

Open RAN e os Desafios da sua Experimentação em Plataformas de Código Aberto

Priscila Solís Barreto, Raimundo G. Saraiva Jr, Gabriel de C. Ferreira e Paulo H. P. de Carvalho

Resumo—A arquitetura *Open RAN* (O-RAN) e as especificações da O-RAN Alliance têm o potencial de promover Redes de Acesso via Rádio, ou *Radio Access Networks* (RANs) em inglês, virtualizadas e desagregadas, conectadas por meio de interfaces não-proprietárias e otimizadas por controladores inteligentes. Entender a arquitetura, interfaces e fluxo de trabalho da O-RAN é fundamental para o futuro do ecossistema de telecomunicações. A evolução da O-RAN enfrenta o desafio de ter disponíveis plataformas experimentais para avaliar pilhas de protocolos programáveis e virtualizadas com interfaces não-proprietárias em conjunto com a otimização da RAN dentro da arquitetura 5G e posteriores. Neste artigo, apresentamos um estudo da O-RAN e discutimos os principais desafios nas plataformas de código aberto de pesquisa experimentais que podem ser usadas para projetar e avaliar as suas propostas. O artigo conclui com a identificação dos componentes de código aberto mais promissores, com base nas suas funcionalidades atuais.

Palavras-Chave—5G e além, NFV, Open RAN, O-RAN, Plataformas de experimentação, SDN.

Abstract—The Open RAN (O-RAN) architecture and the O-RAN Alliance specifications have the potential to promote virtualized and disaggregated Radio Access Networks (RANs), connected through open interfaces and optimized by intelligent controllers. Understanding the O-RAN architecture, interfaces and workflows is critical to the future of the telecommunications ecosystem. The evolution of O-RAN has many challenges due to its complexity, requiring experimental platforms to evaluate programmable and virtualized protocol stacks with the new open interfaces, in conjunction with RAN optimization within the 5G architecture and beyond. In this article, we present a study of O-RAN and discuss key challenges in experimental open source research platforms that can be used to design and evaluate future proposals for the O-RAN architecture. The article concludes with the identification of the most promising open source components, based on their current functionalities.

Keywords—5G and beyond, NFV, Open RAN, O-RAN, Experimentation platforms, SDN.

I. INTRODUÇÃO

As futuras gerações de redes móveis requerem estruturas de controle e gerenciamento mais sofisticadas para atender aos novos casos de uso e modelos de negócios. Na quinta geração (5G), estão presentes dois facilitadores tecnológicos fundamentais: a virtualização de funções de rede, *Network Function Virtualization* (NFV) em inglês, bem como funções de rede programáveis [1]. Outros elementos-chave constituem procedimentos e protocolos eficientes de gerenciamento e

Priscila Solís Barreto, CIC/IE, Universidade de Brasília, Brasília-DF, e-mail: pris@unb.br; Raimundo Guimarães Saraiva Júnior, CPI, IFCE, Limoeiro do Norte-CE, e-mail: junior.saraiva@ifce.edu.br; Gabriel de Carvalho Ferreira, CIC/IE, Universidade de Brasília, Brasília-DF, e-mail: gabrielcarvfer@gmail, Paulo H. P. de Carvalho, ENE/FT, Universidade de Brasília, Brasília-DF, e-mail: paulo@ene.unb.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Agência Nacional de Telecomunicações do Brasil (ANATEL) por meio de Termo de Execução Descentralizada (TED) com a Universidade de Brasília.

orquestração. Por fim, também são necessários algoritmos inteligentes e escaláveis, centrados em serviços que exploram fontes de dados de vários domínios, complementados com mecanismos de segurança confiáveis, para a implantação de serviços de rede personalizados.

As implementações tradicionais de RAN são soluções verticalmente integradas compostas de hardware e software proprietários. Em um cenário de RAN aberta, a RAN é desagregada e remontada em um conjunto de subsistemas interoperáveis com interfaces não proprietárias. Nesse contexto surgiu a iniciativa *Open RAN* (O-RAN), liderada pela O-RAN Alliance ¹, que propõe o desenvolvimento de uma arquitetura padronizada para promover a desagregação horizontal e padronização de interfaces RAN, permitindo assim a interoperabilidade de equipamentos de vários fornecedores.

