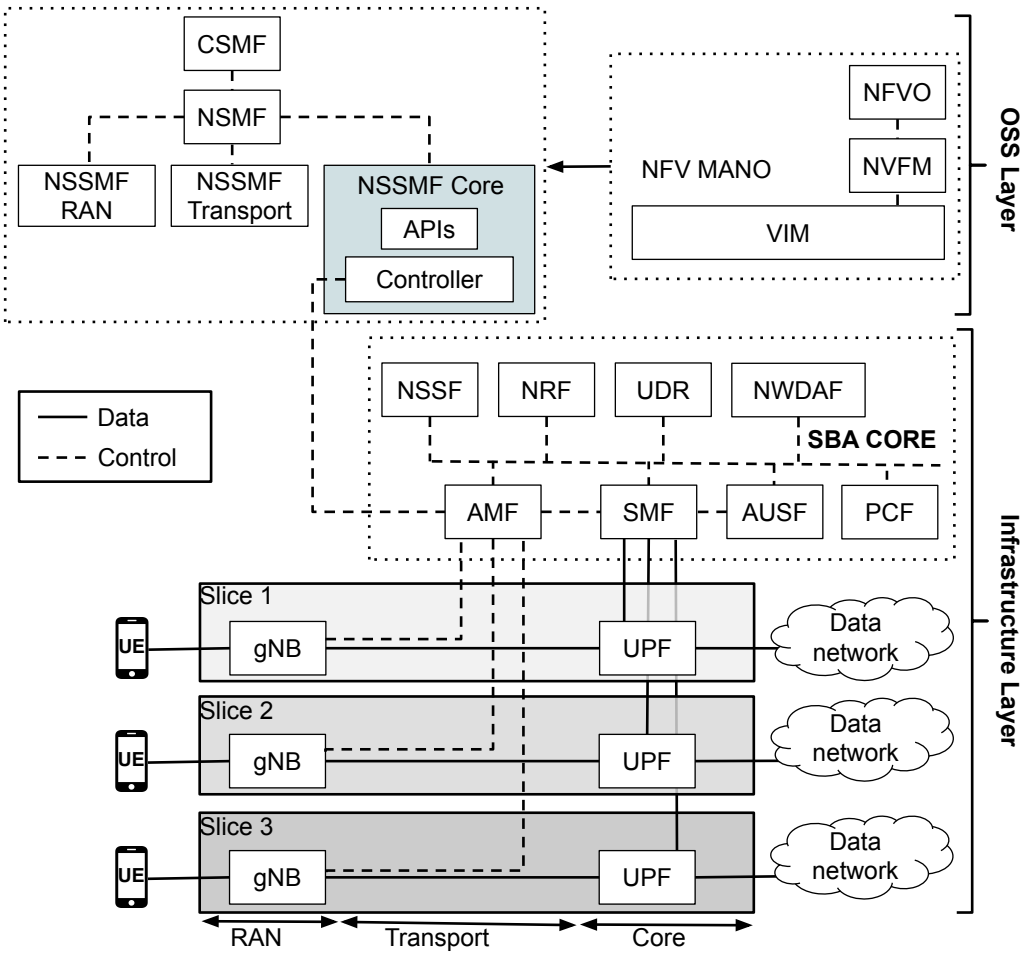


Figura 21: Arquitetura de controle de tempo de execução de fatias de rede.

É fundamental destacar que cada *slice* de rede possui características particulares: distribuição geográfica, recursos computacionais, tempos de resposta, limite máximo de usuários conectados simultaneamente, etc. Essas características são consideradas na arquitetura integrada para orquestração dinâmica completa, oferecendo provisionamento dos *slices* e uma adaptação desses serviços durante o ciclo de vida de cada fatia. As funções centrais do núcleo possuem mecanismos para atuar nas redes de acesso e transporte para provisionar e adaptar configurações em tempo de execução por meio do plano de controle. As mensagens de sinalização necessárias para a orquestração das diferentes fatias de rede são implementadas pelo componente NSSF no núcleo. Esta função trabalha integrada com outras funções principais, como a *Access and Mobility Management Function* (AMF), *Session Management Function* (SMF), *User Plane Function* (UPF), etc. ou seja, o núcleo não orquestra o ciclo de vida dos *slices* em tempo de execução de forma integrada com a camada de infraestrutura.

A camada OSS é responsável por todas as *Operations, Administration, and Maintenance* (OAM) das funções modulares encontradas na camada de infraestrutura, permitindo que as operadoras gerenciem as diferentes fatias da rede ao longo de todo o seu ciclo de vida. As definições dos padrões 3GPP e ETSI NFV impactam significativamente a camada OSS. Por exemplo, as funções NSMF e NSSMF definidas pelo 3GPP devem ser integradas com toda a arquitetura de orquestração dinâmica baseada em NFV MANO para fatiamento de rede. Dessa forma, cada NSSMF possui instâncias para a rede de acesso (NSSMF RAN), transporte

(NSSMF Transport) e core (NSSMF Core), coordenada por um componente NSMF. Nossa abordagem no Proto 6G é inserir um controlador na instância NSSMF *Core* para suportar orquestração dinâmica completa integrada à camada de infraestrutura, utilizando containers K8S. Essa integração é realizada por meio de APIs HTTP REST para gerenciar o ciclo de vida de *Network Slice Instances* (NSIs). Portanto, o NSSMF *Core* foi projetado com APIs para dar suporte à criação, remoção e modificação do fatiamento de rede em tempo de execução. A modificação de uma fatia de rede é realizada através do controlador, responsável pela comunicação para disponibilizar os NSIs, cumprindo os acordos de nível de serviço. O controlador envia solicitações ao K8S para criar, alterar e remover *Network Functions* (NFs) por meio de comunicações HTTP REST.

7.3 Seleção de Componentes para o Fatiamento Fim a Fim: Laboratório

O protótipo da arquitetura integra um controlador, o núcleo do Proto 6G e o Kubernetes adotado na plataforma da META 2, provendo uma orquestração dinâmica total de fatiamento de rede. A ferramenta Terraform[4] foi utilizada para a padronização do ambiente, provisionamento e replicação das máquinas virtuais (do inglês, *Virtual Machine* - VM). Já, o gerenciamento de pacotes e atualização dos módulos de softwares utilizados foram realizados pela ferramenta Ansible[5], responsável, por exemplo, pelas configurações de rede, Kubernetes, *Global System for Mobile Communications Tunnelling Protocol* (GTP) para 5G (GTP5G), etc. O sistema operacional utilizado foi o Ubuntu 18.04.1 LTS com kernel 5.0.0-23-genericm com suporte ao módulo *Low-Latency*. Além disso, o Kubernetes foi configurado com um *Master* e dois *Nodes*, como pode ser observado na Figura 22. O protótipo suporta *Container Network Interface* (CNI) extra para gerenciar redes e sub-redes necessárias para a comunicação interna nos protocolos NGAP e *Non-Access Stratum* (NAS) com o núcleo, utilizando o projeto free5GC[6] (portanto, de acordo com a escolha de núcleo a ser evoluído no Proto 6). Por fim, um emulador de UEs e RAN para a geração de pedidos de conexão com o núcleo e tráfego de rede foi integrado no protótipo. O testador chamado my5G-RAN-tester[7] [59] foi escolhido para essa emulação.

O protótipo de fatiamento dinâmico foi avaliado no LaMCAD da UFG, referente ao levantamento de caminhos para Integração com *Cloud Computing*, descrito na Seção 5.2. Essa avaliação foi publicada em um artigo da XL Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2022) [79]. Além disso, como a solução é baseada em software para um ambiente virtualizado, o protótipo pode ser implantado da mesma forma no ambiente experimental FIBRE RNP, como discutido na Seção 5.1.

É importante destacar que a NSSMF Núcleo é baseada em contêineres e, desta forma, implementada como componentes internos ao Kubernetes. Além disso, a NSSMF Núcleo foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação Typescript e Go. Dessa forma, o protótipo da solução de fatiamento segue a arquitetura *Service Oriented Architecture* (SOA), utilizando protocolo HTTP REST para a interface com componentes externos. O protótipo está disponível no GitHub em https://github.com/fhgrings/FDO-5gc.

[4]https://www.terraform.io/
[5]https://www.ansible.com/
[6]https://www.free5gc.org/
[7]https://github.com/my5G/my5G-RANTester

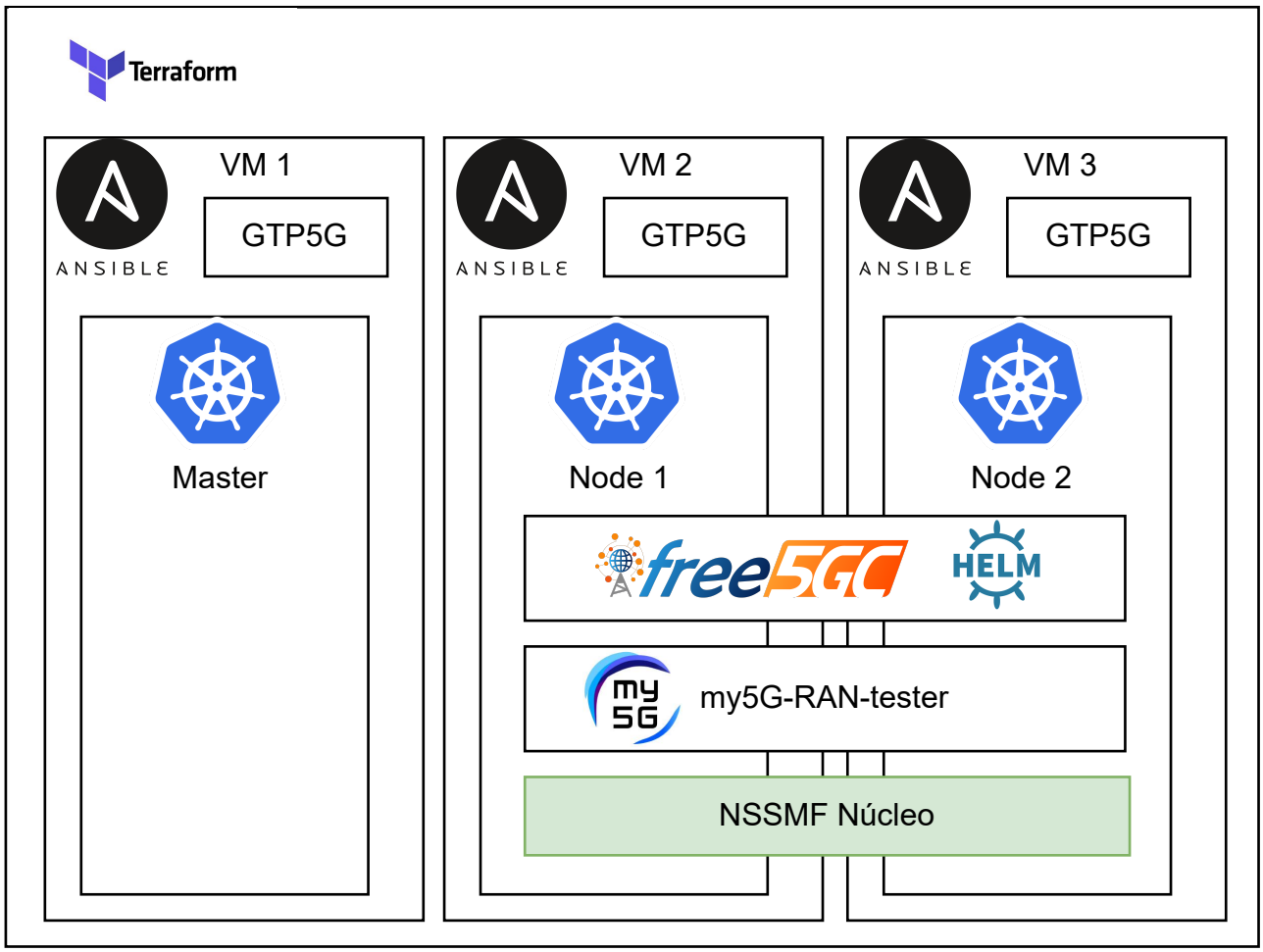


Figura 22: Protótipo da solução de fatiamento dinâmico de recursos para o Proto 6G.

7.4 Especificação Final das Interações com Demais Componentes do 6G

Após o estudo detalhado sobre o fatiamento estático e dinâmico considerando os domínios de núcleo, transporte e acesso, essa seção apresenta uma proposta de arquitetura ciente da dinamicidade de fatiamento fim-a-fim como serviço, alinhada as redes 6G. A arquitetura é baseada em serviços definidos pelas referências do 3GPP, ETSI e O-RAN Alliance, a partir de uma visão de gerenciamento e orquestração, considerando funções de redes virtualizadas. Por exemplo, a arquitetura proposta utiliza as funções de gerenciamento de fatiamento definidas pelo 3GPP e estende as interfaces não definidas para a integração com os controladores de domínio do núcleo, transporte e acesso. Neste contexto, todas as funções são baseada na *Open Container Initiative* (CRI-O) usando um *cluster* Kubernetes.

A arquitetura proposta está alinhada com as especificações TS 28.541 (*Release* 16) e TS 28.5xx (*Release* 17) do 3GPP para o Gerenciamento e Orquestração de Serviços (SMO), atuando nos três domínios distribuídos em redes celulares móveis, i.e., núcleo, transporte e acesso. A arquitetura proposta possui quatro macro funcionalidades: (i) *Onboard*, (ii) *Orchestration*, (iii) *Quality Assurance Closed Loop* e (iv) Interfaces (RN1, TN1 e CN1) para integração com os controladores de domínios, como pode ser observada na parte superior da Figura 23. A arquitetura proposta gerencia as fatias de rede como serviço para integrar, implantar e controlar

todo o ciclo de vida de uma fatia de rede, i.e., considerando todos os domínios de uma rede móvel. Além disso, a arquitetura propõe um fluxo de comunicação e interfaces necessárias para instanciar toda a infraestrutura física e virtual para estabelecer uma fatia fim-a-fim, como pode ser observado na parte inferior da Figura 23. Dessa forma, a arquitetura é baseada nas responsabilidades para cada domínio e no nível de decisão definidos no processo de integração. Cada uma das macro funcionalidades da arquitetura proposta como serviço é descrita a seguir.

