

Monitoramento Unificado para Multiplataformas E2 em Sistemas Open RAN

Paulo Silva, Lucas Medeiros, Matheus Doria, Antonio Campos, Augusto Neto e Vicente Sousa

Resumo— A iniciativa O-RAN introduz uma arquitetura de telecomunicações mais flexível e interoperável, com abordagem desagregada e baseada em interfaces abertas. No entanto, o monitoramento contínuo, principalmente na interface E2, que liga os nós da rede de acesso de rádio aos controladores inteligentes fora da rede de telecomunicações, é essencial para garantir sua operação eficiente. Este artigo apresenta um arcabouço para monitoramento unificado de E2 Service Models (E2SMs) em arquiteturas O-RAN. A proposta utiliza Zabbix e Grafana integrados com *scripts* personalizados, para buscar e visualizar os E2SMs disponíveis na rede. Essa implementação permite o acompanhamento contínuo das capacidades expostas pela rede O-RAN, auxiliando no desenvolvimento de *xApps* e na configuração de *testbeds*.

Palavras-Chave— O-RAN, Monitoramento, RIC, E2SM.

I. INTRODUÇÃO

A O-RAN Alliance apresenta uma arquitetura de rede de telecomunicações como uma evolução da arquitetura tradicional das redes de acesso por rádio (RAN), baseada em padrões abertos, desagregando *hardware* e *software*, e permitindo interoperabilidade entre equipamentos de vários fabricantes. Em conformidade com o 3GPP, a O-RAN Alliance atua como entidade de padronização, reunindo operadoras, fornecedores e instituições para definir especificações técnicas de interfaces abertas e controladores inteligentes, chamados de *RAN Intelligent Controllers* (RICs) [1].

Na arquitetura O-RAN, o Near-RT RIC (*Near-Real-Time RAN Intelligent Controller*) é responsável pelo gerenciamento dinâmico de recursos da RAN, em escalas de tempo entre 10 milissegundos e 1 segundo, atuando em funções como alocação de espectro e gerenciamento de interferência [2]. Essa operação é viabilizada pela interface E2, que conecta o RIC aos elementos distribuídos da RAN, como a O-RAN *Central Unit* (O-CU) e a O-RAN *Distributed Unit* (O-DU) de diferentes fornecedores [3].

O Near-RT RIC disponibiliza uma plataforma aberta para a integração de aplicações de terceiros, denominadas *xApps* (*eXtended Applications*), possibilitando a implementação de funcionalidades avançadas voltadas à otimização de recursos da O-RAN. Entre essas funcionalidades, destacam-se a detecção de falhas, a alocação eficiente de espectro e o gerenciamento dinâmico de tráfego, bem como o desenvolvimento de soluções customizadas para atender a requisitos específicos de serviços prestados pela rede de telecomunicações [1], [3].

Todos os autores são do Leading Advanced Technologies Center of Excellence (LANCE), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, E-mails: paulo.eduardo.093@ufrn.edu.br, lucas.medeiros.114@ufrn.edu.br, matheus.fagundes.067@ufrn.edu.br, antonio.campos@ufrn.edu.br, augusto@dimap.ufrn.br, vicente.sousa@ufrn.edu.br. Esse estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Para garantir a operação eficiente e segura da arquitetura O-RAN, é fundamental dispor de um sistema capaz de monitorar, em tempo real, os recursos e o comportamento da interface E2. Esse monitoramento contínuo permite identificar falhas, gargalos ou comportamentos anômalos que possam comprometer o desempenho da RAN. Além disso, torna-se essencial realizar, periodicamente, o levantamento dos E2 *Service Models* (E2SMs) disponíveis nos nós da rede, de modo a garantir que os controladores inteligentes (*xApps*) possam explorar plenamente as capacidades expostas por cada nó.

