

Implementação de Estratégias de *Handover* em um Ambiente de Simulação para Open RAN

Gabriel de C. Ferreira¹, Priscila Solís Barreto¹,
Eduardo A. P. Alchieri¹ e Paulo H. P. de Carvalho²

¹Departamento de Ciência da Computação (CIC)
Universidade de Brasília (UnB) – Brasília – DF – Brasil

²Departamento de Engenharia Elétrica (ENE)
Universidade de Brasília (UnB) – Brasília – DF – Brasil

{gabriel.carvalho,pris,alchieri}@unb.br, paulo@ene.unb.br

Abstract. *The Open RAN (O-RAN) architecture promotes the Radio Access Network (RAN) disaggregation, by using non-proprietary interfaces and introducing intelligent RAN controllers (RICs). The O-RAN presents several research challenges, primarily related to the RIC applications that optimize the RAN performance. Handover is a fundamental element defined in the O-RAN use cases. In this work, we study the O-RAN architecture and propose a mechanism of handover. The ns-3 simulator was updated to support the O-RAN handover process. Simulation results show that the handover can be managed remotely by the RIC without severely impacting the service. Alternatively, there is an excessive number of requests if the cell triggers the handover and offloads the target cell decision to the RIC.*

Resumo. *A arquitetura Open RAN (O-RAN) promove a desagregação das Redes de Acesso de Rádio (RANs em inglês) através de interfaces não proprietárias e controladores inteligentes da RAN (RICs, em inglês). A O-RAN enfrenta vários desafios, principalmente relacionados às aplicações dos RICs que otimizam o desempenho da RAN. Neste artigo, apresentamos um estudo da arquitetura O-RAN e uma proposta de mecanismo de handover (HO), elemento fundamental em redes móveis. O handover O-RAN foi adicionado ao simulador ns-3. Os resultados de simulação mostram que o HO pode ser gerido pelo RIC, sem prejudicar severamente o serviço. Alternativamente, há sobrecarga do canal de controle caso a célula dispare o HO e o RIC decida a célula de destino.*

1. Introdução

As novas gerações de redes móveis incorporaram estruturas de controle e gerenciamento em que alguns dos elementos-chave são os procedimentos e protocolos de gerenciamento e orquestração [3GPP 2021]. Nas redes móveis, 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. A iniciativa O-RAN, liderada pela O-RAN Alliance¹, aborda esse paradigma ao propor o desenvolvimento de

¹<https://www.o-ran.org>

uma arquitetura padronizada para promover a desagregação horizontal e padronização de interfaces RAN, de forma a viabilizar a interoperabilidade de equipamentos de vários fornecedores [Polese et al. 2022].

Espera-se que adoção da O-RAN tenha um impacto no mercado global de telecomunicações, aumentando o número de fornecedores, permitindo maior competição e inovação, além de redução de Custo Total de Propriedade (TCO em inglês), em torno de 30% no curto prazo [Wypiór et al. 2022]. Entretanto, existem vários desafios técnicos para a O-RAN se transformar em realidade, com destaque para o papel fundamental tanto dos controladores inteligentes da RAN, que empregam fluxos de trabalho embasados em aprendizagem de máquina, quanto dos microsserviços denominados *rApps* e *xApps*, que consistem em aplicações que dão suporte aos controladores na definição e execução de políticas de otimização e controle dos elementos da rede [O-RAN Alliance 2022a].

Nas redes móveis, o *Handover* (HO) é considerado crítico para o gerenciamento de mobilidade, permitindo que um dispositivo troque sua conexão de uma célula para outra, idealmente sem interrupção [Tayyab et al. 2019]. O uso de ondas milimétricas no 5G requer métodos de HO eficientes, dado que estas sofrem de maiores perdas, causando o aumento na taxa de HO, de interrupções e de degradação do serviço [3GPP 2021]. No caso da arquitetura O-RAN, a O-RAN Alliance especificou um total de 22 casos de uso e definiu a otimização do HO como um elemento fundamental para alguns destes, a saber [O-RAN Alliance 2022f]: (a) gerenciamento dinâmico de HO baseado em contexto para Veículo-para-tudo (V2X); (b) alocação dinâmica de recursos de rádio para Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs em inglês); (c) otimização de direcionamento de feixe em Múltiplas-Entradas e Múltiplas-Saídas (MIMO) massivo; (d) gerenciamento e predição de congestionamento de tráfego; e (e) gerenciamento e otimização de consumo de energia.

Embora exista um forte interesse no avanço das especificações da O-RAN, o padrão ainda não está totalmente definido e existem muitos desafios técnicos ainda a serem extensamente avaliados [Polese et al. 2022]. As plataformas de experimentação disponíveis ainda não estão maduras para avaliar os diferentes casos de uso [Solis et al. 2022, Niknam et al. 2020] definidos pela O-RAN Alliance. Grande parte das pesquisas atuais em O-RAN apresentam soluções ou resultados em ambientes de simulação restritos ou plataformas parcialmente adaptadas à arquitetura O-RAN [Bonati et al. 2022, Polese et al. 2022], que em muitos casos, tem funcionalidades reduzidas e processos ainda complexos ou pouco documentados de instalação e configuração.

