

## Capítulo

# 5

## Desagregando e Softwarizando as Redes de Celulares e o Programa OpenRAN Brasil

Daniel A. L. Marques, Fernando N. N. Farias, Fuad M. A. Junior, Daniel L. Feferman, Christian R. E. Rothenberg, Antônio J. G. Abelém, José F. Rezende

### *Abstract*

*Advances in network function virtualization associated with market and regulatory demand for more openness and interoperability on Radio Access Networks (RAN) for next-generation cellular networks motivated the introduction of the framework with standards, protocols, and open-source software components known as OpenRAN. This openness aims to democratize parts of the telecommunications network and thus not depend on large telecommunications equipment manufacturers, allowing costs and power reduction for large manufacturers. The OpenRAN architecture combines modular base station software with off-the-shelf hardware, assigning baseband and radio unit components from single vendors for seamless interoperability, whether there are virtualized/disaggregated RAN elements or not. In addition, the introduction of open interfaces between different OpenRAN components allows the gathering of information from the RAN and the update of control policies, which enables the utilization of Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML) techniques to perform optimizations and smart control of the RAN. Therefore, this minicourse has the main objective to present the concept and challenges which are leading academia and industry to invest in the concept of the open RAN. This short course will be essentially theoretical and will begin by introducing the historical factors of the evolution of the RANs, concepts of openness and softwarization, moreover, it will be addressed disaggregation, RAN intelligent controller (RIC), Core Networks, virtualization, open interfaces, and challenges. Next, the initiatives around the world that are collaborating in the advance, standardization and development of OpenRAN will be presented. After that, the OpenRAN Brazil Program are detailed, where it is presented the motivation, objectives, expected results, testbed, and applications. Finally, the final considerations and future trends regarding the research and development of OpenRANs and their components are presented.*

## **Resumo**

*Avanços na função de virtualização de rede associados com o mercado e a demanda regulatória por mais abertura e interoperabilidade nas Redes de Acesso via Rádio (RAN) da próxima geração de redes celulares motivaram a criação de um framework, com padrões, protocolos e componentes de softwares de código aberto, denominado como OpenRAN. Essa abertura tem como objetivo democratizar segmentos da rede de telecomunicações para não depender de equipamentos de grandes indústrias, assim, permitindo a redução de custos e o poderio desses conglomerados. A arquitetura OpenRAN combina o software estação base modular com hardware pronto para uso, onde são atribuídos componentes de banda base e unidades de rádio de fornecedores únicos, assim viabilizando uma interoperabilidade transparente, não importando se os elementos de RAN são ou não virtualizados/desagregados. Além disso, a introdução de interfaces abertas entre os diferentes componentes OpenRAN permite que se obtenha informações da RAN e se efetue atualizações de políticas de controle, o que viabiliza a utilização de técnicas de Inteligência Artificial (IA) e Aprendizagem de Máquina (ML) para efetuar otimizações e controle inteligente da RAN. Logo, este minicurso tem como principal objetivo apresentar os conceitos e desafios que estão levando a academia e indústria a investir no conceito de RAN aberta. O minicurso será essencialmente teórico e iniciará apresentando os fatores históricos da evolução das RANs e os conceitos de abertura e softwarização, além disso, serão abordados a desagregação, controle inteligente da RAN (RIC), Núcleo da Rede (Core Network), virtualização, interfaces abertas e desafios. Em seguida, as iniciativas ao redor do mundo que estão colaborando no avanço, padronização e desenvolvimento das OpenRANs serão apresentadas. Após isso, será detalhado o Programa OpenRAN Brasil, onde será discutido a motivação, objetivos, resultados esperados, testbed e aplicações. Por fim, são apresentadas as considerações finais e tendências futuras em relação à pesquisa e desenvolvimento das OpenRANs e seus componentes.*

### **5.1. Introdução**

Nos últimos dez anos, houve um desenvolvimento significativo nas infraestruturas de rede, com uma forte tendência em direção ao software em ambiente de nuvem. Essa evolução trouxe consigo tanto benefícios quanto desafios. A softwarização das redes facilitou a programação dos elementos de rede e a virtualização de seus recursos, permitindo a alocação dinâmica e o particionamento da rede em fatias logicamente isoladas. Essas características impulsionaram o desenvolvimento de componentes de software, especialmente controladores e orquestradores, que possibilitam o gerenciamento programático do ciclo de vida das fatias de rede, bem como das aplicações e serviços associados a elas.

Essa softwarização foi impulsionada pelo surgimento do paradigma SDN (Software-Defined Networking ou Redes Definidas por Software). O conceito de SDN consiste na separação dos planos de controle e de dados, que antes eram implementados de forma monolítica e proprietária nos equipamentos de rede. Com essa separação, o plano de controle passa a ser implementado de forma centralizada e externa à rede, por meio de controladores SDN, enquanto o plano de dados se torna programável através de uma interface aberta fornecida pelos equipamentos e utilizada pelos controladores.

A exigência de programabilidade dos equipamentos imposta pelo paradigma SDN

impulsionou o desenvolvimento de diferentes interfaces de programação e controladores SDN. A inteligência da rede é centralizada no controlador SDN, que utiliza estatísticas de tráfego e informações de topologia constantemente coletadas para definir as regras de encaminhamento a serem utilizadas pelos equipamentos, de acordo com as políticas estabelecidas pelos diversos serviços de rede.

Recentemente, o conceito de SDN expandiu-se para além do domínio de rede e dados, sendo aplicado também aos domínios óptico e sem fio nas redes de comunicações das provedoras de serviços. Isso possibilita que um controlador SDN orquestre elementos da rede óptica, como transponders, comutadores ópticos, amplificadores, e elementos de redes sem fio (como as redes de acesso) .

Para que isso seja viável, os equipamentos devem ser programáveis, permitindo que suas configurações sejam alteradas dinamicamente por meio de determinadas interfaces. A padronização destas interfaces é o que permite a construção de redes totalmente abertas, onde é possível a participação de diferentes atores de mercado tanto no desenvolvimento dos equipamentos quanto no desenvolvimento de controladores inteligentes capazes de otimizar o funcionamento destas redes.

Desta forma, para minimizar os custos, os operadores de rede precisam atualizar a infraestrutura de comunicações móveis, acompanhando os novos casos de uso com as respectivas tecnologias e requisitos do mercado. Uma das formas de gerenciar e otimizar tais sistemas perpassa pela abertura das redes de acesso de rádio (do inglês, Radio Access Networks - RAN), que permitirá uma otimização e automação baseadas no acesso aos dados.

Originalmente os componentes de rede eram unidades monolíticas vistas como caixas pretas pelos operadores e fornecidas por um número limitado de fabricantes. Isso resultou em diversos problemas de configuração da RAN, tais como: os equipamentos não poderem ser ajustados para suportar diversas implementações e perfis de tráfego; a coordenação limitada entre nós de rede, o que impede a otimização conjunta e controle de componentes RAN; e a dependência em relação a poucos fornecedores, com opções restritas para as operadoras implantarem e fazerem interface com equipamentos RAN de vários fornecedores.

Nos últimos anos, as redes de acesso de rádio vêm passando por um processo de desagregação dos elementos da rede, buscando reduzir os custos de operação e manutenção. Nessa evolução, surgiu o conceito de CRAN (Centralized RAN ou Rede de Acesso de Rádio Centralizada), onde o processamento de sinal foi softwarizado, ou seja, as funcionalidades foram transformadas em software, e centralizado em servidores, dispostos em data centers. Esse servidores são capazes de processar o sinal proveniente de múltiplas estações rádio-base, denominadas de unidades de rádio remotas (RRUs).

A centralização proporcionada pelo conceito de CRAN resultou em uma grande redução de custos, devido aos ganhos na multiplexação estatística no uso dos recursos de processamento, o que leva a uma diminuição na capacidade necessária para atender a um certo número de unidades de rádio. A virtualização destes componentes de software (vRAN) permite um ganho ainda maior com relação à energia consumida por tais servidores, além de permitir uma maior flexibilidade na localização de tais servidores.

Posteriormente, o processamento realizado por esses servidores foi dividido em duas partes: uma que deve ficar mais próxima das estações-base e outra que pode ficar em locais mais distantes. Essa divisão ou desagregação da RAN resulta em novas reduções de custos, uma vez que diminui ainda mais a necessidade de equipamentos para atender um determinado número de RRUs.

A arquitetura OpenRAN segue esta abordagem de desagregação da RAN em dois componentes, denominados DU (Distributed Unit) e CU (Centralized Unit), e define interfaces abertas e padronizadas para o controle e gerenciamento destes componentes e também da RU (Radio Unit). Isto permite a construção de controladores SDN que fazem uso destas interfaces para otimizar e automatizar a RAN. Este controlador é chamado, na arquitetura da O-RAN Alliance, de RIC (Radio Intelligent Controller), o qual estabelece laços de controle da RAN em diferentes escalas de tempo.

A Aliança O-RAN é uma iniciativa colaborativa, criada em 2018, formada por mais de vinte empresas e organizações da indústria de telecomunicações de diversos países. Seu principal objetivo é remodelar a indústria relacionada às redes de acesso por rádio, promovendo de forma mais sólida conceitos como interoperabilidade, inteligência, virtualização, bem como a padronização e a adoção de soluções abertas. Essa abordagem inovadora busca separar as funções de hardware e software nas redes de acesso rádio, permitindo que os operadores de rede selecionem e combinem componentes de diferentes fornecedores, promovendo a concorrência e a flexibilidade. As especificações desenvolvidas pela O-RAN complementam os padrões estabelecidos pelo 3rd Generation Partnership Project (3GPP), uma colaboração entre organizações de telecomunicações que define os padrões para redes móveis de próxima geração. Essas especificações abrangem desde a desagregação e automação até a virtualização da RAN, assim a aliança busca criar um mercado mais competitivo, com um número crescente de participantes em ascensão.

A desagregação e softwarização da RAN, seguida pela definição de interfaces abertas e padronizadas entre os seus componentes, alavanca um enorme e vibrante ecossistema de inovação centrado nas redes de telecomunicações do futuro. Pela primeira vez, a academia pode participar ativamente no desenvolvimento e experimentação de novas funcionalidades nestas redes, envolvendo o uso de aprendizado de máquina para a completa automação e otimização destas redes.

Por outro lado, esta nova arquitetura da RAN possibilita a construção de redes de telecomunicações mais econômicas, quebrando a dependência de adquirir equipamentos de grandes fabricantes deste setor.

No entanto, o controle separado dos domínios de diferentes tecnologias não possibilita a exploração otimizada e totalmente automatizada dos recursos desses domínios na implementação de serviços fim a fim.

Diante desta perspectiva, este capítulo tem o objetivo de apresentar os principais conceitos, motivações e desafios que estão levando, tanto a indústria quanto a academia, a investir em pesquisa e desenvolvimento na abertura da Rede de Acesso de Rádio. Serão descritos os desafios e soluções que estão tratando da evolução do OpenRAN, tais como: interfaces, arquiteturas, protocolos, serviços e soluções, que servirão de suporte para consolidação do conceito. Além disso, será apresentada a iniciativa brasileira de pesquisa e

desenvolvimento em OpenRAN, denominada de “Programa OpenRAN Brasil”.

Além desta seção introdutória, este capítulo é composto por mais quatro seções. A Seção 5.2 detalhará a junção dos conceitos de abertura e softwarização das RANs, descrevendo a arquitetura OpenRAN, com seus principais componentes e interfaces, além dos seus princípios arquiteturais. Na Seção 5.3 serão discutidas as iniciativas OpenRAN pelo mundo, apresentando as principais plataformas open-source para a implementação dos diferentes componentes, e os principais consórcios que estão direcionando a padronização do OpenRAN, tanto no contexto de software quanto de hardware. A Seção 5.4 apresentará, em detalhes, o Programa OpenRAN@Brasil, que atualmente é o maior programa de pesquisa, desenvolvimento e inovação na área de redes aberta e desagregada para acesso via rádio no Brasil. Por fim, a Seção 5.5 apresentará as considerações finais, destacando as vantagens e oportunidades de se investir em pesquisa e desenvolvimento em OpenRAN, e discutirá qual será o futuro da abordagem no Brasil.

## 5.2. Abertura e a Softwarização na RAN: OpenRAN

A abertura e a softwarização na RAN (Rede de Acesso por Rádio) estão revolucionando a forma como as redes de comunicação são projetadas, implementadas e operadas. A tradicional arquitetura de RAN, que historicamente era baseada em sistemas proprietários e fechados, está sendo transformada por uma abordagem inovadora chamada OpenRAN.

OpenRAN refere-se a um ecossistema de tecnologias e padrões abertos que permitem a separação dos componentes da RAN, como hardware e software. Essa abordagem permite que diferentes fornecedores forneçam componentes interoperáveis, estimulando a concorrência e a escolha de soluções mais eficientes e econômicas.

Na Seção 5.2, serão apresentados a junção dos conceitos de abertura e softwarização às RANs, abordando a origem da ideia, a motivação e a necessidade por trás desses conceitos. Além disso, será apresentada a arquitetura OpenRAN, seus principais componentes e interfaces, bem como seus princípios arquiteturais. Neste tópico, serão abordados os seguintes temas: desagregação, controle inteligente da RAN (RIC), Núcleo da Rede (Core Network), virtualização, interfaces abertas e desafios associados a essa nova abordagem.

### 5.2.1. Padronização do 5G NR

Iniciado em 2016, a *Release 15* (Rel-15) dos padrões 3GPP introduziu oficialmente a tecnologia *5G New Radio (5G NR)* [Lin and et al. 2019]. Os objetivos da Rel-15 foram aprovados em março de 2017 e as especificações finalizadas em junho de 2018, com os primeiros terminais móveis compatíveis com 5G NR Rel-15 lançados em 2019. A Rel-15 aprimorou significativamente a comunicação móvel para cenários de banda larga móvel, chamados de *enhanced Mobile BroadBand (eMBB)*, introduzindo taxas de dados mais rápidas, maior capacidade e menor latência. Para isso, na Rel-15 foi introduzida na Rel-15 uma nova tecnologia de rede de acesso (RAN), denominada 5G New Radio (5G NR), e também um novo núcleo de rede conhecido como 5G Core (5GC). Além disso, novas faixas do espectro em ondas milimétricas (e.g. mmWave) e maior suporte às funcionalidades, como formação de feixes (e.g. beamforming) e MIMO (do inglês multiple input, multiple output) massivo, foram suportadas para atender à maior demanda

por largura de banda das redes móveis. Por fim, a Rel-15 aprimorou novas funcionalidades de Internet das Coisas (IoT), suportando tecnologias de baixo consumo de energia de área ampla (LWPAN) e segurança melhorada.

O Release 16 (Rel-16) do 3GPP começou a ser desenvolvido após a conclusão do Rel-15, expandindo ainda mais as capacidades do 5G com novos recursos e aprimoramentos visando principalmente a garantia de evolução e suporte maior à aplicações industriais [Parkvall et al. 2020, Flynn 2020]. A Rel-16 foi concluída em julho de 2020, e teve os primeiros terminais móveis compatíveis lançados em 2021. Com a Rel-16, houve a introdução da comunicação ultra-confiável e de baixa latência avançada (eURLLC), que possibilita a execução de aplicações que demandem baixa latência extrema, como aplicações industriais e cirurgia remota, além de viabilizar a implementação de redes sensíveis ao tempo (TSN) que necessitam de comunicação em tempo real. Relacionado a isso, a Rel-16 introduziu melhorias na massificação de dispositivos do tipo *Internet of Things (IoT)*, muito usados nas tecnologias de Narrowband IoT (NB-IoT) e no Enhanced Machine-Type Communication (eMTC) para oferecer maior capacidade, melhor cobertura e menor consumo de energia, suportando assim um grande número de dispositivos IoT em uma ampla gama de aplicações como monitoramento ambiental, agricultura e rastreamento de ativos.

A Rel-16 melhorou ainda o suporte a redes não-públicas (NPN) e redes privadas, para atender às necessidades de segurança, desempenho e controle das aplicações de missão crítica e IoT massivo, incluindo funcionalidades como o fatiamento de recursos de rede (network slicing), que permite que operadoras criem redes virtuais otimizadas para aplicações ou serviços específicos. A Rel-16 introduziu o uso integrado para acesso e redes de transporte, também chamadas de *backhaul* (IAB), viabilizando operadoras usarem uma combinação de redes cabeadas e sem fio para melhorar o desempenho de suas redes, bem como funcionalidades para economia de energia que ampliam a vida útil da bateria dos terminais. A Rel-16 também introduziu a comunicação celular 5G de veículos para quaisquer outras coisas (C-V2X), pela qual os veículos se comunicam entre si e com a infraestrutura da estrada, aumentando a segurança e a eficiência. Por fim, a Rel-16 também aprimorou o suporte para multicast e broadcast, permitindo a entrega eficiente de conteúdo em tempo real, como vídeo e áudio, para um grande número de usuários simultaneamente.

O Release 17 (Rel-17) iniciou após a conclusão do Rel-16, e ampliou ainda mais o ecossistema 5G NR com novos recursos, melhorias de desempenho, cobertura e capacidade, suportando também novos casos de uso como realidade aumentada (e.g. extended reality - XR), realidade virtual (e.g. virtual reality - VR), carros autônomos e aplicações industriais [Samdanis and Taleb 2020, Rahman et al. 2021]. A Rel-17 foi concluída em Março de 2022, e os primeiros terminais suportando funcionalidades da Rel-17 são esperados para 2023. A Rel-17 introduziu novos recursos para suportar serviços de missão crítica e IoT massivo. Também melhorou o suporte para redes privadas e redes de acesso sem fio fixas (FWA – Fixed Wireless Access). Além disso, introduziu novos recursos para melhorar o desempenho da rede em áreas rurais. Por fim, trouxe melhorias de segurança para operação integrada com redes 4G, funcionalidades de segurança para serviços baseados em proximidade (e.g. Proximity Services - ProSe) e melhorias na segurança para proteção contra estações rádio-base falsas.