Com a introdução do conceito O-RAN, que é executado principalmente em servidores *white box*, a facilidade provida pelas plataformas experimentais de código aberto pode permitir uma maior facilidade no desenvolvimento de redes orientadas por dados, inteligentes, programáveis e virtualizadas. Entretanto, ainda há muitos desafios a serem tratados nesses ambientes experimentais [2, 3], dado que a maioria das plataformas disponíveis ainda apresenta várias limitações para a comunidade de pesquisa.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma análise da O-RAN e da viabilidade das diferentes plataformas experimentais de código aberto que permitam integrar as funcionalidades do 5G e O-RAN, com o objetivo de contribuir com a pesquisa e novas soluções nesse tema. A estrutura do artigo é a seguinte: a Seção II apresenta o conjunto de conceitos teóricos do 5G e O-RAN a que devem ser considerados funcionais nas plataformas experimentais. A Seção III apresenta uma análise das plataformas identificadas. A Seção IV apresenta as conclusões e trabalhos futuros desta pesquisa.

II. CONCEITOS TEÓRICOS

A. Redes 5G : uma arquitetura orientada a software

O 5GC (*5G Core*) é a arquitetura de núcleo do 5G que se baseia no conceito *Software Based Architecture* (SBA). Neste conceito, cada função de rede, *Network Function* (NF), é uma entidade reutilizável e independente que se comunica por meio de um barramento em comum, *Software Based Interface* (SBI). O 5GC tem como pilares as tecnologias de Redes Definidas por Software, ou *Software-Defined Networks* (SDN) em inglês, e Virtualização de Funções de Rede, ou *Network Function Virtualization* (NFV) em inglês.

A grande maioria das redes atuais é composta por dispositivos proprietários e especializados, o que aumenta os

¹<https://www.o-ran.org>

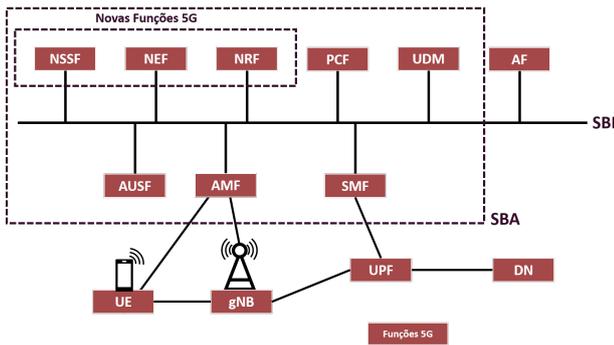


Fig. 1: Núcleo da Rede 5G

custos operacionais e de capital. Uma forma de diminuir os custos com equipamentos especializados é a substituição destes equipamentos por hardware comercial de prateleira, *Commercial-of-the-shelf* (COTS) em inglês. Estes dispositivos podem ser utilizados em conjunto com a computação em nuvem para a virtualização das funções de rede *Virtualized Network Function* (VNF), que implementam em software as funcionalidades dos dispositivos especializados de rede.

O modelo de rede virtualizada é muito útil, pois permite que a topologia da rede seja reorganizada para satisfazer os requisitos dos três cenários de uso do 5G definidos pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP): eMBB, URLLC e mMTC. A rede é reorganizada por meio de fatias de rede (*Network Slices*), onde múltiplos serviços lógicos isolados compartilham uma mesma infraestrutura física. A Figura 1 mostra as funções do 5GC, em que se destacam as funções da *User Equipment* (UE) que é o dispositivo móvel conectado à rede, o *Next Generation Node B* (gNodeB) que também pode ser identificado como um bloco RAN, é a rede de acesso de rádio, que gerencia a conexão de rádio do UE com a *Data Network* (DN) e o *User Plane Function* (UPF) que controla o fluxo de entre o DN e a RAN. A *Access and Mobility Management Function* (AMF) faz o gerenciamento de mobilidade e orquestração da RAN enquanto o *Session Management Function* (SMF) faz o controle das sessões de dados dos UE. Finalmente, a *Network Slice Selection Function* (NSSF), *Network Exposure Function* (NEF) e *Policy Control Function* (PCF) são as funções de controle e gerência das sessões, mobilidade e autenticação dos usuários móveis.