Com o objetivo de contribuir na pesquisa e desenvolvimento de aplicações nos controladores inteligentes da RAN e de facilitar a avaliação destas soluções, neste trabalho é proposta uma nova estratégia de HO, desenvolvida em um ambiente de simulação adaptado dentro do simulador ns-3 [CTTC 2014], para o qual foram desenvolvidas as funcionalidades dos Controladores Inteligentes da RAN (RICs em inglês) e suas interfaces, conforme as especificações O-RAN. Dessa forma, este trabalho apresenta as seguintes contribuições científicas: (a) definição e avaliação de uma *xApp* para otimização do HO em uma arquitetura O-RAN, com análise comparativa de fontes de disparo e decisor, que possa ser útil ao padrão em desenvolvimento dessa arquitetura; (b) definição e implementação de um ambiente de simulação, de código aberto, que permita customizar de forma simples e prática a avaliação de *xApps* e *rApps* a serem executadas em RICs e suas interfaces, conforme as especificações O-RAN.

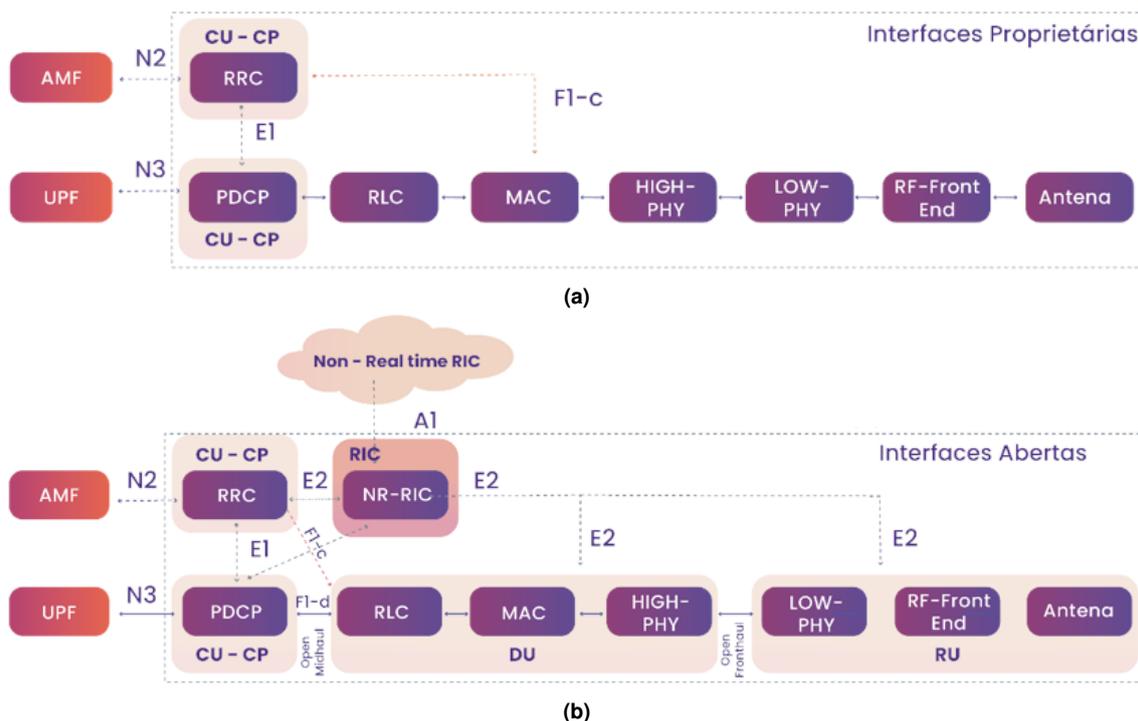


Figura 1. Blocos Lógicos da RAN conforme 3GPP (a) e O-RAN com split 7.2x (b)

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta a fundamentação teórica. A Seção 3 apresenta a proposta deste trabalho. A Seção 4 apresenta e analisa os resultados experimentais. Finalmente, a Seção 5 apresenta as conclusões e trabalhos futuros desta pesquisa.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Elementos da Arquitetura O-RAN

A RAN é composta por 6 blocos lógicos, que interligam os canais de controle e dados desde o núcleo 5G (AMF e UPF) até os Equipamentos de Usuários (UEs) [Habibi et al. 2019]. A Figura 1-a mostra a arquitetura da RAN do 5G conforme especificada pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) [3GPP 2021]. Os canais de controle entram na RAN pela camada de Controle de Recursos de Rádio (RRC) utilizando a interface N2, responsável por gerenciar e supervisionar todas as conexões da RAN com o UE. A camada RRC é responsável por controlar (criar, modificar e eliminar) fatias da rede, controlar os algoritmos de agendamento e filas do envio de pacotes, controlar os recursos de rádio e alocação de banda para as fatias, realizar HO, entre outras funções. A camada RRC ainda controla alguns canais de sinalização, que trafegam na rede pelas interfaces lógicas de controle E1 e F1. Além dessas funções, a camada RRC também gera relatórios de performance de cada fatia, de forma a serem utilizados pelas instâncias superiores de orquestração da rede.