Recentemente, a Release 18 (Rel-18) iniciou com a conclusão da Rel-17 em Março de 2022, e marcou o início do desenvolvimento do chamado 5G Advanced [Lin 2022, Zhang and Long 2022, Chen et al. 2022, Chen et al. 2023]. Embora a data de congelamento da Rel-18 tenha sido deslocada recentemente para Março de 2024, hoje já se tem uma boa visão de quais funcionalidades serão contempladas. Por exemplo, se antevê a introdução de novos recursos para melhorar o desempenho da rede 5G NR em áreas urbanas densas, tanto em termos de taxas de pico de vazão como em termos de taxas médias de vazão, e também a diminuição da latência média. Além disso, serão adicionados novos recursos para suportar serviços de missão crítica e IoT massivo. Por fim, a Rel-18 introduz melhorias no suporte para redes privadas e redes de acesso sem fio fixas (Fixed Wireless Access - FWA), e introduz novos recursos para melhorar a eficiência energética da rede. A Release 18 também marca o início de muitos itens de estudo (Study Items - SIs) para a evolução do 5G Advanced, que se tornarão itens de trabalho (Working Items - WIs) em releases futuras.

### 5.2.2. Desagregação da RAN dos padrões 5G NR

O advento das redes 5G NR levou à uma mudança de paradigma na RAN quando se compara com as redes 4G, com a desagregação da estação rádio-base 5G (conhecida como gNodeB, ou simplesmente gNB) tendo um papel crucial para se atingir os objetivos de melhorias de desempenho, flexibilidade e escalabilidade. Além disso, o movimento pela abertura e desagregação das redes de acesso conhecido como Open RAN não só aprofundou a desagregação na própria RAN, como introduziu novos componentes que permitem que se extraia informações da RAN para que algoritmos externos à gNB possam implementar decisões para gerenciamento de recursos de rádio (Radio Resource Management - RRM) que se traduzem em políticas de RRM que são devolvidas à gNBs, com o uso massivo de inteligência artificial e aprendizado de máquina e também visando a diversidade de fornecedores e diminuição de custos de capital e custos operacionais. A Figura 5.1 apresenta os componentes de uma RAN aberta desagregada e suas interfaces.

A desagregação do 5G NR RAN visa otimizar o desempenho da rede e a utilização de recursos ao desacoplar suas funções principais em componentes distintos. A desagregação vertical, que aborda principalmente a separação de funcionalidades dentro da RAN, envolve a divisão da gNB em dois componentes essenciais: a unidade centralizada (Central Unit - CU) e a unidade distribuída (Distributed Unit - DU), no que é conhecido como Split 2. A CU é responsável por lidar com as funções das camadas superiores, como gerenciamento de mobilidade e controle de recursos de rádio (Radio Resource Control - RRC), enquanto a DU gerencia as funções das camadas inferiores, incluindo processamento da camada de controle de acesso (Medium Access Control - MAC), camada física (Physical interface - PHY) e a própria transmissão de sinal de radiofrequência (Radio Frequency - RF). Essa divisão de trabalho aumenta a flexibilidade e a escalabilidade, permitindo que as operadoras de rede atualizem e dimensionem independentemente cada componente com base nas necessidades específicas de diferentes áreas dentro da cobertura da rede. A interface que conecta a CU com a DU se chama F1, e será explorada em maiores detalhes na próxima seção.

A desagregação horizontal, por outro lado, concentra-se na separação de funcionalidades dentro da própria CU. Isso implica dividir o CU em dois sub-componentes

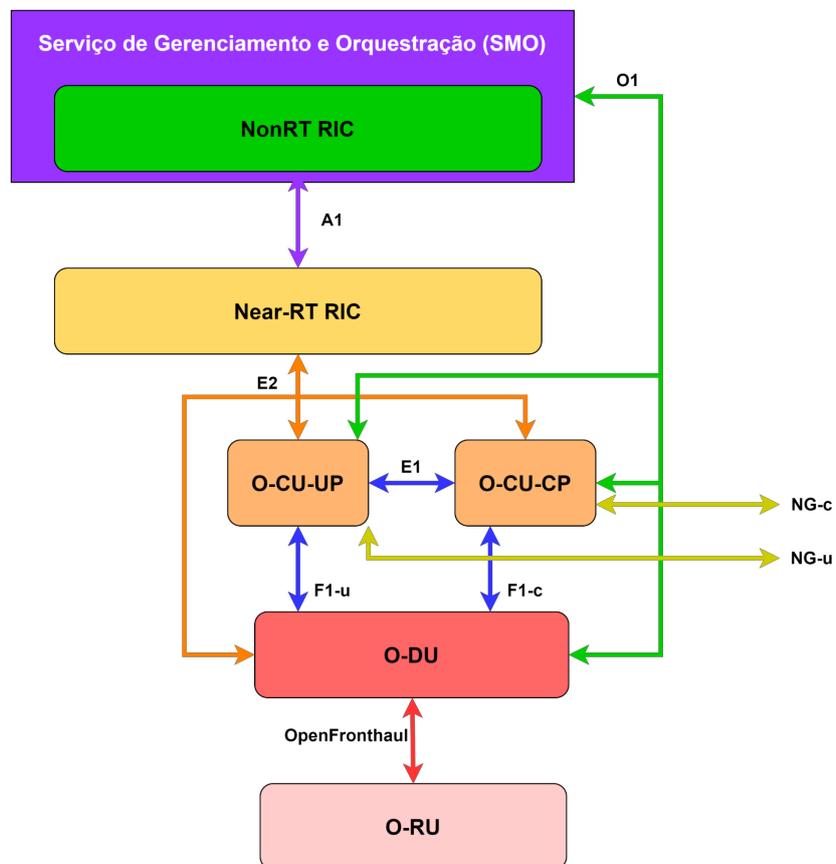


Figura 5.1: Arquitetura Open RAN

distintos: o plano de usuário da CU (CU-UP) e o plano de controle da CU (CU-CP). O CU-UP é responsável por gerenciar o tráfego do usuário, como dados e voz, enquanto o CU-CP lida com sinalização de controle e tarefas de gerenciamento de rede. Dessa forma, ao isolar as funções do plano do usuário e do plano de controle, a desagregação horizontal facilita a alocação de recursos aprimorada, gerenciamento de rede simplificado e otimização mais granular do desempenho da rede. A combinação de abordagens de desagregação vertical e horizontal em RANs 5G NR contribui para aumentar a adaptabilidade, melhorar a eficiência da rede e reduzir os custos operacionais. A interface que conecta a CU-UP ao CU-CP se chama E1, e será melhor explorada na próxima seção.

Avanços na função de virtualização de rede associadas com o mercado e a demanda regulatória por mais abertura e interoperabilidade nas RAN 5G NR motivaram a criação de um arcabouço composto por padrões, protocolos e componentes de softwares de código aberto denominado como Open RAN. Essa abertura tem como objetivo democratizar segmentos da rede de telecomunicações para não depender de equipamentos de grandes indústrias, e assim permitir a redução de custos e o poderio desses conglomerados. A arquitetura Open RAN combina o software da gNB modular com hardware dito “pronto para uso”, onde são atribuídos componentes de banda-base e unidades de rádio de fornecedores distintos, assim viabilizando uma interoperabilidade transparente, não importando se os elementos de RAN são ou não virtualizados e/ou desagregados. Além disso, a introdução de interfaces abertas entre os diferentes componentes Open RAN permite que se obtenha informações da RAN e se efetue atualizações de políticas de controle, o que viabiliza a utilização de Aprendizagem de Máquina e entre outras técnicas de Inteligência Artificial para efetuar otimizações e controle inteligente da RAN.

Uma primeira desagregação introduzida pelo padrão Open RAN foi a desagregação vertical da DU em dois outros componentes, a saber a unidade distribuída aberta (O-DU) e a unidade de rádio aberta (O-RU). Essa abordagem inovadora, conhecida também como Split 7.2x, visa aumentar a interoperabilidade e a flexibilidade dentro da rede ao desacoplar elementos de hardware e software, permitindo o uso de componentes de vários fornecedores via interfaces abertas. O O-DU é responsável por tarefas de processamento em tempo real, como processamento de banda-base, enquanto o O-RU lida com as funções na linha de frente da interface de radiofrequência (RF), incluindo conversão de sinal, amplificação e transmissão pela interface aérea. Ao segregar essas funcionalidades, o padrão Open RAN promove uma arquitetura RAN mais modular e adaptável, permitindo que as operadoras atualizem, dimensionem e personalizem cada subcomponente de forma independente para atender a requisitos de rede específicos e otimizar o desempenho. A adoção do padrão O-RAN (Open RAN), portanto, promove um ecossistema mais competitivo, impulsiona a inovação e, por fim, leva a implantações de redes mais econômicas e eficientes. A interface que conecta a O-DU com a O-RU implementa uma interface conhecida como OpenFronthaul, e será melhor explorada na seção seguinte.

A arquitetura Open RAN (O-RAN) também apresenta o conceito do controlador inteligente da RAN (RAN Intelligent Controller - RIC) como um componente chave desagregado, projetado para aprimorar a inteligência e a adaptabilidade da RAN. O RIC é uma plataforma baseada em software que permite a introdução de funcionalidades avançadas como gerenciamento de recursos de rádio em tempo real, otimização de rede e aplicação de políticas de gerenciamento de recursos de rádio. Ao empregar algoritmos

de aprendizado de máquina e inteligência artificial, o RIC pode realizar tomadas de decisão dinâmicas e inteligentes, otimizando o desempenho da rede com base em padrões de tráfego, comportamento do usuário e outras informações contextuais. Essa camada adicional de inteligência permite que as operadoras de rede forneçam serviços mais confiáveis, consistentes e eficientes, melhorando a qualidade geral da experiência dos usuários finais. O RIC se conecta aos outros elementos da arquitetura Open RAN por meio das interfaces E2, A1 e O1 que serão melhor exploradas na próxima seção.

A arquitetura O-RAN também abrange a plataforma de orquestração e gerenciamento de serviços (Service Management and Orchestration - SMO). O SMO é responsável por coordenar e gerenciar o ciclo de vida de ponta a ponta dos serviços RAN, facilitando a coordenação entre os elementos da rede, maior eficiência da rede e uso mais eficaz dos recursos. Ao incorporar o SMO na arquitetura O-RAN desagregada, as operadoras podem se beneficiar de uma infraestrutura de rede ágil, automatizada e inteligente que pode se adaptar rapidamente às demandas em constante mudança e oferecer desempenho aprimorado em uma ampla variedade de casos de uso. O SMO se conecta à todos os componentes da gNB Open RAN desagregada (e.g. O-CU, O-DU e O-RU) por meio da interface O1, explorada em maiores detalhes na próxima seção.

### **5.2.3. Controlador Inteligente de Rádio (RAN Intelligent Controller - RIC)**

Na RAN monolítica com fabricantes tradicionais (Huawei, Nokia, etc), a otimização de rede normalmente consiste em coletar as métricas de desempenho por períodos estendidos de tempo (e.g. dia ou semana), selecionar algumas células com piores indicadores e realizar ajustes físicos ou lógicos buscando melhorar os resultados dessas métricas. A otimização também pode ser provocada por reclamações dos clientes (e.g. falta de sinal ou má qualidade de serviço), onde é comum o engenheiro responsável não receber todas as informações necessárias para identificar e endereçar o problema. Os ajustes na maioria das vezes são feitos manualmente, alterando a cobertura das antenas através de modificações físicas ou os parâmetros de configuração da estação rádio base ou células envolvidas (e.g. potência de irradiação, agregação de canais, etc). As alterações visam melhorar a experiência da maioria dos usuários na região e normalmente são estáticos (não alteram até a próxima intervenção). Com o tempo foram desenvolvidas algumas implementações mais sofisticadas e tecnologias de automação conhecidas como SON (Self-Organizing Network) que permitem alterar alguns parâmetros de configuração da rede dinamicamente, inclusive considerando determinados indicadores de desempenho. Tais funcionalidades são projetadas individualmente para cada fabricante (frequentemente pelos próprios fabricantes), possuem código fechado e normalmente entram em ação depois que ocorre algum problema de desempenho na rede.

Sendo assim, o RIC atua como próximo passo na evolução das tecnologias de otimização das redes móveis, buscando complementar as soluções já existentes, trazendo mais eficiência e automação. Embora opcional, o RIC é considerado o elemento central da arquitetura Open RAN e atualmente é o componente onde reside a inteligência das redes da nova geração.

Existem dois tipos de controladores RIC com características e propósitos distintos, onde a principal diferença é o tempo de atuação. Como os próprios nomes sugerem,

o Near-RT RIC é projetado para executar ações em tempo quase real e o Non-RT RIC age mais lentamente, podendo realizar os controles com intervalos de alguns minutos ou horas. Dessa forma, estando localizados em partes diferentes da arquitetura Open RAN, os dois se complementam, agindo em conjunto para realizar as tarefas de RRM (Radio Resource Management).

**Near-RT RIC:** de acordo com definição oficial, é uma função lógica que permite controle e otimização em tempo quase real das funções e recursos dos nós E2 por meio de coleta de dados de baixa granularidade e ações na interface E2 com loops de controle na ordem de 10 ms - 1 segundo [ORAN 2023f].

Para atuar em tempo quase real, o Near-RT RIC precisa estar mais próximo à estação rádio base (DU - Distributed Unit e à CU - Control Unit). Tipicamente está localizado na borda ou em nuvem regional de telecomunicações. Através da interface E2, ele interage com DUs e CUs na RAN, bem como com gNBs (5G) e eNBs (4G) compatíveis com O-RAN, operando as malhas de controle de recursos de rádio. O Near-RT RIC consiste em vários aplicativos com lógica personalizada chamados xApps, e serviços que são necessários para suportar a execução dos mesmos (como banco de dados, estrutura para transporte das mensagens entre componentes, gerenciadores de aplicativos e inscrições, etc). Uma xApp é uma aplicação de software que pode ser desenvolvida por terceiros e que implementa uma funcionalidade específica dentro do near-RT RIC (como o controle de recursos rádio). Há um esforço crescente para construir uma loja desses aplicativos para operadoras de redes, que tem o potencial de estimular a inovação ao trazer novas perspectivas, soluções personalizadas e uma competição saudável entre os desenvolvedores.

**Non-RT RIC:** é um componente do SMO (Service Management and Orchestration) e complementa o Near-RT RIC para operação e otimização de RAN. Tipicamente instalado num ponto mais central, ele pode trabalhar com vários Near-RT RICs localizados nas bordas, tendo uma visão mais ampla da rede. De acordo com a definição oficial, o principal objetivo do Non-RT RIC é oferecer suporte à otimização inteligente da RAN, fornecendo orientação baseada em políticas, gerenciamento de modelos ML e informações de enriquecimento para a função Near-RT RIC, para que a RAN possa otimizar, por exemplo, o RRM sob certas condições. Ele também pode executar a função de gerenciamento de recursos de rádio inteligente em intervalo de tempo não real (maior que 1 segundo). De forma análoga, a plataforma Non-RT RIC também possui alguns serviços embarcados para o gerenciamento de seu funcionamento (como banco de dados, interfaces de comunicação, entre outros), além das suas próprias aplicações de otimização e fornecimento de políticas, as quais são nesse caso denominadas rApps. Devido ao seu ciclo de operação poder ser muito mais extenso (podendo realizar análises na escala de horas ou dias, inclusive), esse elemento da arquitetura também pode executar o treinamento e reconfiguração dos parâmetros dos modelos de otimização empregados, sejam nas rApps ou nas xApps [ORAN 2022]. Esses dois elementos se comunicam através de uma interface específica, chamada A1. Por ela, as políticas de execução de otimizações de quase tempo real são transmitidas, além de modelos treinados previamente [ORAN 2023a].

#### 5.2.4. O ciclo de vida e operação de um modelo de IA/ML no RIC

A pesquisa e experimentação de ferramentas de otimização baseadas em aprendizado de máquina (ML) aplicadas em contextos de telecomunicações estão cada vez mais intensas. Até agora, as redes celulares implantadas têm utilizado técnicas de otimização rudimentares, como mencionado anteriormente. No entanto, existe um grande potencial para o uso de técnicas mais sofisticadas, considerando que o poder de processamento para esses algoritmos está se tornando menos limitante, graças ao uso de servidores mais robustos e arquiteturas mais elaboradas, incluindo nuvens e implementações nas bordas de rede para redução da latência da comunicação.

Nesse contexto, a plataforma RIC (Inteligência de Controle da RAN) possibilita a aplicação desses modelos diretamente nos elementos da RAN, utilizando dados coletados por meio da interface E2. Isso permite que um ciclo completo de vida de um modelo de ML empregado no RIC seja realizado, abrangendo todos os passos envolvidos no processo, desde os primeiros estudos até a operação.