Estudos recentes têm proposto arcabouços para abordar desafios operacionais no ecossistema O-RAN. Os autores de [4] desenvolveram uma solução focada no controle de *slices* da RAN. Em [5], foi criado um ambiente de simulação O-RAN baseado no ns-3, permitindo testes de *xApps* e interfaces E2 em ambientes virtualizados. Os autores de [6] propuseram um arcabouço para facilitar o gerenciamento de E2SMs e o desenvolvimento de *xApps*, porém sem capacidades nativas de monitoramento em tempo real.

O monitoramento da interface E2 também tem despertado crescente interesse na comunidade O-RAN, como evidenciado por repositórios em desenvolvimento [7] e discussões em fóruns técnicos [8], apontando a falta de mecanismos para acompanhar a disponibilidade e compatibilidade de E2SMs em redes multi-fornecedor.

A visibilidade dinâmica sobre os E2SMs suportados e os recursos da E2 se torna, portanto, um requisito chave para a orquestração e a gerência de recursos adaptativos, bem como a interoperabilidade em ambientes O-RAN heterogêneos. Ferramentas consolidadas de monitoramento são essenciais nesse cenário, pois permitem acompanhar em tempo real métricas críticas da RAN. Essa capacidade fortalece a automação da gestão da rede, aumentando a resiliência, a estabilidade e o desempenho da arquitetura O-RAN.

Este artigo propõe uma solução baseada na integração entre Zabbix Server/Agent, Grafana e *scripts* em Python e Shell para automatizar a descoberta dos E2SMs disponíveis em nós da rede 5G aberta. Os *scripts* extraem periodicamente informações dos nós E2 e as reportam ao Zabbix via verificações personalizadas. Os dados são armazenados de forma estruturada, permitindo análise temporal e visualização em *dashboards* dinâmicos no Grafana. Essa abordagem garante visibilidade contínua das capacidades dos nós E2 e permite rápida adaptação de *xApps* frente a mudanças na infraestrutura.

O artigo está organizado em cinco seções. A Seção II apresenta a arquitetura das redes O-RAN; a Seção III descreve a proposta do arcabouço para monitoramento unificado; a Seção IV apresenta o *testbed* construído para os testes de validação do arcabouço proposto; a Seção V apresenta e discute os resultados de validação e, por fim, a Seção VI

aborda as principais conclusões do trabalho.

II. ARQUITETURA O-RAN

A arquitetura da O-RAN Alliance aprimora as funcionalidades da RAN por meio do uso de interfaces abertas (O1, E2, A1, F1 e *Open Fronthaul* - OFH) e de controladores inteligentes de recursos, conforme ilustrado na Fig. 1. Seu principal objetivo é fornecer uma arquitetura padronizada que promova a interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fornecedores, além de viabilizar a implementação de estratégias de gerenciamento de recursos de rádio (*Radio Resource Management* – RRM) complementares aos sistemas proprietários, mas seguindo todas as recomendações do 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) [1].

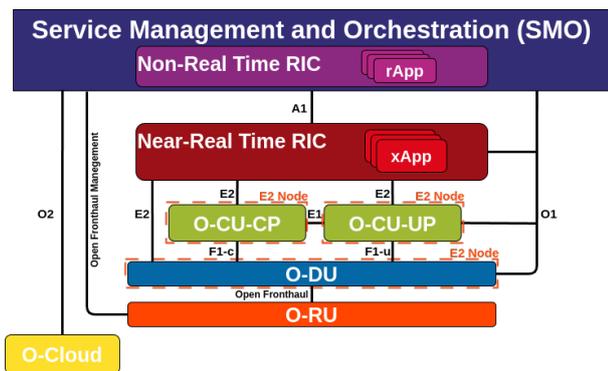


Fig. 1: Arquitetura O-RAN [1].

O componente *Service Management and Orchestration* (SMO) localiza-se na camada superior da arquitetura O-RAN, sendo responsável pela gestão centralizada e orquestração dos elementos da rede por meio da interface O1. Sua atuação inclui a supervisão de funções de ciclo de vida (*Life Cycle Manager* LCM), a automação de processos operacionais e a aplicação de modelos de inteligência artificial e aprendizado de máquina (IA/ML), para suporte à alocação adaptativa de recursos, otimização de desempenho, eficiência energética e gerenciamento de recursos O-Cloud, por meio da interface O2 [2], [9].