Os canais de dados chegam à RAN pela camada de Protocolo de Convergência de Dados de Pacotes (PDCP), que recebe e mapeia a fatia na qual os pacotes recebidos são pertencentes. Em sequência, os pacotes são cifrados e são encapsulados, para serem roteados para a camada *Radio Link Control* (RLC). Os pacotes de canais de controle

provenientes do RRC também passam pela camada PDCP. Ao receber os pacotes, 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 e podem ser encaminhados para o *Medium Access Control* (MAC) de forma transparente. Já os canais de controle da RAN são encaminhados para o MAC. Após o pacote de dados ou de sinalização chegar na camada MAC, este entrará na fila de transmissão relativo à sua fatia e será mapeado de acordo com o canal lógico e de transporte. Finalmente, a camada MAC envia o pacote para a camada física e de *Radio Frequency* (RF), onde ocorre a modulação, multiplexação, direcionamento de feixe, entre outras operações. Por fim, o pacote chega na antena onde é encaminhado para o UE.

Em redes legadas, como o 4G, todos os blocos funcionais até a camada MAC, descritos anteriormente, eram implementados dentro de uma única estrutura física, denominada de *Base Band Unit* (BBU). Entretanto, o 3GPP sugeriu a divisão da BBU em duas unidades de processamento: a Unidade Centralizada (CU) e a Unidade Distribuída (DU). Além desta divisão mais comum, o CU ainda pode ser dividido entre a parte de controle com a camada RRC (CU-CP) e a parte de dados com a camada PDCP (CU-UP). Essa divisão é conhecida como split 7.2, pois a quebra ocorre logo após a camada PDCP (Figura 1-a). A camada PDCP possui funcionalidades de roteamento, logo pode estar conectado a vários RLCs ao mesmo tempo.

Para interligar os elementos DU e CU, o 3GPP definiu a interface lógica F1 (F1-c e F1-d para canais de controle e dados, respectivamente). Essa interface opera dentro da camada de transporte denominada *midhaul*. Já entre o DU e RU, tem-se a interface do *fronthaul*. A segunda divisão mais comum que ocorre na RAN do 5G é na camada física, conhecido como split 7.x. Neste split, parte das funcionalidades da camada física ficam no DU (High-PHY) e parte no Unidade Remota (RU) (Low-PHY). Quando ambos splits são realizados, a rede é denominada rede split 7.2x. Apesar disto, muitas empresas que vendem equipamentos de RAN ainda utilizam interfaces ou extensões proprietárias no *midhaul* e *fronthaul* [Gabriel and Kompany 2021], impedindo a interoperabilidade de equipamentos de diferentes fabricantes.

A Figura 1-b mostra a proposta O-RAN, que define interfaces abertas para permitir a interoperabilidade dos blocos lógicos da RAN e também da plataforma de controle e gerenciamento da RAN. Dessa forma, a O-RAN não é uma nova tecnologia em si, mas uma proposta de combinação de tecnologias existentes que permitem o desenvolvimento de componentes tecnológicos que se comunicam por meio de interfaces abertas e padronizadas. As interfaces entre os elementos são padronizadas de acordo com a arquitetura e especificações da O-RAN Alliance, o que permite que os componentes de hardware e software sejam fornecidos por diferentes fabricantes.

É importante notar na Figura 1-b que a O-RAN incluiu dois RICs. O primeiro RIC atua no controle da célula em intervalos próximos de tempo real e é chamado de *Near Real-Time* ou *near-RT* RIC. Esta atuação se dá por meio de decisões que tipicamente seriam tomadas nos diversos blocos lógicos que compõem a RAN, como: alocação de recursos, controle de acesso, troca de célula primária por meio de *handover*, dentre outros. O segundo RIC tem atuação de controle em intervalos mais longos de tempo que não tempo real, e é chamado de *Non Real-Time* ou *non-RT* RIC. A atuação do RIC de não tempo real (non-RT RIC) se dá por meio do monitoramento do desempenho, da configuração das

políticas executadas pelo RIC próximo de tempo real (near-RT RIC), e do treinamento de modelos baseados em aprendizagem de máquina. Esses dois elementos são propostos para a implementação de controles com laço fechado, utilizando dados coletados e fluxos de trabalho de inteligência artificial para a tomadas de decisão[Bonati et al. 2022].