Ao compreender o ciclo de vida de um modelo de ML no RIC, é possível explorar todo o potencial dessa abordagem avançada de otimização. Os estudos iniciais envolvem a seleção e preparação dos dados relevantes, a definição do objetivo da otimização e a escolha do algoritmo de ML adequado. Em seguida, são realizadas etapas de treinamento e validação do modelo, utilizando conjuntos de dados históricos e métricas de desempenho.

Após o treinamento, o modelo é implantado no ambiente de produção e começa a receber dados em tempo real da interface E2, permitindo que ele faça previsões e tome decisões de otimização. Esse processo é contínuo, com o monitoramento contínuo do desempenho do modelo e possíveis atualizações para melhorar sua precisão e eficácia.

Portanto, entender o ciclo de vida de um modelo de ML no contexto do RIC é fundamental para aproveitar todo o potencial dessa tecnologia, permitindo uma otimização mais sofisticada e eficiente das redes de telecomunicações.

A representação do ciclo de vida mencionado é ilustrada na Figura 5.2. Inicialmente, o modelo é testado em um ambiente experimental ou simulado, utilizando dados previamente obtidos e ferramentas de design típicas, como as bibliotecas Keras, PyTorch, Tensorflow, entre outras. O modelo pode ser treinado e avaliado em um ambiente chamado Training Host, que pode estar localizado dentro do Non-RT RIC ou ser tratado de forma offline. O Training Host solicita dados específicos da RAN e/ou do Near-RT RIC para o treinamento do modelo. Nesse estágio, o modelo pode passar por modificações adicionais, visando melhorias e conformidade, até estar pronto para implantação.

Após o treinamento, o modelo é disponibilizado no catálogo de modelos de otimização do SMO (Service Management and Orchestration) e, em seguida, publicado para o Non-RT RIC, juntamente com as licenças de uso adequadas e metadados associados. O Non-RT RIC é responsável por empacotar o modelo em um contêiner, de acordo com o gerenciador de contêineres utilizado na rede, e definir as políticas para sua operação. Em seguida, o Non-RT RIC implanta o aplicativo já containerizado em seu local de atuação, por exemplo, no Near-RT RIC. Nesse ponto, o modelo está pronto para operar, recebendo os dados da RAN por meio da interface E2 e executando otimizações propostas em tempo quase real, interferindo na rede. Assim, novos dados podem ser coletados e enviados para

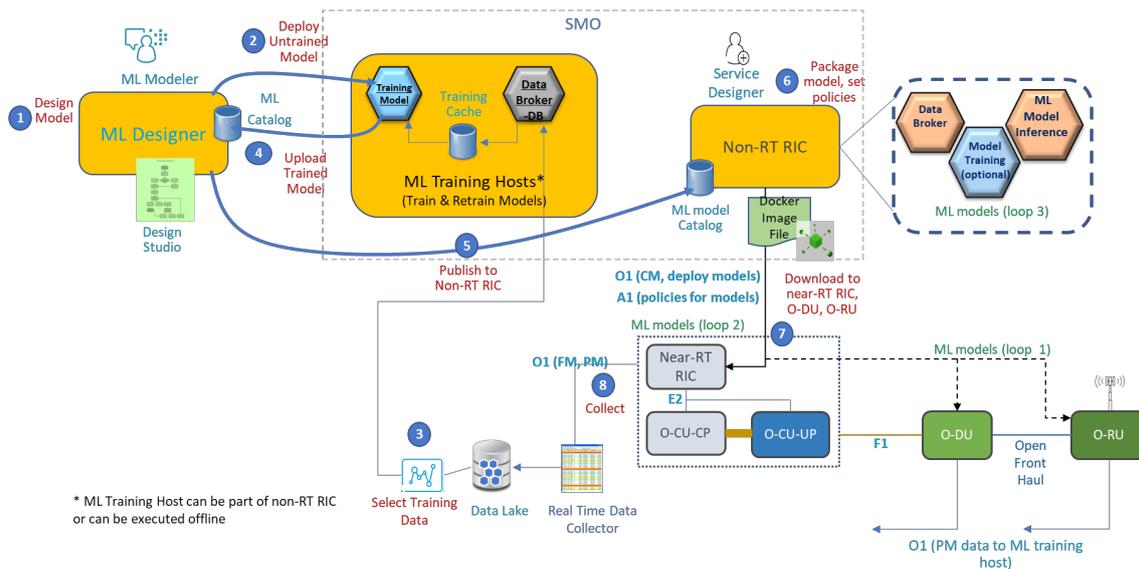


Figura 5.2: Ciclo de Vida do Modelo de Aprendizado de Máquina no contexto do RIC. [ORAN 2023d]

camadas superiores para avaliação e retreinamento, quando necessário [ORAN 2023d].

### 5.2.5. As técnicas de IA/ML e casos de uso

As métricas observáveis da rede são, em geral, Key Performance indicators (KPIs) relacionados ao desempenho dos elementos da rede (as células, sua ocupação, qualidade de serviço média, latências, parâmetros relacionados ao uso massivo de antenas, potência de sinais, entre diversas outras). Dessa forma, são esperados dados numéricos, séries temporais ou em formato de tabela. Alguns outros poderão ser categóricos, indicando condições atingidas, disponibilidade de certo recurso, determinação de prioridades em tarefas (roteamento, por exemplo), alocação de usuário em feixes, entre outros. De toda forma, são pouco esperados dados não estruturados, imagens, fragmentos de textos (strings), etc.

Além disso, em relação aos tipos de tarefas que terão maior ocorrência, são esperadas as denominadas tarefas de aprendizado supervisionado, considerando a natureza dos dados e as otimizações clássicas da rede. Ou seja, são tarefas que possuem um rótulo para entradas e saídas, como a classificação e a regressão. Ademais, as técnicas de aprendizado profundo (Deep Learning) mais características no contexto de redes móveis desagregadas são as redes neurais recorrentes (que lidam bem com problemas de análise temporal), o aprendizado por reforço (com contínua interação com o ambiente) e o aprendizado federado (pelas características dessa estratégia, ao não compartilhar todos os dados dos usuários com a rede, por alguma questão de privacidade de dados, por exemplo).

Alguns casos de uso clássicos em redes móveis podem ser endereçados com certas técnicas citadas. A previsão do uso de carga de uma célula ou um cluster de células, a estimação de condições de canal ou a otimização na transição da conexão em uma certa localidade. Porém, novos casos de uso também são previstos em especificações técnicas, mais complexas, porém facilitadas pela arquitetura Open RAN, como o compartilhamento de RAN entre diferentes operadoras, otimização para ambiente IoT industrial, previsão de

ataques orquestrados à rede, entre outros [ORAN 2023c].

### 5.2.6. Interfaces

Diversas interfaces abertas promovem a comunicação entre os elementos da arquitetura Open RAN. Elas são padronizadas pelos grupos de trabalho da O-RAN Alliance e, de forma objetiva, são tratadas a seguir:

- **A1:** Conecta os dois RICs, habilitando o Non-RT RIC para fornecer controles de ação para o Near-RT RIC que pode afetar um UE ou um grupo deles. Isso ajuda a estabelecer as políticas de otimização de alto nível e gerenciamento de modelos de ML em xApps [ORAN 2023a].
- **O1:** É uma ligação direta entre os elementos da arquitetura, como entre o Near-RT RIC e RAN e entre o SMO e o Non-RT RIC. Ele oferece suporte a serviços de gerenciamento, que incluem o gerenciamento do ciclo de vida dos componentes O-RAN, desde a inicialização e configuração até a tolerância a falhas, garantias de desempenho, rastreamento, coleta de KPIs e gerenciamento de software e arquivos [ORAN 2023b].
- **E2:** Conecta o Near-RT RIC aos nós E2 (estações base compatíveis com DU, CU e O-RAN). O Near-RT RIC usa essa interface para controlar procedimentos e funções dos nós E2. Além disso, a interface E2 garante a coleta e transmissão de métricas RAN periódicas ou acionadas por eventos para o Near-RT RIC [ORAN 2023e].
- **F1:** É responsável por conectar os elementos CU e DU da RAN. Por definição, é dividida entre o plano de controle e o plano de dados, de forma a separar esse tipo de tráfego adequadamente. Originalmente foi definida tecnicamente pelo 3GPP, mas segue complementada pelas especificações da O-RAN Alliance (atribuída ao grupo WG5, conforme tratado em seção específica) [ORAN 2023b].
- **E1:** É responsável por transmitir os sinais de rádio entre a DU e o RU, permitindo a comunicação e o controle da estação base. Essa interface inclui funções como transmissão de dados, controle de potência, modulação e demodulação do sinal de rádio, além de outros recursos relacionados à camada física da rede [ORAN 2023b].

### 5.2.7. FrontHaul O-RAN

A indústria de telecomunicações tem enfrentado sérios desafios para acomodar com eficiência o crescimento exponencial do tráfego de redes. Novos casos de uso e recursos escassos de espectro colocaram uma enorme pressão sobre os provedores de serviços de comunicação para fazer o uso mais eficiente de seu espectro de rádio alocado. Para atender às crescentes demandas, as operadoras estão buscando novas maneiras de projetar redes flexíveis, dimensionar dinamicamente a capacidade da rede, expandir a cobertura de serviços, implantar rapidamente novos serviços e melhorar a experiência geral do usuário, reduzindo o custo total de implantação e o tempo de comercialização.

Como já foi dito, a O-RAN Alliance está padronizando o próximo nível de especificações das Redes de Acesso por Rádio (RAN – Radio Access Networks). A Open

RAN é uma colaboração de fabricantes de equipamentos e empresas de telecomunicações em vários grupos de trabalho para resolver esse problema de interoperabilidade por meio da criação de padrões. Desde que o equipamento atenda aos padrões RAN abertos, o mesmo deve ser compatível com equipamentos fabricados por qualquer outro fornecedor cujo equipamento também atenda aos padrões especificados pela O-RAN Alliance.

Para tanto, a interface Fronthaul é a chave para a implantação flexível de uma rede Open RAN, pois antecipa os diversos cenários sobre como uma estação base irá interagir com o rádio, quais serão as demandas subjacentes das redes 5G, além de possíveis problemas de sincronização. O Fronthaul O-RAN é uma arquitetura que divide o pipeline de processamento do modem sem fio 5G em estágios padronizados, separados e conectados por determinadas interfaces de rede padrão, podendo conectar várias Unidades de Rádio (RU – Radio Unit) a uma única Unidade Distribuída (DU – Distributed Unit), de modo que haja uma bifurcação em várias interfaces aéreas 5G.

As configurações da arquitetura Fronthaul tem a capacidade de equilibrar as demandas de confiabilidade, taxa de transferência e latência de aplicativos avançados em redes 5G. Dependendo do tipo de tratamento de dados necessário, a arquitetura em camadas Fronthaul pode ser distribuída pela rede entre datacenters de ponta e datacenters centrais. Essa estrutura permitirá que operadoras sem fio e operadoras móveis atualizem e aprimorem suas redes sem fio sem estarem vinculadas a equipamentos legados e acelerar a implantação de Fronthaul 5G em larga escala de maneira escalável.

O protocolo mais comumente usado para o Fronthaul é o Common Public Radio Interface (CPRI), mas isso tem algumas limitações e desafios. O CPRI foi projetado para que a Unidade de Rádio Remoto (RRU – Remote Radio Unit) e a Unidade de Estação Base (BaseBand Unit – BBU) sejam co-localizadas, ou seja, há um limite de distância física que pode existir entre elas. Com a RAN Centralizada (C-RAN) se tornando cada vez mais popular, essa limitação de distância física pode se tornar um desafio para locais fora de áreas construídas. Como o CPRI é especificado para topologia ponto a ponto, esse protocolo torna-se uma barreira para implantações de vários fornecedores. O CPRI também pode suportar apenas taxas de dados Fronthaul limitadas, tornando-o inadequado em cenários de alta taxa de dados para redes 5G. O projeto enhanced CPRI (eCPRI) foi desenvolvido para superar essas e outras limitações.

O eCPRI substitui a transferência síncrona de dados no CPRI por um protocolo baseado em Ethernet, removendo a dependência específica do fornecedor. O protocolo eCPRI suporta comunicação ponto-a-multiponto e multiponto-a-multiponto, além de fornecer uma topologia ponto-a-ponto, permitindo que as operadoras misturem e combinem vários fornecedores. O eCPRI possui três planos de operações como parte do protocolo: planos de usuário, sincronização, controle e gerenciamento. As definições de transporte específicas do plano de usuário são padronizadas pelo protocolo eCPRI em relação aos formatos do quadro de dados, pacote e cabeçalho; enquanto os planos de sincronização, controle e gerenciamento não são explicitamente limitados pelo protocolo eCPRI.

A interface Fronthaul O-RAN inclui o Plano de Controle (C-Plane – Control Plane), Plano de Usuário (U-Plane – User Plane), Plano de Sincronização (S-Plane – Synchronization Plane) e Plano de Gerenciamento (M-Plane – Management Plane) sobre as interfaces Lower-Layer Split (LLS). A O-RAN define esses planos de operação da

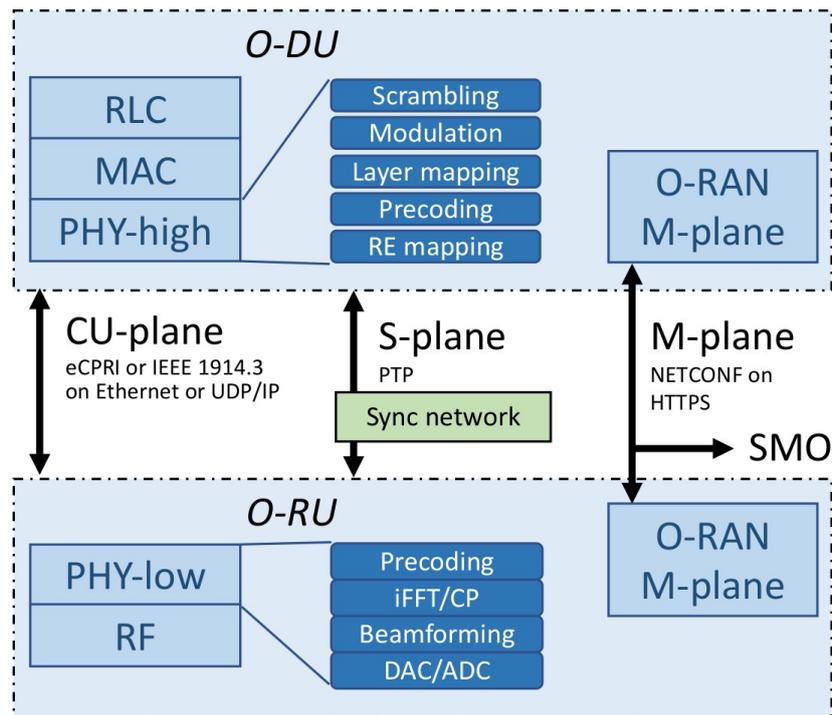


Figura 5.3: Fronthaul O-RAN, planos de operações e protocolos. [Polese et al. 2023]

seguinte forma:

- O plano de controle é responsável por definir o agendamento, a coordenação necessária para a transferência de dados e Beamforming, por exemplo;
- O plano de usuário é responsável pela transferência eficiente de dados dentro dos limites de tempo definidos de acordo com as numerologias NR;
- O plano de sincronização é responsável pelos aspectos de temporização e sincronização entre a O-DU e a O-RU;
- O plano de gerenciamento é responsável por gerenciar a unidade de rádio. O plano de gerenciamento fornece uma variedade de funções de gerenciamento para O-RU com o objetivo de definir parâmetros no lado da O-RU conforme exigido pelos planos de controle, usuário e sincronização, como por exemplo: gerenciar o software da O-RU.

Os protocolos de especificações da interface Fronthaul O-RAN para cada plano mencionado acima é mostrado na Figura 5.3:

Os planos de controle e usuário suportam uma pilha de protocolos que transmitem dados através dos protocolos eCPRI e/ou RoE. Vale ressaltar que, os protocolos User Datagram Protocol (UDP) e Internet Protocol (IP) podem ser utilizados de forma opcional para a transmissão de mensagens dos planos de controle e usuário. Em relação ao plano de sincronização, as especificações para a interface Fronthaul O-RAN definem

os protocolos PTP (Precision Time Protocol) e SyncE como responsáveis pela obtenção da sincronização precisa entre O-RU e O-DU, para tanto, utiliza-se o relógio disponível (como referência de tempo para sincronização) localizado na O-DU. Por fim, o plano de gerenciamento utiliza protocolo NETCONF/YANG e Ethernet para a transmissão de mensagens de gerenciamento de rede.

Embora o desenvolvimento dos padrões Open RAN venha permitindo instalações de redes celulares móveis tanto a nível de pesquisa acadêmica quanto a nível de instalações comerciais, diversos desafios em termos de pesquisa e desenvolvimento se apresentam.

Um dos primeiros desafios encontra-se no mapeamento dos principais casos de uso para instalações de redes Open RAN. Embora os padrões Open RAN forneçam as diretrizes para a criação de uma infraestrutura para implementar uma RAN completa com controle fechado, a identificação de um conjunto de casos de uso “chave” que alavancam esses recursos estendidos ainda está em desenvolvimento. A O-RAN Alliance fornece uma lista de casos de uso relevantes para o controle habilitado para RIC, que inclui o controle “clássico” de gerência de recursos de rádio (RRM) relacionados a transição de conexão de forma otimizada, alocação de recursos, otimização de qualidade de experiência (Quality of Experience - QoE), entre outros. Apesar disso, com o avanço dos padrões 3GPP para novos cenários como redes não-terrestriais (Non-Terrestrial Networks - NTN) e suporte a Realidade Aumentada (Augmented Reality - AR)/ Realidade Virtual (Virtual Reality - VR) no metaverso, torna-se necessário refinar ainda mais e avaliar os futuros casos de uso Open RAN em suporte à estes novos cenários de uso desafiadores.

