

Uma análise de interoperabilidade e desempenho de projetos Open RAN com núcleos de redes móveis de quinta geração

Gabriel Capp Kopper¹, Eduardo Schulz¹, Alexandre Huff² e Cristiano Bonato Both¹

¹ Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS – Brasil

² Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo (UTFPR), PR – Brasil

{gkopper, schulzeduardo}@edu.unisinos.br

alexandrehuff@utfpr.edu.br; cbboth@unisinos.br

Abstract. *The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) and the Open Radio Access Network Alliance (O-RAN) standards define open interfaces that allow software and hardware components from RAN and core networks to interoperate among multiple vendors. Interoperability is one of the main characteristics aimed by network operators and standardizing bodies from mobile telecommunications, enabling the entry of new vendors while fostering innovation in the telecommunications industry. However, few studies have investigated the interoperability of O-RAN and core network projects for the fifth-generation mobile networks. This work analyzes current interoperability between open-source projects for the RAN and core network interfaces and presents the corresponding performance assessment of the ones that interoperate together. Furthermore, we discuss the performance evaluation of projects such as OpenAirInterface and Software Radio Systems RAN and show that the former has roughly three times lower memory consumption when compared to the latter while achieving similar transfer rates.*

Resumo. *Os padrões 3rd Generation Partnership Project (3GPP) e Open Radio Access Network Alliance (O-RAN) definem interfaces abertas para que componentes de software e hardware da RAN e núcleo possam interoperar entre diferentes fornecedores. A interoperabilidade é uma das principais características desejadas pelos operadores de redes de telecomunicações móveis e órgãos padronizadores, permitindo a entrada de novos fornecedores e acelerando a inovação da indústria de telecomunicações. Entretanto, poucos trabalhos têm investigado a interoperabilidade de projetos O-RAN com os núcleos de redes móveis de quinta geração. Este trabalho analisa a interoperabilidade entre projetos de código aberto utilizando as interfaces abertas da RAN e do núcleo. O trabalho também realiza uma avaliação de desempenho dos projetos que apresentam interoperabilidade entre si. A avaliação de desempenho inclui uma discussão acerca dos projetos OpenAirInterface e Software Radio Systems RAN, na qual o primeiro apresenta um consumo de memória três vezes menor do que o segundo, enquanto que ambos apresentam taxas de transferências similares.*

1. Introdução

As redes de telecomunicações móveis estão evoluído significativamente, abrangendo software, programabilidade, virtualização e gerenciamento de rede. A aliança *Open Radio Access Network* (O-RAN) [O-RAN Alliance 2024] estabeleceu uma nova visão de redes móveis abertas, virtualizadas, interoperáveis e inteligentes [Polese et al. 2023]. Essa visão vem transformando a indústria de *Radio Access Network* (RAN), diminuindo as

barreiras para a entrada de novos participantes, aumentando a quantidade de fornecedores de hardware e software e promovendo a inovação. Baseada nessa visão, foi proposta uma nova arquitetura para a RAN, desagregando a *Base Station* (BS) monolítica em três unidades de funções de rádio: (i) *Centralized Unit* (CU), (ii) *Distributed Unit* (DU) e (iii) *Radio Unit* (RU) [Garcia-Saavedra and Costa-Pérez 2021]. Um ponto focal dessa arquitetura é permitir a desagregação flexível da pilha de protocolos de rádio nas três unidades funcionais. Além disso, essa desagregação trouxe mudanças na rede de transporte *Crosshaul*, estabelecendo três segmentos de redes: *Fronthaul* (entre RU e DU), *Midhaul* (entre DU e CU) e *Backhaul* (entre CU e o núcleo da rede móvel). Adicionalmente, as especificações da O-RAN estão alinhadas com os padrões do *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) [3GPP 2022], tanto para a RAN, como o transporte e núcleo.

A indústria de telecomunicações móveis tem acompanhado essa evolução, propondo soluções especializadas em O-RAN e provendo núcleos de redes proprietários [Jonsson 2024]. Além disso, destacam-se algumas principais iniciativas de código aberto para o desenvolvimento da RAN, tais como *Software Radio Systems (SRS) RAN* (srsRAN)¹, *OpenAirInterface* (OAI)² e *O-RAN Software Community* (OSC)³, assim como do núcleo, tais como free5GC⁴, Open5GS⁵ e *OAI Core Network* (OAI CN)⁶. Essas iniciativas utilizam interfaces abertas e definidas pelos principais órgãos padronizadores como O-RAN e 3GPP para garantir a interoperabilidade entre vários fornecedores, promovendo a inovação e incentivando a entrada de novos participantes em pesquisas e desenvolvimento tecnológico para o ecossistema de redes sem fio.

Um dos principais objetivos da aliança O-RAN é garantir interoperabilidade entre os componentes de hardware e software da RAN e do núcleo [O-RAN Alliance 2024]. Desta forma, a O-RAN está incentivando a criação de centros abertos de testes e integração, chamados *Open Testing and Integration Centres* (OTIC) [O-RAN Alliance 2023b]. Entretanto, a literatura especializada apresenta poucos trabalhos que investigam esse objetivo considerando projetos de código aberto [Hoeschele et al. 2022, Krasniqi et al. 2023]. Além disso, a literatura não apresenta trabalhos que realizam uma avaliação de interoperabilidade e desempenho considerando os principais projetos de código aberto que deveriam prioritariamente estarem alinhados com os padrões de interfaces abertas.

Pode-se destacar duas contribuições principais deste trabalho: (i) análise da interoperabilidade entre os projetos de código aberto utilizando as interfaces abertas da RAN e do núcleo, as quais foram definidas pelos órgãos padronizadores e (ii) avaliação de desempenho dos projetos que apresentaram interoperabilidade entre si. Os resultados da análise de interoperabilidade apontam que os projetos de código aberto estão em um estágio inicial de desenvolvimento, apresentando diversas limitações de compatibilidade.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira. A Seção 2 apresenta os fundamentos relacionados à redes móveis de comunicação e os trabalhos relacionados sobre interoperabilidade no contexto das redes móveis de quinta geração. A Seção 3 descreve a metodologia de avaliação utilizada para analisar a interoperabilidade e o desempenho dos projetos de código aberto. Os resultados são apresentados na Seção 4. A Seção 5 discute o estado atual de maturidade dos projetos de código aberto em relação a interoperabilidade e desempenho. Finalmente, a Seção 6 apresenta as considerações finais e direções para trabalhos futuros.