2.2. Controladores Inteligentes da RAN

O non-RT RIC, como elemento de orquestração e gerenciamento de serviços possui uma visão geral da RAN, por meio da coleta e da análise de dados dos diferentes elementos que a compõem. Com o apoio dos *rApps*, fornece, em escala de tempo superior a 1 segundo, gerenciando a configuração dos elementos da RAN e políticas de controle do near-RT RIC, por meio da interface A1. Também fornece informações de enriquecimento, modelos e gerenciamento de modelos de IA/ML para o near-RT RIC, que, por sua vez, retroalimenta o non-RT RIC com informações relacionadas às políticas implantadas. O non-RT RIC, portanto, serve como uma plataforma de software para *rApps* e para a otimização de alto nível da RAN, no que concerne a gerenciamento e controle da rede de acesso via rádio [Dryjański et al. 2021, Lacava et al. 2022].

O near-RT RIC é uma plataforma de software que permite o controle dos elementos da RAN por meio de *xApps*. Permite a otimização de controle dos elementos da RAN em escala de tempo entre 10 ms e 1 segundo, por meio da interface E2. Os *xApps* são capazes de otimizar o HO, monitorar os enlaces de rádio, gerenciar mobilidade de usuários, balancear carga de tráfego de dados, atualizar políticas de fatiamento de rede, realizar *traffic steering* e gerenciamento de interferências. A interface E2 consiste em um ciclo fechado dentro do domínio RAN, sendo usada a partir do near-RT RIC para enviar informações de controle e de políticas do RIC aos nós pela interface E2 e para obter retroalimentação desses nós para o near-RT RIC [Dryjański et al. 2021, O-RAN Alliance 2022a].

Os *xApps* são microsserviços empregados para o gerenciamento de recursos de rádio por meio de interfaces padronizadas [O-RAN Alliance 2022a]. A partir de dados de desempenho medidos na RAN, os *xApps* são capazes de realizar ações de controle na própria RAN. É importante ressaltar que apesar de fazer parte do near-RT RIC, os *xApps* são estruturas independentes, podendo ser fornecidas por terceiros. Por sua vez, os *rApps* são microsserviços projetados para serem executados no non-RT RIC e, portanto, fazem parte do plano de gerenciamento e controle. Os *xApps* e *rApps* possuem conceitos semelhantes, porém operam em escalas de tempo diferentes, enquanto um *xApp* é capaz de controlar diretamente uma função interna a elementos da RAN, um *rApp* é usado no non-RT RIC para apoiar na criação de políticas, que influenciam indiretamente elementos da RAN.

2.3. Estratégias de *handover* na O-RAN

Para ampliar a eficiência espectral da rede 5G, é possível diminuir a cobertura das estações rádio base/*5G Node B* (gNB) e melhorar o reaproveitamento de frequência. No entanto, essa densificação aumenta a taxa de HO, ou seja, a mudança sucessiva de gNB para um usuário em movimento.

A mobilidade nas redes celulares pode ser identificada em dois cenários: o primeiro quando a UE está em IDLE_MODE e deve selecionar uma célula, e o segundo quando a UE está em CONNECTED_MODE e identifica uma célula que atende melhor

do que a célula atual e executa o HO. Nas tecnologias 4G e 5G, tem-se utilizado para o HO um esquema *break-before-make*, entretanto por serem redes ultradensas, não há tempo para sinalização extensa de HO, o que impõe a necessidade de procedimentos HO mais eficientes [Tayyab et al. 2019].

Conforme definido pelo 3GPP, o mínimo de informação requerida para determinar a necessidade do HO é o conjunto de medições de potências recebidas pelo UE dos diversos gNB em suas proximidades [3GPP 2022]. As diferentes técnicas de disparo de HO usam então o histórico de medição de potências, e também Métricas Chave de Desempenho (KPM em inglês), para decidir que UE deve ser transferida via HO para outro canal, chamada intra-gNB HO, ou outra célula, chamada inter-gNB HO.

Um modelo eficiente de HO tem o objetivo de atribuir a cada UE o acesso a um gNB adequado, de modo a maximizar a vazão. As redes convencionais 3GPP implementam a técnica de disparo de HO de maneira distribuída, em que cada gNB toma decisões para os UEs a ele conectados com base na frequência de certos eventos, como os disparos quando a potência recebida pelo UE de gNBs vizinhos e seu gNB primário seja maior ou menor que um limiar configurável, podendo contar também com histerese. Esses eventos são chamados pelo 3GPP de A2, A3 e A4 [3GPP 2022]. A dependência exclusiva nestes eventos para controlar o HO pode resultar no aumento de sua frequência, resultando em degradação do serviço.

Na arquitetura O-RAN, com a desagregação das funções dos gNB, uma implantação massiva leva a uma arquitetura "sem células". A otimização do controle de acesso do usuário pode ser inviável devido à sobrecarga e à complexidade da sinalização. Portanto, o disparo dos HOs pode ser centralizado nos controladores inteligentes que possuem uma visão global da RAN. Um exemplo disso é a possibilidade de o non-RT RIC identificar sequências de HOs que causam degradação do serviço, aprender melhores alternativas por meio de um modelo de Aprendizado de Máquina (ML) treinado, que depois é utilizado por near-RT RICs que monitoram a mobilidade em tempo real de UEs e previnem que haja degradação do serviço devido a HOs indesejados.