Um destes cenários desafiadores é o de redes privadas implementadas com componentes Open RAN. As redes celulares privadas estão emergindo rapidamente como um cenário chave de implantação de 5G, com aplicações em automação industrial, armazéns, saúde, educação e entretenimento. As implantações 5G privadas *greenfield* (i.e. com novas instalações) podem incorporar facilmente soluções Open RAN para controle e otimização de rede, como também reduzir os custos de propriedade e operação graças a nós desagregados e virtualizados. O projeto de redes privadas habilitadas para O-RAN apresenta desafios em termos de otimização específica de domínio, integração com sistemas de ponta e interrupções locais e suporte para conectividade em ambientes restritos.

Outro cenário desafiador é o da implementação de soluções de compartilhamento de espectro baseadas em componentes Open RAN. Controladores de rede e nós RAN programáveis abertos provêm novas oportunidades para o desenvolvimento de sistemas de compartilhamento de espectro. As especificações O-RAN já incluem recursos para compartilhamento de espectro dinâmico 4G e/ou 5G, mas o design de algoritmos para permitir isso ainda é um assunto em aberto. Pesquisas futuras podem investigar como habilitar de forma prática a detecção baseada em Open RAN, soluções de adaptação de espectro reativa e proativa, considerando sistemas 3GPP e não 3GPP, bem como extensões relacionadas ao compartilhamento da arquitetura O-RAN.

É importante observar que o desenvolvimento das tecnologias Open RAN é impulsionado pelas necessidades específicas de grandes players internacionais, como operadoras, provedores de serviços de nuvem e integradores, expressas nas diretrizes estabelecidas nesses fóruns. Geralmente, essas diretrizes têm como objetivo atender às demandas

dos principais mercados do Hemisfério Norte. No entanto, os desafios enfrentados na implantação das tecnologias Open RAN para casos de uso no Brasil e na América Latina podem não ser os mesmos encontrados nesses grandes centros.

Por exemplo, a região enfrenta deficiências de infraestrutura que não são encontradas nos principais centros da América do Norte, Europa e Ásia. Isso pode inviabilizar a desagregação dos componentes da RAN ou a implementação em larga escala de recursos de Mobile Edge Cloud (MEC) devido à falta de infraestrutura de fibra óptica. Além disso, podem existir casos de uso específicos da região que não são abordados pelas diretrizes existentes, bem como um ambiente regulatório e de negócios diversificado. É necessário considerar também as necessidades dos players de pequeno e médio porte na região.

Portanto, é essencial garantir que esses interesses únicos no Brasil e na América Latina sejam adequadamente atendidos no desenvolvimento das tecnologias Open RAN. É necessário um esforço para adaptar as soluções e diretrizes existentes às realidades regionais, considerando as deficiências de infraestrutura, casos de uso específicos e o ambiente regulatório e de negócios local. Isso garantirá que as tecnologias Open RAN sejam relevantes e eficazes para os desafios e necessidades específicas do Brasil e da América Latina.

A automação e orquestração avançadas em ambientes MEC com múltiplos "locatários" da infraestrutura de computação de borda (i.e. *multi-tenant*) e/ou com uso de recursos de múltiplas "nuvens" (i.e. *multi-cloud*) apresentam desafios significativos. O compartilhamento de recursos MEC entre múltiplos "locatários" permite uma utilização mais eficiente da infraestrutura disponível, reduzindo os custos gerais e promovendo uma instalação e operação da MEC mais eficientes e econômicas do que com recursos MEC de um único proprietário/locatário.

Além disso, o compartilhamento de recursos MEC em cenários multilocatários oferece flexibilidade e escalabilidade adicionais. Como os recursos da MEC são compartilhados entre vários "locatários", é mais fácil ajustar a alocação desses recursos de acordo com a demanda variável, adicionando ou removendo "locatários" conforme necessário. Isso facilita o suporte a uma ampla variedade de usuários e aplicativos, permitindo escalar a alocação de recursos MEC de um "locatário" para cima ou para baixo conforme necessário.

Além dos benefícios mencionados, o compartilhamento de recursos MEC entre múltiplos "locatários" oferece oportunidades adicionais de colaboração e inovação. Ao permitir que os "locatários" compartilhem recursos da MEC e se conectem entre si, cria-se um ambiente dinâmico e interativo, no qual eles podem aprender uns com os outros e desenvolver novas ideias e soluções.

No entanto, a implementação efetiva dessa automação e orquestração avançadas em ambientes MEC multi-tenant/multi-cloud apresenta desafios técnicos e operacionais. É necessário desenvolver mecanismos robustos para gerenciar a alocação dinâmica de recursos, garantir a segregação adequada entre os "locatários" e garantir a qualidade de serviço e a segurança da rede. Além disso, a interoperabilidade entre diferentes provedores de MEC e a padronização de interfaces e protocolos são essenciais para facilitar o compartilhamento de recursos e a colaboração entre os "locatários".

Dessa forma, a automação e orquestração avançadas em ambientes MEC multi-tenant/multi-cloud são áreas que exigem pesquisa e desenvolvimento contínuos, buscando soluções eficientes e seguras para permitir o compartilhamento de recursos, a flexibilidade, a escalabilidade e a colaboração entre os "locatários" na MEC.

Um dos principais desafios para avançar nesse tema é gerenciar e coordenar a alocação de recursos entre vários locatários e provedores. Em um ambiente multilocatário ou multinuvem, pode haver muitos usuários e aplicativos diferentes competindo pelo acesso aos mesmos recursos, o que dificulta garantir que todos tenham acesso aos recursos necessários. Portanto, é necessário implementar o isolamento entre workloads para permitir o atendimento multilocatário, permitindo que várias operadoras compartilhem o mesmo datacenter e ambiente multinuvem com diferentes elementos de cada fornecedor. Isso requer um planejamento e coordenação cuidadosos para evitar conflitos ou gargalos, bem como modificações em software, protocolos existentes e integração entre diferentes sistemas e clouds.

Outro desafio é aproveitar ao máximo o uso de algoritmos de Inteligência Artificial (IA) para lidar com a enorme quantidade de parâmetros e ações possíveis para controlar um sistema complexo, com múltiplos componentes, provedores e clientes. Além disso, há o objetivo de reduzir o consumo de energia das redes 5G, o que pode ser potencializado pelo emprego de algoritmos de inteligência artificial na gestão da rede fim-a-fim ou pela introdução de hardware especializado que acelere o processamento de algoritmos específicos enquanto diminui o consumo de energia.

Outro desafio é garantir compatibilidade e interoperabilidade entre diferentes locatários e provedores. Em um ambiente multilocatário ou multinuvem, pode haver muitas tecnologias e fornecedores diferentes envolvidos, o que dificulta garantir que todos os componentes da infraestrutura de rede possam trabalhar juntos perfeitamente. Isso requer o uso de protocolos e interfaces abertos e padronizados para garantir que diferentes locatários e provedores possam se conectar e se comunicar entre si.

A adaptação das tecnologias MEC multilocatário e multinuvem às particularidades do ecossistema do país e da América Latina também é um desafio. Isso inclui as grandes distâncias entre os centros principais e as localidades remotas, bem como deficiências na infraestrutura de Telecomunicações. Além disso, é necessário alinhar os desenvolvimentos em termos de software, hardware, padrões e protocolos com o que está sendo discutido para as redes de 6ª geração (6G).

Além disso, no desenvolvimento das tecnologias Open RAN em si, existem desafios importantes a serem enfrentados. Um deles é a evolução da arquitetura Open RAN. Ainda há questões em aberto sobre como essa arquitetura pode ser implantada de forma efetiva, como a distribuição dos elementos de rede em toda a rede de borda e nuvem, ou a proporção adequada entre os nós RAN e os elementos RIC. É necessário realizar mais pesquisas para projetar extensões adicionais da arquitetura O-RAN, que permitam, por exemplo, o controle em tempo real na RAN, juntamente com xApps, para aproveitar dados que não podem ser transferidos para análise na RAN ou no RIC, como amostras de sinal modulado (i.e. sinal I/Q) ou informações de estimativa em granulação fina do canal.

Além disso, é preciso lidar com o envolvimento do controle em múltiplas escalas

temporais. Considerando a arquitetura Open RAN completa, diferentes malhas de controle operam e têm visibilidade no sistema em diferentes escalas de tempo, o que gera desafios em termos de controle multiescala. Portanto, são necessárias pesquisas abrangentes no design de algoritmos multiescala temporais, levando em consideração a identificação de instabilidades no sistema, bem como possíveis conflitos entre diferentes loops de controle. Também é importante explorar a seleção automatizada de malhas de controle ideais que possam ser usadas para atingir níveis específicos de desempenho.

Em resumo, o desenvolvimento das tecnologias Open RAN enfrenta desafios como a evolução da arquitetura Open RAN, a criação de extensões que permitam o controle em tempo real na RAN em conjunto com xApps, e o envolvimento do controle em múltiplas escalas temporais, exigindo pesquisas adicionais e a implementação de algoritmos apropriados para superar esses desafios.

Outros dois grandes desafios tecnológicos na área de Open RAN são a eficiência energética e a segurança das redes. A virtualização e o controle de malha fechada fornecem recursos úteis para a alocação dinâmica de funções de rede e, assim, para maximizar a eficiência energética. É importante avançar nas pesquisas para desenvolver rotinas de orquestração que incorporem a eficiência energética como uma meta de otimização, além de xApps e rApps que adotem ações de controle ou políticas que incluam a eficiência energética.

No que diz respeito à segurança, a abertura da RAN aumenta a superfície de ataque, mas também possibilita novas abordagens para a segurança da rede. Por exemplo, a maior visibilidade do desempenho da RAN, a telemetria e a capacidade de implantar plug-ins xApps e rApps para análise de segurança e detecção de ameaças abrem caminho para explorar novas abordagens para proteger as redes sem fio, tornando-as mais robustas e resilientes. É essencial investir em pesquisa e desenvolvimento de abordagens de segurança que aproveitem os recursos do Open RAN e aprimorem a integridade, resiliência e disponibilidade de suas implantações. Isso é fundamental para tornar as abordagens Open RAN uma alternativa viável e preparada para o futuro em comparação às implantações de RAN tradicionais.

Em resumo, os desafios tecnológicos relacionados à eficiência energética e segurança nas redes Open RAN exigem avanços em pesquisas para incorporar a eficiência energética na otimização da orquestração, bem como o desenvolvimento de abordagens de segurança que sejam adaptadas às características do Open RAN, visando proteger e fortalecer as redes sem fio.

### **5.3. Iniciativas OpenRAN pelo Mundo**

Uma das principais plataformas open source para a implementação dos diferentes componentes Open RAN é a Open Air Interface (OAI). A OAI é uma plataforma open source para o desenvolvimento e implantação de sistemas de comunicação sem fio via Rádio Definido por Software (Software Defined Radio - SDR) e Virtualização das Funções de Rede (Network Function Virtualization - NFV). Ela permite que engenheiros, pesquisadores e desenvolvedores realizem pesquisa e desenvolvimento utilizando um ecossistema de desenvolvimento para o core da rede e para a camada de acesso das redes celulares baseadas no 3GPP.

A plataforma OAI foi fundada pela Aliança de Software do OpenAirInterface (OpenAirInterface Software Alliance - OSA), um consórcio sem fins lucrativos para o desenvolvimento de um ecossistema aberto de redes celulares 3GPP. Tal consórcio foi fundado pelo instituto de pesquisa EURECOM na França e hoje está altamente alinhado com a filosofia Open RAN, tendo sido recentemente assinado um termo de alinhamento (i.e. *Memorandum of Understanding* - MoU) entre O-RAN Alliance e OSA, com o objetivo de cooperação em RANs abertas [OAI 2023c].

No sentido de promover um ecossistema Open RAN, a OSA conta, além de uma comunidade ativa no desenvolvimento de componentes 3GPP e interfaces abertas Open RAN, com parceiros estratégicos que possibilitam uma gama de desenvolvimentos e prototipagem de testes com o objetivo de tornar a RAN cada vez mais versátil e acessível para diferentes casos de uso.

Ao longo dos anos, a OAI evoluiu e ganhou força significativa nas comunidades de pesquisa e indústria. Tornou-se uma plataforma amplamente reconhecida para prototipagem, teste e validação de sistemas de comunicação sem fio. O projeto OAI recebeu contribuições de várias organizações, incluindo instituições acadêmicas, participantes da indústria e desenvolvedores individuais, tais como Qualcomm, Vodafone, Nokia Bell Labs, NVIDIA, entre outros.

O foco inicial da OAI estava na tecnologia 4G Long Term Evolution (LTE). O projeto teve como objetivo fornecer uma implementação de código aberto da pilha LTE, incluindo os componentes da rede de acesso por rádio (RAN), como a estação base e o User Equipment (UE). Dessa forma, permitiu-se que pesquisadores e desenvolvedores experimentassem diferentes recursos LTE, otimizassem o desempenho e desenvolvessem novos aplicativos e serviços.

Com o surgimento da tecnologia 5G, a Open Air Interface expandiu seu escopo para incluir suporte para redes 5G New Radio (NR). O projeto incorporou as especificações do 3rd Generation Partnership Project (3GPP) para 5G e forneceu uma implementação de código aberto do 5G RAN. Isso permitiu que os desenvolvedores explorassem os recursos do 5G, como taxas de dados mais altas (Enhanced Mobile Broadband - eMBB), baixa latência (Ultra-Reliable Low-Latency Communication - URLLC) e comunicações massivas do tipo máquina (massive Machine-Type Communications - mMTC).

Desta forma, a plataforma OAI está permitindo que os desenvolvedores e pesquisadores não sejam mais limitados à abordagem tradicional para desenvolvimento das comunicações sem fio utilizando hardware e software proprietários, o que limitava a inovação e tornava desafiador os experimentos com novos protocolos e algoritmos. Atualmente, a OAI está desenvolvendo 3 projetos: 5G RAN, 5G Core Network e o MO-SAIC5G. Abaixo discutiremos cada um desses projetos.

Essa discussão proporcionará uma visão abrangente das iniciativas e projetos relevantes que estão moldando o cenário do OpenRAN globalmente, destacando o esforço colaborativo da comunidade para impulsionar a adoção e o avanço dessa nova abordagem na arquitetura de redes de acesso sem fio.

### 5.3.1. 5G RAN

O projeto OAI 5G RAN se concentra na criação de uma solução RAN personalizável e interoperável. Ela fornece uma implementação definida por software da pilha de protocolo 5G RAN que pode ser implantada em hardware de uso geral, permitindo a avaliação e implementação de novos algoritmos, protocolos e arquiteturas [OAI 2023b].

Principais recursos do projeto 5G RAN:

- **Código aberto:** O projeto fornece acesso ao código-fonte completo, permitindo que os usuários entendam e modifiquem a implementação de acordo com suas necessidades e requisitos.
- **Implantação flexível:** O projeto pode ser implantado em hardware comercial pronto para uso de prateleira (i.e. *Commercial Off-The-Shelf* - COTS), permitindo soluções econômicas, facilitando o acesso e incentivando a inovação.
- **Pilha de protocolos:** O projeto abrange vários aspectos da pilha de protocolos 5G RAN, incluindo camada física, MAC (Medium Access Control), RLC (Radio Link Control), PDCP (Packet Data Convergence Protocol), RRC (Radio Resource Control), entre outros.
- **Interoperabilidade:** O projeto visa garantir compatibilidade e interoperabilidade com outros componentes e interfaces da rede móvel, permitindo uma integração com a infraestrutura de rede móvel existente.

### 5.3.2. 5G Core Network

O projeto OAI 5G Core está focado no desenvolvimento de uma implementação 5G Core Network (5GC) flexível e personalizável. O objetivo é fornecer uma plataforma aberta para pesquisadores, desenvolvedores e operadores de rede explorarem, experimentarem e contribuir para a evolução das principais tecnologias de rede 5G [OAI 2023a].

Um fato importante é que o projeto 5G core foi base para a plataforma Magma. O Magma é uma plataforma de software de código aberto que oferece às operadoras de rede uma solução de núcleo de rede móvel aberta, flexível e extensível. Os recursos incluem um núcleo de pacote móvel distribuído centrado em software, automação de rede avançada e ferramentas de gerenciamento e capacidade de coexistir com redes LTE existentes [MAGMA 2023].

Importante ressaltar também que provedores regionais do Brasil que adquiriram recentemente frequências no leilão da ANATEL estão com planos de utilizar o Magma como core da rede. Isto está acontecendo devido aos altos custos de implantação do Core da rede utilizando empresas tradicionais como Ericsson e Nokia [TELETIME 2023b]. Portanto, o Magma surge como uma alternativa de baixo custo para a sua implantação. Atualmente, podemos citar a operadora Brisanet, uma operadora regional que adquiriu recentemente frequências no leilão da ANATEL, que implantou o sistema e está utilizando-o comercialmente [TELETIME 2023a].