¹ <https://www.srsran.com/>

² <https://openairinterface.org/>

³

<https://o-ran-sc.org/>

⁴ <https://free5gc.org/>

⁵ <https://open5gs.org/>

⁶

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

2. Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados

A arquitetura RAN de quinta geração de redes móveis foi repensada a partir da *Release 15* do 3GPP [Meredith and Pope 2018] como um conjunto de oito funções lógicas desagregadas, diferentemente das gerações predecessoras que apresentavam blocos monolíticos. A partir dessas funções, foram especificados diferentes conjuntos de componentes que formam uma *Next Generation Node B* (gNB). Esses componentes podem ser desagregados através de várias opções. Esse trabalho aborda as opções 2 e 8, como pode ser observado na Figura 1. A escolha destas opções é devida à representação das configurações mínimas que os projetos de código aberto suportam para constituir uma gNB com três unidades funcionais: (i) CU contendo as funções *Radio Resource Control* (RRC) e *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP), (ii) DU composta pelas funções *Radio Link Control* (RLC), *Medium Access Control* (MAC) e *Physical* (PHY) e (iii) RU com a responsabilidade de *Radio Frequency* (RF) [Flynn 2021].

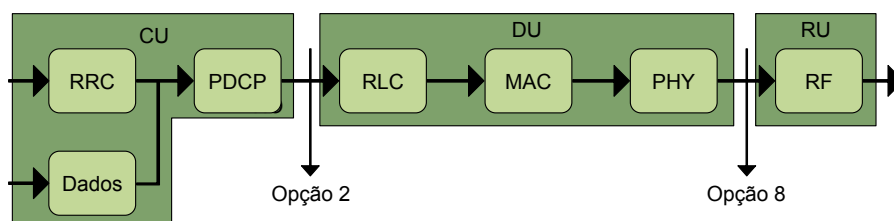


Figura 1. Fluxo de dados com uma gNB desagregada.

Alinhado ao 3GPP, a aliança O-RAN descreve um conjunto de especificações que definem interfaces abertas para a RAN e a integração com o núcleo, possibilitando a interoperabilidade de componentes de software e hardware de múltiplos fornecedores [Polese et al. 2023]. Nesse contexto, a aliança O-RAN opera em três frentes: (i) gerando as especificações das interfaces necessárias para tornar um equipamento interoperável com outros dispositivos O-RAN, (ii) auxiliando terceiros, e.g., operadores a testarem e validarem equipamentos utilizando baterias de testes criadas pelo *Test & Integration Focus Group* (TIFG), o qual é responsável por especificar testes de integração para os componentes da rede de acesso, e (iii) desenvolvendo softwares de código aberto por meio da OSC em parceria com a Linux Foundation [O-RAN Alliance 2024].

O-RAN também introduziu dois controladores chamados *RAN Intelligent Controllers* (RICs) [Almeida et al. 2024]. Esses controladores objetivam expandir a capacidade de adaptação da rede a eventos, tornando a RAN mais inteligente e flexível. O controlador *Near Real-Time RIC* (Near-RT RIC) serve de plataforma para aplicações especiais, chamadas xApps, idealizadas para coletar métricas e gerenciar a rede de acesso com ciclos de controle que levam entre 10 milissegundos e 1 segundo [O-RAN Alliance 2023a]. O controlador *Non Real-Time RIC* (Non-RT RIC) é responsável pelas aplicações chamadas rApps. Tais aplicações são menos sensíveis ao tempo, com ciclos de controle superiores a 1 segundo, e tem como principal responsabilidade otimizar a rede, utilizando políticas de controle e aprendizagem de máquina [Almeida et al. 2024].

A Figura 2 apresenta um diagrama de blocos com os principais componentes de uma rede móvel de próxima geração, integrando a rede de acesso O-RAN com um núcleo baseado em serviços, i.e., *Service-Based Architecture* (SBA). Um *Commercial Off-The-Shelf* (COTS) *User Equipment* (UE) utiliza um *link* de RF de uma unidade RU que está conectada a uma unidade DU. A interface que interconecta a RU e a DU, denominada *fronthaul*, pode ser implementada de maneiras diferentes, por exemplo via fibra ótica ou Ethernet, representando a opção 8. A interface usada para interconectar a DU com a CU,

chamada F1, representa a opção 2. A interconexão dos controladores RIC e da rede de acesso é feita através da interface E2 via protocolo *E2 Application Protocol* (E2AP). É importante destacar que no presente trabalho a DU e a CU podem ser integradas na mesma instância da interface E2. A interface E2 possibilita interligar as xApps que executam no Near-RT RIC a um ou mais *E2 Nodes* (E2Ns). As xApps implementam funcionalidades que incluem a coleta de dados reportados pelos E2Ns e o controle do comportamento destes E2Ns [O-RAN Alliance 2023a]. Além disso, a conexão entre os RICs é feita usando a interface A1. Finalmente, a RAN é conectada ao núcleo utilizando de duas interfaces distintas, i.e., a N2 e a N3. A interface N2 conecta a RAN ao plano de controle via *Access and Mobility Management Function* (AMF) e a interface N3 conecta o plano de dados utilizando o componente *User Plane Function* (UPF) [3GPP 2018].

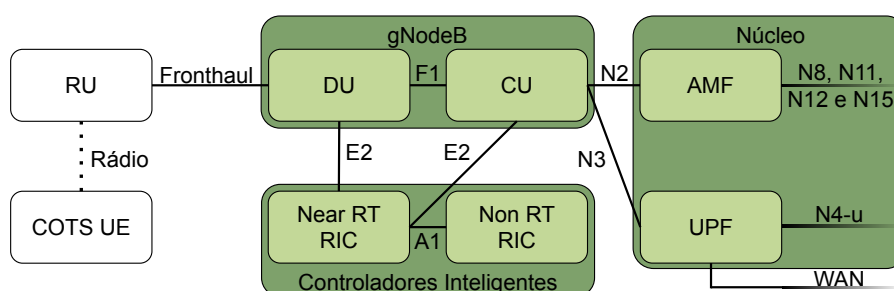


Figura 2. Interfaces de comunicação dos componentes de uma rede móvel.

Trabalhos relacionados

Analisar, testar e avaliar a interoperabilidade e desempenho dos componentes que envolvem uma rede de telecomunicação móvel é fundamental para garantir a compatibilidade desejada pela aliança O-RAN e 3GPP entre múltiplos fornecedores de hardware e software. A O-RAN define diversos testes envolvendo as unidades de RU, DU e CU, bem como inclui testes de redes fim-a-fim para funcionalidades como mobilidade e fatiamento da rede [O-RAN Test and Integration Focus Group 2024]. Entretanto, atualmente existe apenas um teste no contexto dos controladores, que verifica a capacidade do Near-RT RIC em solucionar o caso de uso *Traffic Steering*. Embora as especificações sejam públicas possibilitando sua utilização e auditoria, apenas as instituições certificadas como OTIC são capazes de validar e certificar equipamentos de hardware.