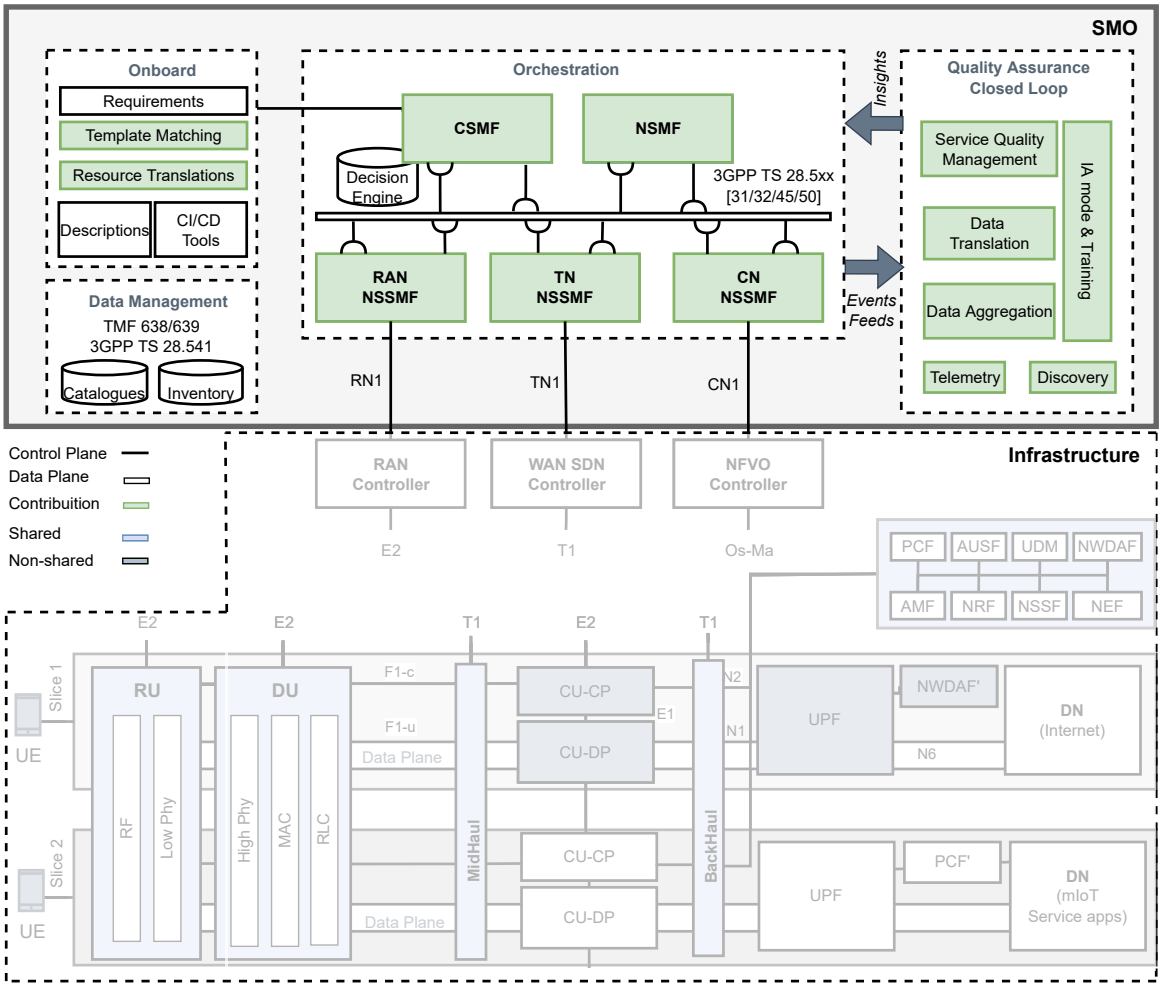


Figura 23: Arquitetura de fatiamento como serviço para o Proto 6G.

As solicitações do locatário (*Tenant*) de uma fatia de rede são recebidas, como entrada, na funcionalidade da *Onboard*, que tem como objetivo traduzir as solicitações para os recursos da infraestrutura, seguindo os modelos de casos de uso definidos pela GSMA. Após a especificação do caso de uso, a *Onboard* pesquisa os modelos de uma instância de fatiamento de domínios (*Network Slice Sub-net Instance* - NSSI) no banco de dados de catálogos e inventários para criar um modelo de instância de fatiamento de rede (*Network Slice Instance* - NSI). Posteriormente, a *Onboard* produz como saída, uma definição de fatia de rede (*Network Slice Definition*), composta por descrições virtuais e físicas para cada domínio.

A funcionalidade de *Orchestration* e a interface com a *Onboard* são definidas pelo 3GPP. Por exemplo, a interface de solicitação de alocação de recursos é recebida pela função de comunicação e gerenciamento de serviço (CSMF), que interage com as funções de serviço de seleção de fatiamento de rede (NSSMFs) para cada domínio. Além disso, a solicitação de alocação

de recursos da fatia de rede é gerenciada pela função de gerenciamento de fatiamento de rede (NSMF). A funcionalidade de *Orchestration* da arquitetura proposta mapeia e define as interfaces necessárias para completar a comunicação de alocação de recursos entre os gerenciadores de sub-redes (RAN NSSMF, TN NSSMF e CN NSSF) e os controladores de domínio.

A principal função da *Quality Assurance Closed Loop* está relacionada ao tempo de execução do ciclo de vida de uma fatia de rede. Desta forma, a *Quality Assurance Closed Loop* é responsável pelo monitoramento, rastreamento, análise de dados e requisições de ações de atualização de uma fatia. Todas essas responsabilidades referem-se a garantia de QoS do fatiamento de rede. Desta forma, o *Quality Assurance Closed Loop* é formado por seis sub-funções: (i) *Telemetry*; (ii) *Discovery*; (iii) *Data Aggregation*; (iv) *Data Translation*; (v) *IA Mode & Training* e (vi) Service Quality Management. Essas sub-funções trabalham de forma integrada. Por exemplo, a NSMF, como um gerenciamento de fatia global, sendo responsável pela tomada de decisão fim-a-fim sobre a qualidade da fatia de rede. Decisões como, previsão de longo prazo, adaptabilidade, gerenciamento de fatias sem requisitos de tempo real, alocação física e virtual de fatias de rede são providas pelas funcionalidades do *Quality Assurance Closed Loop*.

Os controladores de Redes de cada domínio devem trabalhar de forma integrada para prover um fatiamento fim-a-fim como serviço. Por exemplo, a alocação de recursos proposta cria a associação e as interfaces necessárias para uma alocação fim-a-fim. A Figura 23 mostra a interface RN1, TN1 e CN1 entre os gerenciadores de fatia de rede de domínio (RAN NSSMF, TN NSSMF e CN NSSMF) e os controladores de infraestrutura de domínio (RAN Controller, WAN SDN Controller e NFVO Controller). Os controladores irão atuar em cada domínio da infraestrutura física ou virtual usando suas respectivas interfaces. Por exemplo, E2 é a interface com o domínio do controlador RAN, T1 é a interface com o domínio do controlador de transporte e o domínio do controlador principal da interface Os-Ma.

Após a especificação da arquitetura proposta, iniciou-se o desenvolvimento do protótipo, como pode ser observado na Figura 24. Todas as ferramentas que estão destacadas na figura são *open source* e adaptadas para trabalharem em um ambiente CRI-O, usando um *cluster* Kubernetes. De acordo com as definições deste documento, optou-se por utilizar o projeto Free5GC para o núcleo da rede, bem como o projeto OpenAirInterface para a rede de acesso. O controlador ONOS será utilizado na rede de transporte, pois é utilizado no projeto FIBRE. As demais ferramentas, como Prometheus, Istio, Grafana, Helm, MongoDB e *framework* HTTP da linguagem Go foram escolhidas por serem largamente utilizadas em projetos *cloud native*.

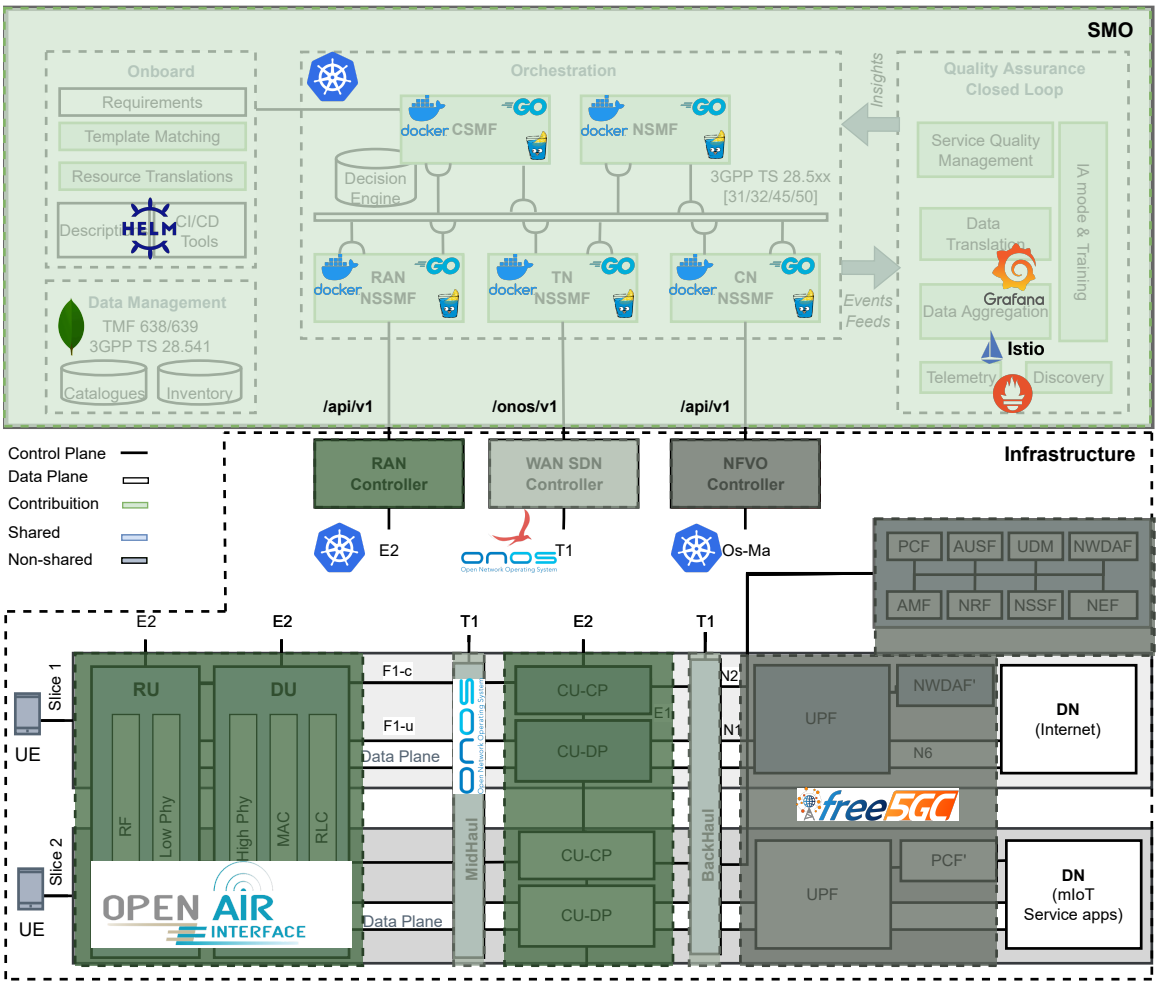


Figura 24: Protótipo da arquitetura proposta.

8 Ação 7 - Rede Satelital

8.1 Levantamento de Possíveis Caminhos para Integração da Rede Satelital

Nessa subseção apresentamos os resultados dos levantamentos de possíveis caminhos para integrar a rede satelital oferecida pelo Projeto C em parceria com SINDISAT ao Projeto Brasil 6G. A subseção cobre as demandas de componentes no acesso, núcleo e aplicações do Proto 6G. Um ranqueamento de vantagens e desvantagens de cada caminho de integração é fornecido. As possibilidades de caminho preferencial para integração da rede satelital são fornecidas, agregando valor a todo o projeto Brasil 6G.

8.1.1 Caminho 1: *Untrusted* N3A com Satélite em Backhaul e Transceptor 6G

Essa solução possibilita a integração de vários componentes do Brasil 6G tal qual ilustrado na Figura 25, nomeadamente: (i) os diversos recursos presentes no Brasil 6G: núcleo, acesso e aplicações; (ii) utiliza o modo *untrusted* N3A; (iii) o enlace satelital funciona como *backhaul* de transporte; (vi) Transceptor 6G do Inatel como extensão do enlace de *fronthaul* para até 50 km; (v) enlace *Radio over Fiber* (RoF) do WOCA Inatel para avaliação de cenário alternativo de *fronthaul* óptico integrado; (vi) *NFV Infrastructure* (NFVI) no UE emulado; (vii) NFV *Open Source MANO* (OSM) no ICT Lab via função UPF do free5GC (núcleo escolhido para o Proto 6G).

A Figura 25 ilustra o servidor FIBRE Edge 2 suportando o ETSI NFV OSM que executa como um contêiner Docker e é orquestrado dentro de um único *cluster* Kubernetes. Para melhor compreensão, a Figura 26 mostra um corte vertical com as pilhas de protocolos previstas nos planos de dados e controle da rede. Continuando, o cluster Kubernetes inclui ainda o Servidor Brasil 6G (fora do FIBRE) e um *laptop* que roda um emulador de UE. Esses três *Pods* do cluster são ilustrados como caixas cinza no desenho, executando respectivamente as funções AMF, N3IWF e UPF do núcleo do Proto 6G. Repare que no FIBRE Edge 2 executam também os programas Nginx, LEMP Stack, BIND DNS e Geo IP necessários para a aplicação *Content Distribution Network* (CDN) do cenário do Projeto C SINDISAT. O servidor Brasil 6G executa o *master* do *cluster* Kubernetes, com suporte a um *multiplexer* desenvolvido pela Unisinos/UFG para configuração de interface de rede dos contêineres Docker. Os componentes do free5GC também executam nesse servidor, além da ferramenta my5G-RAN-Tester também desenvolvida pela Unisinos/UFG com foco na automação de testes de sinalização e fatiamento de recursos. Ainda, o servidor Brasil 6G roda a função NSSMF para suporte ao fatiamento. A NFVI do *laptop* é gerenciada pelo mesmo VIM que se encontra no FIBRE Edge 2. Nesse *laptop*, também existem os componentes de CDN do lado de acesso, nomeadamente: Nginx e Vanish *cache* (para avaliação de cache CDN no lado remoto do *fronthaul*).

O enlace 6G entre o UE e a BS GFDM pode ser atendido ou não por um sistema de RoF do WOCA Inatel. Quando atendido por esse sistema, o sinal de rádio da USRP MIMO modula um *laser* do lado remoto do fronthaul. Do lado da BS 6G, um fotodetector recebe o sinal modulado e o joga novamente no ar para recepção em outra USRP MIMO da BS 6G. O tráfego pode ser então acomodado no enlace satelital através do *Terminal Server*, caso se deseje integrar o satélite. Em caso negativo, o sinal segue diretamente do CRR para o ICT Lab, onde é entregue ao servidor Brasil 6G para controle de acesso *untrusted* N3A no free5GC. Em caso positivo para o uso do enlace satelital, o sinal segue até o *Hub Server* no parceiro do SINDISAT. Como existem limitações do que pode ser executado nesse servidor, os pacotes retornam ao ICT Lab

via Internet onde são entregues ao servidor Brasil 6G (núcleo free5GC). Em ambos os casos, o tráfego de *backhaul* é entregue a função N3IWF, que implementa funções tanto no plano de dados, como de controle. Após a função N3IWF, o tráfego de controle (NAS) é enviado para a função AMF. Uma vez admitido na rede, o tráfego de dados passa a ser encaminhado a função UPF, de onde segue para o Servidor FIBRE Edge 2 (onde estão as VNFs de CDN).