Principais recursos do projeto 5G Core Network:

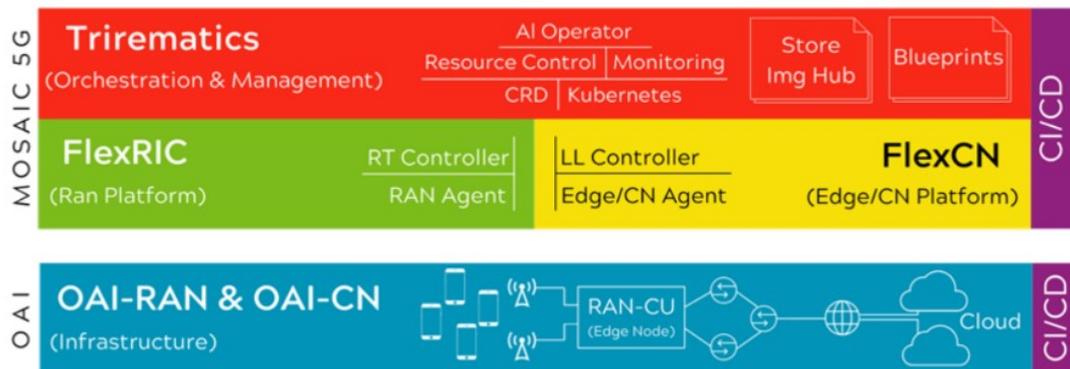


Figura 5.4: Recursos do projeto MOSAIC5G. [OAI 2023d]

- **Código aberto:** O projeto fornece acesso ao código-fonte completo, permitindo que os usuários entendam e modifiquem a implementação de acordo com suas necessidades e requisitos.
- **Conformidade com 3GPP:** O projeto visa alinhar-se às especificações definidas pelo 3rd Generation Partnership Project (3GPP), responsável pela padronização das tecnologias de comunicação celular. Ele se esforça para garantir a conformidade com os padrões 3GPP para promover a interoperabilidade e compatibilidade com outros componentes 5G.
- **Network Function Virtualization (NFV):** O projeto fornece flexibilidade e escalabilidade na implantação de funções de rede através do uso de NFV. Isso permite que as funções de rede sejam virtualizadas em hardwares de uso geral, facilitando a economia e gerenciamento de recursos.

### 5.3.3. MOSAIC5G

O projeto MOSAIC5G visa transformar a RAN e o CN em plataformas de entrega de serviços de rede ágeis e abertas. Tal plataforma permite explorar novos casos de uso de interesse para diferentes indústrias verticais [OAI 2023d].

Principais recursos do projeto MOSAIC5G:

- **Código aberto:** O projeto fornece acesso ao código-fonte completo, permitindo que os usuários entendam e modifiquem a implementação de acordo com suas necessidades e requisitos.
- **Protocolo E2:** O projeto fornece a implementação do protocolo E2. O protocolo E2 é dividido em E2 Application Protocol (E2AP) e E2 Service Model (E2SM). O E2AP é um protocolo básico que coordena como o near-Real Time RIC e os nós E2 se comunicam entre si e fornece um conjunto básico de serviços. E2SM define um modelo de dados padrão para a troca de informações e controle entre os componentes RAN

- **FLEXRIC** - FlexRIC é a abreviação de “Flexible RAN Intelligent Controller”. Ele faz interface com a pilha de rádio OAI através da interface E2 para monitorar e controlar a RAN em tempo real. O FlexRIC possui um modelo de serviço (SM) integrado para monitoramento e fatiamento, que pode ser facilmente personalizado e estendido para atender aos diversos casos de uso de 5G.

Também podemos citar algumas contribuições alinhadas com a filosofia Open RAN que surgiram através das parcerias citadas anteriormente:

- **Integração do split 7.2 O-RAN:** em parceria com a VVDN Technologies, a integração desse split é uma melhoria importante para a pilha de protocolos 5G OAI, abrindo a oportunidade de integração de Radio Units (RUs) 5G em conformidade com o padrão O-RAN e facilitando a comercialização de uma solução 5G Open RAN com software rodando em hardware de uso geral e RUs comerciais (COTS);
- **Interoperabilidade com L1 NVIDIA Aerial SDK:** parceria com a NVIDIA, sendo outra oportunidade de utilização de RUs comerciais Open RAN, mas dessa vez em uma integração que explora o split NFAPI da pilha OAI e a utilização de parte da camada física rodando em componentes COTS da NVIDIA (GPUs e NICs) com implementação aberta rodando em containers;
- **Implementação do split 2 (interface F1):** implementação do split já vem sendo explorada no OAI há algum tempo, mas recentemente testes de interoperabilidade com CU do parceiro Accelleran vem sendo feitos com objetivo de aumentar a robustez da implementação da interface e possibilitar interoperabilidade também com outros fornecedores;
- **Implementação da interface E2:** iniciada dentro do projeto MOSAIC5G visando integração com o FlexRIC, hoje a implementação visa ser compatível com as especificações O-RAN para a interface E2 e busca integração também com o  $\mu$ ONOS RIC do projeto ONOS da ONF.

#### 5.3.4. O-RAN Alliance

A própria O-RAN Alliance disponibiliza diversas implementações open source dentro da arquitetura Open RAN, são elas: SMO, nonRT-RIC, nearRT-RIC, O-CU e O-RU. Dessa forma, a O-RAN Alliance permite a disseminação do conhecimento e testes de acordo com a sua norma. Abaixo detalhamos um pouco de cada um dos projetos da O-RAN Alliance:

- **SMO:** o SMO de referência da O-RAN Alliance é chamado de Orchestration and Management (OAM), seguindo as especificações dos documentos do grupo de trabalho da O-RAN Alliance (WG1). O mesmo é baseado em partes da implementação do projeto ONAP tendo como destaque a implementação e suporte de modelos YANGs que são usados para a configuração e monitoramento através do uso de NETCONF (O1). Através da interface O1, o projeto provê também emuladores de O-CU e O-RU para integração via O1 com o SMO.

- **Near-RT RIC:** implementação de referência seguindo as especificações da O-RAN Alliance habilitando terminações A1, E2 e O1. É baseado nos componentes executados como micro serviços dentro de um cluster Kubernetes, com possibilidade de embarcar os xApps usando imagens Docker.
- **nonRT-RIC:** A implementação do nonRT-RIC foca na interface A1, responsável pela comunicação entre o nonRT-RIC e o nearRT-RIC. Dessa forma, o projeto visa a testes usando xApps que utilizem a interface para comunicação de ambas soluções da O-RAN Alliance: o SMO (OAM) e o nearRT-RIC (OSC).

### 5.3.5. Consórcios e projetos Open RAN

Historicamente, a infraestrutura da Rede de Acesso Rádio (RAN) em redes celulares era limitada a um pequeno número de fornecedores de grande porte, devido à complexidade e aos altos custos de pesquisa e desenvolvimento envolvidos. Essas soluções geralmente consistiam em sistemas proprietários de um único fornecedor, nos quais o hardware e o software eram integrados, resultando em sistemas RAN fechados e com pouca competição e flexibilidade no mercado.

No entanto, esse cenário começou a mudar com o avanço da capacidade computacional disponível na nuvem (computação em nuvem) e a redução dos custos de desenvolvimento e operação de plataformas de hardware de aceleração, como GPUs, ASICs e FPGAs. Esses avanços, combinados com o desenvolvimento de padrões abertos para as interfaces entre os componentes da RAN, possibilitaram a realização do conceito de RAN aberta e desagregada.

A abordagem de RAN aberta e desagregada visa desagregar a RAN tradicional, abrindo e padronizando os protocolos e interfaces entre os vários componentes da RAN, como rádios, hardware e software. Isso permite a criação de um ecossistema mais competitivo e vibrante de provedores de soluções RAN. Com a desagregação, é possível combinar diferentes componentes de diferentes fornecedores, escolhendo aqueles que melhor atendem às necessidades específicas de uma operadora.

A RAN aberta e desagregada traz benefícios significativos para a indústria de telecomunicações. Ela promove a inovação e a competição no mercado, pois permite que fornecedores de diferentes especialidades contribuam para o desenvolvimento da RAN. Além disso, possibilita a adoção de soluções mais flexíveis e escaláveis, pois os componentes podem ser atualizados e substituídos independentemente uns dos outros. Isso reduz a dependência de um único fornecedor e oferece às operadoras mais opções para personalizar e otimizar sua infraestrutura de rede.

Em suma, a evolução da capacidade computacional, a redução dos custos de hardware de aceleração e o desenvolvimento de padrões abertos permitiram a concretização do conceito de RAN aberta e desagregada. Essa abordagem traz mais competição, flexibilidade e inovação para o mercado de RAN, rompendo com o modelo tradicional de fornecedores de grande porte e sistemas fechados.

Dentre as primeiras iniciativas da indústria nesse sentido encontram-se o xRAN Forum, fundado em outubro de 2016 por empresas como a AT&T, Deutsche Telekom, SK Telecom, Intel, entre outras. O xRAN Forum visava desenvolver, padronizar e promo-

ver uma alternativa aberta à RAN tradicional. Da mesma forma, o conceito de C-RAN (Centralized/Cloud-RAN), introduzida pela China Mobile em 2010, visava centralizar as funções da unidade de banda base (BBU) para alcançar eficiências de custo e melhorias de desempenho. Finalmente, a O-RAN Alliance foi o resultado de uma fusão entre o xRAN Forum e o C-RAN em 2018, visando alinhar e focar esforços na abertura dos protocolos e interfaces entre os subcomponentes da RAN. Ela se constitui como uma comunidade global de operadoras de redes móveis e fornecedores de tecnologia com a missão de reestruturar a maneira como as RAN são construídas e operadas.

Desde sua criação, a O-RAN Alliance tem trabalhado na criação de interfaces abertas e padronizadas e na promoção de uma RAN definida por software e virtualizada para incentivar implantações de vários fornecedores e um ecossistema aberto de soluções RAN. A O-RAN Alliance também promove o uso de tecnologias de inteligência artificial e aprendizado de máquina para melhorar a eficiência e o desempenho das RANs. Em termos técnicos, a O-RAN Alliance define padrões para interfaces abertas entre vários elementos de uma RAN aberta por meio de vários grupos de trabalho (Working Groups - WGs), cada um focando em um aspecto da rede. Cada grupo de trabalho é composto por representantes de várias empresas, de uma maneira muito similar à como o próprio 3GPP também é constituído. Os principais grupos de trabalho são:

- **WG1 - Use Cases and Overall Architecture Workgroup:** Ele tem responsabilidade geral pela arquitetura O-RAN e casos de uso. O WG 1 identifica as tarefas a serem concluídas no escopo da arquitetura e dos casos de uso e atribui aos líderes de WG a condução dessas tarefas enquanto trabalham com outros WGs da O-RAN Alliance.
- **WG2 - Non-real-time RAN Intelligent Controller and A1 Interface Workgroup:** O principal objetivo do Non-RT RIC é oferecer suporte ao gerenciamento de recursos de rádio inteligente em tempo não-real, otimização de procedimento de camada superior, otimização de política em RAN e fornecimento de modelos AI/ML para Near-RT RIC.
- **WG3 - Near-real-time RIC and E2 Interface Workgroup:** O foco deste WG é definir uma arquitetura baseada em controlador inteligente de rádio em tempo quase real (Near-RT RIC), que permite controle e otimização quase em tempo real de elementos e recursos RAN por meio de ações e coleta de dados refinadas pela interface E2.
- **WG4 - Open Fronthaul Interfaces Workgroup:** O objetivo deste WG é fornecer interfaces front-haul verdadeiramente abertas, nas quais a interoperabilidade DU-RU de vários fornecedores pode ser realizada.
- **WG5 - Open F1/W1/E1/X2/Xn Interface Workgroup:** O objetivo deste WG é fornecer especificações de perfil de vários fornecedores totalmente operáveis (que devem ser compatíveis com a especificação 3GPP) para interfaces F1/W1/E1/X2/Xn e, em alguns casos, propor aprimoramentos de especificação 3GPP.

- **WG6 - Cloudification and Orchestration Workgroup:** O WG de orquestração e migração para a cloud busca conduzir a dissociação do software RAN das plataformas de hardware subjacentes e produzir tecnologias e projetos de referência que permitiriam que as plataformas de hardware de commodities fossem aproveitadas para todas as partes de uma implantação de RAN, incluindo a CU e a DU.
- **WG7 - White-box Hardware Workgroup:** A promoção de hardware de design de referência aberta é uma maneira potencial de reduzir o custo da implantação do 5G que beneficiará tanto as operadoras quanto os fornecedores. O objetivo deste Grupo de Trabalho é especificar e liberar um design de referência completo para promover uma plataforma de software e hardware desacoplada.
- **WG8 - Stack Reference Design Workgroup:** O objetivo deste WG é desenvolver a arquitetura de software, design e plano de liberação para a CU O-RAN (O-CU) e DU O-RAN (O-DU) com base nas especificações O-RAN e 3GPP para o Pilha de protocolo NR.
- **WG9 - Open X-haul Transport Workgroup:** Esse WG centra-se no domínio dos transportes, constituído pelos equipamentos de transporte, meios físicos e protocolos de controle/gestão associados à rede de transporte.
- **WG10 - OAM for O-RAN:** Esse Grupo Técnico (GT) é responsável pelos requisitos do OAM, arquitetura e interface O1.
- **WG11 - Security Work Group:** Esse WG concentra-se nos aspectos de segurança do ecossistema RAN aberto.

Além desses WGs, existe ainda o Test & Integration Focus Group (TIFG), que define a abordagem geral do O-RAN para teste e integração, incluindo a coordenação de especificações de teste em vários WGs. Isso pode incluir a criação de especificações de teste e integração de ponta a ponta; perfis para facilitar a produtização, operacionalização e comercialização de O-RAN; abordagens para atender aos requisitos gerais; e especificações de processos para realização de integração e verificação de soluções. O TIFG planeja e coordena os O-RAN ALLIANCE PlugFests e define diretrizes para os Centros de Integração e Teste Aberto (Open Testing and Integration Centres - OTIC) terceirizados.

Em muitas medidas complementares a estas atividades, o Telecom Infra Project (TIP) foi formado em 2016 com o objetivo de possibilitar acesso global para todos através de uma metodologia colaborativa e focada em engenharia para a construção e implantação de infraestrutura de rede de telecomunicações global. O projeto é dirigido conjuntamente por seu grupo de empresas de tecnologia e telecomunicações fundadoras, que formam seu conselho de administração. As empresas membros hospedam laboratórios e aceleradoras de tecnologia incubadora e o TIP hospeda uma conferência anual de infraestrutura. A organização promove transparência de processo e colaboração no desenvolvimento de novas tecnologias, com mais de 500 organizações membros participantes, incluindo operadoras, fornecedores, desenvolvedores, integradores, startups e outras entidades. Essas organizações participam em vários grupos de projetos TIP, que empregam estudos de caso atuais para evoluir equipamentos e softwares de telecomunicações em formas mais flexíveis, ágeis e interoperáveis.

O TIP opera como uma entidade sem fins lucrativos que se dedica a avançar a conectividade global. A organização é liderada por um conselho de administração representando empresas líderes. O TIP se dedica a entender as necessidades de seus membros prestadores de serviços e outros membros do ecossistema e identificar lacunas na indústria que se alinham com a missão do TIP. A comunidade propõe ou define casos de uso específicos e recomenda a formação de grupos de projetos onde os membros colaboram em soluções. O comitê técnico do TIP apoia esses grupos, identificando um caminho a seguir e removendo obstáculos para garantir um caminho claro para o sucesso.

O TIP é uma organização que visa impulsionar a inovação e a colaboração na indústria de telecomunicações. Ele é composto por vários elementos interligados, começando pelos grupos de projetos, que abrangem todas as áreas da rede de telecomunicações, desde o acesso até o núcleo e os serviços.

Esses grupos de projetos trabalham de forma colaborativa para identificar problemas-chave enfrentados pela indústria e propor soluções inovadoras. Eles se concentram em construir a tecnologia que aborda esses problemas, desenvolvendo soluções práticas e viáveis.

As soluções desenvolvidas pelos grupos de projetos são testadas e validadas em ambientes de laboratório. O TIP possui Laboratórios Comunitários que são espaços físicos que facilitam a colaboração entre os membros do grupo de projetos, permitindo a construção e teste das soluções propostas.

Além dos laboratórios, o TIP também realiza eventos chamados de PlugFests, nos quais as soluções são testadas em um ambiente de ponta a ponta, composto por vários elementos de rede interoperáveis. Esses PlugFests verificam a prontidão técnica das soluções desenvolvidas.

Após a validação em laboratório e PlugFests, as soluções são testadas em cenários do mundo real. O TIP realiza Testes de Campo em ambientes controlados de pequena escala e testes de mercado em ambientes comerciais maiores. Essas etapas permitem avaliar o desempenho e a eficácia das soluções em diferentes situações reais.

Quando uma tecnologia desenvolvida pelo TIP se torna madura e está pronta para ser implantada, ela é listada na TIP Exchange. A TIP Exchange é uma plataforma que fornece informações sobre as soluções validadas e permite que os operadores identifiquem as tecnologias mais adequadas para suas necessidades. As soluções listadas na TIP Exchange recebem emblemas que representam os níveis de validação realizados pela comunidade TIP.

O TIP promove um ciclo constante de feedback entre os grupos de projetos e os membros que estão produzindo cada componente da pilha de tecnologia. Esse feedback contínuo permite ciclos de desenvolvimento mais rápidos e eficientes, garantindo que as soluções atendam às necessidades específicas dos operadores e sejam relevantes para o mercado.

Em resumo, o TIP impulsiona a colaboração e a inovação na indústria de telecomunicações por meio de grupos de projetos, laboratórios, PlugFests e testes em campo. Ele permite o desenvolvimento e a validação de soluções práticas e viáveis, que são lista-

das na TIP Exchange quando estão prontas para implantação.