Huang et al. [Huang et al. 2024] exploram a interoperabilidade através da validação de produtos com a especificação da O-RAN e 3GPP, realizando testes principalmente no *Fronthaul* e Near-RT RIC. Entretanto, os autores analisaram apenas sistemas proprietários, pois o foco foi uma avaliação de conformidade com os padrões estabelecidos e não testes de viabilidade para construir e operar redes com múltiplos fornecedores. Gabilondo et al. [Gabilondo et al. 2021] propuseram testes com tecnologias de código aberto, tais como OAI e Open5GS. Os autores testaram tecnologias proprietárias como a Amarisoft CALLBOX PRO e o núcleo Open5GCore, com modems representando UEs. Os testes realizados não abordam os controladores RICs, pois o foco do trabalho realizado foi apenas em redes de quinta geração *Stand Alone* (SA).

Yang [Yang 2022] propôs a criação de uma interface *Web* para realizar testes na interface O1, a qual também possibilita controlar e orquestrar uma RAN. Entretanto, o autor não explora as interfaces de *backhaul* e nem a interface E2. Além disso, foram realizados testes práticos em apenas uma implementação da RAN. É importante destacar, que a interface de orquestração O1 ainda não é suportada em nenhum dos projetos de rede

de acesso de código aberto testados neste trabalho, tais como OAI e srsRAN. Höschele et al. [Hoeschele et al. 2022] apresentam uma parceria entre a Technische Universität Dresden e o consórcio Eurecom na criação do 5G-OPERA. O trabalho descreve a importância da interoperabilidade entre os componentes para iniciar a criação de redes 6G. Além disso, os autores citam *testbeds* criados para testar o funcionamento de componentes da O-RAN.

Krasniqi et al. [Krasniqi et al. 2023] apresentam os desafios na implementação de testes de redes móveis, destacando o fato de alguns fornecedores hesitarem em adotar testes de interoperabilidade, assim como o alto nível de recursos necessários para o planejamento da implementação dessas redes. Além disso, os autores discutem o uso de *System Under Test* (SUT) para realização de testes, bem como, as vantagens das redes O-RAN e seus aspectos inovadores. A Tabela 1 resume as características dos trabalhos relacionados apresentados, e também destaca a análise de interoperabilidade e desempenho realizado por este trabalho.

Tabela 1. Características dos trabalhos relacionados.

Trabalhos	Propõe testes	Testes de núcleo	Testes da RAN	Testes do RIC	Projetos de código aberto
O-RAN TIFG	●	●	○	○	○
Huang et al.	○	●	●	●	○
Gabilondo et al.	○	●	●	○	●
Yang	○	○	○	●	○
Höschele et al.	○	○	○	○	○
Krasniqi et al.	●	○	○	○	○
Este trabalho	●	●	●	●	●

(●) Presença da característica e (○) ausência.

3. Metodologia de Avaliação

A metodologia adotada neste trabalho utiliza um SUT, i.e., um conjunto de componentes a serem testados em um sistema. Para generalizar a metodologia adotada, foi definido um SUT completo com RAN, RICs e núcleo 5G. Entretanto, para testes mais especializados é possível utilizar apenas parte do SUT. A Figura 3 mostra o diagrama de blocos do SUT, formando uma rede móvel real com quatro computadores para executar os componentes da rede, um quinto computador para o servidor de aplicação, um *Universal Software Radio Peripheral* (USRP) para a executar a RU e um COTS UE. Todos os computadores se comunicam através de uma rede local utilizando diferentes protocolos dependendo das interfaces indicadas na figura. Os testes foram subdivididos em três categorias especializadas em (i) plano de controle, (ii) plano de dados e (iii) Near-RT RIC e xApps. Cada categoria utiliza todo ou parte do SUT para definir se um determinado grupo de componentes é interoperável. A seguir cada categoria é descrita detalhadamente.

Plano de controle

Para determinar a interoperabilidade no plano de controle é necessário realizar o registro de um UE no núcleo, i.e., o estabelecimento de uma *Protocol Data Unit* (PDU) e recebimento de no mínimo um endereço *Internet Protocol* (IP) pela UE. A Figura 4 apresenta a troca de mensagens no plano de controle e seu resultado no plano de dados. O processo começa quando uma UE inicia seu registro com a gNB e estabelece uma conexão na camada de RRC e a mensagem é repassada para a AMF do núcleo. Posteriormente, começa a troca de mensagens de autenticação do UE com o núcleo e, quando aceito, o

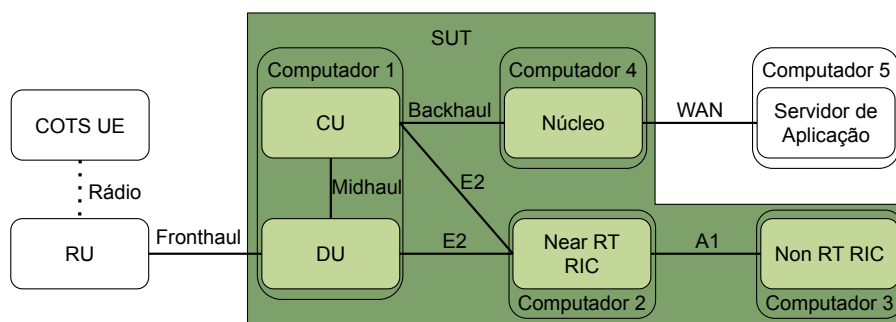


Figura 3. Configuração do SUT utilizado.

UE inicia a requisição de uma PDU. Para o estabelecimento da PDU, a AMF necessita de informações de inscrições localizadas na *Unified Data Management* (UDM) e da criação de um contexto na *Session Management Function* (SMF). Uma vez que a sessão de PDU é criada, um túnel *General Packet Radio Service (GPRS) Tunneling Protocol* (GTP) é estabelecido entre o UE e o UPF no plano de dados, definindo um ou mais endereços IP associados ao UE.