Um outro exemplo é a aplicação do conceito de Redes Auto-Organizáveis (SON) e Balanceamento de Carga Móvel (MBL) conforme definida pelo 3GPP para melhorar a experiência do usuário, ao equilibrar a carga por meio da otimização dos gatilhos de HO. O non-RT RIC pode monitorar a experiência do usuário por medições na UE e a utilização de recursos. O non-RT RIC avalia o desempenho em função dos requisitos de nível de serviço esperados. Por meio dos RICs na arquitetura O-RAN, as estatísticas de qualidade de serviço da rede de rádio podem ser utilizadas para melhorar o desempenho da rede e da experiência do usuário ao otimizar o disparo de HOs.

2.4. Desafios e Trabalhos Relacionados

Algumas redes O-RAN já foram implantadas comercialmente, quando não precisam lidar com a interoperabilidade de sistemas legados. Nessas redes O-RAN, grande parte das operadoras tem habilitado as interfaces parcialmente e muitas não incluem ainda o RIC, dado que a arquitetura O-RAN ainda está em fase de especificação e avaliação [TECKNEXUS 2022].

Na pesquisa acadêmica, propostas de HO para O-RAN por meio de *xApps* também são recentes. No trabalho de [Kumar et al. 2020], os autores definem para uma rede O-

RAN a aplicação do conceito de *Automatic Neighbor Relation* (ANR) proativa com o suporte de modelos inteligentes baseada em ML para melhorar os HOs em gNBs. Entretanto, o trabalho é restrito à uma proposta e sua arquitetura, sem demonstração em uma plataforma experimental. Em [Cao et al. 2022], os autores propõem um esquema inteligente de controle de acesso de usuário com aprendizado por reforço profundo para o RIC em um ambiente federado. O modelo mostra uma maximização da vazão em cada UE e diminuição de HOs frequentes. Embora a proposta como método de otimização tem um forte potencial de ser integrada à padronização da O-RAN, a avaliação foi realizada em um simulador customizado, sem integração a uma rede móvel O-RAN. De maneira similar, os autores em [Prananto et al. 2022], propõem um algoritmo de ML para HO que mostra melhor desempenho em comparação a algoritmos tradicionais e que poderia ser implementado em um *xApp*. Entretanto, os resultados experimentais são restritos à implementação de uma rede neural em MATLAB e a um protótipo de um near-RT RIC usando vetores autorregressivos nesse mesmo ambiente. O trabalho de [Papa et al. 2022] realiza uma investigação do efeito do plano de controle de uma RAN definida por software no desempenho do plano de usuário, com o uso de um simulador feito a partir da modelagem do comportamento de controladores (near-RT RIC) de código aberto. Os resultados mostram que o uso de um único near-RT RIC pode ser sobrecarregado caso haja um número excessivo de UEs sendo controlados. A distribuição de requisições de HO entre diversos controladores melhora o desempenho do usuário em pelo menos 20% para vazão e 140% para atraso em comparação com uma abordagem de controlador único.

Dentre os trabalhos citados, todos utilizaram simuladores com modelagens simplificadas de uma rede 3GPP e de um RIC. Isto é esperado, vide a curva de aprendizado, complexidade e recursos computacionais necessários para a montagem de uma rede real ou emulada, e a indisponibilidade de um simulador de código aberto. Recentemente, foi apresentada a versão inicial de um módulo que serve de interface entre um near-RT RIC real e a RAN simulada dentro do simulador ns-3 [Lacava et al. 2022], com o objetivo de reduzir a barreira de acesso à pesquisa com O-RAN. Diferentemente de [Lacava et al. 2022], colocamos também o near-RT RIC e *xApps* dentro da simulação, permitindo maior agilidade no desenvolvimento, depuração, testes e experimentação. A utilização de um simulador com modelagem mais precisa das diversas camadas de rede da pilha LTE também traz mais realismo às simulações, expondo comportamentos inesperados decorrentes, por exemplo, de enfileiramento, falhas de transmissão e interferências.

3. Proposta de Implementação de uma Solução de *handover* na Arquitetura O-RAN

Conforme as especificações da O-RAN Alliance [O-RAN Alliance 2022b], a intervenção do near-RT RIC no procedimento de HO se dá de duas formas. Na primeira, o HO é disparado pelo eNB (equivalente do gNB em uma rede 4G), através de uma mensagem *RIC Indication* [O-RAN Alliance 2022b, O-RAN Alliance 2022e], como mostrado na Figura 2. Na segunda, o HO é disparado pelo próprio RIC ou algum de seus *xApps*. Como o comportamento interno do RIC e *xApps* não é padronizado pela O-RAN Alliance, utilizamos a mesma mensagem usada na primeira forma, porém partindo do *xApp* e com endereço de origem do eNB (*spoofing*) que iniciará o HO, como mostrado na Figura 3.