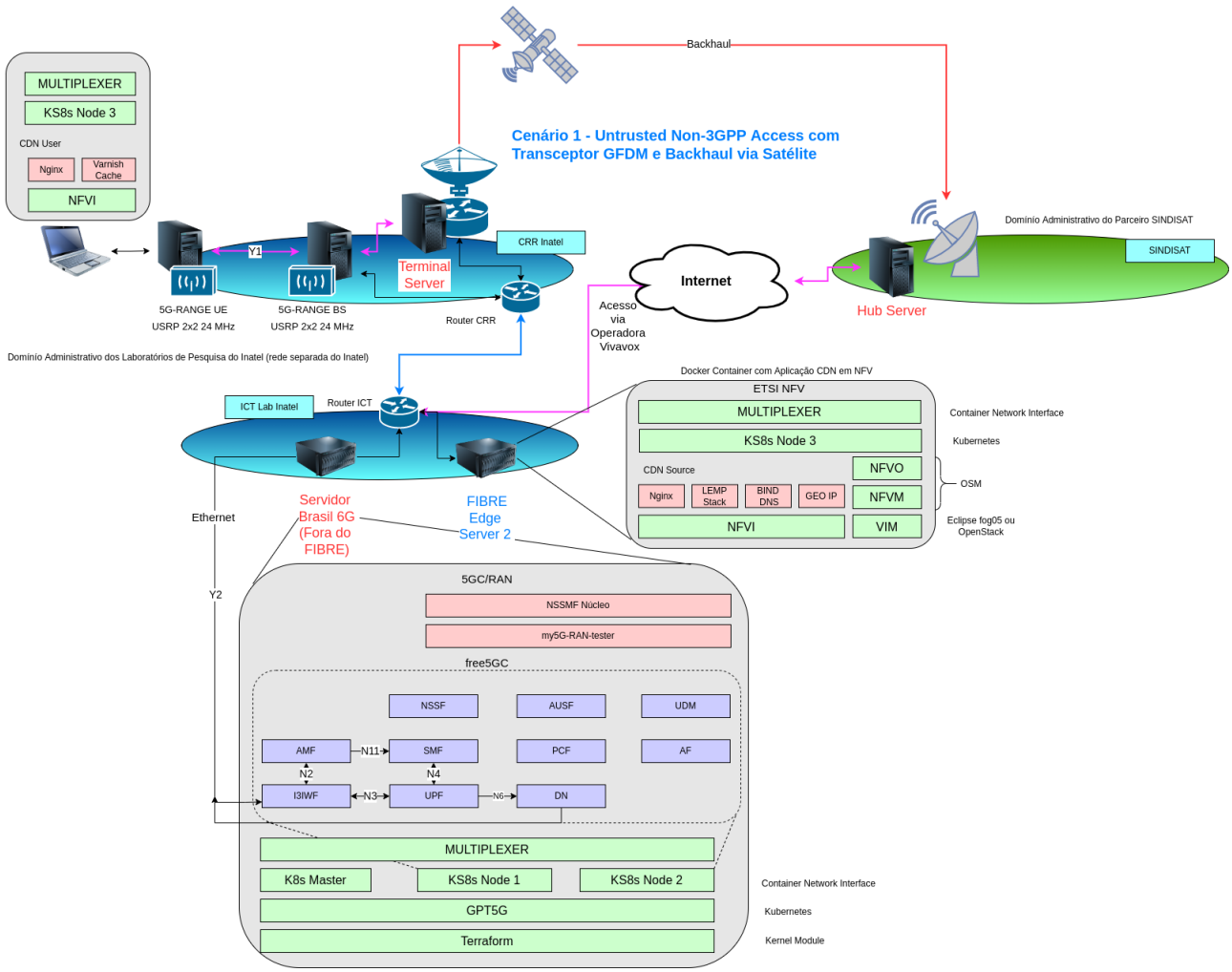


Figura 25: Caminho 1 para integração da rede satelital ao Projeto Brasil 6: visão horizontal.

A Figura 26 apresenta o corte vertical para esse caminho possível de integração. No plano de controle, o laptop cliente de CDN (ou seja, que fica do lado remoto da rede) implementa a pilha NAS/TCP/Inner-IP/IPSec/IP/Ethernet. Em seguida, a UE 6G recebe os quadros Ethernet gerados pelo laptop (contendo IP) e gera o sinal de RF. Um cenário de RoF pode ser inserido nesse enlace, conforme já comentado. A BS 6G recebe os pacotes IP do outro lado e entrega para o terminal satelital (*Terminal Server*), caso este seja usado. O *Terminal Server* implementa um *gateway* TCP que recebe os segmentos transportados nesse enlace desde o *laptop*, retira o conteúdo (NAS) desses segmentos e entrega ao TCP *Optimizer* (implementado em *hardware* ou *software*). Do outro lado do enlace satelital, os segmentos TCP são recebidos e a carga útil entra em outra conexão TCP. Logo, no *Hub Server* existe um *gateway* reverso. A carga útil (NAS) é entregue a função N3IWF. Finalmente, ainda no plano de controle, a N3IWF entrega os pacotes NAS a AMF usando a pilha de protocolos NGAP/SCTP/IP/Ethernet.

Uma vez realizados os procedimentos do plano de controle, os pacotes de dados (controles

e dados relativos ao cenário CDN com satélite do SINDISAT) são enviados sobre TCP e/ou UDP sobre IP/GRE/Inner-IP/IPSEC/IP/Ethernet. Em seguida, seguem o mesmo caminho anterior, chegando a N3IWF no plano de dados. No plano de dados, a N3IWF possui a pilha GRE/Inner-IP/IPSEC/IP/Ethernet do lado de acesso. A N3IWF traduz o tráfego de dados do usuário encapsulado em GRE para GPT-U/UDP/IP/Ethernet. O tráfego segue sobre Ethernet até a UPF. Na UPF, recupera-se o tráfego TCP e/ou UDP sobre IP enviado pelas VNFs no *laptop*. Esse tráfego segue até o servidor FIBRE Edge 2, onde estão as VNFs de CDN do lado do núcleo.

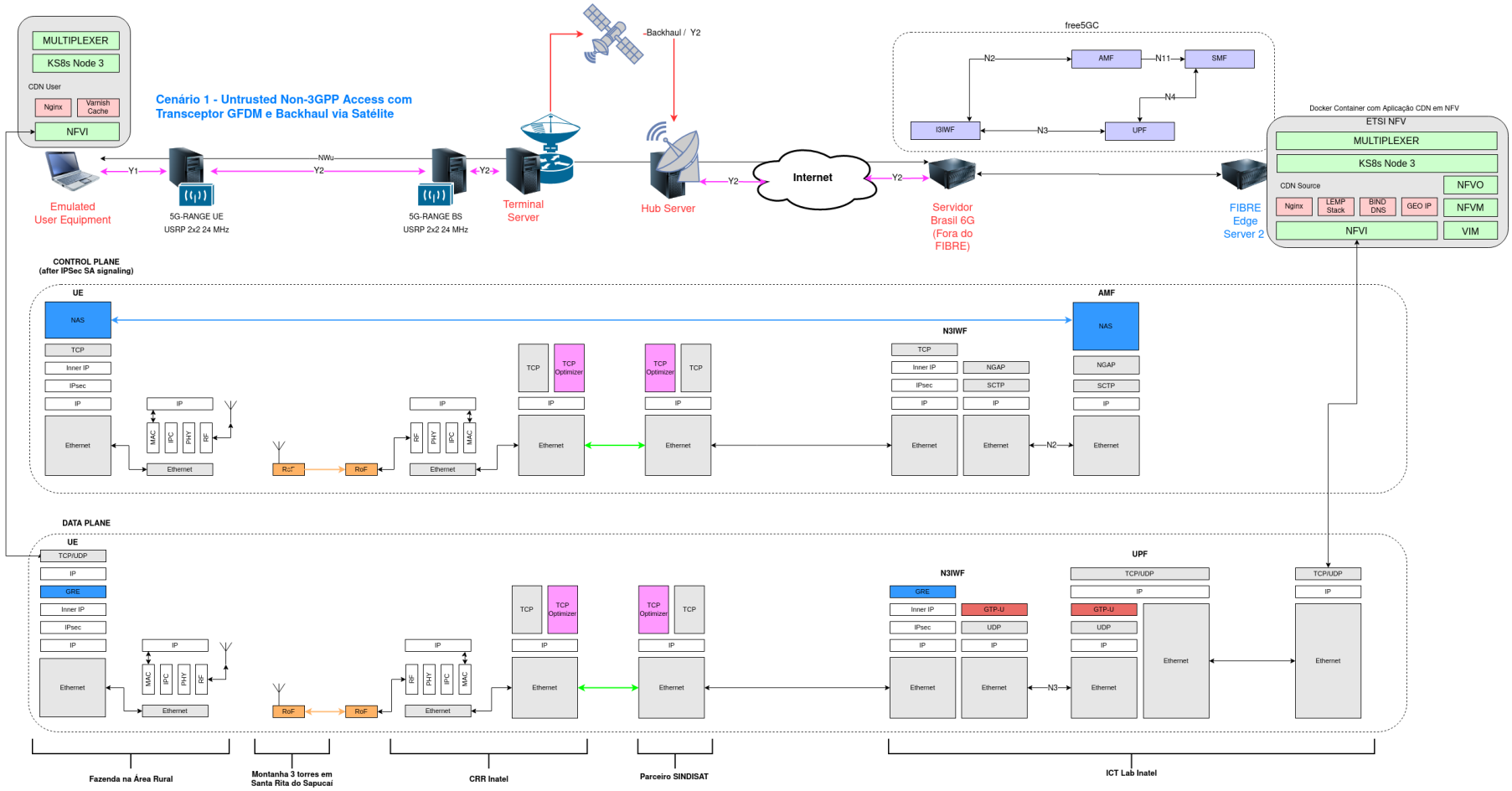


Figura 26: Caminho 1 para integração da rede satelital como backhaul ao Projeto Brasil 6: visão vertical.

8.1.2 Caminho 2: *Untrusted* N3A com Satélite em Fronthaul e Transceptor 6G

Esse caminho é uma alternativa ao Caminho 1 em que o satélite entra como *fronthaul*, atendendo a UE 6G. A Figura 27 ilustra essa variante. Nesse cenário, o enlace entre a UE 6G e a BS 6G é expandido pelo satélite. Como não é possível colocar a BS no parceiro SINDISAT, o *Hub Server* recebe o tráfego advindo da BS e o encaminha pela Internet de volta ao ICT Lab (entrada da Ilha FIBRE no Inatel). Após a entrada, o tráfego segue para o CRR onde fica a BS 6G. Em seguida, o tráfego segue até o Servidor Brasil 6G novamente no ICT Lab. O restante da figura segue exatamente da mesma forma que o Caminho 1.

A Figura 28 mostra o corte vertical para esse caso. A principal diferença é que a irradiação feita pela UE 6G é capturada pelo sistema de RoF e levada ao Ethernet, seguindo via satélite até o *Hub Server*. Via Internet o tráfego retorna até o reverso do sistema RoF, cuja saída entrega um sinal de RF à BS 6G no CRR. O próximo salto leva o tráfego IP da BS 6G até a N3IWF. Daí em diante, o caminho é igual ao 1. É importante observar que nesse caminho 2 apresentado na Figura 28, o uso de RoF não é opcional.

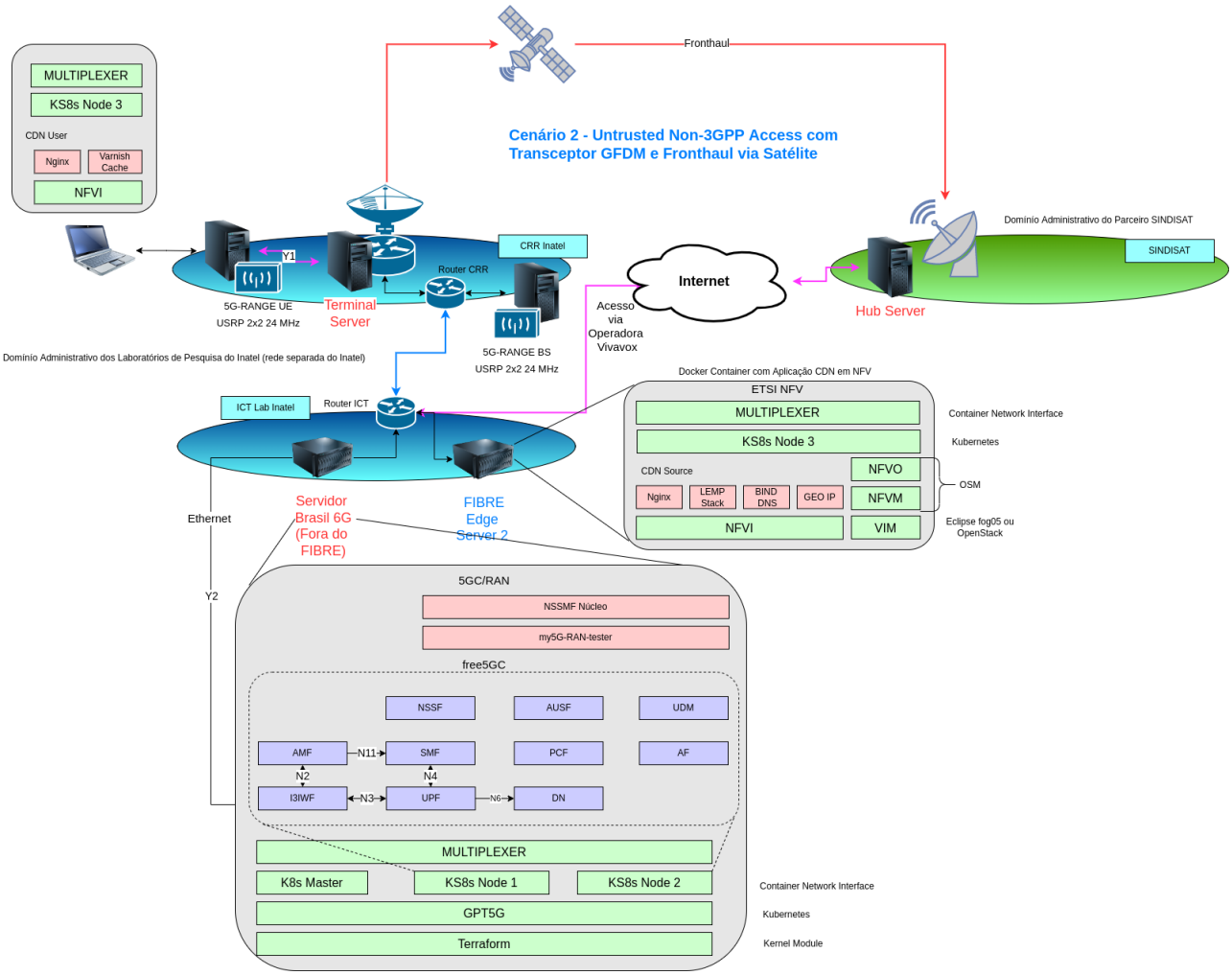


Figura 27: Caminho 2 para integração da rede satelital como fronthaul ao Projeto Brasil 6G: visão horizontal.

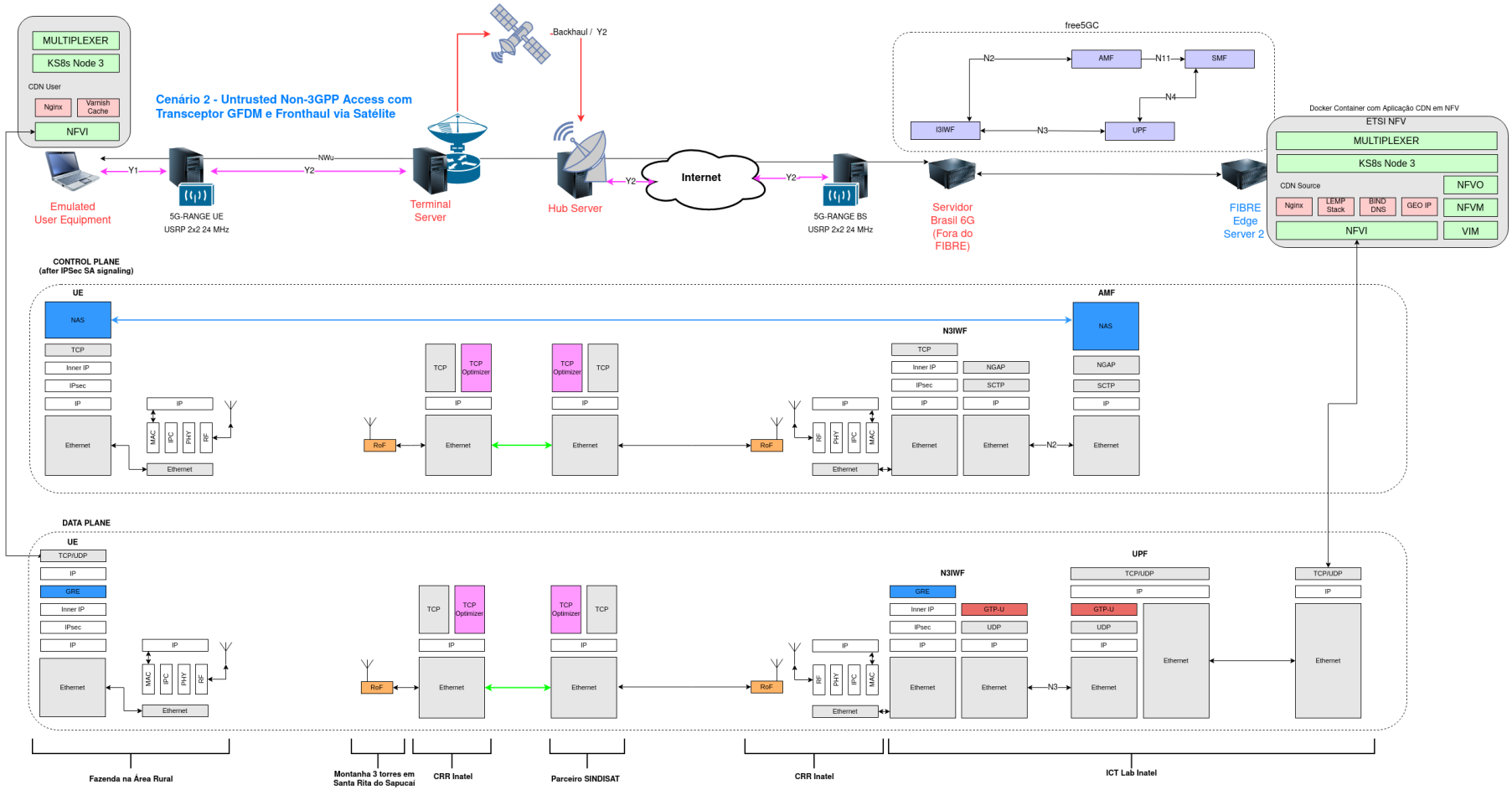


Figura 28: Caminho 2 para integração da rede satelital como fronthaul ao Projeto Brasil 6: visão vertical.