O *Non-Real-Time RAN Intelligent Controller* (non-RT RIC) é um componente da arquitetura O-RAN responsável por funções de gerenciamento e otimização, que operam em escalas de tempo superiores a um segundo. Integrado ao SMO, o non-RT RIC é projetado para executar tarefas como treinamento e análise de modelos de IA/ML, gerenciamento de políticas, configuração de parâmetros e suporte à orquestração de xApps e rApps [10].

O *Near-RT RIC* é uma função lógica responsável por otimizar, controlar e monitorar os nós O-CU e O-DU em tempo quase real. Suas decisões são guiadas por políticas e modelos gerados pelo non-RT RIC, recebidos via interface A1. As funcionalidades de RRM, como controle de mobilidade, interferência e alocação de recursos, são implementadas por microserviços modulares chamados xApps, que executam algoritmos específicos de forma adaptativa e virtualizada [10].

O *O-Cloud* é a infraestrutura de nuvem que fornece os recursos computacionais, de armazenamento e rede, necessários para hospedar funções da RAN desagregada, incluindo o O-CU, O-DU, SMO, xApps e rApps. Ele

é composto por *hardware*, *software* de virtualização e plataformas de orquestração compatíveis com ambientes nativos em nuvem [11].

O nó E2 representa as funções desagregadas O-CU e O-DU, antes integradas às estações base tradicionais. Ele se comunica com o Near-RT RIC via interface E2, permitindo decisões de controle e otimização quase em tempo real para melhorar o desempenho e o uso dos recursos da RAN [3]. Essa arquitetura padronizada facilita a integração de soluções multivendedor, conforme as especificações da O-RAN Alliance, promovendo interoperabilidade e reduzindo a dependência de tecnologias proprietárias. Na TR 38.801 [12], o 3GPP define uma série de *splits*, os quais delimitam a divisão da pilha de protocolos entre os nós CU e DU. A O-RAN Alliance especifica o Split 7.2x (baseado no *Split 2* do 3GPP), que define [13]:

- **O-CU:** nó responsável pelas funcionalidades de camadas superiores da estação base, como o Controle de Recursos de Rádio (RRC), o Protocolo de Adaptação de Dados de Serviço (SDAP) e o Protocolo de Convergência de Dados por Pacote (PDCP). Atua na gestão de acesso de usuários, mobilidade e gerenciamento de sessões [2], [3].
- **O-DU:** nó lógico que gerencia funções das camadas RLC (Controle de Link de Rádio), MAC (Controle de Acesso ao Meio) e alta camada PHY (Camada Física). Opera próximo ao O-RU, realizando o processamento de sinais de rádio em tempo real, incluindo modulação, demodulação, codificação e decodificação [2], [3].

A interface E2 padroniza a comunicação entre o Near-RT RIC e os nós da RAN (O-CU/O-DU), com base em dois componentes: o E2 Application Protocol (E2AP), que define procedimentos de sessão, manutenção, relatórios e comandos; e os E2 Service Models (E2SMs), que especificam métricas, controles e operações (como KPM Reporting, RRC Control e RAN Configuration) [14], [15]. O-DUs e O-CUs de diferentes fabricantes podem adotar catálogos distintos de E2SMs, com variações proprietárias. Assim, o mapeamento periódico dos E2SMs ativos em cada nó é essencial para garantir que as xApps explorem todas as funcionalidades disponíveis e mantenham a interoperabilidade em ambientes O-RAN heterogêneos [2], [3].

III. PROPOSTA DE ARCABOUÇO PARA MONITORAMENTO UNIFICADO

Este artigo propõe um arcabouço unificado de monitoramento da interface E2, baseado na integração de ferramentas de código aberto para coleta, supervisão, controle e armazenamento de métricas de capacidade e desempenho em ambientes O-RAN. O arcabouço proposto é mostrado na Fig. 2.