Após o recebimento do RIC *Indication*, o near-RT RIC aceita (RIC *decision=Accept*) por padrão os pedidos, a menos que um *xApp* associado ao serviço reque-

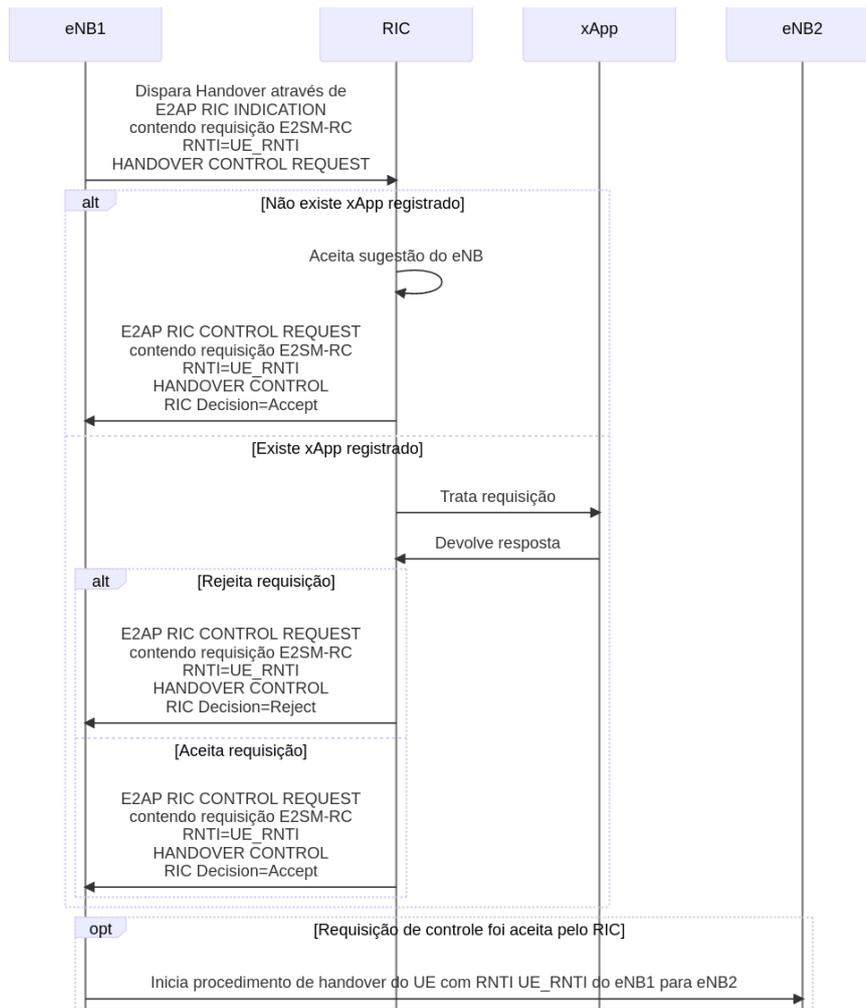


Figura 2. *handover* disparado pelo eNodeB

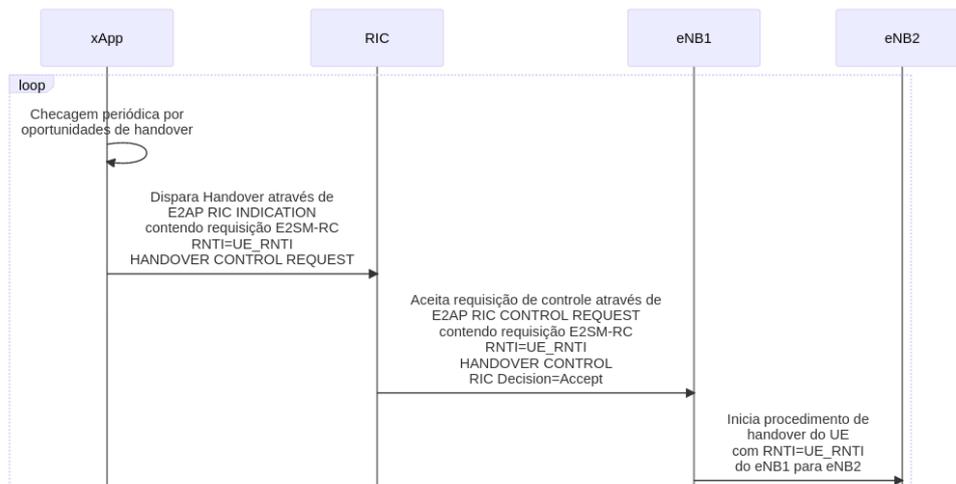


Figura 3. *handover* disparado pelo xApp do near-RT RIC

rido (*Handover Control* neste caso) esteja registrado. Caso haja um $xApp$, ele é inquerido sobre o pedido, podendo aceitar (RIC decision=Accept) ou rejeitar a requisição (RIC decision=Reject). Nos casos em que a requisição de controle é aceita, escolhe-se também a decisão tomada. No caso do *Handover Control*, esta decisão é a célula de destino para a qual um UE deve ser transferido. Tanto a aceitação da requisição de controle quanto a decisão sobre a célula de destino são enviadas de volta ao eNB por meio de uma ordem de controle encapsulada em um *RIC Control Request*.