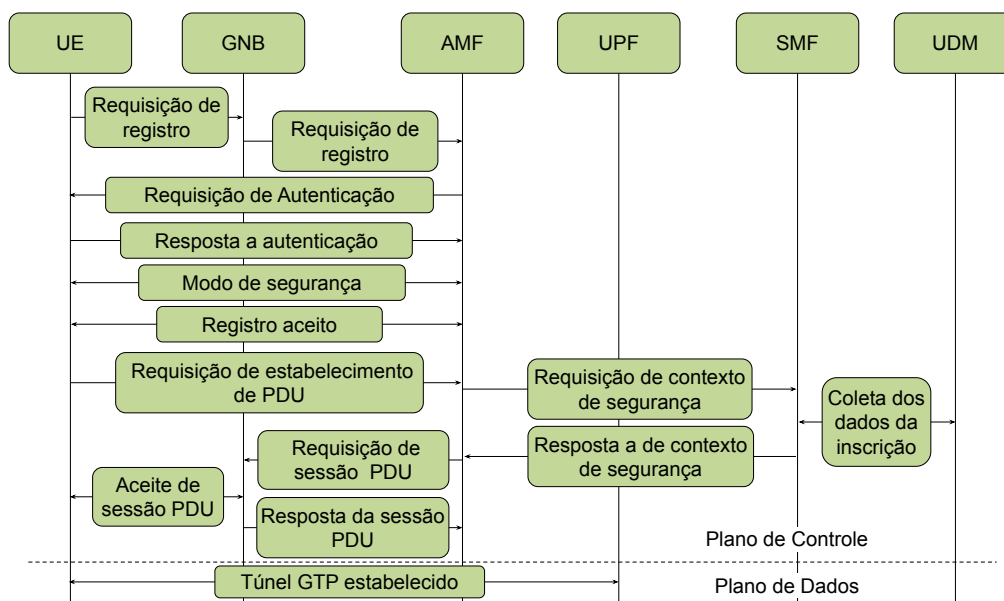


Figura 4. Registro de um UE e estabelecimento do túnel GTP.

Plano de dados

Para atestar a interoperabilidade no plano de dados utilizou-se uma requisição *Internet Control Message Protocol (ICMP) ECHO* entre o UE e o Servidor de Aplicação, garantindo que o equipamento de usuário se comunique através da interface de rede externa do UPF com serviços disponíveis na Internet. Para testar a qualidade da conexão foram realizados testes de vazão de *download*, *Round Trip Time (RTT)* e retransmissão utilizando com a ferramenta *Iperf3*⁷. O objetivo principal destes testes foi garantir que a rede esteja funcionando de maneira adequada. Para realização dos testes, enviou-se um total de 600 pacotes durante um intervalo de 10 minutos, garantindo um intervalo de confiança de 95% de acordo com a variabilidade das amostras.

⁷ <https://iperf.fr/>

Near-RT RIC e xApps

O teste de interoperabilidade do Near-RT RIC foi baseado no registro de uma xApp no E2N da rede de acesso. O *Service Model* (SM) utilizado neste teste foi o *Key Performance Metrics* (KPM). A escolha do KPM foi devido sua simplicidade, mas principalmente pelo seu suporte nos projetos de rede de acesso de código aberto. A Figura 5 apresenta a troca de mensagens entre o *E2 Node* (E2N), Near-RT RIC e xApp. O teste realizado é representado pela *Região Cronometrada* compreendendo desde a solicitação de inscrição enviada pela xApp ao E2N até a obtenção da respectiva resposta.

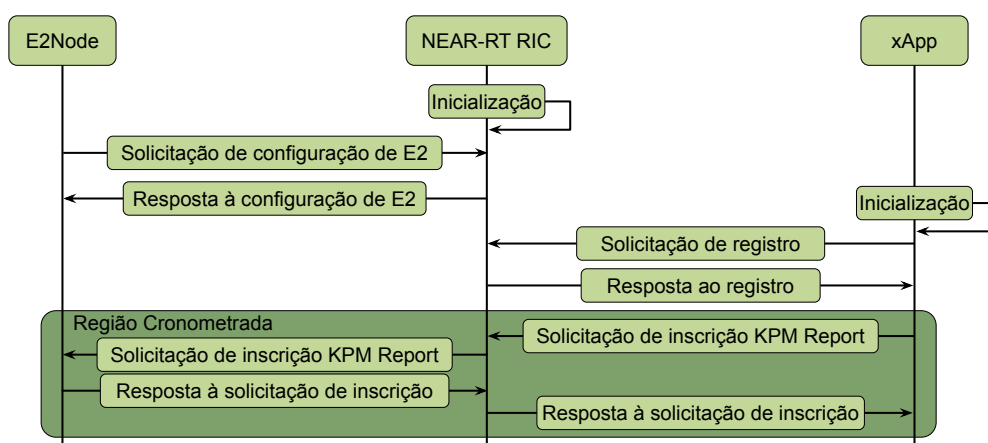


Figura 5. Registro de xApp no Near-RT RIC e inscrição no E2Node.

4. Avaliação de Interoperabilidade e Desempenho

Esta seção descreve inicialmente os detalhes do cenário de avaliação. Posteriormente, os resultados dos testes de interoperabilidade e desempenho são apresentados.

4.1. Cenário de Avaliação

A Tabela 2 apresenta os equipamentos utilizados na realização dos testes, organizados em (i) parâmetros do rádio, (ii) computador gNB, (iii) computador do núcleo 5G e (iv) computador do Near-RT RIC. As principais configurações dos equipamentos utilizados nos experimentos são: um celular OnePlus Nord N10 5G, utilizado como COTS UE, um USRP B210 sem o módulo GPS como RU, dois computadores equipados com processador Intel Core i7-12700 e 16GB de memória *Random Access Memory* (RAM) cada e dois notebooks com um processador Intel Core i7-1255U e 40GB de memória RAM cada. Todos computadores utilizando a distribuição do Sistema Operacional (SO) Linux Ubuntu com variações na versão do *kernel*.

Um dos computadores foi escolhido para instalar as gNBs, com o intuito de manter o *hardware* idêntico para os dois projetos de código aberto da RAN testada, i.e., OAI e srsRAN. O ambiente utilizado foi o Ubuntu 22.04 LTS com o *kernel* 5.15.0-91-lowlatency. A versão do *driver* do rádio escolhida foi a 4.5.0.0. Para coleta das métricas de consumo do processador e memória foi utilizado o *Node Exporter* no Prometheus e essas métricas foram expostas no Grafana hospedado na mesma máquina. Todos os testes utilizaram um *script* disponibilizado pelo srsRAN para melhorar o desempenho do sistema, fixando a frequência do processador.

Para o ambiente dos núcleos testados, i.e., free5GC, Open5GS e OAI CN, foi utilizado um dos notebooks com Ubuntu Server 22.04 LTS com o *kernel* 5.15.0-101-generic.