Um dos grupos de projeto de destaque dentro do Telecom Infra Project (TIP) é o Open RAN Project Group, cujo objetivo é estabelecer e construir soluções de Rede de Acesso Rádio (RAN) para redes de comunicação móvel de segunda, terceira, quarta e quinta geração (2G, 3G, 4G e 5G), baseadas em hardware de propósito geral "neutro- isto é, sem depender de um fornecedor específico - interfaces abertas e software aberto.

Esse grupo de projeto trabalha em estreita colaboração com organizações como a O-RAN Alliance e o 3GPP na definição de padrões, buscando coletar requisitos comuns, desenvolver componentes de software aberto em parceria com organizações como a Open Network Foundation (ONF), criar plataformas de teste e validação, promover testes de campo e implementações de novas redes, e, por fim, fomentar a adoção de redes Open RAN por meio da plataforma TIP Exchange.

Dentro do Open RAN Project Group, existe um subgrupo específico chamado subgrupo de RU (Remote Radio Unit), que se concentra no desenvolvimento de hardware de RU construído com uma arquitetura aberta e desagregada. O objetivo é obter reduções significativas nos custos operacionais de instalação e operação em comparação com as soluções proprietárias existentes.

Essas iniciativas visam impulsionar a inovação, a interoperabilidade e a adoção de soluções Open RAN, permitindo a construção de redes mais flexíveis, escaláveis e econômicas, além de promover a competição e a diversidade de fornecedores no mercado de infraestrutura de telecomunicações.

Conforme mencionado anteriormente, a Open Networking Foundation (ONF) é uma organização sem fins lucrativos cujo objetivo é acelerar a adoção de soluções de rede abertas e desagregadas. Foi fundada em 2011 por grandes empresas como Deutsche Telekom, Facebook, Google, Microsoft, Verizon e Yahoo, entre outras. O principal propósito da ONF é reinventar a infraestrutura de rede e criar novas arquiteturas de rede que sejam abertas e programáveis. A ONF tem uma estrutura única na qual combina as forças de projetos de código aberto tradicionais, operadores de rede, fornecedores e pesquisa acadêmica. A organização tem várias áreas de trabalho, referidas como "projetos", cada uma focando em um aspecto específico de rede. Estes incluem Aether, ONOS (Open Network Operating System), CORD (Central Office Re-architected as a Datacenter), Stratum e outros. Esses projetos são supervisionados pela equipe de liderança técnica da ONF, que é responsável pela direção técnica da fundação.

Os produtos da ONF incluem software, padrões, melhores práticas, planos de teste e até mesmo designs de hardware para redes. O mais conhecido deles é provavelmente o projeto ONOS, que é um sistema operacional de rede definido por software (Software Defined Networks - SDN) projetado para alta disponibilidade, desempenho e escalabilidade. Outro projeto proeminente é o CORD, que visa transformar a infraestrutura de telecomunicações em uma plataforma mais flexível, econômica e escalável. No escopo de software para RAN aberta e desagregada, a ONF desenvolve alguns projetos relevantes como a plataforma de 5G e 4G chamada Aether e softwares baseado no ONOS que inclui soluções completas para a implementação de diversos componentes Open RAN. A plataforma Aether inclui projetos como o SD-RAN, um Near-RT-RIC e um conjunto de xApps

para o controle da RAN conforme os padrões Open RAN, e o SD-CORE, um conjunto de software que implementa as funcionalidades de núcleo de rede 4G / 5G.

Outra organização relevante no cenário é a Linux Foundation (LF), um consórcio tecnológico sem fins lucrativos criado em 2000 com o objetivo de padronizar o sistema operacional Linux, apoiar o seu desenvolvimento e promover a sua adoção comercial, além de hospedar e promover o desenvolvimento colaborativo de projetos de software de código aberto. Em relação à conectividade em geral e Open RAN em específico, a Linux Foundation tem várias iniciativas:

- **LF Networking (LFN):** Uma iniciativa abrangente que visa aumentar a colaboração e a excelência operacional em projetos de rede. O LFN suporta o desenvolvimento de vários projetos de rede de código aberto, como ONAP (Open Network Automation Platform) e OPNFV (Open Platform for NFV).
- **LF Edge:** Esta iniciativa visa estabelecer uma estrutura aberta e interoperável para computação de borda independente de hardware, silício, nuvem ou sistema operacional. É uma organização guarda-chuva que hospeda vários projetos, incluindo Akraio Edge Stack, EdgeX Foundry e Open Horizon, que são relevantes para a computação de borda, uma tecnologia chave para futuras redes 5G e RAN.
- **O-RAN Software Community (OSC):** Embora não seja um projeto exclusivo da Linux Foundation, esta é uma comunidade de código aberto com um objetivo semelhante de criar software para redes de acesso por rádio (RAN) de sistemas sem fio de próxima geração que são mais abertos e flexíveis do que os padrões atuais. Essa comunidade está associada à O-RAN Alliance, que está desenvolvendo um padrão para Open RAN.

Recentemente, eles anunciaram um projeto chamado “FL Connectivity”, criado em colaboração com a Meta (Facebook), e voltado para avançar tecnologias que irão acelerar as redes e aplicações de conectividade. Como parte deste projeto, a Meta irá introduzir três sub-projetos iniciais, a saber o Terragraph (tecnologia sem fio para viabilizar acesso em altas taxas para usuários residenciais), o Open M-Plane (software e design de hardware Evenstar da Meta para configuração e gerenciamento da RAN) e o Maveric (software para planejamento e avaliação de desempenho de instalações de rede).

Uma iniciativa notável no contexto do Open RAN é o projeto Open RAN Gym, que oferece ferramentas para aquisição de dados RAN e experimentação com Inteligência Artificial (IA), incluindo seu testbed de pesquisa em comunicações sem fio. O testbed conhecido como Colosseum é reconhecido como um dos maiores e mais avançados ambientes de teste em redes sem fio já construídos. Ele fornece uma infraestrutura flexível e escalável que permite que pesquisadores e desenvolvedores testem e avaliem algoritmos, protocolos, técnicas de transmissão, modulações, gerenciamento de espectro e outras tecnologias relacionadas à comunicação sem fio.

O Colosseum combina 128 nós de rádio padrão com um emulador de canal digital suportado por uma rede de roteamento composta por Field Programmable Gate Arrays (FPGAs). Cada um dos nós de rádio oferece uma plataforma para comunicação

por radiofrequência e aplicações de aprendizado de máquina, utilizando um servidor Dell R730 equipado com uma GPU NVIDIA K40M e um Universal Software Radio Peripheral (USRP) Ettus X310 equipado com uma FPGA XILINX Kintex 7.

O Colosseum é capaz de criar ambientes virtuais que simulam rádios operando em áreas abertas, centros urbanos, shoppings ou desertos, gerando mais de 52 terabytes de dados por segundo. Cada nó pode hospedar imagens de pilhas de rádio 4G/5G, Core de rede, RIC ou UE, possibilitando a criação de cenários sofisticados e inovadores, como otimização de recursos durante a segmentação de redes (network slicing) por meio de xApps que fazem uso de técnicas de aprendizado de máquina.

Essa infraestrutura avançada oferecida pelo Colosseum permite que pesquisadores e desenvolvedores explorem diversas possibilidades e conduzam experimentos de ponta, impulsionando o desenvolvimento e aprimoramento contínuo das tecnologias Open RAN, bem como a aplicação de IA para otimizar o desempenho e a eficiência das redes de comunicação sem fio.

#### **5.4. Programa OpenRAN Brasil**

O Programa OpenRAN@Brasil é uma iniciativa voltada para impulsionar a adoção e desenvolvimento da tecnologia Open RAN no Brasil. Em parceria com empresas, instituições acadêmicas e governamentais, o programa tem como objetivo promover a inovação, a colaboração e o avanço das soluções de redes de acesso sem fio. Nesta seção, serão apresentadas as motivações por trás do programa, uma descrição detalhada do programa em si, bem como informações sobre o seu testbed.

##### **5.4.1. Motivação do Programa**

O acesso à Internet está se tornando cada vez mais um serviço essencial, assim como o fornecimento de energia elétrica e água. A pandemia de COVID-19 evidenciou o papel fundamental que a Internet exerce para a continuidade das atividades econômicas, sociais e acadêmicas, seja pela viabilização do teletrabalho, seja pela realização de aulas online para escolas e universidades. Além disso, os usuários passaram a ter uma necessidade de uso constante da Internet, com capacidade de banda para suportar diversas atividades, como: videoconferências, aplicações de tempo real e streaming de vídeos, por exemplo.

Com este cenário, o investimento em infraestrutura para conectividade passou a ser uma prioridade em diversos países. No entanto, muitas nações têm dificuldades em manter e atualizar sua infraestrutura de rede para atender estas demandas crescentes, sendo o próprio Brasil um exemplo. Além do cenário costumeiramente desafiador, os fornecedores de tecnologia impõe soluções proprietárias e fechadas, o que acaba gerando lock-ins, desta forma inviabilizando o uso de outras soluções, assim encarecendo os equipamentos e limitando a inovação e oportunidades para a indústria nacional.

Uma forma de atenuar este problema é por meio do desenvolvimento e adoção de soluções abertas para tecnologias de rede. Iniciativas como o TIP (Telecom Infra Project), projeto liderado pela Meta, e ONF (Open Networking Foundation), da Linux Foundation, bem como O-RAN Alliance, buscam oferecer uma pilha de tecnologia aberta. Essas iniciativas visam impulsionar o desenvolvimento e adoção de soluções abertas, estimulando

a desagregação, na qual o software é embarcado em hardware de tipo white box, que pode ser desenvolvido por diferentes fornecedores.

O modelo atual de elementos de rede verticalizados e fechados com hardware, software e interfaces proprietárias não garante a flexibilidade e o custo-benefício necessários para os provedores. Assim, o movimento de desagregação causa dois impactos. Primeiro, o hardware produzido passa a ser totalmente aberto, permitindo a fabricação por diferentes fornecedores e o desenvolvimento por terceiros do software a serem embarcados nesses equipamentos. Em segundo, o software desenvolvido tende a adotar o conceito de software de código aberto, liderado por comunidades que envolvem operadores, indústria e academia.

Estas mudanças levam a uma redução nos custos dos equipamentos e estimula uma maior inovação, assim, permitindo que operadoras e os provedores possam implementar e testar novas funcionalidades de forma mais ágil, resultando em serviços de melhor qualidade. Além disso, os provedores de rede podem reduzir os seus gastos operacionais e em infraestrutura, uma vez que por conta da desagregação, só é necessário trocar uma parte dos equipamentos.

Diante dessas vantagens, é de suma importância que o Brasil participe desse movimento. A médio prazo, trará benefícios tanto para os pequenos provedores de rede quanto para os usuários, além de impulsionar a criação de um ecossistema de inovação ao redor dessa iniciativa. Esse ecossistema envolverá fabricantes nacionais de equipamentos de rede, integradores, desenvolvedores de software e pesquisadores.

#### **5.4.2. Programa OpenRAN@Brasil**

O OpenRAN@Brasil [ORAN-Brasil 2023] é um programa do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), executado em conjunto pela RNP (Rede Nacional de Ensino e Pesquisa), CPQD (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações), Intel e Eldorado. O programa visa acelerar o desenvolvimento do ecossistema de redes abertas, desagregadas e programáveis a partir de pesquisa, desenvolvimento, inovação e capacitação em tecnologias e aplicações, em 5G e além.

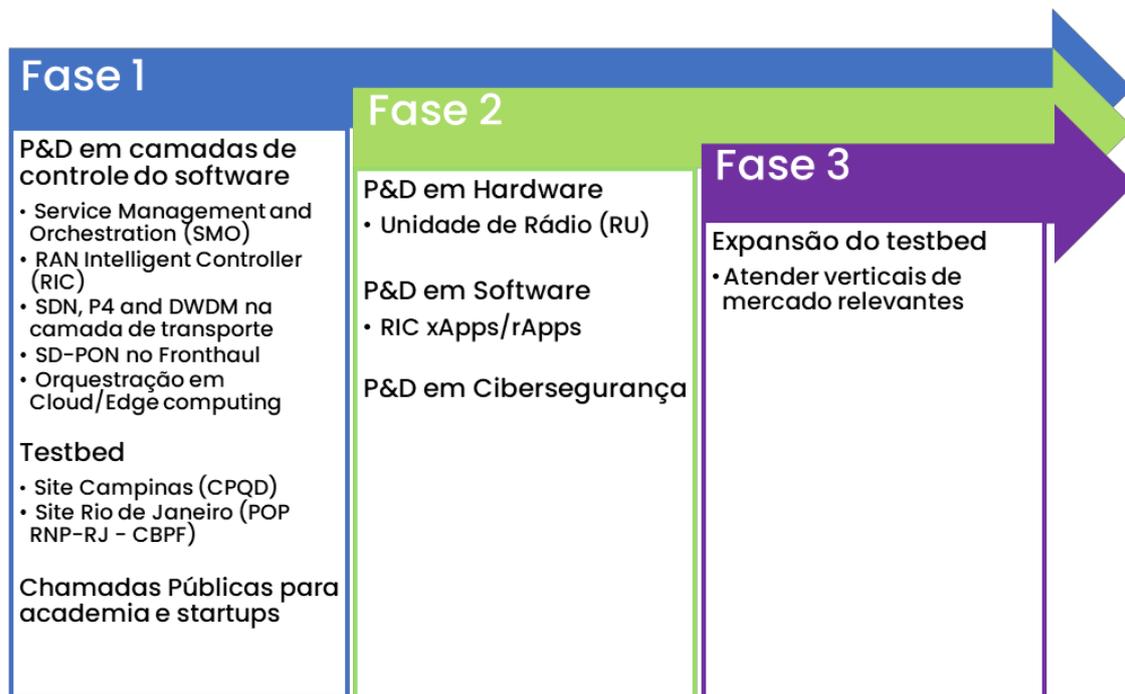


Figura 5.5: Visão macro das fases do Programa OpenRAN@Brasil.

O Programa OpenRAN@Brasil para alcançar a visão estabelecida, elenca três pilares:

- Pesquisar, desenvolver, implantar e validar soluções inovadoras de gerenciamento e controle inteligente de redes abertas e desagregadas em diferentes domínios tecnológicos (redes de pacotes, acesso rádio e óptico);
- Construir e disponibilizar infraestruturas de rede softwarizadas (testbed), nesses diferentes domínios tecnológicos, que adotam as tendências de abertura e desagregação, com a finalidade de integrar, demonstrar e validar aplicações inovadoras;
- Capacitar profissionais de TI, desenvolvedores e engenheiros de rede no paradigma de softwarização das infraestruturas de rede e engajar outros atores (universidades, empresas) e outras iniciativas no processo de inovação

O Programa OpenRAN@Brasil é composto por três fases, estas apresentadas de forma resumida na imagem 5.5. Abaixo, cada um dos estágios é detalhado.

**Fase I:** A primeira fase do Programa teve seu início em dezembro de 2021 e a possui uma duração de 36 meses. Para este estágio do projeto foram elencados os seguintes objetivos:

1. A pesquisa e desenvolvimento de tecnologias que habilitam a softwarização de infraestruturas de rede multi-domínio com o uso de soluções abertas e desagregadas;
2. A construção e operação de uma plataforma de experimentos (testbed) composto por equipamentos de pacotes, ópticos e sem fio abertos e desagregados;

3. A fomentação de um ecossistema de inovação na área de desenvolvimento de softwares inteligentes para o controle e gerenciamento de redes abertas e desagregadas, através da disseminação de conhecimento e capacitação de estudantes, pesquisadores e desenvolvedores;

A pesquisa e o desenvolvimento realizados nesta parte do projeto, tem como objetivo focar nos componentes de software para gerenciamento, controle e automação de infraestruturas. No caso, são estudados os seguintes elementos da arquitetura: Service Management and Orchestration (SMO); RIC (RAN Intelligent Controller); na camada de transporte são estudados o DWDM, FFTX e P4; SD-PON no Fronthaul; e Orquestração em Cloud e Edge Computing.

O ambiente de experimentação que está sendo construído neste estágio do OpenRAN@Brasil, será composto de dois sites, um ficará em Campinas, implementando no ambiente do CPQD e administrado pelo mesmo, e outro site ficará na cidade do Rio de Janeiro, nas instalações do CBPF (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas), sendo que este último site será administrado pela RNP. Nesta seção haverá um maior detalhamento deste ambiente de testes.

Para a fomentação do ecossistema de inovação, destacamos a realização das seguintes atividades: o lançamento da Chamada Pública do Programa OpenRAN@Brasil, para aumentar o engajamento da comunidade acadêmica com o projeto; a realização de workshops para as comunidades da academia, indústria e operação com o objetivo disseminar o Programa; a participação do projeto em eventos, como o WRNP; e em futuro próximas ações de capacitação e uma Chamada destinada para o meio de startups.

A execução desta etapa é feita em conjunto pela RNP e pelo CPQD. Além das instituições previamente mencionadas, também há a colaboração de pesquisadores das universidades UNICAMP, UFF, UFRGS e UFRJ.