B. A Arquitetura Open RAN (O-RAN)

1) *Mapa das Iniciativas O-RAN*: O-RAN, que tem como objetivo desagregar hardware e software e definir interfaces não-proprietárias, é uma iniciativa aplicável a todas as gerações de tecnologia móvel [4].

O *TIP-Telecom Infra Project*², fundado pelo Facebook em 2016 possui mais de 500 membros participantes, que incluem operadoras, fornecedores, desenvolvedores, integradores, *startups*, interessados na padronização das interfaces.

Outro grupo que lidera o movimento O-RAN é a O-RAN Alliance, fundada em fevereiro de 2018 por operadoras como: AT&T, China Mobile, Deutsche Telekom, NTT Docomo e Orange. Além das interfaces não-proprietárias, o

O-RAN Alliance também propõe o suporte de inteligência computacional em todas as camadas da pilha. Existem neste grupo 11 *Working Groups*, cada um responsável por diferentes partes da arquitetura O-RAN.

A O-RAN Software Community³ é uma junção entre a O-RAN Alliance e a Linux Foundation, com a missão de apoiar a criação de software de código aberto para a RAN. Em 2020 foi criada a Open RAN Policy Coalition⁴ que representa um grupo de empresas formadas para promover políticas na adoção de soluções abertas e interoperáveis na RAN, com o apoio de agências reguladoras e governos.

2) *Interfaces do O-RAN*: Conforme as especificações do 3GPP, a RAN é composta por diversos blocos lógicos, que interligam os canais de controle (através do AMF) e de dados (através do UPF) da rede 5G com o UE. Inicialmente, estes blocos lógicos eram concentrados em uma única entidade física chamada de eNodeB no 4G e gNodeB no 5G. A Figura 2 mostra a arquitetura do gNodeB proposta pelo 3GPP em seu lado esquerdo. Os canais de controle entram na RAN por meio do RRC (*Radio Resource Control*) empregando a interface N2. O RRC é responsável por gerenciar a conexão da RAN com o UE, além de controlar as fatias da rede, os algoritmos de agendamento e filas do envio de pacotes e os recursos de rádio e alocação de banda para cada fatia, além do *handover*. O RRC também controla as interfaces lógicas E1 e F1 e gera relatórios de desempenho de cada fatia, de forma a ser utilizado pelas instancias superiores de orquestração da rede.

Os canais de dados e controle usam o *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP), onde os pacotes são encapsulados para serem roteados para a camada *Radio Link Control* (RLC). O RLC separa os pacotes de dados, de sinalização e de controle da RAN. Os pacotes de dados e de sinalização são mapeados ao seu canal ou fatia e podem ser encaminhados para a *Medium Access Control* (MAC) de forma transparente. A camada MAC é responsável por controlar os canais de controle de acesso do usuário móvel na rede 5G e enviar os pacotes para a camada física (PHY), onde ocorre a modulação, multiplexação, direcionamento de feixe, entre outras operações. Finalmente, é feita a transmissão pela antena.

O 3GPP propôs divisão do gNodeB em duas unidades de processamento, a *Centralized Unit* (CU) e a *Distributed Unit* (DU), além de uma unidade de transmissão *Radio Unit* (RU), como mostrado no lado esquerdo da Figura 2. A DU executa as camadas RLC, MAC e partes da PHY. O CU executa as camadas RRC e PDCP e controla várias DUs, suportando vários gNodeBs. O CU e uma DU são conectadas via interfaces Fs-C e Fs-U para controle e dados, respectivamente, enquanto DU e RU são conectadas via fronthaul proprietário. A separação do DU do RU tem o objetivo de concentrar recursos de processamento nos DUs, reduzindo custos.