Tabela 2. Configurações dos testes.

Parâmetros do rádio		Computador do Núcleo	
Banda de Frequência	n78 (FR1, TDD)	Processador	i7-1255U
Largura de banda	40MHz	RAM	40GB
<i>Subcarrier Spacing</i>	30kHz	SO	Ubuntu 22.04LTS
Número de antenas	1 TX, 1 RX	<i>kernel</i>	5.15.0-generic
Computador da gNB		Computador do Near-RT RIC	
Processador	i7-12700	Processador	i7-1255U
RAM	16GB	RAM	40GB
SO	Ubuntu 22.04LTS	SO	Ubuntu 22.04LTS
<i>kernel</i>	5.15.0-lowlatency	<i>kernel</i>	6.5.0-generic

As métricas de consumo do processador e memória também foram coletadas usando o *Node Exporter* conectado ao Prometheus. Todas as redes dos núcleos testadas foram implementadas utilizando contêineres com a ferramenta Docker, seguindo os ambientes declarados pelos seus respectivos projetos. A configuração dos testes de interoperabilidade nos planos de controle e dados foi um subconjunto do SUT apresentado na Figura 3, i.e., com os RICs removidos. Esta remoção objetivou simplificar e reduzir a variabilidade dos testes, visto que os RICs não são necessários para a execução desses testes.

Os testes com os RICs foram executados em um notebook com Ubuntu 22.04 LTS utilizando o *kernel* 6.5.0-25-generic. O controlador da OAI chamado Flexric⁸ foi configurado em *bare metal* e o RIC da OSC foi executado utilizando o Kubernetes na versão v1.29.0. Em todos os testes, as xApps foram executadas na mesma máquina que os RICs executaram. O núcleo Open5GS foi utilizado para esses testes, pois apresentou o melhor desempenho. Os RICs não geraram quantidades significativas de carga ao núcleo.

4.2. Resultados

A primeira análise realizada neste trabalho refere-se a interoperabilidade dos projetos de código aberto da RAN e do núcleo. A Tabela 3 é uma matriz diagonal mostrando a compatibilidade entre os projetos. Os projetos testados para a rede acesso são OAI RAN e srsRAN. Os núcleos 5G testados são Open5GS, free5GC e OAI CN. Os controladores analisados são Flexric e OSC Near-RT RIC. Para o Flexric foram testadas duas versões (Commit 93961d2 e Branch e2ap-v2), pois apresentam funcionalidades adicionais. As aplicações testadas foram a xApp de exemplo de monitoramento disponível junto do Flexric e uma versão modificada da xApp denominada Bouncer da OSC. A cor verde na tabela representa que os testes realizados comprovaram a interoperabilidade entre os projetos e a cor vermelha indica que os projetos ainda não são interoperáveis entre si. Por fim, a cor cinza indica testes inválidos, i.e., os projetos não são interoperáveis por definição.

A Figura 6 apresenta o resultado do teste de RTT, utilizando mensagens do tipo *Echo Request* do protocolo ICMP. Os testes foram realizados com os três projetos de núcleo 5G e dois projetos da RAN de código aberto. Pode-se observar que o RTT aumenta consideravelmente ao utilizar o projeto srsRAN com menos de 25% das amostras sendo mais rápidas que o percentil 99 do projeto OAI. Entretanto, a diferença entre usar os diferentes núcleos escolhidos em cada um dos projetos RAN é virtualmente inexistente.

A Figura 7 apresenta o desempenho da taxa de transferência de cada um dos projetos OAI RAN e srsRAN para os três núcleos analisados. A medição foi realizada no

⁸ <https://gitlab.eurecom.fr/mosaic5g/flexric>

Tabela 3. Testes de interoperabilidade entre projetos da RAN, RICs e núcleo.

	OAI RAN	srs-RAN	Open-5GS	Free-5GC	OAI CN	Flex-ric	Near-RIC	Flexric xApp	OSC xApp
OAI RAN	Black	White	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red
srs-RAN	White	Black	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Open-5GS	Green	Green	Black	White	White	White	White	White	White
Free-5GC	Green	Green	White	Black	White	White	White	White	White
OAI CN	Green	Green	White	White	Black	White	White	White	White
Flex-ric	Green	Green	White	White	White	Black	White	Green	Red
Near-RIC	Green	Green	White	White	White	White	Black	Red	Green
Flexric xApp	Green	Green	White	White	White	Green	Red	Black	White
OSC xApp	Red	Green	White	White	White	Red	Green	White	Black

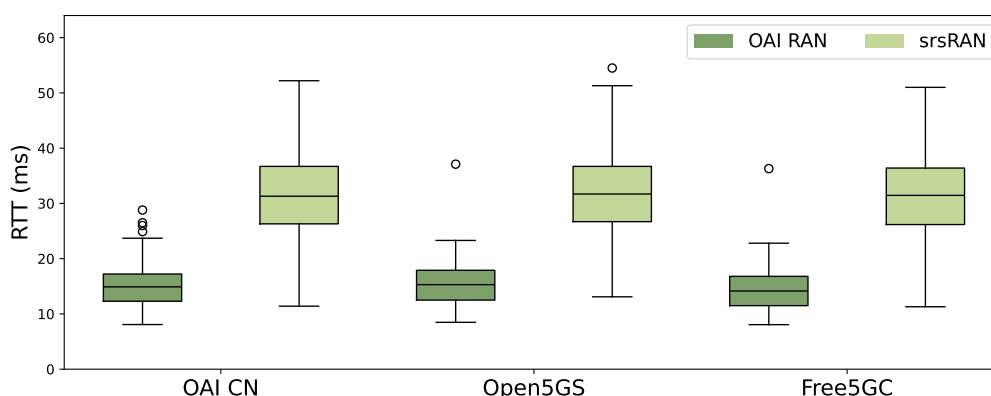


Figura 6. Análise de RTT em 600 medições entre RANs e núcleos.

plano de dados entre o UE e o Servidor de Aplicação utilizando a ferramenta Iperf3. Os resultados apresentados nessa análise são interessantes, considerando a combinação dos projetos de RAN e núcleos integrados. Por um lado, a OAI RAN apresenta um desempenho extremamente similar em todos os núcleos. Por outro lado, o projeto srsRAN apresenta desempenho similar ao OAI quando operando junto ao núcleo Open5GS, porém taxa de transferência inferior, mas extremamente consistente, ao se conectar ao free5GC e OAI CN. Dessa forma, pode-se concluir que a escolha do núcleo não tem um grande impacto em relação ao desempenho da taxa de transferência.