**Fase II:** Esta etapa do Programa começou a sua execução no final do ano de 2022 e tem duração de 30 meses. O seu objetivo é o desenvolvimento de uma unidade de rádio nacional 5G (O-RU 5G) aderente aos requisitos definidos pela O-RAN Alliance para uso em macrocélulas na banda de sub-6GHz. A escolha por focar o P&D neste componente se dá por conta que a maior parte do custo de uma solução Open RAN está concentrada na unidade de rádio e, também, por existirem poucos fabricantes no mundo para este componente, assim diminuindo a competitividade.

O equipamento que está em desenvolvimento tem como pontos norteadores: o baixo custo, a alta programabilidade e o atendimento de nichos de mercado relevantes para o desenvolvimento do País. Ao final do projeto, a O-RU 5G desenvolvida será integrada e testada em conjunto com os demais componentes da solução Open RAN, fornecidos por terceiros, o que permitirá exercitar as diferentes interfaces abertas previstas na arquitetura

Além do objetivo de desenvolver um hardware nacional, nesta fase também será abordada a pesquisa e desenvolvimento de aplicações SDN inteligentes na camada de inteligência na rede de acesso rádio, os xApps/rApps, e em aspectos de cibersegurança da arquitetura OpenRAN.

O grupo atuante é composto pela RNP, como instituição coordenadora, CPQD,

Inatel e Eldorado atuando como instituições executoras. O time de execução também contará com pesquisadores de universidades especialistas nas áreas de 5G, redes de acesso de rádio (RAN), inteligência artificial, segurança cibernética e no paradigma Open RAN. Este último time participa da equipe de execução da RNP, liderada internamente pela DPDI (Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação).

**Fase III:** Nesta fase, o Programa expandirá o testbed proposto na Fase I para as demais áreas do País, no caso, as áreas Norte, Nordeste, Sul e Sudeste devem ser contempladas com novos sites. Essas novas infraestruturas serão focadas em verticais temáticas de interesse, como saúde e indústria. Esta etapa ainda encontra-se em elaboração.

### 5.4.3. Testbed do Programa OpenRAN@Brasil

Como apresentado na seção anterior, a fase 1 do programa OpenRAN@Brasil a tem o objetivo de pesquisar e desenvolver softwares para a construção de uma plataforma de código aberto para o controle e gerenciamento de infraestruturas de rede programáveis compostas por equipamentos abertos e desagregados. Isso significa que esses equipamentos são construídos integrando vários componentes fornecidos por diferentes fabricantes de hardware e software. Portanto, é essencial construir um testbed baseado nessas tecnologias para fornecer um ambiente de recursos para experimentadores e executar os casos de uso planejados no projeto.

As soluções mencionadas envolvem o uso de equipamentos abertos, que são gerenciados e orquestrados por sistemas abertos desenvolvidos por comunidades, fóruns e consórcios internacionais. Essas soluções aproveitam os novos paradigmas de softwarização, virtualização e desagregação. Além disso, essas soluções abertas abrangem o controle de infraestruturas de redes avançadas que englobam múltiplos domínios tecnológicos, como os domínios de pacotes (*IP/Ethernet*), óptico (transporte e acesso) e de acesso sem fio (rede celular 5G e *WiFi*).

Para este testbed, além das tecnologias de redes de acesso sem fio (5G) baseadas em Open RAN, ele também é composto por mais duas outras tecnologias: redes de acesso óptico através da tecnologia PON (*Passive Optical Network*) e redes de transporte com tecnologias de pacotes (IP/Ethernet) e ópticas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) - Redes de Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda. Além disso, o testbed contará com uma camada de computação em nuvem/borda para oferecer suporte aos softwares de aplicações, controle e orquestração da infraestrutura, bem como para processamento dos dados provenientes das antenas 5G Open RAN (RIC, CU e DU).

Na fase 1 do programa, foram estabelecidos dois locais para a construção do testbed inicial. O primeiro será localizado na RNP, junto ao PoP (Ponto de Presença da RNP) do Rio de Janeiro, no prédio do CBPF (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas). O segundo local está situado no prédio do CPQD (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações). Para permitir a integração entre os locais, será estabelecido um enlace de 10 Gbps. Essa conexão possibilitará a realização de experimentos conjuntos, aproveitando os recursos disponíveis em ambos os sites, conforme ilustrado na Figura 5.6.

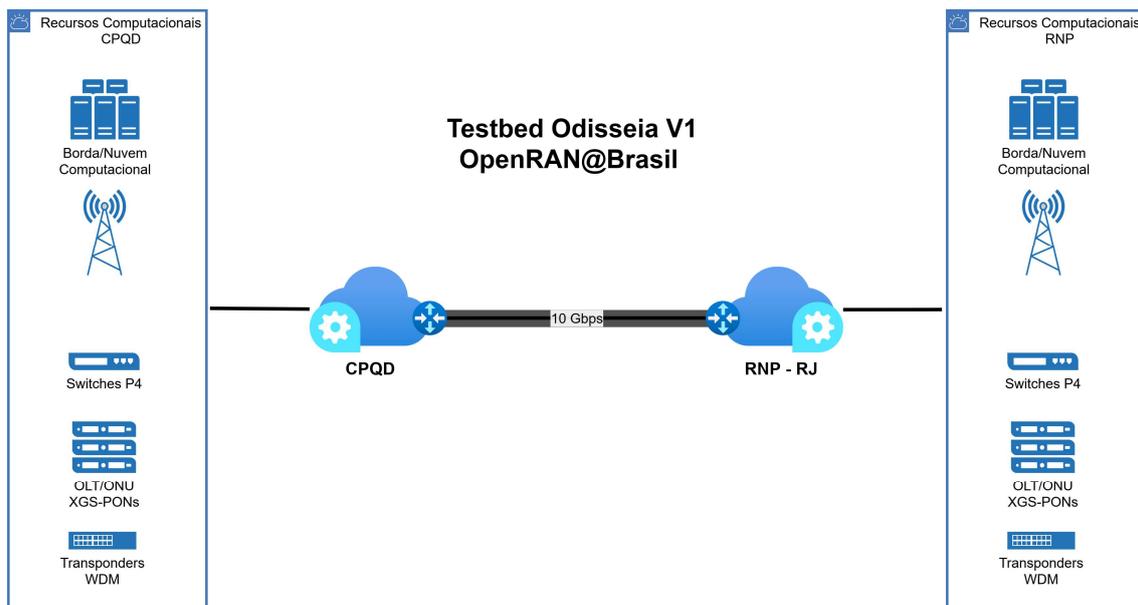


Figura 5.6: Visão global do testbed do OpenRAN@Brasil fase 1.

Basicamente, cada um dos sites possui um conjunto de 6 a 7 servidores, que estão categorizados em 5 configurações de hardware específicas de acordo com seus objetivos dentro do testbed. Além disso, cada site inicialmente contará com um conjunto de 3 antenas indoor 5G baseadas em Open RAN, seguindo a arquitetura split 7.2X da O-RAN Alliance.

No domínio de pacotes, será aplicada uma topologia leaf-spine, na qual apenas a camada de leafs será composta por switches P4. Além disso, essa topologia permitirá a utilização de um projeto interno da RNP chamado de P7 [Rodriguez et al. 2022], que possibilitará a manipulação e criação de topologias virtuais, assim como a criação de enlaces com características personalizadas, como atraso, largura de banda e variação do atraso.

No domínio óptico, serão disponibilizadas duas tecnologias. A primeira é baseada em PON, com as tecnologias XGS-PON e GPON. A segunda é baseada em WDM, utilizando transponders ópticos.

Nas Figuras 5.7 e 5.8, apresentam-se as topologias físicas de ambos os sites, RNP e CPQD, respectivamente. Esses diagramas representam as conexões físicas implementadas dentro de cada instituição e servirão como modelos para a fase de implantação do testbed.

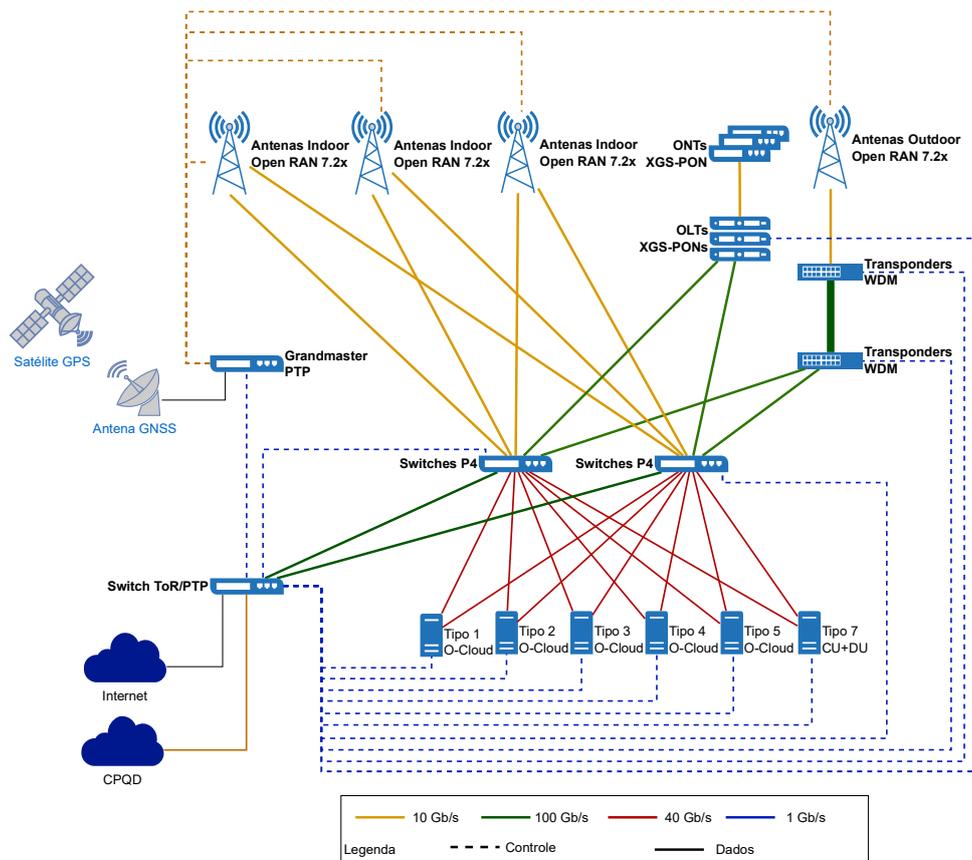


Figura 5.7: Arquitura do física dos testbeds na RNP

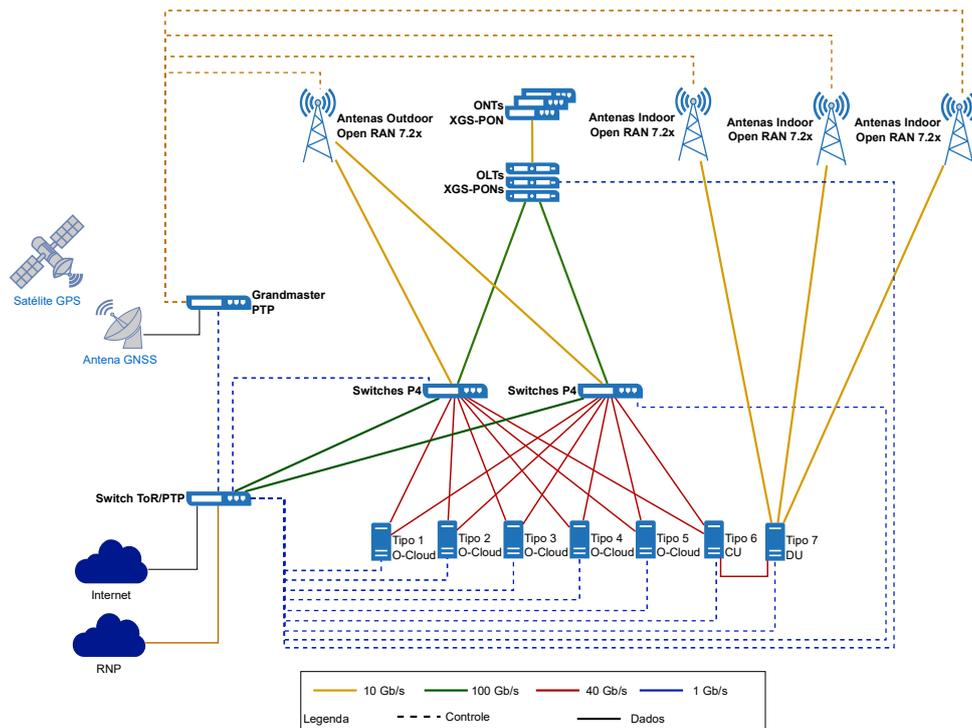


Figura 5.8: Arquitura do física dos testbeds na CPQD

#### 5.4.4. Hardwares utilizados no testbed

A especificação de hardware para os servidores do domínio cloud foi baseada nos requisitos das redes 5G privadas, nos requisitos de implantação do testbed e nas recomendações de funcionalidades e capacidades indicadas pelos projetos e aplicações previstas para utilização no projeto do testbed. Os servidores foram agrupados em tipos e conjuntos, apresentando características e recursos intercambiáveis entre si. Isso permite o uso das aplicações e projetos em diferentes topologias, além de possibilitar a análise da melhor arquitetura tanto para a infraestrutura de cloud do testbed quanto para as aplicações do testbed, visando o fornecimento do serviço final.

Inicialmente, foi criada uma classificação e nomenclatura com base na função geral dos servidores dentro do testbed. A tabela abaixo resume os tipos de servidores que compõem o domínio da cloud em cada localidade selecionada (RNP: RJ - Rio de Janeiro, e CPqD: CPS - Campinas), utilizando esse critério:

Tipo de Servidor Função Geral Localidade  
 Cloud Controller Controlar e orquestrar a infraestrutura da cloud RNP: RJ  
 Application Server Hospedar e executar aplicações do testbed RNP: RJ  
 Storage Server Armazenar e gerenciar dados e recursos do testbed RNP: RJ  
 Edge Server Prover serviços de borda e processamento local RNP: RJ, CPqD:  
 Management Server Gerenciar e monitorar a infraestrutura do testbed CPqD: CPS

Tipo de Servidor	Função Geral	Localidade
Cloud Controller - Tipo I	Controlar e orquestrar a infraestrutura da cloud	RNP, CPQD
Application Server - Tipo III e IV	Hospedar e executar aplicações do testbed	RNP, CPQD
Storage Server - Tipo VI	Armazenar e gerenciar dados e recursos do testbed	RNP, CPQD
Edge Server - Tipo II e VII	Prover serviços de borda e processamento local	RNP, CPQD
Management Server - Tipo IV e V	Gerenciar e monitorar a infraestrutura do testbed	RNP, CPQD

Tabela 5.1: Arquitetura do física dos testbeds na CPQD

Essa classificação e nomenclatura foram estabelecidas levando em consideração as funções específicas desempenhadas por cada tipo de servidor dentro do domínio da cloud em cada local escolhido. O fabricante fornecedor dos servidores selecionado foi a SUPERMICRO, devido ao preço oferecido e à facilidade de personalização dos servidores para atender às necessidades específicas, principalmente em relação a processadores e placas de aceleração. A lista completa dos tipos de servidores e suas configurações está disponível no Anexo A.

Em relação aos demais equipamentos especificados neste testbed, segue a classificação abaixo, descrevendo as características de cada equipamento adquirido, de acordo com seu domínio, fabricante, modelo, entre outros:

- **Domínio de Acesso Sem Fio (5G-Open RAN - Indoor):**

- o Fabricante: Foxconn
- o Modelo: HW-MOBE-RPQN-7801E
- o Características:
  - ORAN option 7.2 over 10Gb/s RJ45/SFP+
  - 5G NR x 4 (4TR)
- **Domínio de Acesso Óptico (PON):**
  - o Fabricante:
    - Radisys
    - Edgecore
  - o Modelo:
    - RLT-1600X OLT (RLT-1600X) Any PON (XGS-PON e GPON)
    - ASXvOLT16 (ASXvOLT16-O-AC-F-US) XGS-PON
- **Domínio de Transporte Óptico (WDM):**
  - o Fabricante:
    - Edgecore
  - o Modelo:
    - AS7716-24SC (Cassini)
- **Domínio de Transporte de Pacotes (IP/Ethernet):**
  - o Fabricante:
    - Edgecore
  - o Modelo:
    - DSC 801 (Wedge100BF-32QS)
    - DSC 810 (AS9516-32D)
- **Domínio de Sincronização (PTP Grandmaster):**
  - o Fabricante:
    - FIBROLAN
  - o Modelo:
    - Falcon RX (5G xHaul Timing Aware O-RAN Switch & PTP Grandmaster)
- **Domínio de Gerenciamento/Controle (Switch de Gerenciamento - ToR):**
  - o Fabricante:
    - UFISpace
  - o Modelo:

- S9600-72XC (Open Aggregation Router)

Essa classificação fornecerá uma visão geral dos equipamentos adquiridos para cada domínio específico do testbed, incluindo detalhes sobre fabricante, modelo e outras características relevantes.

#### 5.4.5. Escolha da pilha Open RAN

Em relação à pilha de processamento da RAN, conforme definida pela O-RAN Alliance, foi observado que as iniciativas das comunidades que desenvolvem código aberto ainda não possuem implementações completas de todas as interfaces do O-RAN.