A O-RAN incluiu um núcleo de controle da RAN nesta desagregação: o *Near Real-Time RAN Intelligent Controller* (near-RT RIC). O near-RT RIC implementa laços de controle rígidos que vão de 10ms a 1s, administrando centenas de CUs e DUs com balanceamento de carga, *handover*, políticas de

³<https://oran-osc.github.io>

⁴<https://www.openranpolicy.org>

²<https://telecominfraproject.com>

fatiamento de RAN e escalonamento de recursos de rádio. Um dos principais componentes do near-RT RIC são os xApps, componentes *plug-and-play* que implementam políticas para controle da RAN. Este elemento troca informações com CU e DU através da interface lógica E2.

Foi adicionado também o *Non Real-Time RAN Intelligent Controller* (non-RT RIC), que opera na camada de orquestração da rede com balanceamento de carga. O non-RT RIC permite o controle de malha fechada da RAN com escalas de tempo maiores que 1s por meio da execução de aplicativos de terceiros (rApps), que são usados para fornecer serviços de valor agregado para apoiar e facilitar a otimização e as operações de RAN. O non-RT RIC implementa ciclos de inteligência artificial e aprendizado de máquina, que inclui coleta de dados, treinamento, validação, implantação e execução.

A Figura 2 mostra, em sua direita, os detalhes dos componentes e interfaces propostas na O-RAN.

A interface A1 é estabelecida entre o non-RT RIC e o near-RT RIC [4]. A interface é utilizada inicialmente por os serviços de gerenciamento de políticas (*Policy Management Service*) e o de informações enriquecedoras (*Enrichment Information Service*). O primeiro gerencia a configuração de políticas de células, fatias e UEs, com o objetivo de cumprir acordos de nível de serviço, enquanto o segundo é responsável pela coleta de métricas de serviço, posteriormente utilizadas para adaptação automática da rede [5].

A interface E2, considerada a principal interface da arquitetura, é estabelecida entre os nós E2 (e.g. gNodeB, CU, DU) e o near-RT RIC [4, 5]. As funções E2 são agrupadas em: serviços do RIC (*Report, Insert, Control e Policy*); funções de gerenciamento da interface E2 e atualização de serviços no *RAN Intelligent Controller* (RIC) [5]. Pela sua importância, esta interface tem altos requisitos de segurança tais como confidencialidade, integridade, proteção contra ataques de *replay* e autenticação da origem de dados [5].

A interface F1 entre o CU e o DU de um gNodeB, transporta o plano de controle através do *bearer* F1-C [4]. O *bearer* F1-C por sua vez garante o transporte confiável de mensagens de controle do protocolo F1AP, além de ser utilizado para prover informações de encaminhamento e roteamento, prover redundância para a rede de sinalização e fazer controle de congestionamento e fluxo [6].

C. Segurança em 5G e O-RAN

Ao longo das diversas gerações de redes móveis, várias falhas de implementação e abusos de protocolos foram descobertos [7]–[9]. As falhas mais recentes vêm sendo encontradas através da análise estática e dinâmica automatizada das implementações dos modelos definidos pelos padrões 3GPP. Esta análise só é possível devido à existência das pilhas de rede implementadas em código aberto, como srsLTE e OpenAir Interface [9]. Já as soluções proprietárias só podem ser avaliadas utilizando-se metodologia caixa preta [7, 8]. De acordo com a GSMA [10], as maiores preocupações da indústria são relacionadas a fase de implementação do software. Isto se deve à observação de práticas inseguras em sistemas em produção [10], em que podem ser listadas as seguintes:

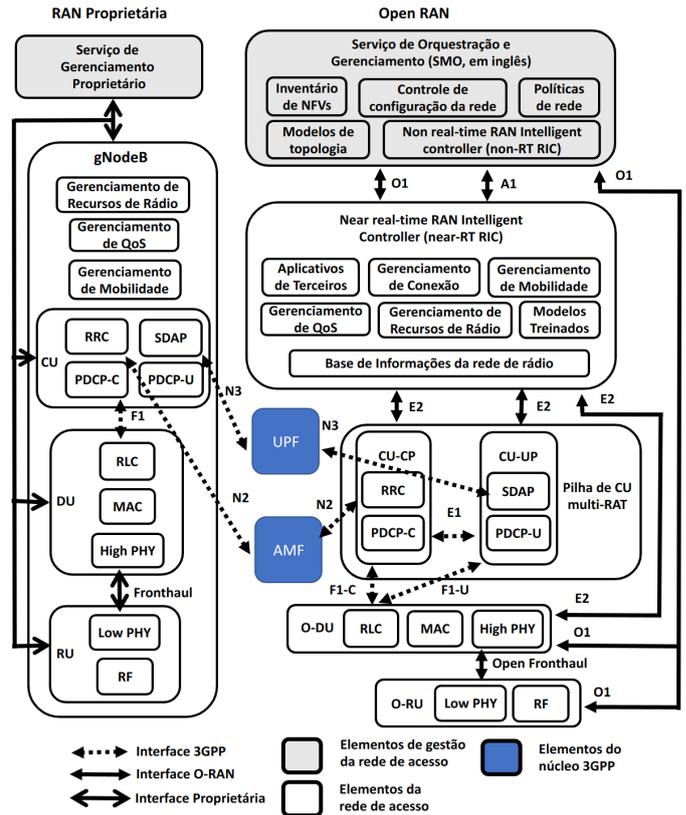


Fig. 2: Arquitetura da RAN 5G proprietária (esquerda) e arquitetura O-RAN (direita), adaptado de [4]

- Credenciais guardadas dentro de uma imagem de software (seja programa, contêiner ou máquina virtual): permite roubo e reuso destas credenciais para acesso indevido de serviços. Caso a imagem seja distribuída para vários usuários, a mesma credencial pode ser utilizada para atacar qualquer um destes usuários.
- Não verificação da integridade das imagens de software: permite que um ator malicioso substitua o software sem ser detectado.
- Não criptografia do plano de dados de usuário: expõe dados de usuários da rede, que podem ser capturados por terceiros e utilizados para identificá-los.
- Não isolamento entre contêineres: permissões indevidas dão acesso a recursos e configurações as quais a aplicação não deveria ter acesso, permitindo que um contêiner roube dados de outros processos do mesmo servidor.

A desagregação da RAN proposta pela O-RAN porém implica em uma maior superfície de ataque, devido ao aumento da quantidade de canais e elementos acessíveis pela rede. Isto é declarado explicitamente pelo grupo de segurança (SFG) da O-RAN Alliance [11], que reconhece os desafios de segurança devido às novas interfaces e componentes, às técnicas de virtualização/contêinerização, ao suporte de código aberto e à capacidade de suportar modelos de *Machine Learning* (ML). Outros trabalhos, como do gabinete para segurança da informação Alemão [12], listam os potenciais riscos mapeados no atual estágio de especificação da arquitetura O-RAN e propõem algumas melhorias, como a concepção da rede segura por projeto (*Secure by Design*) e as recentes especificações do

SFG que definem os princípios de confiança zero (*Zero Trust*) como requisitos de segurança da O-RAN.

III. PLATAFORMAS DE EXPERIMENTAÇÃO DE CÓDIGO ABERTO PARA 5G E O-RAN

A adoção do paradigma SBA/SBI em redes móveis e a O-RAN apresentam novos desafios para a pesquisa experimental em redes celulares. Nos últimos anos, o interesse em plataformas de código aberto para redes celulares têm crescido constantemente e as bibliotecas de software de código aberto têm contribuído consideravelmente nos avanços da comunidade de pesquisa, ao oferecer instanciação rápida de elementos de rede celular totalmente funcionais. Com a introdução da O-RAN e o uso de servidores *white box*, a facilidade de desenvolvimento pode aumentar consideravelmente, permitindo que os pesquisadores planejem, prototipem, analisem e testem suas soluções em um ambiente muito próximo do real.

Existem várias iniciativas ao redor do mundo para essa integração. Em [13] é demonstrada uma descrição detalhada da implementação da arquitetura O-RAN a partir de uma perspectiva de software. Em [3] é demonstrado o uso de controladores de Inteligência Artificial (IA) para O-RAN e sua integração na arquitetura O-RAN. Em [14], os autores introduzem ferramentas do sistema O-RAN em conjunto com o Colosseum, um emulador de canal sem fio baseado em *Software Defined Radio* (SDR) com suporte a *Long Term Evolution* (LTE). Em [2], os autores constroem uma plataforma experimental em conformidade com a O-RAN através da interface E2 e O2 que permite conectividade entre o sistema em teste e a infraestrutura 5G, baseada em uma combinação de uso de licença e infraestrutura de código aberto.