8.1.3 Comparação e Determinação de Caminho Preferencial

Por solicitação do SINDISAT pretendemos implantar os dois caminhos 1 e 2. Entretanto, o caminho 1 será feito primeiro. O caminho 2 será avaliado havendo tempo hábil para tal. Nesse momento, estamos aguardando a instalação do enlace satelital físico no Inatel para dar continuidade nos caminhos 1 e 2.

9 Ação 8 - Inteligência Artificial

Esta seção tem como objetivo traçar os possíveis caminhos para integração de IA com os componentes da rede 6G (acesso, núcleo, aplicações), em especial a proposta Proto 6G em construção na META 5. Ainda, mudanças arquiteturais necessárias no 6G podem ser propostas a partir da análise dos possíveis caminhos. Para não fugir do que órgãos padronizadores têm trabalhado, parte-se do NWDAF do 3GPP e *AI framework* do *International Telecommunication Union* (ITU), discutindo-se a distribuição dos componentes ao longo da rede como possíveis caminhos [80, 81].

A maior parte dos trabalhos analisados como fundamentação teórica para esta ação trabalha com versões de NWDAF para aplicação de IA. Do ponto de vista arquitetural, as escolhas dos pesquisadores são ambientadas no contexto de que os componentes para IA podem estar centralizados ou distribuídos. Alguns trabalhos também vão na direção de um modelo híbrido, com alguns componentes de coleta distribuídos ao longo de segmentos de rede (acesso, transporte, núcleo) e componentes de análise de dados centralizados. Ao longo desta seção discute-se os possíveis caminhos para introduzir a AI como de forma onipresente no Proto 6G.

9.1 Estado da Arte

Considerou-se os seguintes aspectos na análise de trabalhos correlatos: arquitetura (centralizada, distribuída ou híbrida), IA/*Machine Learning* (ML) ao longo da arquitetura, tipo de aprendizado (supervisionado, não supervisionado ou *reinforcement*), origem dos dados e compatibilidade com 3GPP. A Tabela 17 traz alguns dos trabalhos avaliados.

A coluna 'AI/ML Ao longo da Arquitetura' mostra se os algoritmos de IA são aplicados em toda a arquitetura de rede (fim-a-fim) ou somente em determinado segmento (RAN, transporte, núcleo, etc.). Ressalta-se que, apesar de alguns trabalhos pregarem que sua solução é fim-a-fim, os algoritmos de IA desses trabalhos atuam com dados da RAN apenas. A coluna 'Tipo de Aprendizado' mostra os métodos de aprendizado que os trabalhos consideraram nas suas soluções e experimentos, tais como aprendizado supervisionado, não supervisionado, etc. A coluna 'Origem dos Dados' apresenta de onde os dados que são suporte para a técnica são coletados, por exemplo RAN, núcleo, funções de rede, UE, etc.

Além das colunas mencionadas, há a coluna 'Tipo da Arquitetura de IA', ponto essencial da análise deste relatório. Com vistas a arquitetura do núcleo 6G, o tipo de arquitetura (centralizada ou distribuída) foi escolhida como possíveis caminhos para implantação de IA onipresente no 6G, visto que o intuito deste projeto é fornecer a arquitetura e componentes para que IA possa ser explorada como bloco de principal de construção. Dessa forma, as demais colunas da tabela são importantes do ponto de vista de algoritmos e técnicas de IA que o estado da arte utiliza, mas a coluna 'Tipo da Arquitetura de IA' tem maior importância nesta seção.

Por fim, a coluna 'Compatível com 3GPP' mostra o estado atual de cada trabalho em relação às *releases* do 3GPP. A informação 'Não' nesta coluna significa que as propostas estudadas neste momento não estão em *releases* do 3GPP, mas podem ser compatíveis no futuro.

É possível encontrar trabalhos com uma arquitetura híbrida para suportar IA. Em alguns desses trabalhos, há funções de análise de dados separadas por domínio (RAN, núcleo, *edge*), enquanto o módulo de tomada de decisões fica centralizado [89]. Para estes trabalhos, pode-se dizer que componentes que executam algoritmos são distribuídos, e não apenas componentes de coleta de dados. Componentes centralizados recebem dados dos domínios e podem se integrar com componentes 3GPP, como por exemplo o NWDAF [89]. Uma vez que há componentes

Tabela 17: Estado da arte da aplicação de AI na arquitetura do 6G.

Referência	**AI/ML Ao longo da Arquitetura**	**Tipo de Aprendizado**	**Origem dos Dados**	**Tipo da Arquitetura de IA**	**Compatível com 3GPP?**
[82]	RAN	Supervisionado	RRU, UE	Centralizada	Sim
[50]	Fim-a-fim	Federado	Todas NFs	Distribuída	Não
[83]	Não especificado	Supervisionado, não supervisionado, aprendizado por reforço	Não especificado	Distribuída	Baseada
[84]	Fim-a-fim	Aprendizado federado	Todas NFs	Distribuída	Sim
[85]	Fim-a-fim	Supervisionado, não supervisionado	Data lake/ warehouse, NFs, OAM	Distribuída	Sim
[86]	Não especificado	Não especificado	Não especificado	Não especificado	Sim
[87]	Fim-a-fim	Não especificado	Todas NFs, incluindo não 3GPP	Centralizada	Sim
[88]	Fim-a-fim	Não especificado	Não especificado	Centralizada	Sim
[89]	Fim-a-fim	Supervisionado (Algoritmos Ensemble Learning, GBM, XGBoost, CatBoost).	RAN, edge, núcleo	Distribuída com alguns componentes centralizados	Sim
[90]	Fim-a-fim	Supervisionado e não supervisionado (futuramente)	RAN, edge e núcleo.	Distribuída	Sim
[91]	Fim-a-fim	Não especificado	Não especificado	Centralizada ou distribuída	Baseada
[92]	Edge	Federado	Não especificado	Centralizada ou distribuída	Não
[93]	RAN (camada PHY)	Supervisionado, não supervisionado, aprendizado por reforço	RAN	Fora do escopo	Sim
[81]	Fim-a-fim	Aprendizado multi-agentes (incluindo reforço)	RAN, CN, TN	Centralizada ou distribuída	Não

específicos em todos os domínios, pode-se considerar que os trabalhos desse tipo permitem a abrangência da IA fim-a-fim.

O trabalho apresentado por [81] propõe uma evolução de funções desenhadas para suporte de voz, de dados e de inteligência, sendo que essa última inicia-se no 5G com a introdução do NWDAF e permeia a rede fim-a-fim em uma futura evolução da arquitetura 6G. O artigo propõe o conceito de "*intelligence inclusion*", como uma abstração de alto nível para uma visão prematura da forma em que o 6G irá suportar nativamente os serviços IA.

Essa "*intelligence inclusion*" incorpora minimamente quatro aspectos de aplicação dentro da arquitetura 6G: infraestrutura, governança de dados (relacionado sobretudo à privacidade e segurança dos dados), *Network Operations, Administration and Maintenance* (OAM) e serviços de IA de terceiros [81].

Para viabilizar essa arquitetura, os autores propõem algumas novas funcionalidades, além dos planos de dados e controle: um novo plano de inteligência (*intelligent plane*) e uma plataforma *Everything as a Service* (XaaS) que poderá integrar serviços de infraestrutura, comunicação e computação nas camadas de *Infrastructure as a Service* (IaaS), *Platform as a Service* (PaaS) e *Software as a Service* (SaaS).

O trabalho apresentado por [84] analisa detalhes técnicos sobre a implementação do componente NWDAF, bem como a sua integração num 5G Core funcional baseado na implementação Open5GS [26] e na ferramenta de emulação UERANSIM [94]. Este trabalho explora um estudo de caso que aplica NWDAF no MANO para otimizar o aprovisionamento de funções de rede. Os dados e estatísticas das funções do Core são acessados diretamente pelo NWDAF via SBA, que faz uma análise sobre os protocolos utilizados e o tamanho das primitivas. Esses resultados são disponibilizados pelo serviço definido pela especificação NWDAF, podendo assim serem integrados ao MANO.

O trabalho apresentado em [89] propõe uma plataforma com base no conceito de *Intent-based Networking* com o objetivo de fornecer controle e gerenciamento inteligente de fatias de rede com funções especificadas pelo 3GPP para o componente NWDAF, que é utilizado para previsão de utilização de fatias, garantia de QoS, balanceamento de carga, escalonamento automático de recursos de VNF e detecção de anomalias. Os resultados apresentados são preliminares, mas apontam para a viabilidade de utilização do NWDAF para concepção de uma abordagem *Intent-Based Network* (IBN).

Em [50] os autores apresentam uma proposta de arquitetura distribuída onde para cada função do core é associada uma NWDAF (chamada folha - *Leaf NWDAF*) que contém os modelos analíticos associados a cada função do core. Na arquitetura existe também uma NWDAF central (chamada *Root NWDAF*) que é responsável treinar os modelos de cada *Leaf NWDAF*. A Root NWDAF possui um módulo de comunicação para atualizar os modelos em cada *Leaf NWDAF*. Apesar da visão de componentes distribuídos entre as funções, todos estes componentes estão centralizados no core da rede.

9.2 Levantamento de Possíveis Caminhos para Integração da AI

As especificações do 3GPP e ITU a respeito de IA para 5G podem ser consideradas emergentes, pois mesmo a especificação do NWDAF traz diversos trechos como 'trabalho futuro' [81, 82]. Considerando a proposta deste projeto, parte-se do aspecto arquitetural para delimitar possíveis caminhos de introdução de IA no 6G, ou até mesmo evolução do que há no 5G para suportar requisitos de 6G. Portanto, o levantamento de possíveis caminhos aborda o viés centralizado ou distribuído das arquiteturas para IA.

9.2.1 Caminho 1: Centralizado

Em uma primeira investigação pôde-se imaginar que o caminho natural para IA seria uma abordagem distribuída, pois mesmo no 5G falava-se em IA na *edge*. Porém, em virtude do pouco detalhamento de como deve funcionar o NWDAF, encontrou-se diversos trabalhos com utilização de componentes NWDAF centralizados.

Há dois motivos principais pelos quais a abordagem centralizada foi adotada: (i) foco dos trabalhos nas técnicas e modelos de aprendizado de máquina; e (ii) foco dos trabalhos no segmento RAN. O primeiro motivo significa que, em virtude da falta de especificação de componentes de NWDAF, os trabalhos a priori aplicaram IA se preocupando com *dataset* e algoritmos de IA e não com a arquitetura. O segundo motivo significa que, apesar de alguns trabalhos mencionarem que suas propostas englobam todos os segmentos de rede, na prática os experimentos e simulações atacam apenas o segmento RAN.

As principais vantagens de IA centralizada são: facilidade de implementação e implantação; segurança dos dados (do ponto de vista de implantação de mecanismos de segurança); possibilidade dos pesquisadores dispenderem mais esforços nos algoritmos de IA do que no *setup* do ambiente. Em geral, mesmo atuando no segmento RAN, as propostas enviam dados para nuvens públicas ou privadas, nas quais os componentes de IA estão localizados. Devido a baixa curva de aprendizado de nuvem, considera-se que os esforços de implementação e implantação são baixos. Uma vez que os dados são armazenados em uma estrutura centralizada[8], a preocupação de segurança dos dados coletados é minimizada, isto é, preocupa-se com segurança em um único local. Por fim, muitos trabalhos de IA em redes de computadores e telecomunicações preocupam-se prioritariamente com o aprendizado e análise dos dados para segurança, *handover*, controle de tráfego, etc., o que significa que a maior preocupação dos pesquisadores está nos algoritmos de IA e preparação dos *datasets*. Um *setup* básico foi considerado suficiente na maior parte dos trabalhos.

As principais desvantagens de IA centralizada são: alto tráfego de rede para envio de dados coletados ao longo da topologia; tratamento de dados de forma universal; segurança dos dados (do ponto de vista de risco); e atraso elevado. O alto tráfego de dados eleva o custo para operadoras e provedores de infraestrutura e aumenta a complexidade de tempo de análise dos dados. Uma vez que os dados são tratados no mesmo local, apesar de não ser obrigatório, a IA pode ser induzida a tratar os dados da mesma forma, sendo que dados de diferentes segmentos devem ser tratados considerando particularidades do segmento em questão. Apesar da implantação de mecanismos de segurança de dados em um único local ser uma vantagem (como explicado no último parágrafo), o risco é maior do que em um ambiente distribuído pois, caso um atacante consiga quebrar os mecanismos de segurança, ele terá acesso aos dados de toda a topologia. O atraso elevado para envio das métricas pode tornar a centralização impeditiva em ambientes com requisições periódicas de controle rígido.

9.2.2 Caminho 2: Distribuído

A maior parte dos trabalhos no estado da arte argumentam que a IA é *end-to-end* (fim-a-fim). Dessa forma, uma solução distribuída é condizente, pois componentes de IA específicos para cada segmento podem ser implantados. Neste sentido, o caminho distribuído significa que a aplicação de IA é distribuída ao longo da topologia, e não somente a coleta de informações.

[8]'Centralizado' neste contexto trata do segmento no qual os componentes estão dispostos. Alguns nós podem estar distribuídos dentro do segmento, por exemplo nós de bancos de dados das soluções.

A principal vantagem de IA distribuída está na aplicação de técnicas e modelos de IA apropriadas para cada segmento. Por exemplo, um algoritmo para a RAN possui *inputs* e *outputs* diferentes do que um algoritmo para o *Transport Network* (TN). De fato, os dados a serem treinados, classificados, analisados, etc. variam de segmento para segmento. Outra vantagem de IA distribuída está no poder de processamento e tráfego de transferência de dados: o processamento pode ser distribuídos nos diversos segmentos de rede e não é necessário que dados sejam transmitidos inter-segmentos a todo momento, havendo portanto economia de banda. Por fim, a redução do atraso é uma vantagem a ser considerada, uma vez que os procedimentos de IA são executados localmente.

As desvantagens em uma abordagem distribuída estão na complexidade de implantação dos componentes ao longo da topologia e na unificação dos resultados para aplicação *end-to-end*. Apesar disso, a abordagem centralizada parece cabível para projetos de pesquisa com foco nas técnicas de IA, mas em ambientes produtivos de grandes operadoras e empresas corporativas torna-se uma abordagem insustentável. A unificação dos resultados é um problema pois as propostas rogam pelo *end-to-end*, mas não deixam claro como métricas específicas de determinado segmento afetam outros segmentos. Por exemplo, no segmento TN, uma métrica relacionada a latência de determinado enlace é fundamental. Mas, no CN, essa métrica não faz sentido nenhum se não for correlacionada a uma métrica de CPU, memória, etc. Dessa forma, resultados da aplicação de IA em determinado segmento tendem a melhorar o gerenciamento de recursos naquele segmento.