Uma análise do consumo de *Central Processing Unit* (CPU) também foi realizada para quantificar a necessidade de recursos computacionais utilizados em cada projeto. Na Figura 8 pode-se observar a porcentagem do uso de CPU do computador designado para a gNB ao longo de 600 segundos. Na esquerda pode-se observar o uso de CPU durante os testes com o OAI CN. É possível perceber uma disparidade entre os projetos srsRAN

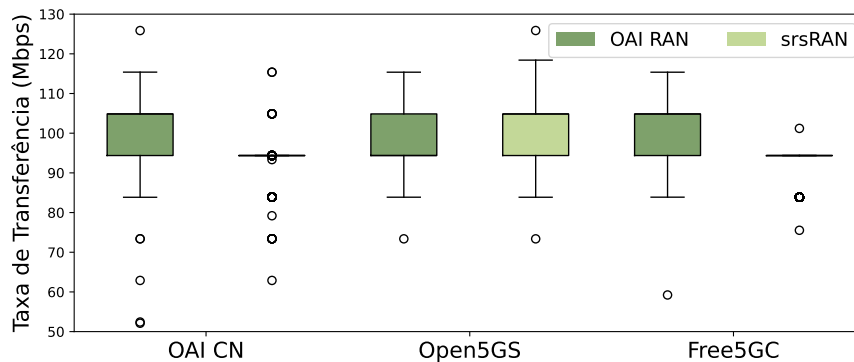


Figura 7. Taxa de transferências dos projetos de RAN e núcleo interoperáveis.

e OAI, sendo que o srsRAN teve um consumo até duas vezes maior. No gráfico central, as RANs analisadas apresentam um comportamento extremamente semelhante, i.e., o projeto srsRAN possuiu um perfil similar ao projeto OAI RAN ao operar com o Open5GS. Por fim, o gráfico da direita apresenta o resultado obtido nos testes com o núcleo free5GC, que se assemelha com o valores obtidos com o projeto OAI CN. O uso de CPU nunca ultrapassa a marca de 10% utilizando processadores de COTS *desktop*. Entretanto, é importante destacar que os testes foram realizados com apenas um UE. Também não foi realizado teste de escalabilidade em relação a quantidade de dispositivos conectados. Desta forma, não é apresentado o uso de processador no computador do núcleo, pois, diferentemente da RAN, não foi observado consumo de recursos significativos, e.g., a utilização de CPU média não ultrapassou 1%.

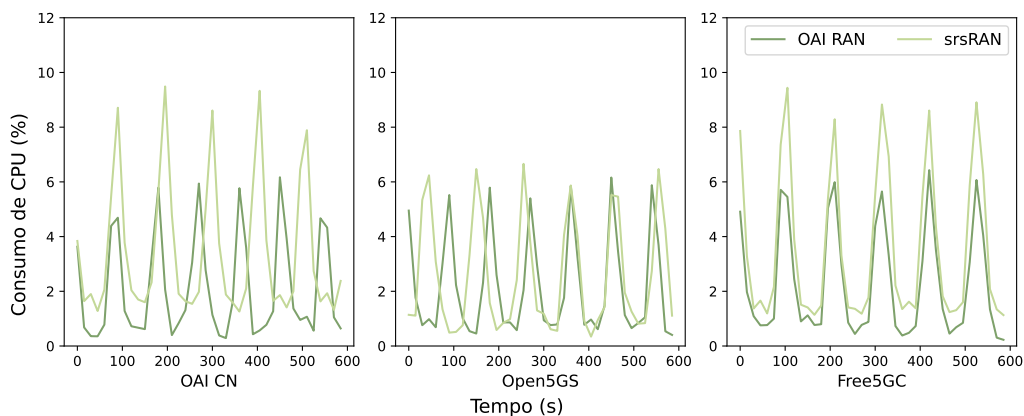


Figura 8. Consumo de CPU durante os testes com o lperf no computador das gNB.

Tendo analisado o padrão de consumo de processamento, também foi investigada a utilização de memória RAM nos computadores da RAN. A Figura 9 apresenta os resultados encontrados para cada um dos projetos testados. Nas barras verde escuro que representam o projeto OAI RAN, pode-se observar um consumo de $\approx 2,4$ GB de memória. O projeto srsRAN identificado com as barras verde claro apresenta um consumo de $\approx 7,4$ GB. No topo de cada barra também pode-se observar o desvio padrão na distribuição dos valores obtidos nos testes, indicando que a variação no consumo é mínima. Dessa forma, observa-se que consumo de memória é independente da escolha de núcleo, embora o consumo altere drasticamente dependendo do projeto da gNB escolhida. Curiosamente, o uso de memória registrado com o OAI RAN é três vezes menor, levando a conclusão de que o projeto srsRAN não seja a melhor opção para situações com limitação de memória. É importante destacar o fato de que os testes realizados só levam em consideração um

único UE, de modo que a relação entre o consumo e o aumento da quantidade de UEs conectados também deve ser levada em consideração.

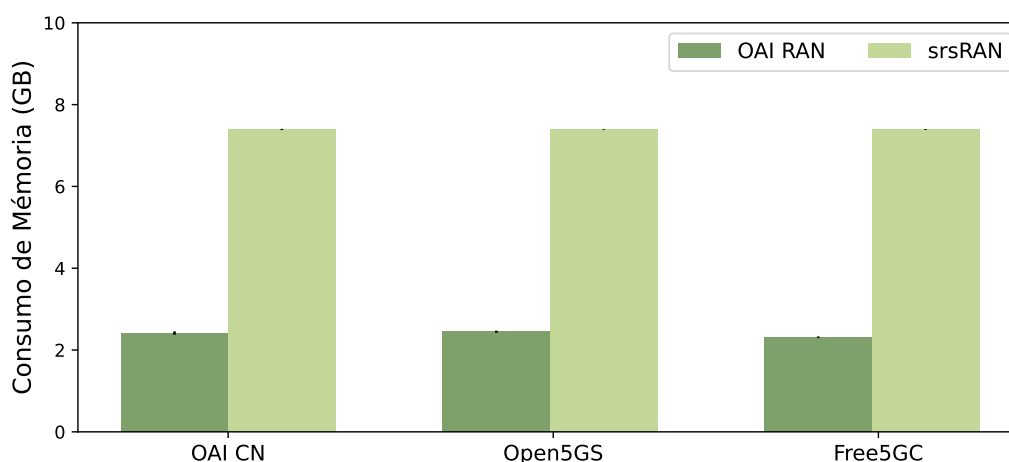


Figura 9. Consumo de memória nos testes com o lperf no computador das gNB.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 3, encontrou-se um cenário com restrições de interoperabilidade. Diversas versões do projeto Flexric não apresentaram suporte para os projetos de redes de acesso. Entretanto, testes com o srsRAN e o Near-RT RIC *Release 1* da OSC utilizando uma xApp que implementa o *Service Model* (SM) KPM para comunicar com o srsRAN resultaram em interoperabilidade. Testes também foram realizados para conectar E2Ns do OAI RAN ao Near-RT RIC da OSC. Resultados obtidos demonstraram a capacidade de conectar OAI RAN ao Near-RT RIC, porém não foi encontrada uma xApp capaz de interoperar adequadamente nestes testes.