O coletor de KPIs (*Key Performance Indicators*) é o elemento central da solução, sendo responsável pela coleta e transmissão periódica de métricas referentes aos elementos computacionais da infraestrutura 5G. Este componente deve ser implantado em cada unidade a ser monitorada e é capaz de obter KPIs nativamente expostas pelo sistema computacional (e.g., CPU, memória), bem como executar *scripts* auxiliares para a extração de métricas de telecomunicações (e.g., taxa de erro, taxa de transmissão). Considerando o near-RT RIC, o coletor de KPI possui a capacidade de identificar e executar

xApps especializados na coleta de métricas via interface E2. Tais xApps estabelecem comunicação direta com os nós E2, coletando informações em tempo quase real e armazenando-as localmente em bancos de dados acessíveis ao coletor, ampliando a abrangência do monitoramento. Também é proposto um coletor de KPI para o 5GC (núcleo de rede do 5G) e outro para a infraestrutura computacional do nó E2, que podem expor métricas a serem monitoradas e expostas na *dashboard*. O servidor de monitoramento consolida os dados recebidos de todos os coletores, estruturando as informações com base em um modelo padronizado e armazenando-as de forma persistente. A visualização dessas métricas é realizada por meio de uma *dashboard*, composta por painéis interativos e personalizáveis, que exibem os KPIs organizados por E2SMs por nó E2, além de indicadores associados aos UEs, gNBs e ao 5GC.

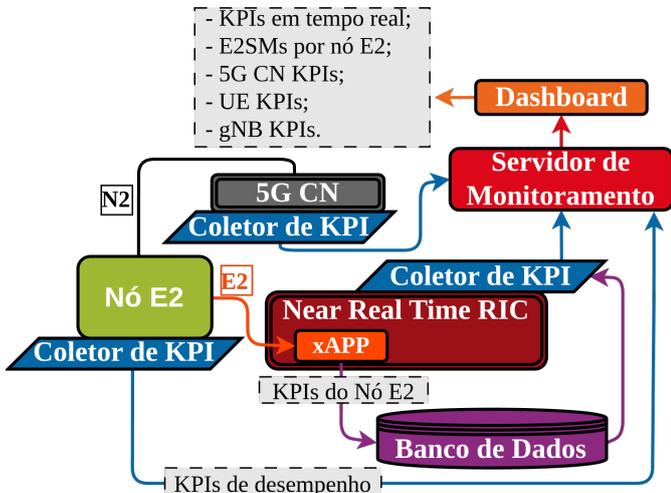


Fig. 2: Arcabouço de monitoramento proposto.

A adoção da solução proposta oferece benefícios significativos para a gestão operacional de sítios 5G, especialmente em cenários que envolvem múltiplos nós E2 com diferentes capacidades e perfis de serviço. A possibilidade de realizar o levantamento automatizado dos E2SMs disponíveis em cada nó E2 elimina a necessidade de inspeções manuais ou consultas diretas às interfaces de baixo nível, que são suscetíveis a erros operacionais e exigem conhecimento técnico aprofundado. Esse mapeamento contínuo garante ao operador de rede uma visão atualizada e abrangente das funcionalidades expostas por cada elemento da RAN, viabilizando a alocação inteligente de xApps e a maximização do aproveitamento dos recursos disponibilizados pela infraestrutura. Além disso, o monitoramento sistemático de KPIs relevantes — como latência, utilização de CPU, perda de pacotes, entre outras — permite respostas mais ágeis a eventos críticos, contribuindo para o aumento da resiliência e da eficiência da operação. Essa abordagem automatizada promove um modelo de gestão proativo, adaptativo e com menor dependência de intervenção humana, o que é fundamental para escalar redes O-RAN em ambientes dinâmicos e heterogêneos.

IV. METODOLOGIA DE VALIDAÇÃO

A validação do arcabouço proposto neste trabalho foi realizada por meio de um ambiente experimental composto por

quatro máquinas, cada uma dedicada a um papel específico: Zabbix Server, Near-RT RIC, e duas estações rádio base (gNBs Bell e Maxwell), conforme ilustrado em Fig. 3.