Uma outra iniciativa, apoiada pela NSF (*National Science Foundation*) é a plataforma POWDER⁵, uma infraestrutura definida por software de ponta a ponta que usa SDRs e disponibiliza uma implementação O-RAN pronta para uso, na forma de uma imagem de contêiner pré-compilada. O uso do POWDER é gratuito somente para acadêmicos financiados pela NSF. Além disso, na documentação não foi encontrado o detalhamento da integração dos componentes principais para a construção de uma pesquisa O-RAN de ponta a ponta. Outra plataforma ainda em desenvolvimento e validação na Europa é a 5GENESIS⁶, que inclui uma infraestrutura de rádio heterogênea habilitada para NFV de computação de borda e estruturas de orquestração e gerenciamento.

Até o momento da elaboração deste artigo, foram identificadas poucas plataformas que possam ser consideradas prontas para uso e que possam ser facilmente integradas às funcionalidades do 5GC com a arquitetura O-RAN. A amostra limitada de casos de uso e a falta de soluções de implementação sistemáticas e holísticas, com suporte limitado representam desafios adicionais. Outros problemas incluem detalhes ausentes sobre funcionalidades e parâmetros exatos controlados por cada elemento e o papel da IA e da análise de dados na melhoria do desempenho da rede. Na continuação serão detalhadas as plataformas de código aberto que na

pesquisa realizada se apresentam como mais factíveis para serem integradas para implementar ambientes experimentais de 5G e O-RAN.

A. Implementações de 5GC

Duas das principais implementações em código aberto de redes 4G e 5G hoje são o free5gc e o Open Air Interface, detalhados a seguir.

1) *free5gc*: O free5gc⁷ é um consórcio formado pela Universidade Nacional Taiwanesa de Chiao Tung (NCTU), além de parceiros da indústria e academia. O projeto foi iniciado como um *fork* do NextEPC⁸, que implementa o núcleo da rede 4G LTE, e foi progressivamente alterado para suportar o padrão 5G NR⁹. Atualmente implementa os componentes essenciais do núcleo da rede 5G, sendo utilizado em campo por operadoras de telefonia em redes públicas e em redes privadas. A linguagem utilizada é a Go.

2) *Open Air Interface*: O Open Air Interface implementa os componentes essenciais do núcleo da rede com foco no processamento de sinais de rádio para uso com rádio definido por software e emulação¹⁰. Atualmente implementa o núcleo da rede 5G Release 16, sendo utilizada em redes de telefonia públicas e privadas. É implementado em linguagem C¹¹.

B. Implementação de Orquestração e Gerenciamento

1) *Magma*: É uma arquitetura para redes sem fio proposta inicialmente pelo Facebook a partir do projeto Magma [15], agora parte do Linux Foundation. O objetivo do projeto é simplificar a montagem de redes sem fio multi-tecnologia (Wi-Fi, 4G, 5G) públicas ou privadas [16]. O projeto usa o núcleo de rede 4G e 5G implementado pelo Open Air Interface (OAI), Seção III-A.2, sendo compatível com os redes 3GPP [17]. Segundo avaliação realizada nesta pesquisa, este projeto não segue os padrões O-RAN, implementando suas próprias interfaces de gerenciamento e orquestração de maneira unificada e agnóstica quanto às tecnologias da rede de acesso. A documentação da ferramenta ainda é incompleta, mas o projeto se encontra ativamente em desenvolvimento.

2) *Mosaic5g*: Mosaic5g é a arquitetura de rede 5G proposta inicialmente pelo projeto Mosaic5g, agora parte da Open Air Interface Alliance [18]. O Mosaic5G conta com seu RIC (FlexRic) que implementa a interface E2 do padrão O-RAN, um *Software Development Kit* (SDK) para desenvolvimento de xApps, além da desagregação dos gNodeBs em CU e DU/DU+RU, implementada pelo OpenAirInterface [18]. O Mosaic5g tem documentação extensa, porém defasada. O desenvolvimento é feito de forma privada e o código fonte publicado ao final do ciclo de desenvolvimento.