A Figura 10 apresenta a média do tempo de resposta de uma subscrição para a coleta de uma métrica de KPM da RAN. A medição foi realizada entre o envio de uma mensagem de subscrição e a respectiva resposta. Todos os testes foram realizados utilizando o núcleo Open5GS visando manter a consistência entre testes. Os RICs e xApp utilizaram o mesmo computador, pois o objetivo foi analisar o desempenho de cada projeto de RAN com a xApp. O lado esquerdo do gráfico apresenta os resultados do projeto Flexric em uma escala linear, com uma precisão de microssegundos, para os dois projetos da RAN. O lado direito do gráfico pode-se observar o resultado do Near-RT RIC da OSC em uma escala logarítmica no eixo das ordenadas com precisão de milissegundo, pois os resultados divergiram entre ≈ 7 ms e 900 ms. Neste caso, os testes foram realizados apenas com o projeto srsRAN, pois o projeto OAI RAN não apresentou interoperabilidade com o projeto Near-RT RIC da OSC. O comportamento inesperado ao utilizar o Near-RT RIC da OSC pode ser atribuído ao controlador ser baseado em microsserviços em um *cluster* Kubernetes (K8s), utilizando uma arquitetura alinhada com as especificações da O-RAN. Os microsserviços que compõem o Near-RT RIC da OSC trocam mensagens utilizando a biblioteca *RIC Message Router* (RMR) que recebe configurações de roteamento de outro componente chamado *Routing Manager*. Considerando que o Flexric é monolítico e requer que as xApps implementem a comunicação da interface E2 via protocolo *Stream Control Transmission Protocol* (SCTP), função realizada pelo componente *E2 Termination* no Near-RT RIC da OSC, o Flexric tem uma comunicação direta entre xApps e E2Ns o que permite reduzir a latência de comunicação. Entretanto, essa diferença na arquitetura dos controladores Near-RT RIC e Flexric não justifica aumentos de 2 ordens de magnitude nos resultados, que podem ser atribuídos ao funcionamento do *Routing Manager* do Near-RT RIC. Como o *Routing Manager* verifica a existência de no-

vas xApps periodicamente, a falta de sincronização entre o temporizador do controlador e o momento em que a aplicação é inicializada pode causar um aumento na latência em alguns registros de xApps e conseqüentemente nas subscrições, o que explica os resultados deste experimento.

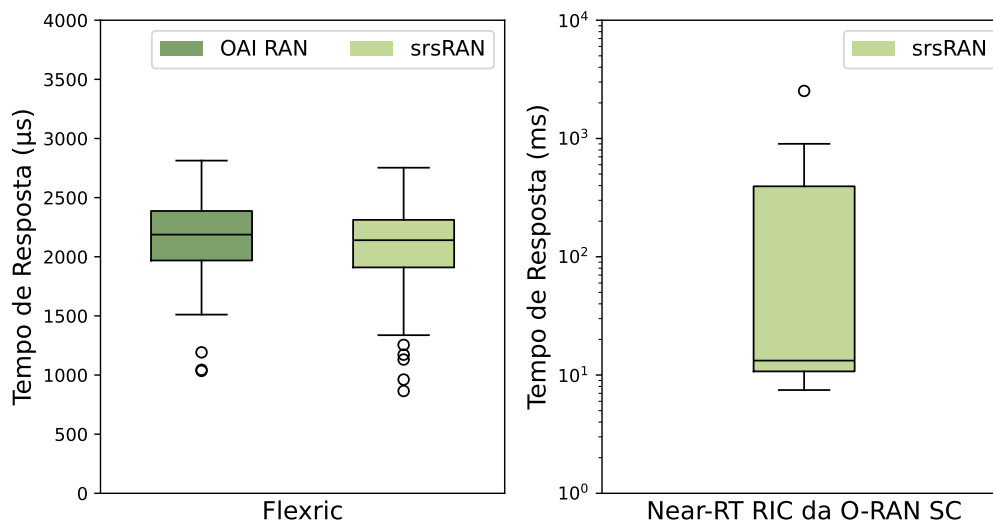


Figura 10. Tempo de tempo entre a subscrição e a primeira indicação.

5. Discussões

Os resultados obtidos nos projetos Open5GS e srsRAN encontram-se dentro das expectativas, pois este núcleo é recomendado pelo projeto da SRS com um repositório regularmente atualizado, demonstrando como utilizar os projetos integrados dentro de um ambiente containerizado com *docker*⁹. O funcionamento de qualquer núcleo testado foi um ótimo sinal para interoperabilidade nas interfaces de *backhaul*, pois indica que todos os projetos estão seguindo as especificações e são, portanto, interoperáveis. Infelizmente para a SRS, seu projeto srsRAN obteve resultados limitados para os testes de latência e memória, sem nenhuma vantagem aparente. Além disso, o projeto srsRAN só funciona com uma versão específica do Flexric e também foi necessário utilizar uma xApp customizada do Near-RT RIC da OSC para o funcionamento com o srsRAN. É importante destacar que utilizando essa mesma xApp com o OAI RAN não se obteve sucesso de interoperabilidade. Isso demonstra que a implementação do E2N ainda está na sua infância, mas está evoluindo rapidamente. Em soluções que não são impactadas pela latência mais elevada e o maior consumo de recurso, o srsRAN provê taxas de transferência extremamente estáveis quando operando em conjunto do OAI CN e free5GC. Além disso, projeto srsRAN oferece boa documentação, com tutoriais criados pela própria empresa que são regularmente atualizados. Assim, o projeto de srsRAN destaca-se pela facilidade de configuração, instalação e uso do sistema.