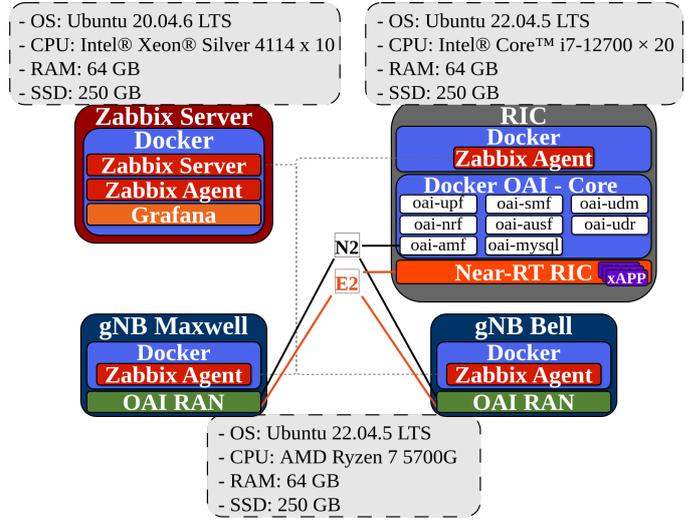


Fig. 3: Ambiente de testes.

O ambiente de monitoramento foi estruturado com o uso do Zabbix Server, uma plataforma robusta e amplamente adotada no setor de infraestrutura para o acompanhamento contínuo da disponibilidade, desempenho e integridade de sistemas distribuídos, como servidores, equipamentos de rede e serviços críticos [16]. O Zabbix é responsável pelo processamento e armazenamento estruturado das KPIs coletadas periodicamente a partir dos elementos da rede, utilizando para isso o Zabbix Agent, implantado nos respectivos nós.

Para a visualização e análise interativa dessas métricas, foi utilizada a ferramenta Grafana, uma solução de observabilidade amplamente reconhecida por sua flexibilidade na construção de *dashboards* interativos. O Grafana oferece suporte nativo a diversas fontes de dados, gráficos em séries temporais, alertas customizáveis e painéis dinâmicos, permitindo uma visualização intuitiva e altamente personalizável do estado da rede. Essa integração facilita a identificação de tendências, anomalias e padrões operacionais relevantes, promovendo uma supervisão proativa e orientada por dados.

A infraestrutura de rede foi prototipada com o OAI (OpenAirInterface) [17], que tem os principais blocos funcionais da arquitetura 5G, seguindo o 3GPP, incluindo a pilha RAN [18], do núcleo da rede (CN) [19] e do Equipamento do Usuário (UE). O OAI é formado por uma comunidade global de programadores, possibilitando que pesquisadores executem implementações de testes em cenários controlados e realistas. O OAI também disponibiliza o FlexRIC [20], uma implementação extensível do Near-RT RIC, compatível com a interface E2, que permite a execução de xApps. Essas aplicações podem ser desenvolvidas para otimizar aspectos específicos da rede, como *handover*, controle de potência ou balanceamento de carga, facilitando a pesquisa e validação de algoritmos avançados de gestão de recursos na RAN. Esse ecossistema permitiu a implementação do xApp voltado à descoberta automática de E2SMs e à exposição contínua das KPIs disponíveis em cada nó E2.

Dessa forma, o Zabbix Server atuou como nó central de

coleta e organização das KPIs, armazenando os dados de forma estruturada e integrando-os automaticamente aos *dashboards* do Grafana, para fins de visualização e análise temporal. A instância do Near-RT RIC foi responsável pela orquestração dos xApps e pela gestão das funções de controle da rede de acesso via interface E2. A Tabela I lista os componentes usados no protótipo dos testes de validação.

TABELA I: Componentes e versões utilizadas no ambiente.