9.2.3 Caminho 3: Híbrido

Uma abordagem híbrida é adotada em alguns trabalhos no estado da arte. Geralmente, alguns componentes são implantados nos diferentes segmentos RAN, TN e CN, enquanto outros são centralizados e integrados a um NWDAF também centralizado. Ressalta-se que nessa abordagem componentes de processamento são distribuídos em diferentes segmentos, e não somente componentes de coleta. Em [89], os componentes centralizados fazem a análise de dados dos diferentes segmentos para buscar intenções dos usuários.

Na abordagem híbrida, pode-se ter as melhores vantagens da abordagem centralizada e da distribuída. O tráfego de dados pode ser reduzido visto que nem todos os dados precisam ser enviados para os componentes centralizados. O processamento pode ser distribuído entre partes da topologia. Particularidades de cada segmento podem ser tratados no próprio segmento, enquanto a IA *end-to-end* pode ser aplicada nos componentes centralizados.

Notoriamente, a utilização de uma ou outra abordagem (centralizada ou distribuída) possui vantagens relacionadas especificamente àquela abordagem. Para exemplificar, considere-se o tráfego de dados: na abordagem distribuída, o tráfego ainda será menor que na abordagem híbrida, pois nenhum dado será permutado entre diferentes segmentos ou tampouco entre componentes (como na abordagem híbrida). Ainda assim, à luz dos conceitos de *federated learning* e *transfer learning*, a abordagem híbrida permite que algoritmos de IA sejam executados em diferentes segmentos (como na abordagem distribuída) e no núcleo propriamente dito (como na abordagem centralizada). Dessa forma, dados que não possam sair de determinada região podem ser tratados localmente. Ainda, dados de treinamento podem ser reaproveitados para outro tipo de treinamento.

Dessa forma, entende-se que a obtenção de *federated/transfer learning* é simplificado com a utilização da abordagem híbrida. Indo além, pode-se afirmar que é praticamente impossível ou altamente complexo atingir *federated learning* em um ambiente centralizado. Ademais, pode-

se afirmar que o *transfer learning* exige que entidades centralizadas ao menos orquestrem a entrada, saída e transformações dos algoritmos de treinamento.

9.2.4 Comparação e Determinação de Caminho Preferencial

Além da arquitetura centralizada, distribuída ou híbrida, considerou-se os seguintes aspectos na análise de trabalhos correlatos: IA/ML ao longo da arquitetura, tipo de aprendizado (supervisionado, não supervisionado ou *reinforcement*), origem dos dados, compatibilidade com 3GPP. A Tabela 17 traz alguns dos trabalhos avaliados.

Considerando a investigação realizada, pode-se inferir dois desafios principais em aberto. O primeiro é que a maior parte dos trabalhos aborda o aspecto *end-to-end* e menciona que a solução considera todos os segmentos de rede; porém, na prática, o que se encontra são experimentos e simulações focando apenas em RAN. O segundo desafio está na correlação dos dados de diferentes segmentos, isto é, como um dado do segmento TN (por exemplo, *link usage*) tem relação com um dado do RAN (por exemplo, atraso de propagação na antena) ou com um dado do CN (por exemplo, capacidade de memória), e assim por diante.

Para atacar os dois problemas em aberto, determina-se como caminho preferencial para o Brasil 6G (e para a arquitetura Proto 6G) o caminho híbrido. Desta forma, componentes de IA podem ser experimentados em segmentos de rede diversos, de forma distribuída, focando-se em segmentos diferentes da RAN (de forma contrária ao que se encontra comumente na literatura). Também, pode-se idealizar componentes centralizados com funcionalidades para a correlação de dados de diferentes segmentos.

Para realização do caminho hibrido, partiu-se de um melhoramento do bloco funcional do core 5G existente conforme Figura 29. Neste bloco, nota-se que as funções necessárias para o funcionamento do serviço de conectividade móvel permanecem com adicional proposto de uma entidade NWDAF com papel duplo. Inicialmente, o 3GPP compreende que NWDAF cumpre o papel de oferecer *analytics* para a rede, para isso técnicas tanto de AI como de agregação de dados são necessárias. No entanto, trabalha-se com a hipótese de estender essa compreensão de uma função de *analytics* no núcleo para uma entidade que oferece inteligencia artificial sob demanda, tanto para a operação e gestão da rede, quanto para os usuários e novas aplicações.

Por isso, distingue-se conforme ilustrado na Figura 29 dois papeis para o NWDAF: AI para Conectividade, indicado como *AI for Networking* e Conectividade para AI, indicado como *Networking for AI*.

O termo AI para Conectividade refere-se a utilização de técnicas de AI para apoiar a operação e gestão da rede em seus mais diversos aspectos. Com esse melhoramento previsto para o NWDAF, inicialmente idealizado pelo 3GPP, propomos o conceito do *Evolved Network Data Analytics Function* (eNWDAF).

Para tanto, vislumbra-se que os paradigmas de AI possam ser amplamente utilizados para por exemplo na predição de trafego, otimização de uso de recursos, aprimoramento de mecanismos de segurança. A necessidade de uma entidade realizando esse papel fundamenta-se no fato de a utilização de técnicas de AI conhecidas hoje serem alheias a arquitetura de rede. Isso significa que as potencialidades da AI são colocadas como funções adicionais nas arquiteturas de rede e não como um componente nativo e integrado ao bloco estrutura.

Isso leva a limitações quando a coexistência de múltiplos paradigmas e técnicas de AI sobre uma arquitetura, o que limita uma gerencia fim-a-fim e detalhada. Alternativamente, com uma entidade cumprindo o papel de lidar com técnicas de IA para suporte a conectividade, problemas assim poderão ser endereçados.

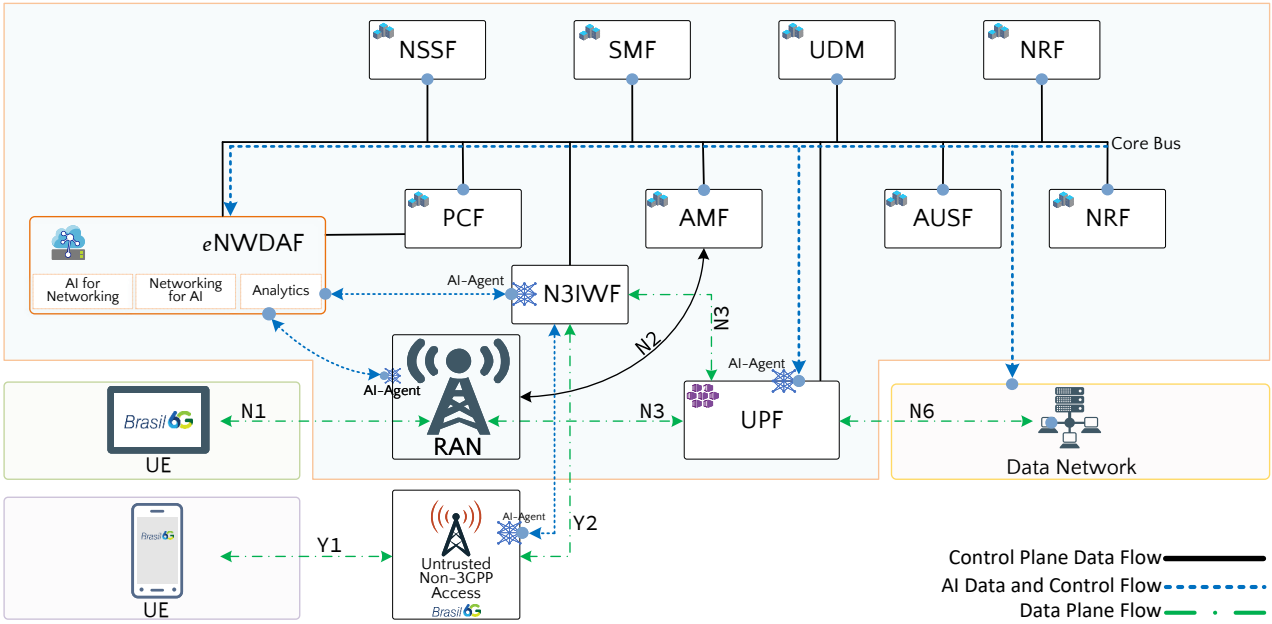


Figura 29: Avanços no *Core* relacionados à AI no à Arquitetura Proto 6G.

Outro papel previsto ao eNWDAF é uma entidade nativa de suporte de AI que pode fornecer informações para aplicações e usuários. Neste caso a rede também auxilia as aplicações a possuir uma maior ciência do contexto relativo à rede as suporta. Este é o conceito da Conectividade para AI (*Networking for AI*).

O *design* de uma entidade com esse papel avança o conceito de *analytics* inicialmente compreendido e aceito pelo 3GPP, e sobretudo, coloca o núcleo de rede como um ecossistema para suporte de usuários e aplicações inteligentes, consumindo localmente recursos computacionais para suporte de AI. A razão desse papel atribuído ao eNWDAF é embarcar para o núcleo da rede móvel o conceito de computação de borda, incorporando capacidades computacionais e a previsão de serviços sofisticados no núcleo da rede móvel para oferta de AI, com seus desdobramentos e paradigmas para os usuários.

O elemento chamado Artificial Intelligence Agent (AI-Agent) é o responsável pela implantação de forma híbrida da AI ao longo da topologia da rede. Este elemento possui duas funções principais. A primeira delas diz respeito à realização de técnicas e mecanismos de AI através de diversos processos como treinamento, aprendizagem e inferência. A outra função está relacionada à transferência de dados necessários tanto para operação quanto para a gestão destes mecanismos distribuídos de AI ao longo da topologia da rede e sua arquitetura.

A técnica híbrida idealizada neste relatório consiste em estender as capacidades previstas da entidade NWDAF fazendo-o suportar uma operação dupla dos mecanismos de AI. De um lado, vislumbra-se a oferta e entrega de funcionalidades de AI ao longo da arquitetura da rede móvel cumprindo a todas as demandas do ciclo de vida de fatias de rede bem como do monitoramento. Além disso, idealizamos um funcionamento distribuído, isto é, baseado em AI-Agent que são rotinas de código distribuídas ao longo da arquitetura. Essas rotinas permitem tanto a coleta de dados para mecanismo de *analytics* quando para empenhar funções conhecidas de IA, isto é, predição, classificação e *forecasting*.

A outra inovação idealizada para o eNWDAF é a realização do suporte nativo de IA para aplicações e usuários. Com isso, espera-se uma oferta de serviços de IA de forma disruptiva,

anternativo ao padrão centralizado em servidores de alto desempenho. Por fim, a outra funcionalidade idealizada no eNWDAF é a função de *analytics* que já é prevista pelo 3GPP.

9.3 Relações Macro entre Núcleo, Acesso e Aplicações

A Figura 29 apresenta no core Proto 6G as intervenções ligadas à AI. Entretanto, esta figura também indica que os componentes de AI estão distribuídos ao longo da topologia da rede. Assim a Figura 29 indica que presença dos *AI-Agent* tanto na RAN como no acesso não-3GPP não-confiável (*Untrusted Non-3GPP Access*). Neste caso, o *AI-Agent* é o componente responsável por operações ligadas à AI no acesso da rede. Este componente possui capacidade para enviar fluxos de dados e controle de AI para o núcleo da rede. Assim é possível realizar processamento de AI em diferentes pontos da topologia da rede seja no acesso ou núcleo e realizar a troca de informações de forma controlada entre estes elementos, segregando papéis, contribuindo para o uso de AI ao longo de toda arquitetura.

O acesso indicado na Figura 29 é o mesmo indicado na Figura 9. Este acesso utiliza a Interface Y2 para acesso à função N3IWF, que por sua vez fornece acesso à UPF através da interface N3.

Este acesso será utilizado pelo UE-T6G, como indicado na Figura 14. Este mesmo acesso também poderá ser utilizado por dispositivos IoT, conforme indicado na Figura 16. O *AI-Agent* poderá ser implantados no acesso 6G, neste caso, o elemento *BS-T6G* e assim realizar a abordagem híbrida dentro da arquitetura Proto 6G.

10 Ação 9 - Distributed Ledger Technologies

Nesta seção, aprofundamos a discussão sobre o suporte das DLTs (*Distributed Ledger Technologies*) [95] como tecnologia promissora nas arquiteturas de 6G. DLTs referem-se à infraestrutura tecnológica e aos protocolos que permitem acesso, validação e atualização de registros simultâneos de maneira imutável em uma rede espalhada por várias entidades ou locais (*Blockchain* é a DLT atualmente mais popular). DLTs podem ser definidas como livros de transações digitais distribuídos que armazenam blocos de dados compartilhados em uma rede de nós de computadores (rede descentralizada).

Em um cenário 6G, as DLTs podem ser aplicadas em:

- Compartilhamento de Dados;
- *Edge/Cloud Storage*;
- Comércio de Energia;
- Aprendizado Federado e Compartilhamento de Espectro;
- Gerenciamento de Recursos/Serviços;
- Mecanismos de dimensionamento dinâmico de fatias para ambientes de vários domínios.

Nesse contexto, foram avaliados os possíveis caminhos que nortearão a utilização das DLTs em uma arquitetura de 6G com foco no núcleo da arquitetura.

10.1 Levantamento de Possíveis Caminhos para Integração de DLTs

Em [96] foram propostas duas arquiteturas para a 6G, sendo uma arquitetura evolucionária e uma arquitetura disruptiva, em que foram apresentados alguns potenciais habilitadores em que o princípio da imutabilidade podem ser empregados. Desta forma, essa seção buscar avaliar quais são as visões do 3GPP, dos projetos *Open Sources* e das DLTs como IOTA [97], *Smart Contracts* e DLTs baseadas em Blockchain [98] como tecnologias habilitadoras.

10.1.1 Visão do 3GPP

Conforme o *Release Timelines* do 3GPP [99], atualmente o 3GPP encontra-se em fase de finalização do *Release* 17 e início do *Release* 18. O *Release* 17 tem previsão para ser finalizado em 2022, tendo como objetivos aprimoramentos voltados para casos de uso existentes. O *Release* 18 foi aberto em 2022 e tem previsão para ser finalizado em 2024. O *Release* 18 representa uma grande evolução do sistema 5G, pois inclui aprimoramentos nas áreas de Inteligência Artificial e Realidade Estendida; não contemplando a aplicação dos DLTs como tecnologia para a 5G.

Atualmente, o 3GGP tem o grupo de pesquisa TSG SA WG6 (SA6) [100]. Este grupo está trabalhando em um estudo denominado "*Study on Blockchain support in Application Layer for 5g Verticals*", mas até o presente momento não foram reportados nenhum resultado ou direções sobre o uso dos DLTs para os próximos *releases*. Do ponto de vista arquitetural, existe um caminho a ser percorrido e novas oportunidades, desafios estão em aberto para propor a utilização das DLTs como uma tecnologia habilitadora em 6G.