3) *Aether*: Aether é a implementação proposta pela Open Networking Foundation (ONF) para uma arquitetura 5G compatível com O-RAN e 3GPP [19]. Utiliza os núcleos de rede 5G free5gc, Seção III-A.1, e o 4G OMEC, da própria ONF [19]. A plataforma de rede definida por software utilizada

⁷<https://www.free5gc.org/>

⁸<https://nextepc.org/>

⁹<https://github.com/free5gc/free5gc/releases>

¹⁰<https://openairinterface.org/oai-5g-core-network-project>

¹¹<https://gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g>

⁵<https://powderwireless.net>

⁶<https://5genesis.eu>

para montar as redes virtuais conectando a infraestrutura física é ONOS, também da ONF [19]. Provê SDK para o desenvolvimento de xApps para seu RIC em diversas linguagens. O projeto tem desenvolvimento publicamente ativo. Oferece documentação completa e permite simulação da rede¹².

C. SD-RAN

O SD-RAN é um fragmento do Aether focado no desenvolvimento da RAN conforme as especificações O-RAN. Dentre as plataformas avaliadas, foi identificada como a mais promissora, devido a sua extensa e atualizada documentação, além de parcerias com a academia e indústria [20]. O SD-RAN conta com uma plataforma desenvolvida para reduzir a barreira de aprendizado chamada *SD-RAN-in-a-box* (RIAB)¹³.

O RIAB vem pré-configurado com os mais diversos elementos de rede requeridos por uma rede funcional, incluindo xApps, rApps e VNFs. Em sua configuração padrão, o RIAB conta com um simulador de RAN, utilizado para testar as interfaces da O-RAN, em especial a interface E2 [20]. A interface E2 é responsável pela comunicação entre RIC near-RT e o gNodeB em sua forma convencional ou desagregada em CU, DU e RU. Neste caso, o plano de dados de usuário não é emulado [20]. Caso o plano de usuário seja requerido, este pode ser emulado por meio do OpenAirInterface, e assim, os nós podem ser conectados através de um canal simulado em software ou de um canal físico real, conectando a camada L2 emulada pelo OpenAirInterface a rádios externos [20].

O RIAB conta com um arquivo mestre de configuração em formato YAML. Os campos definidos neste arquivo sobrecrevem as definições dos arquivos de configuração padrão de cada um dos elementos de rede habilitados. A maior parte destes elementos são implementados por meio de aplicações em contêineres, identificados por *commit* e um repositório Git, ou por uma imagem Docker, ou ainda por meio de um Helm Chart¹⁴, que associa uma das opções anteriores com configurações do contêiner para uso em um *cluster* do sistema de orquestração Kubernetes.

IV. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A O-RAN procura trazer os avanços em virtualização, computação em nuvem, redes definidas por software e aprendizado de máquina para as redes de acesso móveis, através da desagregação da RAN e interfaces não-proprietárias. Entretanto, a evolução da pesquisa na O-RAN e sua aplicação em redes legadas, de quinta geração e posteriores depende da possibilidade de que a academia e a indústria sejam capazes de avaliar a viabilidade econômica e técnica da O-RAN, além de contribuir para a arquitetura proposta.

Este trabalho apresentou uma análise das ferramentas disponíveis para viabilizar uma plataforma experimental de código aberto para a O-RAN em que se identifica o SD-RAN como a mais promissora. O trabalho futuro desta pesquisa pretende avançar na implementação do SD-RAN para avaliação da O-RAN nos ciclos de ML na otimização da RAN e exploração de riscos de segurança.