Componente	Software/Repositório	Versão
5G Core Network	oai-cn5g-fed	v1.5.0
RAN	openairinterface5G	2024.w42
Near-RT RIC	FlexRIC	dev
Zabbix Server/Agent	Zabbix	7.0.3
Grafana	Grafana Labs	grafana:10.2.9
Docker	Docker	version 26.1.3

As gNBs foram configuradas com diferentes E2SMs, simulando a heterogeneidade funcional típica de ambientes multivendor. Essa configuração permitiu avaliar a capacidade do arcabouço proposto em lidar com múltiplos E2SMs e validar sua interoperabilidade e adaptabilidade em um cenário O-RAN realista. A Tabela II apresenta os E2SMs disponíveis em cada nó E2 do protótipo construído para os testes de validação.

TABELA II: E2SMs instalados em cada Nó E2 do protótipo de validação.

E2 Service Model	gNB-Bell	gNB-Maxwell
ORAN-E2SM-KPM	Instalado	Não instalado
ORAN-E2SM-RC	Não instalado	Instalado
MAC-STATS-V0	Instalado	Não instalado
RLC-STATS-V0	Não instalado	Instalado
PDCP-STATS-V0	Instalado	Não instalado
SLICE-STATS-V0	Não instalado	Instalado
TC-STATS-V0	Instalado	Não instalado
GTP-STATS-V0	Não instalado	Instalado

V. RESULTADOS DE VALIDAÇÃO

Com o ambiente de experimentação devidamente configurado, de acordo com a Fig. 3, foi executada uma bateria de testes com o objetivo de avaliar o comportamento do arcabouço de monitoramento proposto em condições operacionais realistas. Os experimentos, com duração média de 30 minutos e amostragens realizadas a cada 10 segundos, permitiram a observação contínua de múltiplas métricas. Dentre os parâmetros monitorados, destacam-se os modelos de serviço publicados dinamicamente por cada nó E2, bem como o consumo de recursos computacionais (CPU e memória) das gNBs e das funções de rede que integram o 5GC. Além disso, foram coletadas informações sobre os UEs ativos na rede, como tempo de conexão, endereço IP atribuído e o identificador da gNB associada. Essas medições, ao serem expostas na *dashboard*, validam o arcabouço de monitoramento proposto, pois comprovam que as métricas foram adquiridas pelo Coletor de KPIs, enviadas ao Servidor de Monitoramento, que após da devida organização, são expostas de forma amigável para o usuário do sistema monitoramento unificado.

A Fig. 4 ilustra um *snapshot* dos resultados das medições obtidas durante o experimento realizado no testbed de

validação (com gNBs instaladas nos servidores Bell e Maxwell). A *dashboard* apresentada na figura é interativa e possui, na parte superior, um seletor que permite alternar entre diferentes gNBs monitoradas, centralizando todas as informações relevantes em um único painel. Logo abaixo, encontra-se o painel *Supported RAN Functions per E2 Node*, composto por duas linhas de texto colorido que indicam, de forma visual, a presença (em verde) ou ausência (em vermelho) dos E2SMs em cada nó. A primeira linha refere-se ao *E2 Node 3584*, gNB instalada no servidor Bell, e a segunda linha é o *E2 Node 3585*, gNB instalada no servidor Maxwell. É possível verificar que os E2SMs disponíveis são os mesmos instalados previamente em cada gNB, como especificado na Tabela II.