10.1.2 DLTs (*Distributed Ledger Technologies*)

Distributed Ledger Technology (DLT) receberam atenção crescente nos últimos anos como um método inovador de armazenamento e atualização de dados dentro e entre as organizações. Um *distributed ledger* é um livro digital diferente de redes centralizadas e sistemas de *ledger systems* de duas maneiras. Primeiro, as informações são armazenadas em uma rede de máquinas, com alterações no *ledger systems* refletidas simultaneamente para todos os detentores do *ledger systems*. Em segundo lugar, a informação é autenticada por uma assinatura criptográfica. Juntos, esses sistemas fornecem um registro transparente e verificável das transações. A tecnologia *Blockchain* é um dos usos mais conhecidos do DLT, em que o *ledger* compreende 'blocos' de transações, e é a tecnologia subjacente à criptomoeda Bitcoin. No entanto, os possíveis usos dos DLT's vão muito além do setor financeiro; seu uso também foi explorado na educação, nas indústrias criativas, na agricultura, nas indústrias de alimentos e nas arquitetura de telecomunicações (dentre outros). A seguir, apresentamos as DLTs mais conhecidas e que tem relação com esse trabalho:

10.1.2.1 Blockchain *Blockchain* é uma sequência de blocos, que contém um lista de registros de transações como livro público convencional. Um bloco consiste de cabeçalho do bloco e do corpo do bloco. Os sistemas de *Blockchain* atuais são categorizados aproximadamente em três tipos: *Blockchain* público, *Blockchain* privado e *Blockchain* de consórcio [101]. Em um rede *Blockchain* pública, um nó pode juntar-se livremente à rede e ativar funcionalidades da rede que estiverem disponíveis, observando que o termo 'nó' refere-se a uma entidade (ou seja, a identidade de um usuário blockchain) em vez de um dispositivo físico. Em outras palavras, os nós são muitas vezes referidos como os 'mineradores' ou 'nós de mineração' de blocos no contexto na formação da cadeia *Blockchain* [102]. Os principais recursos do *Blockchain*, distintos de outros bancos de dados relacionais, estão associados à sua natureza distribuída. No *Blockchain*, várias cópias do *ledger* são mantidas por diferentes partes, com dados adicionados por consenso e sem a necessidade de terceiros. Como resultado, *Blockchain* pode fornecer ganhos em eficiência, confiança e reconciliação de dados em todos os participantes do *ledger systems*. Isso significa que *Blockchain* é capaz de oferecer:

- Um registro imutável: os dados adicionados ao *ledger systems* são, em teoria, imutáveis, seguros e preservados durante a vida do *ledger systems*, com o consentimento de todos os participantes quanto ao conteúdo;
- Desintermediação: os nós podem interagir diretamente, sem a necessidade de um intermediário. Isso inclui a capacidade de iniciar transações diretas de dados ou ativos digitalizados (que podem ser uma criptomoeda, como Bitcoin, ou uma representação digital de ativos do mundo real, como títulos de propriedade ou moeda fiduciária;
- Falta de controle central por uma das partes. Acréscimos ao *ledger systems*, razão ou mudanças na estrutura administrativa são decididas de forma consensual por vários participantes;
- Novas oportunidades de gerenciamento e compartilhamento de dados: essas oportunidades são alcançadas facilitando o armazenamento e acesso de várias formas para os participantes.

Blockchain tem o potencial de transformar as tradicionais indústrias com suas características chaves: descentralização, persistência, anonimato e auditabilidade, sendo uma tecnologia promissora para dar suporte ao núcleo das redes de 6G.

10.1.2.2 Smart contracts Contratos inteligentes são uma forma de contrato digital automatizado no qual os termos da transação são incorporados em código de computador, a serem cumpridos automaticamente pelo software mediante reconhecimento de uma determinada entrada. Em sua forma mais básica, os contratos inteligentes são "um conjunto de promessas, especificadas em formato digital, incluindo protocolos dentro dos quais as partes cumprem essas promessas. Embora o conceito tenha sido articulado pela primeira vez em 1996, a imutabilidade e a natureza distribuída do *blockchain* trouxeram uma atenção renovada ao conceito. Embora sejam comumente citados na literatura como uma aplicação potencial de *blockchain*, questões permanecem sobre o status legal, aplicabilidade e viabilidade tecnológica de tais contratos.

Pretendemos em 2023 avaliar a integração do mundo das DLTs com o Proto 6G através de *Smart Contract*. Se possível, ele será desenvolvido na linguagem *Solidity* e terá como finalidade dar suporte ao núcleo da rede, seja no suporte a tomada de decisões ou no registro imutável de ações do plano de controle. Tal *Smart Contract* poderia viabilizar uma moeda própria digital (*token*) da arquitetura Proto 6G. Entretanto, nesse momento, tal token é apenas uma possibilidade a ser avaliada e aprimorada em 2023.

10.1.2.3 IOTA IOTA é uma DLT *Open Source* e uma criptomoeda projetada para a Internet das Coisas (IoT). Utiliza DAG (*Directed Acyclic Graph*) direcionado para armazenar transações em seu *ledger*, motivado por uma escalabilidade potencialmente maior sobre a tecnologia *blockchain*.

Uma das vantagens da IOTA é na melhoria da taxa de transferência e na latência, em comparação com as DLTs baseadas em *blockchain*, benefício alcançado pela estrutura de dados baseada em DAG, denominada *Tangle*. IOTA permite que as transações sejam encadeadas diretamente, sem a necessidade de construir blocos. A estrutura DAG tem sido utilizada em propostas para compor a arquitetura 5G/6G, tendo como desvantagem ser uma solução nova e pouco conhecida, com poucas pesquisas científicas na literatura.

Em [103], foi proposta uma *Blockchain* baseada em DAG para compartilhamento de recursos em 6G, devido a limitação das transações nos sistemas de *Blockchain* em processar inúmeras transações de recursos produzidas simultaneamente em redes 6G. Para lidar com esse problema, foi proposto um esquema de dimensionamento de *Blockchain*que combina DAG com fragmentação, dividindo as transações de *Blockchain* em vários subconjuntos mutuamente disjuntos mantidos por diferentes comitês, permitindo que transações de alto volume de recursos sejam processadas e registradas simultaneamente. Além disso, todos os comitês mantêm um DAG global de bloqueios para resolver a degradação da segurança gerada pela fragmentação; demonstrando que o esquema proposto alcança um bom desempenho em eficiência de utilização de recursos.

O protocolo IOTA ainda está em pesquisa, possuindo duas redes públicas: em que a rede principal IOTA é a rede estável que gerencia os *tokens* IOTA. *Shimmer* é a rede de teste para as atualizações de protocolos mais recentes e melhorias quando mudanças são comprovadas no *Shimmer*. A futura atualização que conclui o esforço de descentralização é chamada *Coordicide* [97], uma atualização de protocolo planejada, em que fornece um novo mecanismo descentralizado para proteger a rede IOTA. Com esta atualização, a IOTA será a primeira DLT a resolver

três problemas fundamentais com a tecnologia *blockchain*: altas taxas, dimensionamento e centralização.

IOTA tem um potencial para ser uma DLT que irá prover funcionalidades em 6G, através da sua estrutura de dados *Tangle*, permitindo a validação paralela de transações sem exigir ordenação total, eliminando a necessidade de mineradores e validadores intermediários. A paralelização, a ausência de intermediários, a capacidade de trabalhar em um ambiente assíncrono e a abordagem sem líder oferecem uma solução de consenso e registro de alto desempenho [97]. Soma-se ainda o fato da IOTA não ter taxas para a realização de transações. Assim sendo, contratos inteligentes suportados no ambiente IOTA são outra opção a ser investigada em 2023.

10.1.3 Núcleos de Rede *Open Sources*

Do ponto de vista dos *frameworks* que implementam núcleos de rede, o que observamos foi um alinhamento entre o que está sendo definido nos *releases* do 3GPP e as funcionalidades que estão sendo implementadas nestes *frameworks*; o que torna a aplicação das DLTs nestes cenários desafiadora, mas ao mesmo tempo promissora. Foram avaliados alguns projetos *Open Sources* como: Open5gcore, free5GC, Open5GS, cn5G, SD-Core (Aether) [104], ONF (*Open Network Foundation*) [105] e Magma *core*, sendo que do ponto de vista de integração com as DLTs, nenhum deles tem habilitado essa funcionalidade. A seguir as considerações sobre o núcleo Free5GC e uma possível proposta de implementação para integrar o núcleo Free5GC com as DLTs no Proto 6G.

10.1.3.1 Free5GC Atualmente, o Free5GC está na implementação da Release 15 do 3GPP, não apresentando em seu *Roadmap* referência para as DLTs. Apesar de não fazer referência, o Free5GC tem potencial a partir do Estágio 3 em aplicar DLTs em relação às funcionalidades de Operação, Administração e Manutenção (OAM) da rede.

Uma proposta inicial para a integração entre o Proto 6G e as DLTs é desenvolver um módulo *proxy/gateway* no Free5GC que possa realizar a comunicação entre as DLTs e o núcleo da arquitetura. Esse componente ofereceria uma interface padronizada de comunicação, garantindo as taxas requeridas para uma rede de 6G. A investigação desse possibilidade e eventual implementação acontecerá no contexto da Atividade 5.3.

11 Considerações Finais

Este relatório apresenta o resultado das Atividades 5.1 e 5.2 realizadas durante o ano de 2022. No inicio do ano, as atividades foram dividas em 11 ações. As Ações de 1-9 foram executadas em paralelo, e como tal, tiveram seus resultados reportados. Em 2023, essas ações seguirão sendo executadas, juntando-se as Ações 10 e 11, que abraçam a Atividade 5.3. Para facilitar o entendimento, a seguir apresentamos as principais considerações finais para cada Ação realizada

11.1 Considerações Finais por Ação Desenvolvida

- **Ação 1** - Os princípios de projeto do Proto 6G foram revisitados, bem como os escopos de projeto. A partir destes, foi feita uma revisão da arquitetura evolucionária para o 6G proposta na primeira fase do Brasil 6G. Uma duzia de decisões de projeto foram tomadas em grupo democraticamente e reportadas neste relatório. Essas decisões guiaram os trabalhos do grupo em 2022. Por fim, uma visão que consolida as relações macro entre núcleo, acesso e aplicações foi feita para sumarizar o Proto 6G como um todo.

- **Ação 2** - Uma revisão do estado da arte em núcleos para o Proto 6G foi realizada. As alternativas Free5GC, Open5GS e CN5G (OAI) foram comparadas e analisadas considerando aspectos funcionais, técnicos, suporte a inteligência artificial, fatiamento de recursos, múltiplas redes de acesso, conformidade ao padrão 3GPP e robustez da implementação. A escolha do núcleo Free5GC como solução para evoluir o 5G na direção do 6G foi justificada. O principal motivo foi o suporte já implementando ao acesso não-3GPP, aspecto fundamental para acomodar os transceptores 6G do Inatel, bem como conectividade Wi-Fi, SigFox e LoRaWAN, importantes para os cenários de demonstração do projeto.

- **Ação 3** - Um estudo minucioso foi realizado para determinar as melhores opções de acesso para o 6G do Brasil. Caminhos preferenciais para integração do acesso via transceptor 6G de longa distância, acesso via Wi-Fi, e acesso de dispositivos IoT de baixo consumo de energia foram determinados e analisados. A escolha do acesso não-3GPP não-confiável foi o escolhido para integrar os transceptores 6G ao núcleo 3GPP. O enlace formado por esses transceptores irá fornecer um *backhaul* sem fio via *gateway* para transportar o tráfego das demais tecnologias, e.g., Wi-Fi, LoRa e Sigfox. Vale lembrar que esse caminho preferencial escolhido inicialmente não torna inviável a adoção futura de outros caminhos discutidos na Ação 3. Também é interessante observar que é possível conectar simultaneamente múltiplas tecnologias a um único transceptor 6G, assim como também é possível ter tecnologias diferentes conectadas a computadores diferentes, cada uma controlando um transceptor 6G do lado UE diferente, ou seja, usar múltiplos computadores atuando como equipamento de usuário (UE). Todas as escolhas de caminhos foram justificadas e comparadas no texto.

- **Ação 4** - Essa ação é fundamental ao projeto, pois visa definir em conjunto com os integrantes da META 2 do projeto Brasil 6G quais são as demandas de núcleo, acesso, software, aplicações, redes, IoT, etc. para a plataforma de experimentação em 6G do projeto. Decidimos apoiar a plataforma do projeto Brasil 6G na rede FIBRE da RNP. Tal solução se justifica pela facilidade de interconexão, orquestração e operação já existentes

na rede FIBRE e nas diversas ilhas das instituições participantes do projeto. Com isso em mente, adotamos o Kubernetes como principal ambiente para orquestração de funções virtuais de rede do Proto 6G. Analisamos, desenhamos e implementamos a plataforma que une as instituições participantes, bem como os laboratórios internos do Inatel. O ICT Lab do Inatel foi escolhido como ponto de convergência da plataforma, facilitando integrações e demostrações do Proto 6G. O principal data center do projeto fica no *rack* do ICT Lab. Os laboratórios do Inatel foram interconectados por uma malha redundante de fibras ópticas. Um total de 6 servidores foram preparados conforme especificação da RNP na rede FIBRE. Esta é hoje a maior ilha da rede FIBRE no Brasil. Testes de funcionamento do core Free5GC executando distribuído em três ilhas foram realizados pela Unisinos, UFG e Inatel. A integração com a nuvem do projeto LaMCAD da UFG foi realizada. Além do acesso via FIBRE, o acesso por VPN ao ICT Lab para fins de configuração de cenários foi também implementado. O servidor principal do projeto Brasil 6G foi especificado através de um levantamento democrático de requisitos e a compra realizada. Entretanto, até o momento o mesmo ainda não foi entregue pelo fornecedor. Usando recursos de outros projetos, todos os servidores do ICT Lab foram protegidos por *nobreak*, condição fundamental para estabilidade da plataforma do Brasil 6G. Ainda, a empresa Vivavox de Santa Rita do Sapucaí oferece acesso a Internet de 100 Mbps necessários ao ICT Lab. A equipe da META 5 ainda ajudou na escrita dos relatórios da META 2.

- **Ação 5** - Essa ação também é fundamental ao projeto, pois visa definir quais são as demandas das aplicações da META 6 com relação as tecnologias existentes na META 5 e 2. Foi realizado um mapeamento de demandas para 10 aplicações da rede Proto 6G em relação ao núcleo de acesso. Além disso, é importante ressaltar que a rede não está limitada a essas aplicações, dado que outras aplicações serão implementadas futuramente. Com base nesse levantamento, uma visão detalhada de possíveis caminhos ótimos para integração de aplicações, rede de acesso e núcleo foi realizada. As demais ações da META 5 foram alinhadas e estão sendo desenvolvidas para suportar não apenas os requisitos das aplicações do 6G, como também tirar proveito dos recursos instalados na META 5 (sinalização 5G, novos componentes do núcleo, virtualização e orquestração de recursos, fatiamento fim a fim, integração com transceptores 6G, enlace de satélite e rede FIBRE da RNP). Nosso objetivo é maximizar as possíveis integrações de cenários e resultados do projeto.

- **Ação 6** - O fatiamento da infraestrutura física e virtual de forma dinâmica e como um serviço é o alvo dessa ação. Em 2022, foi realizado um levantamento dos possíveis caminhos para introduzir o fatiamento fim a fim de recursos no Proto 6G. Embora o fatiamento fim a fim esteja padronizado pelo 3GPP, poucas são as soluções que o implementam de forma dinâmica. Essa é uma contribuição do projeto Brasil 6G. Realizamos um estudo das relações macro entre núcleo, acesso e aplicações para o suporte ao fatiamento dinâmico. Implementamos um cenário experimental de fatiamento dinâmico no LaMCAD da UFG. O protótipo testado integra um controlador, o núcleo do Proto 6G e o Kubernetes adotado na plataforma da META 2, provendo uma orquestração dinâmica total de fatiamento de rede. A ferramenta Terraform foi utilizada para a padronização do ambiente, provisionamento e replicação das máquinas virtuais. O gerenciamento de pacotes e atualização dos módulos de softwares utilizados foram realizados pela ferramenta Ansible, que ficou responsável, por exemplo, pelas configurações de rede, Kubernetes, *Global System for Mobile Communications Tunnelling Protocol* (GTP) para 5G (GTP5G), etc. O

Kubernetes foi configurado com um *Master* e dois *Nodes*. O protótipo suporta uma *Container Network Interface* (CNI) extra para gerenciar redes e sub-redes necessárias para a comunicação interna nos protocolos NGAP e *Non-Access Stratum* (NAS) com o núcleo, utilizando o projeto Free5GC. Por fim, um emulador de UEs e RAN para a geração de pedidos de conexão com o núcleo e tráfego de rede foi integrado no protótipo. O testador chamado my5G-RAN-tester foi escolhido para essa emulação. O sucesso dessa ação nos levou a adotar e amadurecer esse cenário como base para todo o projeto Brasil 6G. Estamos alinhando as demais ações com esse cenário, de forma a suportar fatiamento de recursos para algumas das aplicações que serão demonstradas em 2023. Ainda, estamos aprimorando esse cenário para oferecer fatiamento como um serviço (Slicing-as-a-Service), avançando o estado da arte da orquestração de recursos no 6G.