Levando em consideração os critérios e justificativas mencionados acima, foram realizadas pesquisas sobre as opções disponíveis no mercado de fornecedores, como Mavenir, Baicells, Nokia, Radisys, entre outros, que estão surgindo e/ou adaptando-se ao conceito de Open RAN. Devido à natureza relativamente nova dessa tecnologia, muitos fornecedores ainda não adotaram todas as funcionalidades do O-RAN, especialmente em relação às interfaces E2, A1 e O1. Alguns fornecedores ainda utilizam soluções híbridas, combinando interfaces proprietárias com as interfaces padronizadas pela O-RAN Alliance. Essa migração para uma solução totalmente baseada em interfaces abertas é um processo mais lento e está planejada no roadmap desses fornecedores. Esse cenário já era esperado, uma vez que a tecnologia/arquitetura ainda está em processo de amadurecimento e sua aplicação em ambientes de produção requer uma maturidade mínima.

Atualmente, 90% das implantações mundiais de Open RAN se baseiam em soluções da Intel, que desenvolveu uma solução de referência de camada física, chamada FlexRAN, otimizada para seus processadores. Quando membros do projeto consultaram representantes da Intel para a disponibilização da solução FlexRAN ao projeto, os mesmos recomendaram consulta à empresa *Radisys*, para que houvesse um suporte adequado, uma vez que a Intel não pode atender no momento um projeto de pequena escala como o do Testbed proposto. Ademais, foi informado também que a *Radisys* dispõe de implementação própria das camadas de mais alto nível (L2/L3), e que esta implementação é utilizada como base de produtividade por boa parte dos fornecedores comerciais. Somado ao fato de que a *Radisys* vem apoiando trials de demonstração da tecnologia Open RAN em comunidades como a *Open Networking Foundation*, há uma série de fatores que levam a esta recomendação.

Tal projeto foi destacado e usado como referência na justificativa para uso do Open RAN. Nos documentos oficiais do projeto *Intel Smart Edge*, existe a referência ao uso da pilha RAN da *Radisys* junto com camadas mais baixas da pilha RAN da Intel FlexRAN.

Devido à estreita colaboração da *Radisys* com o *Intel Smart Edge* e o suporte negociado que eles fornecerão em nossa implementação do TestBed, bem como a disponibilidade das interfaces O-RAN E2, A1 e O1, e considerando que a *Radisys* foi o fornecedor que mais atendeu aos nossos critérios de seleção, foi decidido selecionar a pilha Open RAN da *Radisys* para o nosso projeto. Essa escolha baseia-se na confiança na capacidade da *Radisys* de fornecer as soluções e o suporte necessários para o sucesso do nosso TestBed.

#### 5.4.6. Licenciamento do Espectro 5G

Como uma instituição de pesquisa e desenvolvimento, temos o objetivo de impulsionar a inovação tecnológica e contribuir para o avanço científico no campo das telecomunicações. O 5G representa uma nova geração de tecnologia de comunicação sem fio, com potencial para transformar setores como saúde, indústria, transporte e muito mais. É uma oportunidade única para explorar e compreender a aplicabilidade do 5G em cenários específicos e seu impacto nas mais diversas áreas.

Por isso, buscamos obter autorização para conduzir experimentos práticos, testes de viabilidade e pesquisas científicas que nos permitirão avaliar o desempenho e as capacidades do 5G em diferentes cenários e aplicações. Esses estudos nos ajudarão a compreender melhor os benefícios e os desafios associados ao uso do 5G e Open RAN, além de fornecer insights valiosos para o desenvolvimento de soluções tecnológicas avançadas.

É importante ressaltar que o objetivo dos nossos experimentos e pesquisas é estritamente científico e experimental. Não temos a intenção de fornecer serviços comerciais ou competir com as operadoras de telecomunicações estabelecidas. Nossas atividades serão realizadas em ambiente controlado, em conformidade com as regulamentações e diretrizes estabelecidas pela Anatel, a fim de evitar interferências prejudiciais a outros serviços e usuários do espectro.

Acreditamos que o pedido de licenciamento de espectro 5G para fins científicos e experimentais é fundamental para impulsionar a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias avançadas no Brasil. Além disso, contribuiremos para o fortalecimento do ecossistema de inovação, promovendo a colaboração entre instituições acadêmicas, empresas e outras entidades envolvidas no campo das telecomunicações.

#### 5.5. Considerações Finais e o Futuro do OpenRAN

A evolução das redes de comunicação tem impulsionado uma demanda crescente por conectividade, inovação e flexibilidade. Nesse contexto, surgiram iniciativas como o OpenRAN, que visa transformar a infraestrutura de redes de acesso por rádio (RAN) através de uma abordagem aberta, desagregada e interoperável. O OpenRAN promete revolucionar a maneira como as redes são projetadas, implantadas e gerenciadas, oferecendo uma série de benefícios para operadoras, fornecedores e usuários finais. O projeto representa uma oportunidade única para impulsionar a inovação e transformar o cenário das redes de comunicação no país. Com base nas informações fornecidas sobre as organizações ONF (Open Networking Foundation), Linux Foundation e a plataforma OAI (Open Air Interface), podemos destacar várias conclusões motivadoras que mostram o potencial e os benefícios do projeto OpenRAN Brasil em uma escala ainda maior:

- **Desenvolvimento de uma infraestrutura de comunicação moderna e flexível:** O OpenRAN oferece uma abordagem inovadora para a construção de redes de comunicação, baseada em componentes desagregados e interoperáveis. Ao adotar essa abordagem, o projeto OpenRAN Brasil tem o potencial de desenvolver uma infraestrutura de comunicação moderna e flexível, capaz de se adaptar rapidamente às demandas em constante evolução. Isso significa que o país poderá aproveitar as novas oportunidades proporcionadas pelas tecnologias emergentes, como Internet

das Coisas (IoT), inteligência artificial e veículos autônomos.

- **Estímulo à concorrência e redução dos custos:** A adoção do OpenRAN Brasil pode abrir espaço para a entrada de novos fornecedores de hardware e software, aumentando a concorrência no mercado de telecomunicações. Isso pode levar a uma redução dos custos para os operadores de rede, bem como para os usuários finais, resultando em serviços mais acessíveis e de melhor qualidade. Além disso, a interoperabilidade entre diferentes componentes e fornecedores no OpenRAN permite que as operadoras escolham as soluções mais adequadas para suas necessidades, sem ficarem presas a um único fornecedor.
- **Fortalecimento da indústria nacional de tecnologia:** O projeto OpenRAN Brasil pode impulsionar o desenvolvimento da indústria nacional de tecnologia, incentivando a colaboração entre empresas locais, universidades e instituições de pesquisa. Ao fornecer uma plataforma aberta e acessível para experimentação e inovação, o projeto permite que os desenvolvedores brasileiros contribuam com soluções personalizadas e desenvolvam habilidades técnicas avançadas. Isso fortalece a capacidade de inovação do país e cria oportunidades de negócios, exportação de tecnologia e geração de empregos qualificados.
- **Expansão da conectividade em áreas remotas e rurais:** O OpenRAN Brasil tem o potencial de levar conectividade de alta qualidade para áreas remotas e rurais, onde a infraestrutura de telecomunicações tradicional pode ser limitada. Com a flexibilidade e a escalabilidade oferecidas pelo OpenRAN, o projeto OpenRAN Brasil pode promover a inclusão digital nessas regiões, permitindo que mais pessoas tenham acesso a serviços de comunicação e internet. Isso contribui para reduzir a desigualdade digital, proporcionando igualdade de oportunidades em termos de educação, saúde, desenvolvimento econômico e participação cívica.
- **Colaboração global e intercâmbio de conhecimentos:** O projeto OpenRAN Brasil se beneficia da colaboração global com organizações como a ONF, a Linux Foundation e a comunidade OAI. Essas parcerias permitem o intercâmbio de conhecimentos, melhores práticas e experiências com outros países que estão desenvolvendo iniciativas semelhantes. Isso amplia o alcance do projeto, aumenta sua relevância internacional e facilita a adoção de padrões e tecnologias globalmente aceitos. A colaboração global também pode atrair investimentos e apoio técnico de organizações internacionais, fortalecendo ainda mais o projeto OpenRAN Brasil.

Como pode ser visto, o projeto OpenRAN Brasil tem o potencial de revolucionar as redes de comunicação no país, estimulando a inovação, reduzindo os custos, fortalecendo a indústria nacional, expandindo a conectividade e promovendo a colaboração global. Com um compromisso contínuo das partes interessadas, investimentos adequados e uma estratégia bem definida, o projeto pode impulsionar o Brasil para a vanguarda da próxima geração de redes de comunicação. O OpenRAN oferece uma visão promissora de um futuro mais aberto, inclusivo e eficiente em termos de custos para as telecomunicações brasileiras.

Trabalhando em colaboração com operadoras, fornecedores e outros participantes da indústria, organizações como a O-RAN Alliance, Open Network Foundation e Linux Foundation visam democratizar segmentos da rede de telecomunicações, reduzir custos e diminuir a dependência de grandes indústrias de equipamentos. Através do desenvolvimento de um framework com padrões, protocolos e componentes de software de código aberto, como o OpenRAN, eles estão impulsionando a interoperabilidade, permitindo que diferentes componentes de RAN sejam combinados de forma transparente, independentemente de serem virtualizados ou desagregados.

No futuro, as tecnologias Open RAN têm o potencial de impulsionar uma série de avanços e aplicações inovadoras nas redes de comunicação. Com a flexibilidade e a interoperabilidade oferecidas pelo Open RAN, espera-se que surjam novos serviços e modelos de negócios. Por exemplo, a introdução de interfaces abertas e a capacidade de integrar componentes de diferentes fornecedores podem permitir a criação de redes híbridas, combinando infraestruturas de comunicação tradicionais com tecnologias emergentes, como redes 5G, Internet das Coisas (IoT) e computação em nuvem. Isso abrirá caminho para uma ampla gama de aplicativos, desde cidades inteligentes e automação industrial até saúde digital e veículos autônomos.

Outra utilidade para a virtualização de redes é a adoção do Open RAN para facilitar a implementação de redes privadas, permitindo que setores como manufatura, energia, transporte e agricultura tenham maior controle e segurança sobre suas infraestruturas de comunicação. Redes privadas baseadas em OpenRAN podem fornecer conectividade confiável e personalizada para atender às necessidades específicas de cada setor, permitindo a implementação de soluções avançadas, como monitoramento remoto, automação de processos e análise de dados em tempo real. Isso impulsiona a transformação digital em vários setores e promoverá a eficiência operacional, a produtividade e a inovação.

Além disso, a introdução de interfaces abertas entre os diferentes componentes do OpenRAN possibilita a obtenção de informações da RAN e a atualização de políticas de controle, permitindo a utilização de técnicas avançadas, como Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina (ML), para otimização e controle inteligente da RAN.

Em conclusão, o projeto OpenRAN Brasil tem o potencial de revolucionar as redes de comunicação no país, estimulando a inovação, reduzindo os custos, fortalecendo a indústria nacional, expandindo a conectividade e promovendo a colaboração global. Com um compromisso contínuo das partes interessadas, investimentos adequados e uma estratégia bem definida, o projeto pode impulsionar o Brasil para a vanguarda da próxima geração de redes de comunicação. O OpenRAN oferece uma visão promissora de um futuro mais aberto, inclusivo e eficiente em termos de custos para as telecomunicações brasileiras à medida que mais organizações e países adotam essa abordagem, espera-se que surjam novas aplicações e benefícios que impulsionam a transformação digital e contribuam para um mundo mais conectado e inteligente.

## **Agradecimentos**

Gostaríamos de expressar nosso especial agradecimento aos seguintes colaboradores pelo seu inestimável apoio na elaboração deste material: Ariel Goes de Castro (Unipampa), Eduardo Melão (CPQD), João Paulo Sales Henrique Lima (CPQD), Maykon Renan Pe-

reira Da Silva (CPQD), Vitalii Afanasiev (CPQD) e Weskley Vinicius Fernandes Maurício (CPQD).

Também gostaríamos de estender nossos agradecimentos a todos os colaboradores do Programa OpenRAN@Brasil. Este projeto conta com o apoio do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação por meio dos recursos da Lei nº 8.248, de 23 de outubro de 1991, conforme orientação da Secretaria de Empreendedorismo e Inovação do MCTI. Além disso, expressamos nossa gratidão aos contribuidores da RNP (Rede Nacional de Ensino e Pesquisa).

## Referências

- [Chen et al. 2023] Chen, W., Lin, X., Lee, J., Toskala, A., Sun, S., Chiasserini, C. F., and Liu, L. (2023). 5g-advanced towards 6g: Past, present, and future.
- [Chen et al. 2022] Chen, W., Montojo, J., Lee, J., Shafi, M., and Kim, Y. (2022). The standardization of 5g-advanced in 3gpp. *IEEE Communications Magazine*, 60(11):98–104.
- [Flynn 2020] Flynn, K. (2020). Progress on 5g releases 16/17 in 3gpp. *IEEE Communications Standards Magazine*, 4(2):4–5.
- [Lin 2022] Lin, X. (2022). An overview of 5g advanced evolution in 3gpp release 18. *IEEE Communications Standards Magazine*, 6(3):77–83.
- [Lin and et al. 2019] Lin, X. and et al. (2019). 5G New Radio: Unveiling the Essentials of the Next Generation Wireless Access Technology. *IEEE Communications Standards Magazine*, 3(3):30–37.
- [MAGMA 2023] MAGMA (2023). Disponível: <https://magmacore.org/about-magma/>. online: acessado em 30/06/2023.
- [OAI 2023a] OAI (2023a). O-ran alliance 5g core project. Disponível: <https://openairinterface.org/oai-5g-core-network-project/>. online: acessado em 07/06/2023.
- [OAI 2023b] OAI (2023b). O-ran alliance 5g ran project. Disponível: <https://openairinterface.org/oai-5g-ran-project/>. online: acessado em 07/06/2023.
- [OAI 2023c] OAI (2023c). O-ran alliance announces mou with oai. Disponível: <https://openairinterface.org/news/o-ran-alliance-announces-mou-with-oai-new-otics-o-ran/>. online: acessado em 06/06/2023.
- [OAI 2023d] OAI (2023d). O-ran alliance mosaic5gproject. Disponível: <https://openairinterface.org/mosaic5g/>. online: acessado em 07/06/2023.
- [ORAN 2022] ORAN (2022). O-ran working group 2 non-rt ric architecture. Disponível: <https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/specifications>. online: acessado em 05/06/2023.

- [ORAN 2023a] ORAN (2023a). O-ran working group 1 a1 interface: General aspects and principles. Disponível: <https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/specifications>. online: acessado em 05/06/2023.
- [ORAN 2023b] ORAN (2023b). O-ran working group 1 architecture description. Disponível: <https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/specifications>. online: acessado em 05/06/2023.
- [ORAN 2023c] ORAN (2023c). O-ran working group 1 use cases detailed specification. Disponível: <https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/specifications>. online: acessado em 05/06/2023.
- [ORAN 2023d] ORAN (2023d). O-ran working group 2 ai/ml workflow description and requirements. Disponível: <https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/specifications>. online: acessado em 06/06/2023.
- [ORAN 2023e] ORAN (2023e). O-ran working group 3 e2 general aspects and principles (e2gap). Disponível: <https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/specifications>. online: acessado em 05/06/2023.
- [ORAN 2023f] ORAN (2023f). O-ran working group 3 near-rt ric architecture. Disponível: <https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/specifications>. online: acessado em 05/06/2023.
- [ORAN-Brasil 2023] ORAN-Brasil (2023). Openran@brasil - desenvolvimento do ecossistema de redes abertas a partir de pesquisa, inovação e capacitação em tecnologias e aplicações, em 5g e além. Disponível: <https://www.openranbrasil.org.br/>. online: acessado em 11/06/2023.
- [Parkvall et al. 2020] Parkvall, S. et al. (2020). 5g nr release 16: Start of the 5g evolution. *IEEE Communications Standards Magazine*, 4(4):56–63.
- [Polese et al. 2023] Polese, M., Bonati, L., D’Oro, S., Basagni, S., and Melodia, T. (2023). Understanding o-ran: Architecture, interfaces, algorithms, security, and research challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 25(2):1376–1411.
- [Rahman et al. 2021] Rahman, I. et al. (2021). 5g evolution toward 5g advanced: An overview of 3gpp releases 17 and 18. *Ericsson Technology Review*, 2021(14):2–12.
- [Rodriguez et al. 2022] Rodriguez, F., Vogt, F. G., De Castro, A. G., Schwarz, M. F., and Rothenberg, C. (2022). P4 programmable patch panel (p7): An instant 100g emulated network on your tofino-based pizza box. In *Proceedings of the SIGCOMM ’22 Poster and Demo Sessions*, SIGCOMM ’22, page 4–6, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Samdanis and Taleb 2020] Samdanis, K. and Taleb, T. (2020). The road beyond 5g: A vision and insight of the key technologies. *IEEE Network*, 34(2):135–141.

[TELETIME 2023a] TELETIME (2023a). Brisnet usa tecnologia do facebook para levar conexão a locais sem infraestrutura. Disponível: <https://www.opovo.com.br/noticias/economia/2021/04/14/brisanet-usa-tecnologia-do-facebook-para-levar-conexao-a-locais-sem-1.html>. online: acessado em 07/06/2023.

[TELETIME 2023b] TELETIME (2023b). Provedores regionais utilizam solucao de core do facebook para facilitar servico lte. Disponível: <https://teletime.com.br/21/05/2019/provedores-regionais-utilizam-solucao-de-core-do-facebook-para-facili> online: acessado em 07/06/2023.

[Zhang and Long 2022] Zhang, Y. and Long, B. (2022). A review of 5g-advanced service and system aspects standardization in 3gpp. In *2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops)*, pages 94–99.