Na sequência, o painel *E2 Node RRC Information* apresenta parâmetros relacionados aos recursos de rádio da gNB selecionada, tais como: o nome do nós E2 (gNB-OAI-Bell), o ID do nó E2 (3584), a banda de operação (n78), a quantidade de PRBs (*Physical Resource Blocks*) (106), o espaçamento entre subportadoras (30 kHz) e o status de conexão (*Connected*). Dois gráficos dispostos em formato de séries temporais mostram a evolução do consumo de CPU e memória da gNB ao longo do tempo, permitindo a análise do comportamento do nó em termos de carga computacional. À esquerda da *dashboard*, é possível visualizar a lista de ações disponíveis por E2SM, com destaque para o modelo ORAN-E2SM-KPM no experimento em questão. As informações relacionadas aos UEs conectados estão localizadas na região central da *dashboard* e incluem métricas como: o tempo de conexão, *Data Network Name* (DNN), *QoS Flow Identifier*(QFI), *Slice Differentiator* (SD), *Slice Service Type* (SST), *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) e *Reference Signal Received Power* (RSRP). Por fim, no lado direito da interface, são exibidos os KPIs associados ao 5GC. Esses painéis fornecem uma visão do desempenho de cada função de rede que compõe o 5GC do OAI, incluindo o uso de CPU e memória. É possível expandir cada painel e ter acesso a métricas adicionais com tráfego de *uplink* e *downlink*, status operacional dos contêineres Docker utilizados em cada componente, por exemplo. A arquitetura do *testbed* pode ser replicada por meio do seguinte repositório do Github https://github.com/PauloBigood/O-RAN_Monitoring/tree/main.

VI. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um arcabouço para o monitoramento unificado de E2SMs em arquiteturas O-RAN, que também abrange KPIs relevantes associadas às gNBs, UEs e ao 5GC. Como a arquitetura 5G O-RAN é virtualizada, o arcabouço proposto engloba métricas de telecomunicações, bem como métricas do sistema computacional que suporta as funções de rede 5G e O-RAN. A proposta foi validada experimentalmente por meio de um *testbed* utilizando o OAI. A validação experimental comprovou o potencial do ambiente de monitoramento proposto como uma plataforma facilitadora de desenvolvimento e adaptação de xApps frente a mudanças na infraestrutura, bem como um facilitador da visualização de recursos em ambientes O-RAN heterogêneos.

Com o sistema de monitoramento desenvolvido, é possível visualizar os E2SMs suportados por cada nó E2, uma



Fig. 4: Dashboard de Monitoramento dos nós E2.

informação essencial para o desenvolvimento de xApps capazes de explorar plenamente as capacidades oferecidas pela infraestrutura disponível. Os resultados obtidos evidenciam que os componentes utilizados na solução de monitoramento — Zabbix, Grafana e scripts customizados — foram eficazes na coleta e armazenamento periódico das KPIs de interesse, viabilizando a visualização integrada do comportamento dos diversos elementos da rede.

Como trabalhos futuros, pretende-se expandir a avaliação para diferentes configurações do *testbed*, incorporando outras soluções *open source* de RIC, RAN e 5GC (e.g., srsRAN, Open5GS), assim como a avaliação de métricas objetivas, como o uso médio de CPU/Memória e o tempo de descoberta de E2SMs. Além disso, planeja-se o desenvolvimento de um xApp capaz não apenas de identificar os E2SMs suportados por cada nó, mas também de descobrir dinamicamente a lista de ações disponíveis.

REFERÊNCIAS

[1] O-RAN Alliance, “O-RAN Alliance Working Group 1, O-RAN Architecture Description 13.0,” 2025, accessed: Fev 2025. [Online]. Available: [\url{https://orandownloadswb.azurewebsites.net/specifications}](https://orandownloadswb.azurewebsites.net/specifications)

[2] M. Polese, L. Bonati *et al.*, “Understanding o-ran: Architecture, interfaces, algorithms, security, and research challenges,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 1376–1411, 2023.

[3] O-RAN Alliance, “O-RAN Alliance Working Group 3, (O-RAN.WG3.TS.E2GAP-R004-v07.00 Technical). O-RAN E2 General Aspects and Principles (E2GAP) 7.0,” 2025, accessed: Fev 2025. [Online]. Available: [\url{https://orandownloadswb.azurewebsites.net/specifications}](https://orandownloadswb.azurewebsites.net/specifications)

[4] H. Cheng, S. D’Oro *et al.*, “ORANslice: An Open Source 5G Network Slicing Platform for O-RAN,” in *Proceedings of ACM Workshop on Open and AI RAN*, Washington, DC, USA, November 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3636534.3701544>

[5] A. Lacava, M. Polese *et al.*, “Programmable and customized intelligence for traffic steering in 5g networks using open ran architectures,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, pp. 1–16, 2023.