- **Ação 7** - A integração com satélite é fundamental para o Brasil, pais continental e carente de conectividade no campo. Nesse contexto, na Ação 7 realizamos diversos levantamentos de possíveis caminhos para integrar a rede satelital oferecida pelo Projeto C (parceria do Inatel com o SINDISAT) ao Projeto Brasil 6G. As demandas de componentes no acesso, núcleo e aplicações do Proto 6G foram estudadas para suportar integração com enlace satelital físico a ser oferecido pelo SINDISAT ao Inatel. Um ranqueamento de vantagens e desvantagens de cada caminho de integração foi fornecido. As possibilidades de caminho preferencial foram determinadas e estão em implementação, agregando valor a todo o projeto Brasil 6G. Dois caminhos foram estabelecidos: (i) *Untrusted* N3A com Satélite em Backhaul e Transceptor 6G; e (ii) *Untrusted* N3A com Satélite em Fronthaul e Transceptor 6G. Embora não seja mandatória, a integração com o Transceptor 6G do CRR Inatel é amplamente desejável para aumentar a área de cobertura da solução. Por solicitação do SINDISAT pretendemos implantar os dois caminhos. Entretanto, o caminho 1 está sendo implementado por primeiro. O caminho 2 será implementado havendo tempo hábil para tal. Nesse momento, estamos aguardando a instalação do enlace satelital físico no Inatel para dar continuidade nos caminhos 1 e 2. Essa Ação 7 resultou na Aplicação 11 (App 11), que se junta as outras dez na descrição da Ação 5.

- **Ação 8** - O estado da arte para integração da inteligência artificial no Proto 6G foi estudado nessa ação. Foi feita uma revisão sobre como o 3GPP pretende avançar com a IA a partir das *Releases* existentes e em preparação. Esse levantamento explorou em quais porções da arquitetura 5G/6G a IA tem sido empregada. As topologias lógicas de implantação da IA no plano de controle foram determinadas (centralizada, distribuída e híbrida). Essa topologias nos levaram aos possíveis caminhos para implantação da IA no Proto 6G. Escolhemos um caminho híbrido, ou seja, distribuído com alguns componentes centralizados. Esse caminho preferencial se relaciona com a função NWDAF que se encontra em padronização no 3GPP. Em 2023 pretendemos especificar uma arquitetura de IA para suporte ao plano de controle do Proto 6G.

- **Ação 9** - Por fim, na Ação 9 o foco é na introdução das tecnologias de registro imutável descentralizado de informações e computação determinística através de contratos inteligentes em Blockchain e/ou Tangle. O estado da arte para integração de DLTs no Proto 6G foi estudado nessa ação. Foi feita uma revisão sobre como e se o 3GPP pretende avançar com DLTs nas *Releases* existentes e em preparação. Detectamos que existe interesse do 3GPP nessas tecnologias, mas o atual estágio de desenvolvimento é anterior a qualquer especificação. A partir de uma revisão da literatura na área, determinamos os principais

uso de DLT em 5G/6G, bem como um possível cenário de integração dessas tecnologias através de contratos inteligentes com a arquitetura Free5GC. Em 2023 pretendemos especificar uma arquitetura de DLT para suporte ao plano de controle do Proto 6G.

11.2 Visão Consolidada do Proto 6G

A Figura 30 apresenta uma visão consolidada da arquitetura 6G proposta, incluindo aplicações da META 6, plataforma da META 2, e componentes do acesso e núcleo presentes na META 5. A esquerda são apresentadas as dez aplicações do 6G que serão executadas em uma fazenda na zona rural de Santa Rita do Sapucaí, MG. Elas se conectam por Wi-Fi, LoRa e Sigfox a Transceptores UE-T6G do Inatel. Esses transceptores implementam um emulador de estação de assinante da solução My5G Core, que é um *fork* do projeto *open source* Free5GC. Os UE-T6G fornecem a conectividade necessária da fazenda até a montanha das três torres (*three towers*), onde um Transceptor BS-T6G recebe o tráfego vindo da fazenda e o entrega para o Servidor Brasil 6G que fica no ICT Lab do Inatel.

Alternativamente, o tráfego do BS-T6G pode ser enviado pelo enlace de satélite em implantação no Inatel até um satélite físico GEO em parceira com o SINDISAT. Nesse caso, o parceiro SINDISAT devolve o tráfego recebido no HUB satelital em Santa Rita do Sapucaí via rede cabeada. O tráfego proveniente das aplicações, quer tenha passado ou não pelo satélite, é recebido pela função N3IWF do My5G Core, que implementa parte do Proto 6G Core.

Para tanto, todos os procedimentos de entrada na rede são feitos para as dez aplicações usando o emulador de UE do My5G Core. Depois de autorizado, o tráfego das aplicações segue para a UPF dentro do Proto 6G Core. A partir daí, dois caminhos são possíveis: (i) aplicações locais rodando virtualizadas (App 1, 2, 8 e 10) no mesmo Servidor Brasil 6G; (ii) aplicações rodando na Internet (3, 4, 5, 6, 7 e 9), cujo tráfego escoa pela conexão patrocinada pela Operadora Vivavox no ICT Lab.

Outras aplicações e cenários são possíveis com o WOCA, IoTRG e o próprio CRR do Inatel. A partir da rede FIBRE, componentes do Proto 6G Core podem ser distribuídos em outras ilhas nacionalmente. Até o momento componentes podem ser instanciados na Unisinos e UFG.

A arquitetura contém ainda componentes de SMO para orquestração de fatias fim a fim como um serviço, incluindo recursos de gerência de dados, *onboarding*, orquestração de funções virtuais de rede e laço de controle de qualidade. Vale observar que a App 10 inclui o acesso remoto a conteúdos e armazenamento temporário na fazenda, usando servidor NGINX, plataforma de NFV e controlador ONOS.

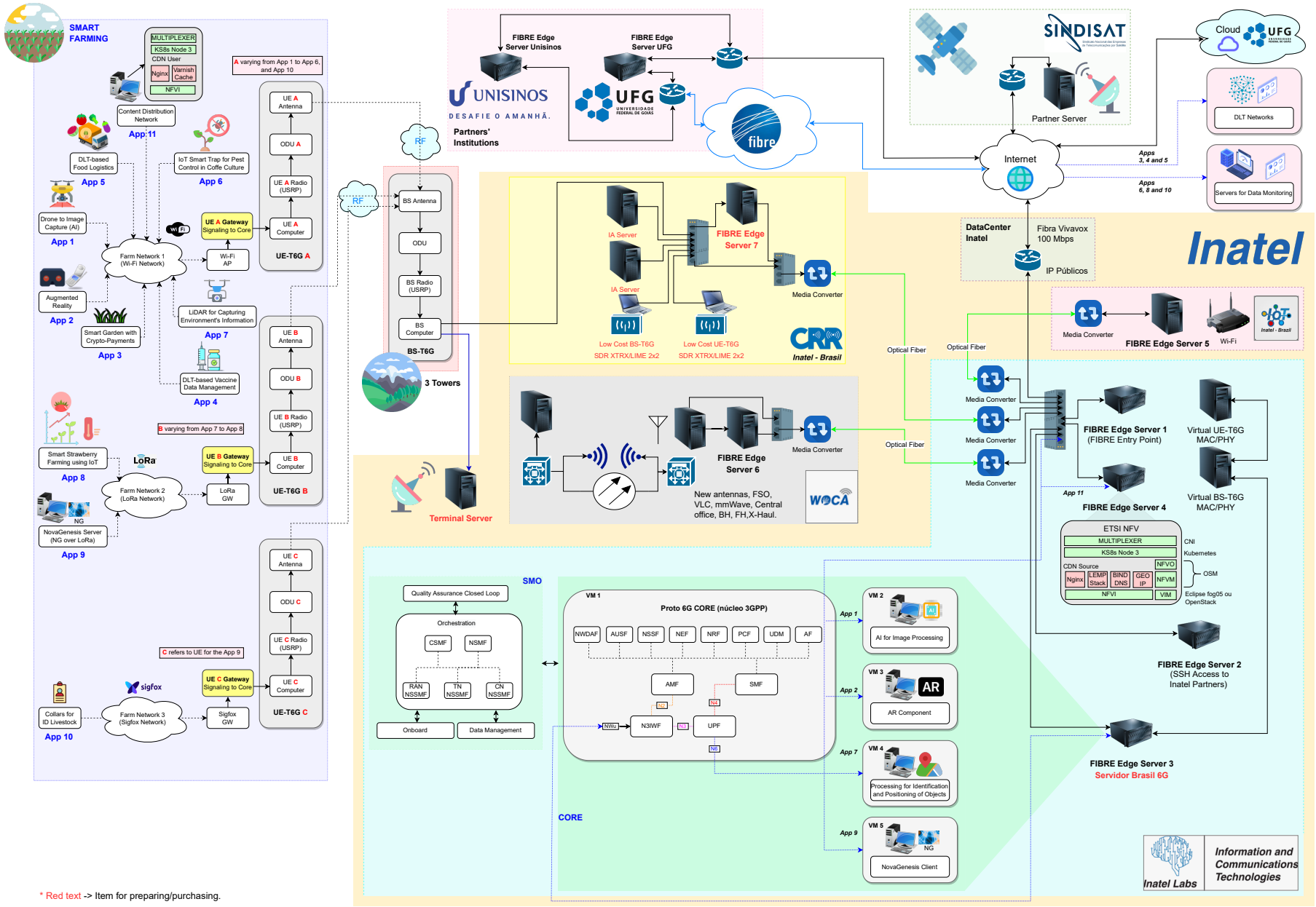


Figura 30: Visão consolidada da arquitetura 6G proposta nesse relatório. Autores: Diego Pivoto e Antônio Alberti.

Referências

[1] A. M. Alberti, M. A. F. Casaroli, D. Singh, and R. da Rosa Righi, "Naming and name resolution in the future internet: Introducing the novagenesis approach," *Future Generation Computer Systems*, vol. 67, pp. 163–179, 2017. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X16302643

[2] F. Silva, J. Castillo-Lema, A. Neto, F. Silva, P. Rosa, D. Corujo, C. Guimarães, and R. Aguiar, "Entity title architecture extensions towards advanced quality-oriented mobility control capabilities," in *2014 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Jun. 2014, pp. 1–6.

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

[4] ITU-T, "Network 2030 - Architecture Framework," International Telecomunication Union, Tech. Rep., 2020. [Online]. Available: http://handle.itu.int/11.1002/pub/815d5501-en

[5] A. Alberti et al., "Arquiteturas para a Rede 6G," Projeto Brasil 6G, Report, 2021.

[6] J. Jose Ordonez-Lucena, P. Ameigeiras, L. M. Contreras, J. Folgueira, and D. Lópes, "On the Rollout of Network Slicing in Carrier Networks: A Technology Radar," *Sensors*, vol. 21, no. 8094, 2021.

[7] G. Americas, "White Paper: Management, Orchestration & Automation," 5G Americas, Tech. Rep., 2019.

[8] ETSI, "TS 23.628: Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Architecture enhancements to facilitate communications with packet data networks and applications," 3GPP, Tech. Rep., 2018.

[9] ITU-T, "White Paper FG-NET2030: Network 2030 - A Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond," International Telecommunication Union, Tech. Rep., May 2019.

[10] G. P. A. W. Group, "5G PPP Architecture Working Group, View on 5G Architecture," 5G PPP, Tech. Rep., 2019.

[11] M. Corici, E. Troudt, and T. Magedanz, "An Organic 6G Core Network Architecture," in *2022 25th Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks (ICIN)*, Mar. 2022, pp. 1–7, iSSN: 2472-8144.

[12] A. A. Barakabitze, A. Ahmad, R. Mijumbi, and A. Hines, "5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges," *Computer Networks*, vol. 167, p. 106984, Feb. 2020. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128619304773

[13] L. U. Khan, I. Yaqoob, N. H. Tran, Z. Han, and C. S. Hong, "Network Slicing: Recent Advances, Taxonomy, Requirements, and Open Research Challenges," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 36 009–36 028, 2020, conference Name: IEEE Access.

[14] F. Rinaldi, H.-L. Maattanen, J. Torsner, S. Pizzi, S. Andreev, A. Iera, Y. Koucheryavy, and G. Araniti, "Non-Terrestrial Networks in 5G & Beyond: A Survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 165 178–165 200, 2020, conference Name: IEEE Access.

[15] M.-Y. Yun, J. Kim, D. You, and M.-S. Lee, "Main features of 5G New Radio for Non-Terrestrial Networks," in *2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Oct. 2021, pp. 1474–1478, iSSN: 2162-1233.

[16] S. Lagen, N. Patriciello, and L. Giupponi, "Cellular and Wi-Fi in Unlicensed Spectrum: Competition leading to Convergence," in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, Mar. 2020, pp. 1–5.

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

[18] W. Chen, J. Montojo, J. Lee, M. Shafi, and Y. Kim, "The Standardization of 5G-Advanced in 3GPP," *IEEE Communications Magazine*, pp. 1–7, 2022, conference Name: IEEE Communications Magazine.

[19] X. Lin, "An Overview of 5G Advanced Evolution in 3GPP Release 18," Jan. 2022, arXiv:2201.01358 [cs]. [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2201.01358

[20] T. Hewa, G. Gür, A. Kalla, M. Ylianttila, A. Bracken, and M. Liyanage, "The Role of Blockchain in 6G: Challenges, Opportunities and Research Directions," in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, Mar. 2020, pp. 1–5.

[21] T. Nguyen, N. Tran, L. Loven, J. Partala, M.-T. Kechadi, and S. Pirttikangas, "Privacy-Aware Blockchain Innovation for 6G: Challenges and Opportunities," in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, Mar. 2020, pp. 1–5.

[22] H. Xu, P. V. Klaine, O. Onireti, B. Cao, M. Imran, and L. Zhang, "Blockchain-enabled resource management and sharing for 6G communications," *Digital Communications and Networks*, vol. 6, no. 3, pp. 261–269, Aug. 2020. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352864820300249

[23] free5GC, "free5GC," 2022. [Online]. Available: https://www.free5gc.org/

[24] Magma, "Magma Core," 2022. [Online]. Available: https://magmacore.org/

[25] F. FOKUS, "Open5GCore," 2022. [Online]. Available: https://www.open5gcore.org/

[26] Open5GS, "Open5GS," 2022. [Online]. Available: https://open5gs.org/

[27] OpenAirInterface, "5G CORE NETWORK OpenAirInterface," 2022. [Online]. Available: https://openairinterface.org/oai-5g-core-network-project/

[28] O. N. Foundation, "SD-Core," 2022. [Online]. Available: https://opennetworking.org/sd-core/

[29] "5G Core Network - OpenAirInterface," https://openairinterface.org/oai-5g-core-network-project/, [*Online*; acessado em 08 de agosto de 2022].

[30] Y. Mao, A. Pranolo, L. Hernandez, A. P. Wibawa, and Z. Nuryana, "Artificial intelligence in mobile communication: A survey," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1212, no. 1, p. 012046, jan 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1088/1757-899x/1212/1/012046

[31] W. Sun, P. Bocchini, and B. D. Davison, "Applications of artificial intelligence for disaster management," *Natural Hazards*, vol. 103, no. 3, pp. 2631–2689, Sep 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11069-020-04124-3

[32] A. Nikitas, K. Michalakopoulou, E. T. Njoya, and D. Karampatzakis, "Artificial intelligence, transport and the smart city: Definitions and dimensions of a new mobility era," *Sustainability*, vol. 12, no. 7, 2020. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2071-1050/12/7/2789

[33] A. P. James, "Towards strong ai with analog neural chips," in *2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2020, pp. 1–5.