REFERÊNCIAS

- [1] European Telecommunications Standards Institute. 5G NG-RAN E1 signalling transport (3GPP TS 38.462 version 16.0.0 Release 16). https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138400_138499/138462/16.00.00_60/ts_138462v160000p.pdf.
- [2] Ying Wang, Adam Gorski, and Aloizio Pereira da Silva. Development of a data-driven mobile 5g testbed: Platform for experimental research. In *2021 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom)*, pages 324–329, 2021.
- [3] Solmaz Niknam, Abhishek Roy, Harpreet S. Dhillon, Sukhdeep Singh, Rahul Banerji, Jeffery H. Reed, Navrati Saxena, and Seungil Yoon. Intelligent o-ran for beyond 5g and 6g wireless networks. <https://arxiv.org/abs/2005.08374>.
- [4] O-RAN Alliance. O-RAN Minimum Viable Plan and the Acceleration towards Commercialization Whitepaper. <https://www.o-ran.org/s/O-RAN-Minimum-Viable-Plan-and-Acceleration-towards-Commercialization-White-Paper-29-June-2021.pdf>.
- [5] O-RAN Alliance. O-RAN Near-Real-time RAN Intelligent Controller Architecture & E2 General Aspects and Principles 2.01. <https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/specifications>.
- [6] European Telecommunications Standards Institute. 5G NG-RAN F1 signalling transport (3GPP TS 38.472 version 16.0.0 Release 16). https://www.3gpp.org/ftp/Specs/2022-03/Rel-16/38_series/38472-g10.zip.
- [7] Syed Rafiul Hussain, Omar Chowdhury, Shagufta Mehnaz, and Elisa Bertino. LTEInspector: A systematic approach for adversarial testing of 4g LTE. In *Proceedings 2018 Network and Distributed System Security Symposium*. Internet Society, 2018.
- [8] Chuan Yu, Shuhui Chen, Fei Wang, and Ziling Wei. Improving 4g/5g air interface security: A survey of existing attacks on different LTE layers. *Computer Networks*, 201:108532, dec 2021.
- [9] Imtiaz Karim, Syed Rafiul Hussain, and Elisa Bertino. ProChecker: An automated security and privacy analysis framework for 4g LTE protocol implementations. In *2021 IEEE 41st International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*. IEEE, jul 2021.
- [10] GSMA. Mobile telecommunications security landscape. Technical report, GSMA, feb 2022.
- [11] O-RAN Alliance. O-RAN Security Threat Modeling and Remediation Analysis. Technical report, O-RAN Alliance, mar 2022.
- [12] Stefan Köpsell, Andrey Ruzhanskiy, Andreas Hecker, Dirk Stachorra, and Norman Franchi. Open RAN Risk Analysis. Technical report, Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, feb 2022.
- [13] B. Balasubramanian, E. Daniels, M. Hiltunen, R. Jana, K. Joshi, R. Sivaraj, T. X. Tran, and C. Wang. Ric: A ran intelligent controller platform for ai-enabled cellular networks. *IEEE Internet Computing*, 25(02):7–17, mar 2021.
- [14] Michele Polese, Leonardo Bonati, Salvatore D’Oro, Stefano Basagni, and Tommaso Melodia. Colo-ran: Developing machine learning-based xapps for open ran closed-loop control on programmable experimental platforms. <https://arxiv.org/abs/2112.09559>.
- [15] MAGMA. Docs: 5g sa feature documentation. <https://github.com/magma/magma/pull/11790>.
- [16] MAGMA. Magma: Introduction. <https://docs.magmacore.org/docs/basics/introduction.html>.
- [17] Linux Foundation. Magma Project Accelerates with Establishment of Magma Core Foundation and New Members Under Open Governance. <https://linuxfoundation.org/press-release/magma-project-accelerates-with-establishment-of-magma-core-foundation-and-new-members-under-open-governance/>.
- [18] OpenAirInterface. Mosaic 5G. <https://openairinterface.org/mosaic5g/>.
- [19] Open Networking Foundation. Aether: Private 4G/5G Connected Edge Platform for Enterprises. <https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2021/08/Aether-Technical-White-Paper-1.pdf>.
- [20] Open Networking Foundation. Introduction to SD-RAN. <https://docs.sd-ran.org/master/introduction.html>.

¹²<https://docs.aetherproject.org/master/developer/aiab.html>

¹³<https://github.com/onosproject/sdran-in-a-box>

¹⁴<https://github.com/onosproject/sdran-helm-charts>