[6] A. Feraudo, S. Maxenti *et al.*, “xDevSM: Streamlining xApp Development With a Flexible Framework for O-RAN E2 Service Models,” in *Proceedings of ACM WiNTECH*, Washington, DC, USA, November 2024.

[7] FlexRIC, “FlexRIC Grafana development branch,” 2025, accessed: Apr. 2025. [Online]. Available: https://gitlab.eurecom.fr/mosaic5g/flexric/-/tree/aymanfatich?ref_type=heads

[8] Open Air 5G, “Collects RAN and Core Metrics with Prometheus,” 2025, accessed: Apr. 2025. [Online]. Available: <https://lists.eurecom.fr/sympa/arc/openair5g-user/2025-02/msg00081.html>

[9] C.-F. Hung, C.-H. Tseng, and S.-M. Cheng, “Anomaly detection for mitigating xapp and e2 interface threats in o-ran near-rt ric,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 6, pp. 1682–1694, 2025.

[10] O-RAN Software Communit, “O-RAN SC K Release Documentation,” 2025, accessed: Mar. 2025. [Online]. Available: <https://docs.o-ran-sc.org/en/latest/index.html>

[11] O-RAN Alliance, “O-RAN Alliance Working Group 6, (O-RAN Alliance, Alfter, Germany, document O-RAN.WG6.CAD-v08.01 Technical). O-RAN cloud architecture and deployment scenarios for O-RAN virtualized RAN 8.01 (2025),” 2025, accessed: Fev 2025. [Online]. Available: [\url{https://orandownloadswb.azurewebsites.net/specifications}](https://orandownloadswb.azurewebsites.net/specifications)

[12] “TR 38.801: Study on New Radio Access Technology; Radio Access Architecture and Interfaces (Release 14),” 3GPP, Tech. Rep. TR 38.801, 2017, <https://www.3gpp.org/DynaReport/38801.htm>.

[13] “O-RAN.WG4.CUS.0: Open Fronthaul Control, User and Synchronization Plane Specification,” O-RAN Alliance, Tech. Rep. O-RAN.WG4.CUS.0, March 2023, available at <https://www.o-ran.org/specifications>.

[14] O-RAN Alliance, “O-RAN Alliance Working Group 3, (O-RAN Alliance, Alfter, Germany, document O-RAN.WG3.TS.E2AP-R004-v07.00 Technical). O-RAN E2 Application Protocol (E2AP) 7.0 (2025),” 2025, accessed: Fev 2025. [Online]. Available: [\url{https://orandownloadswb.azurewebsites.net/specifications}](https://orandownloadswb.azurewebsites.net/specifications)

[15] —, “O-RAN Alliance Working Group 3, (O-RAN Alliance, Alfter, Germany, document O-RAN.WG3.TS.E2SM-R004-v07.00 Technical). O-RAN E2 Service Model (E2SM) 7.0 (2025),” 2025, accessed: Fev 2025. [Online]. Available: [\url{https://orandownloadswb.azurewebsites.net/specifications}](https://orandownloadswb.azurewebsites.net/specifications)

[16] Zabbix LLC, “Zabbix,” 2025, accessed: May 2025. [Online]. Available: <https://www.zabbix.com/br/pr/pr411>

[17] OSA, “About the OpenAirInterface Software Alliance,” <https://openairinterface.org/about-us/>, 2025, accessed: Fev 2025.

[18] —, “OAI 5G RAN Project Group,” <https://openairinterface.org/oai-5g-ran-project/>, 2024, accessed: May 2025.

[19] —, “OAI-5G Core Network (CN) project group,” 2024, accessed: May 2025. [Online]. Available: <https://openairinterface.org/oai-5g-core-network-project/>

[20] Mosaic5G, “FlexRIC,” 2025, accessed: May 2025. [Online]. Available: <https://gitlab.eurecom.fr/mosaic5g/flexric>