[34] J. Hartmann, P. Cappelletti, N. Chawla, F. Arnaud, and A. Cathelin, "Artificial intelligence: Why moving it to the edge?" in *ESSDERC 2021 - IEEE 51st European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC)*, 2021, pp. 1–6.

[35] J. Pan, K. L. Low, J. Ghosh, S. Jayavelu, M. M. Ferdaus, S. Y. Lim, E. Zamburg, Y. Li, B. Tang, X. Wang, J. F. Leong, S. Ramasamy, T. Buonassisi, C.-K. Tham, and A. V.-Y. Thean, "Transfer learning-based artificial intelligence-integrated physical modeling to enable failure analysis for 3 nanometer and smaller silicon-based cmos transistors," *ACS Applied Nano Materials*, vol. 4, no. 7, pp. 6903–6915, Jul 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1021/acsanm.1c00960

[36] S. Yadav, A. Kaushik, and S. Sharma, *Simplify the Difficult: Artificial Intelligence and Cloud Computing in Healthcare*. Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 101–124. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-73885-3_7

[37] Y. Ouyang, L. Wang, A. Yang, M. Shah, D. Belanger, T. Gao, L. Wei, and Y. Zhang, "The next decade of telecommunications artificial intelligence," 2021. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2101.09163

[38] M. Conti, A. Passarella, and S. K. Das, "The internet of people (iop): A new wave in pervasive mobile computing," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 41, pp. 1–27, 2017. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574119217303723

[39] M. E. Morocho-Cayamcela, H. Lee, and W. Lim, "Machine learning for 5g/b5g mobile and wireless communications: Potential, limitations, and future directions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 137 184–137 206, 2019.

[40] N. Kato, B. Mao, F. Tang, Y. Kawamoto, and J. Liu, "Ten Challenges in Advancing Machine Learning Technologies toward 6G," *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 3, pp. 96–103, 2020.

[41] R. Shafin, L. Liu, V. Chandrasekhar, H. Chen, J. Reed, and J. C. Zhang, "Artificial intelligence-enabled cellular networks: A critical path to beyond-5g and 6g," *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 2, pp. 212–217, 2020.

[42] W. Jiang, M. Strufe, and H. D. Schotten, "Experimental results for artificial intelligence-based self-organized 5g networks," in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2017, pp. 1–6.

[43] T. B. Ahammed, R. Patgiri, and S. Nayak, "A vision on the artificial intelligence for 6g communication," *ICT Express*, 2022. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959522000741

[44] N. H. Mahmood, G. Berardinelli, E. J. Khatib, R. Hashemi, C. de Lima, and M. Latva-aho, "A functional architecture for 6g special purpose industrial iot networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, pp. 1–11, 2022.

[45] H. Yang, A. Alphones, Z. Xiong, D. Niyato, J. Zhao, and K. Wu, "Artificial-Intelligence-Enabled Intelligent 6G Networks," *IEEE Network*, vol. 34, no. 6, pp. 272–280, 2020.

[46] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, and M.-S. Alouini, "What should 6g be?" *Nature Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 20–29, Jan 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1038/s41928-019-0355-6

[47] N. Janbi, I. Katib, A. Albeshri, and R. Mehmood, "Distributed artificial intelligence-as-a-service (daiaas) for smarter ioe and 6g environments," *Sensors*, vol. 20, no. 20, 2020. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1424-8220/20/20/5796

[48] S. Zhang and D. Zhu, "Towards artificial intelligence enabled 6g: State of the art, challenges, and opportunities," *Computer Networks*, vol. 183, p. 107556, 2020. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S138912862031207X

[49] S. Garg, T. Bag, and A. Mitschele-Thiel, "Decentralized machine learning based network data analytics for cognitive management of mobile communication networks," in *NOMS 2022-2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, 2022, pp. 1–9.

[50] Y. Jeon, H. Jeong, S. Seo, T. Kim, H. Ko, and S. Pack, "A distributed nwdaf architecture for federated learning in 5g," in *2022 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 2022, pp. 1–2.

[51] R. Vidhya, P. Karthik, and S. Jamadagni, "Anticipatory qoe mechanisms for 5g data analytics," in *2020 International Conference on COMmunication Systems & NETworkS (COMSNETS)*, 2020, pp. 523–526.

[52] K. Abbas, T. A. Khan, M. Afaq, J. J. Diaz Rivera, and W.-C. Song, "Network data analytics function for ibn-based network slice lifecycle management," in *2021 22nd Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, 2021, pp. 148–153.

[53] S. Schwarzmann, C. Cassales Marquezan, M. Bosk, H. Liu, R. Trivisonno, and T. Zinner, "Estimating video streaming qoe in the 5g architecture using machine learning," in *Proceedings of the 4th Internet-QoE Workshop on QoE-Based Analysis and Management of Data Communication Networks*, ser. Internet-QoE'19. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2019, p. 7–12. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/3349611.3355547

[54] S. Schwarzmann, C. C. Marquezan, R. Trivisonno, S. Nakajima, and T. Zinner, "Accuracy vs. cost trade-off for machine learning based qoe estimation in 5g networks," in *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2020, pp. 1–6.

[55] NGMN Alliance, "Description of Network Slicing Concept," 2016.

[56] 3GPP, "Telecommunication Management; Study on Man- agement and Orchestration of Network Slicing for Next Generation Network," 2018.

[57] M. Jaffar and N. Chuberre, "Status of ntn and satellite in 3gpp releases 17 and 18," *3GPP Highlights*, no. 3, Oct. 2021. [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp/Information/Highlights/2021_Issue03/files/downloads/Highlight_Issue_3_final_web.pdf

[58] B. Gupta and C. Necati, "Technical report on the interworking between 3gpp 5g system and wlan," IEEE, Tech. Rep., Oct. 2020. [Online]. Available: https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/20/11-20-1376-00-AANI-technical-report-on-interworking-between-3gpp-5g-system-and-wlan.docx

[59] L. B. Silveira, H. C. de Resende, C. B. Both, J. M. Marquez-Barja, B. Silvestre, and K. V. Cardoso, "Tutorial on communication between access networks and the 5G core," *Computer Networks*, vol. 216, p. 109301, 2022.

[60] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjöland, and F. Tufvesson, "6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities," *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 7, pp. 1166–1199, 2021.

[61] 3GPP, "System architecture for the 5G System (5GS)," 3rd Generation Partnership Project-3GPP, Sophia Antipolis CEDEX, France, Tech. Rep. (3GPP TS 23.501 version 17.4.0 Release 17, 05 2022. [Online]. Available: https://www.etsi.org/

[62] ——, "5G; Access to the 3GPP 5G Core Network (5GCN) via non-3GPP access networks," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 3GPP TS 124.502, 04 2021, version: 16.7.0 - Release 16. [Online]. Available: https://www.etsi.org/

[63] J. Navarro-Ortiz, S. Sendra, P. Ameigeiras, and J. M. Lopez-Soler, "Integration of LoRaWAN and 4G/5G for the Industrial Internet of Things," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 2, pp. 60–67, 2018.

[64] K. V. Cardoso, C. B. Both, L. R. Prade, C. J. A. Macedo, and V. H. L. Lopes, "A softwarized perspective of the 5g networks," 2020.

[65] 3GPP, "Technical specification group services and system aspects; release 15 description; summary of rel-15 work items (release 15)," 3rd Generation Partnership Project-3GPP, Sophia Antipolis Cedex, France, Tech. Rep. 3GPP TR21.915 V15.0.0, 10 2019. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/121900_121999/121915/15.00.00_60/tr_121915v150000p.pdf

[66] W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi, and H. D. Schotten, "The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 334–366, 2021.

[67] J. T. Penttinen, *Support of Trusted Access Network.* John Wiley & Sons, 2021, pp. 219–219.

[68] L. L. Mendes, C. S. Moreno, M. V. Marquezini, A. M. Cavalcante, P. Neuhaus, J. Seki, N. F. T. Aniceto, H. Karvonen, I. Vidal, F. Valera, P. A. S. M. Barreto, M. F. Caetano, W. D. Dias, and G. Fettweis, "Enhanced Remote Areas Communications: The Missing Scenario for 5G and Beyond 5G Networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 219 859–219 880, 2020.

[69] R. Yasmin, J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, and A. Pouttu, "On the integration of LoRaWAN with the 5G test network," in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2017, pp. 1–6.

[70] Y. Chen, Y. A. Sambo, O. Onireti, and M. A. Imran, "A Survey on LPWAN-5G Integration: Main Challenges and Potential Solutions," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 32 132–32 149, 2022.

[71] "free5GC," 2019. [Online]. Available: https://www.free5gc.org/

[72] 3GPP TS 23.501, version 15.5.0, Release 15, *System architecture for the 5G System (5GS)*, Apr 2019. [Online]. Available: http://www.etsi.org

[73] "Multus-CNI," 2022. [Online]. Available: https://github.com/k8snetworkplumbingwg/multus-cni

[74] "flannel," 2022. [Online]. Available: https://github.com/flannel-io/flannel

[75] I. Vidal, B. Nogales, F. Valera, L. F. Gonzalez, V. Sanchez-Aguero, E. Jacob, and C. Cervelló-Pastor, "A multi-site nfv testbed for experimentation with suav-based 5g vertical services," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 111 522–111 535, 2020.

[76] L. Fundation, "Hardware requirements," *https://wiki.onosproject.org*, 2022.

[77] E. OSM, "Installing osm," *https://osm.etsi.org/*, 2022.

[78] L. B. Dominato, H. C. de Resende, C. B. Both, J. M. Marquez-Barja, B. O. Silvestre, and K. V. Cardoso, "Tutorial on communication between access networks and the 5g core," 2021. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2112.04257

[79] F. H. Grings, L. B. D. Silveira, N. J. Muller, K. V. Prade, Lúcio; Cardoso, and C. Corrêa, Sand Luz; Both Bonato, "Orquestração dinâmica total de fatiamento de rede no núcleo 5G sobre plataforma nativa de computação em nuvem," in *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, 2022, pp. 349–363.

[80] C. Hernández-Chulde and C. Cervelló-Pastor, "Intelligent Optimization and Machine Learning for 5G Network Control and Management," in *Highlights of Practical Applications of Survivable Agents and Multi-Agent Systems. The PAAMS Collection*, ser. Communications in Computer and Information Science, F. De La Prieta, A. González-Briones, P. Pawleski, D. Calvaresi, E. Del Val, F. Lopes, V. Julian, E. Osaba, and R. Sánchez-Iborra, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 339–342.

[81] J. Wu, R. Li, X. An, C. Peng, Z. Liu, J. Crowcroft, and H. Zhang, "Toward Native Artificial Intelligence in 6G Networks: System Design, Architectures, and Paradigms," *arXiv:2103.02823 [cs]*, Mar. 2021, arXiv: 2103.02823. [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2103.02823

[82] S. Sevgican, M. Turan, K. Gökarslan, H. B. Yilmaz, and T. Tugcu, "Intelligent network data analytics function in 5G cellular networks using machine learning," *Journal of Communications and Networks*, vol. 22, no. 3, pp. 269–280, Jun. 2020, conference Name: Journal of Communications and Networks.

[83] C. Hernández-Chulde and C. Cervelló-Pastor, "Intelligent optimization and machine learning for 5g network control and management," in *Highlights of Practical Applications of Survivable Agents and Multi-Agent Systems. The PAAMS Collection*, F. De La Prieta, A. González-Briones, P. Pawleski, D. Calvaresi, E. Del Val, F. Lopes, V. Julian, E. Osaba, and R. Sánchez-Iborra, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 339–342.

[84] A. Chouman, D. M. Manias, and A. Shami, "Towards supporting intelligence in 5g/6g core networks: NWDAF implementation and initial analysis." [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2205.15121

[85] Aarna Networks, "NWDAF Rel 17 Explained - Architecture, Features and Use Cases," 2022. [Online]. Available: https://www.aarnanetworks.com/post/nwdaf-rel-17-explained-architecture-features-and-use-cases

[86] on5g.es, "The 3GPP sets the priorities for 5G Advanced, with specifications expected to be approved in 2024," 2022. [Online]. Available: https://on5g.es/en/the-3gpp-sets-the-priorities-for-5g-advanced-with-specifications-expected-to-be-approved-in-2024/

[87] K. Samdanis and T. Taleb, "The Road beyond 5G: A Vision and Insight of the Key Technologies," *IEEE Network*, vol. 34, no. 2, pp. 135–141, Mar. 2020. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9003619/

[88] netscout.com, "What Is Network Data Analytics Function?" 2022. [Online]. Available: https://www.netscout.com/what-is/nwdaf

[89] K. Abbas, T. A. Khan, M. Afaq, and W.-C. Song, "Ensemble Learning-based Network Data Analytics for Network Slice Orchestration and Management: An Intent-Based Networking Mechanism," in *NOMS 2022-2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, Apr. 2022, pp. 1–5, iSSN: 2374-9709.

[90] E. Aumayr, G. Caso, A.-M. Bosneag, A. D. Zayas, Özgü Alay, B. Garcia, K. Kousias, A. Brünstrom, P. M. Gomez, and H. Koumaras, "Service-based analytics for 5g open

experimentation platforms," *Computer Networks*, vol. 205, p. 108740, 2022. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128621005892

[91] Y. Liu, Y. He, Y. Lin, and L. Tang, "Toward native artificial intelligence in 6g," in *2022 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 2022, pp. 1–6.

[92] S. Barmpounakis and P. Demestichas, "Framework for trustworthy ai/ml in b5g/6g," in *2022 1st International Conference on 6G Networking (6GNet)*, 2022, pp. 1–6.

[93] M. K. Shehzad, L. Rose, M. M. Butt, I. Z. Kovacs, M. Assaad, and M. Guizani, "Artificial intelligence for 6g networks: Technology advancement and standardization," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 17, no. 3, pp. 16–25, sep 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109%2Fmvt.2022.3164758

[94] Aligungr, "Aligungr/ueransim: Open source 5g ue and ran (gnodeb) implementation." [Online]. Available: https://github.com/aligungr/UERANSIM

[95] N. El Ioini and C. Pahl, "A review of distributed ledger technologies," in *On the Move to Meaningful Internet Systems. OTM 2018 Conferences*, H. Panetto, C. Debruyne, H. A. Proper, C. A. Ardagna, D. Roman, and R. Meersman, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 277–288.

[96] A. Alberti et al., "Contribuições para a Arquitetura da Rede 6G: Visões Evolucionária e a Disruptiva," Projeto Brasil 6G, Report, 2021.

[97] IOTA, "IOTA," 2022. [Online]. Available: https://www.iota.org/

[98] G. Chen, B. Xu, M. Lu, and N.-S. Chen, "Exploring blockchain technology and its potential applications for education," *Smart Learning Environments*, vol. 5, no. 1, p. 1, Jan 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1186/s40561-017-0050-x

[99] 3GPP, "3GPP - ," 2022. [Online]. Available: https://www.3gpp.org/

[100] G. S. WG6, "TSG SA WG6 SA6: Study on blockchain support in application layer for 5g verticals," 3GPP, Tech. Rep., 2020.

[101] Z. Zheng, S. Xie, H. Dai, X. Chen, and H. Wang, "An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends," in *2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress)*, 2017, pp. 557–564.

[102] W. Wang, D. T. Hoang, P. Hu, Z. Xiong, D. Niyato, P. Wang, Y. Wen, and D. I. Kim, "A survey on consensus mechanisms and mining strategy management in blockchain networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 22 328–22 370, 2019.

[103] J. Xie, K. Zhang, Y. Lu, and Y. Zhang, "Resource-efficient dag blockchain with sharding for 6g networks," *IEEE Network*, vol. 36, no. 1, pp. 189–196, 2022.

[104] SD-Core, "SD-Core," 2022. [Online]. Available: https://opennetworking.org/sd-core/

[105] opennetworking, "Open Networking," 2022. [Online]. Available: https://opennetworking.org/