As soluções de HO implementadas são: a A2A4, padrão do ns-3; e duas soluções propostas neste trabalho, uma baseada em K-Means e outra no MaxRsrq, sendo RSRQ a sigla em inglês para a Qualidade Recebida do Sinal de Referência, métrica similar à Relação Sinal-Ruído (SNR). Em todos os casos, quando a célula origem e a de destino forem a mesma, o disparo do HO é cancelado. A estratégia MaxRsrq (Equação 1) seleciona como célula de destino para um UE, x , a célula cujo valor de potência medido é máximo ($argmax$) dentre os valores medidos pelo UE ($y(x)$). A estratégia A2A4 (Equação 2) também se comporta como o MaxRsrq, exceto quando a diferença entre a potência recebida da célula de destino, b , e da célula atual, a , são inferiores a um limiar t , onde o disparo do HO é cancelado. Finalmente, a estratégia do K-Means (Equação 3) busca a célula x com menor valor ($argmin$) de distância d_i até uma das k centroides c_i encontradas pelo K-Means, representando as diferentes células da RAN. O K-Means é refeito periodicamente, a partir das medições mais recentes de todos os UEs conectados na rede.

$$maxRsrqTargetCell(x) = argmax(y(x)) \quad (1)$$

$$a2a4TargetCell(x) = \begin{cases} maxRsrqTargetCell(x) & \text{se } (b - a) > t \\ -1 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

$$kmeansTargetCell(x) = argmin((d_i(y(x), c_i)) \forall i \in [0, k]) \quad (3)$$

Quando o eNB recebe a ordem de controle, ele executa o comando, seja para interromper um HO potencial, seja para iniciá-lo. As mensagens de confirmação ou erro da finalização da ordem de controle ainda não foram implementadas, utilizando-se eventos do próprio simulador para avaliar o sucesso dos procedimentos.

Foram implementadas a infraestrutura publicador-subscritor requerida pela especificação da O-RAN em [O-RAN Alliance 2022c]. Seguida de sua especialização na forma de $xApps$ e aplicações que implementam o Protocolo de Aplicação E2 (E2AP), permitindo comunicação do near-RT RIC com $xApps$ e com nós E2 (eNB, gNB, CU, DU). No simulador, as aplicações E2AP são instaladas nos nós E2 (eNB) e se registram ao RIC. O funcionamento das camadas do eNB é inalterado, chamando condicionalmente a implementações do E2AP para envio de KPMs ou realizar requisições de controle para o near-RT RIC. As requisições de controle têm fácil implementação, uma vez que o simulador pode enviar a requisição para o RIC e reagendar o evento de controle atual para o futuro, onde se espera ter obtido a resposta do RIC.

Na aplicação E2AP, foram implementadas as seguintes mensagens, conforme [O-RAN Alliance 2022c]: RIC Subscription Request/Response/Failure, RIC Subs-