O funcionamento do projeto OAI RAN com o OAI CN foi esperado, pois ambos são desenvolvidos pelo mesmo grupo. Entretanto, o OAI RAN também interoperou com sucesso com todos os outros núcleos testados e obteve resultados similares nos testes de desempenho, quando comparado ao srsRAN. Estes resultados são extremamente positivos em relação à compatibilidade das redes de acesso e núcleos. Além disso, o OAI possui suporte para o *split* do CU e DU, enquanto o srsRAN, até o momento, não possui. A execução destes *splits* em um mesmo computador ou de forma virtualizada funciona muito

⁹ https://github.com/herlesupreeth/docker_open5gs

bem. Durante a realização dos testes que envolveram o OAI foram encontradas diversas dificuldades que foram resolvidas com diferentes níveis de esforço. Por exemplo, uma das adversidades que foi encontrada refere-se a menor disponibilidade de documentação comparada ao srsRAN. Também destaca-se um dos maiores problemas encontrados no OAI, que é o método de suporte da plataforma. Por exemplo, grande parte dos problemas solucionados acabam ficando perdidos na *mailing-list* do projeto, tornando a procura por soluções mais difícil do que a maioria dos projetos que utiliza uma página de "Issues".

Ao utilizar o Flexric observou-se que existem diversas *branches* em seu repositório e muitas dessas ainda com alguma atividade. Isso revela uma característica peculiar deste projeto em relação aos outros, pois apresenta diversas adaptações temporárias introduzidas no seu código com a contribuição de vários indivíduos e empresas. Por exemplo, a *branch* principal do repositório da OAI adiciona novas métricas no SM KPM e utiliza uma versão diferente do Flexric, quebrando a compatibilidade da xApp adaptada para esse artigo. Outro ponto interessante sobre esse projeto refere-se a sua estrutura, que é completamente diferente daquela apresentada no Near-RT RIC da OSC. O projeto da Flexric é monolítico e não possui o componente *Routing Manager*. Por um lado, esse RIC é incrivelmente rápido e eficiente e a comunidade parece ter facilidade em adaptá-lo a suas necessidades. Por outro lado, o Near-RT RIC da OSC é projetado para ser utilizado em um *cluster* Kubernetes com suas xApps sendo distribuídas por pacotes conhecidos como *charts*, que descrevem todos os recursos necessários para a sua implantação no *cluster* Kubernetes.

6. Conclusões

Este artigo investigou a interoperabilidade e desempenho de projetos de código aberto para redes móveis de quinta geração. Um dos resultados positivos foi que todos os projetos de núcleo de uma rede de quinta geração são operáveis. Entretanto, o estudo destacou que as soluções para RICs ainda estão em um estágio inicial apresentando várias limitações de interoperabilidade e desempenho. Embora os testes tenham sido realizados apenas com uma UE, a variação de desempenho entre as combinações de RAN e núcleo se provou pequena e, dependendo do cenário, insignificante. Entretanto, a diferença de latência entre os RICs testados é significativa e pode tornar o Near-RT RIC da O-RAN SC inviável para certas aplicações. Tendo em vista que todos os testes apresentados neste trabalho foram feitos de maneira manual e que todos os projetos envolvidos estão em constante crescimento, como trabalho futuro torna-se claro que o próximo passo é automatizar o conjunto de testes e a publicação de resultados visando produzir uma fonte de informações atualizada, reproduzível e automatizada sobre nível de interoperabilidade de projetos de código aberto para redes móveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por meio dos Projetos PORVIR-5G: Programabilidade, ORquestração e VIRtualização de Redes em 5G, concessão 2020/05182-3, e SAMURAI: núcleo 5G inteligente e integração de múltiplas redes de acesso, concessão 20/05127-2.

Referências

3GPP (2018). *5G; System Architecture for the 5G System*. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 3gpp ts 23.501 version 15.2.0 release 15 edition.

- 3GPP (2022). 3GPP TS 38.401 V17.1.1 - NG-RAN; Architecture description. Technical report, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).
- Almeida, G. M., Bruno, G. Z., Huff, A., Hiltunen, M., Duarte, E. P., Both, C. B., and Cardoso, K. V. (2024). Ric-o: Efficient placement of a disaggregated and distributed ran intelligent controller with dynamic clustering of radio nodes. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 42(2):446–459.
- Flynn, K. (2021). Open RAN. <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/open-ran>.
- Gabilondo, A., Fernandez, Z., Martin, A., Viola, R., Zorrilla, M., Angueira, P., and Montalbán, J. (2021). 5g sa multi-vendor network interoperability assessment. In *2021 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, pages 1–6.
- Garcia-Saavedra, A. and Costa-Pérez, X. (2021). O-RAN: Disrupting the Virtualized RAN Ecosystem. *IEEE Communications Standards Magazine*, 5(4):96–103.
- Hoeschele, T., Kaltenberger, F., Grohmann, A. I., Tasdemir, E., Reisslein, M., and Fitzek, F. H. P. (2022). 5g interoperability of open ran components in large testbed ecosystem: Towards 6g flexibility. In *European Wireless 2022; 27th European Wireless Conference*, pages 1–6.
- Huang, Y., Sun, Q., Li, N., Chen, Z., Huang, J., Ding, H., and I, C.-L. (2024). Validation of current o-ran technologies and insights on the future evolution. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 42(2):487–505.
- Jonsson, P. (2024). Ericsson Mobility Report. Technical Report EAB - 24:000300 Uen Rev B, Ericsson.
- Krasniqi, X., Hajrizi, E., and Qehaja, B. (2023). Challenges and lessons learned during private 5g open ran deployments. In *2023 3rd International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, pages 1–6.
- Meredith, J. and Pope, M. (2018). 3rd Generation Partnership Project Technical Specification Group Services and Systems Aspects Release 15 Description. Technical Report 3GPP TR21.915 V15.9.0, 3rd Generation Partnership Project-3GPP, Sophia Antipolis CEDEX, France. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/21_series/21.915/.
- O-RAN Alliance (2023a). *O-RAN Architecture Description*. O-RAN Alliance, o-ran.wg1.oad-r003-v10.00 edition.
- O-RAN Alliance (2023b). Overview of Open Testing and Integration Centre (OTIC) and O-RAN Certification and Badging Program. White paper, O-RAN.
- O-RAN Alliance (2024). O-RAN Alliance. <https://www.o-ran.org/>. Accessed on April 7, 2024.
- O-RAN Test and Integration Focus Group (2024). End-to-end Test Specification. Technical Report O-RAN.TIFG.E2E-Test.0-R003-v05.00, O-RAN Alliance.
- Polese, M. et al. (2023). Understanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 25(2):1376–1411.
- Yang, W.-C. (2022). Interoperability Testing Tool for Operations and Maintenance Interfaces of 5G Open RAN Base Station. In *2022 23rd Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, pages 1–4.