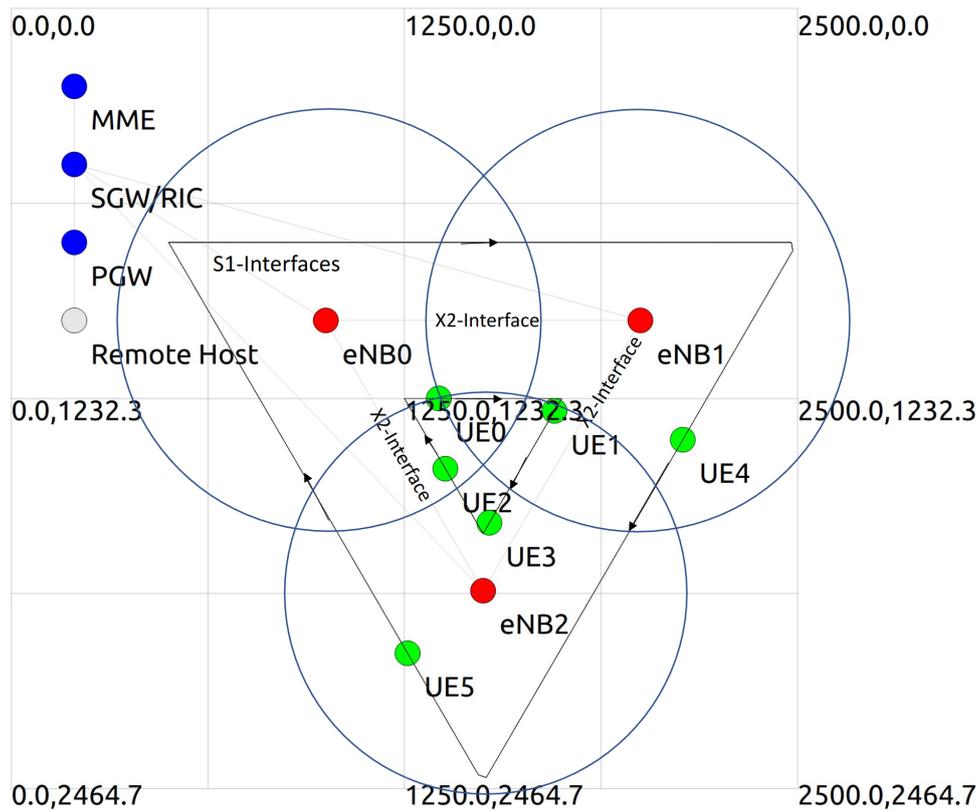


Figura 4. Topologia simulada

cription Delete Request/Response/Failure, RIC Control Request, E2 Node Configuration Update/Acknowledge/Failure, RIC Indication. Acima das mensagens definidas pelo E2AP, foram implementados os serviços de coleta periódica das KPMs requeridas pelo processo de HO segundo [3GPP 2017, O-RAN Alliance 2022d] e parte do E2SM-KPM: HO.SrcCellQual.RSRP, HO.SrcCellQual.RSRQ, HO.TrgtCellQual.RSRP e HO.TrgtCellQual.RSRQ. Foram também implementados os serviços relativos ao HO, parte do E2SM-RC, conforme [O-RAN Alliance 2022e].

4. Análise de Simulações

4.1. Cenários de Simulação

A topologia do cenário de simulação (Figura 4) permite avaliar o desempenho do HO inter-eNBs subordinados a uma mesma Entidade de Gerenciamento de Mobilidade (MME) [Tayyab et al. 2019], executados através da interface X2. O cenário é composto por três *Evolved Node-Bs* (eNBs) (vermelho) dispostos de maneira equidistante. Os componentes do núcleo da rede LTE (PGW, SGW, MME) são mostrados em azul na lateral superior esquerda. O near-RT RIC e seus *xApps* foram instalados no *Serving Gateway* (SGW). Os seis UEs (verde) são separados em dois grupos, traçando movimentos triangulares dentro e fora do triângulo formado pelos eNBs. As velocidades de movimentação foram escolhidas conforme indicado em [ITU 2017]. Pedestres, $\leq 10km/h$, são representados pelos UE0 ($0.2m/s$) e UE1 ($1m/s$). Veículos, $\leq 120km/h$, são representados pelos UE2 ($5m/s$), UE3 ($10m/s$), UE4 ($5m/s$) e UE5 ($30m/s$).

São comparados seis cenários distintos. O primeiro cenário é composto de uma

rede LTE padrão, sem interferência do RIC. Neste caso, as decisões de HOs são tomadas pelo algoritmo de HO do eNB e executadas imediatamente. Todos os cenários seguintes são compostos de redes LTE com O-RAN. O segundo, terceiro e quarto cenários seguem o comportamento mostrado na Figura 2, com disparos de HO iniciados pelo eNB. No segundo cenário, a decisão que seria feita por um $xApp$ é substituída pela sugestão feita pelo próprio eNB na mensagem de disparando do HO. No terceiro e quarto cenários, dois $xApps$ desenvolvidos escolhem a decisão da célula de destino baseado em suas políticas internas, ou rejeitam o pedido de HO, impedindo que o HO seja iniciado. O quinto e sexto cenários tem os $xApps$ como fontes de disparo do HO, conforme mostrado na Figura 3.

4.2. Métricas de Avaliação do Desempenho e Confiança Estatística

As métricas avaliadas são o número de disparos efetuados (requisições de controle do RIC) e disparos cancelados (requisições de controle rejeitadas), utilizados para avaliar a eficiência do uso do canal de controle. O número de *handovers* iniciados e concluídos também foram analisados para avaliar se os *handovers* estão sendo executados corretamente e em tempo hábil. Por fim, o número de conexões estabelecidas foi obtido para indicar se houve perda de conexão, devido à falta de um HO.

As simulações foram executadas 20 vezes para cada cenário, com *seeds* gerados aleatoriamente. Os resultados serão mostrados com as margens de erro para um intervalo de confiança de 95%. As simulações têm duração de 10 minutos, com uma transmissão por UE a cada 1 segundo, mantendo uma conexão ativa com um servidor remoto.

4.3. Resultados e Discussões

Os resultados coletados nas simulações estão dispostos na Tabela 1. A primeira linha é o caso de referência, sem O-RAN. Neste caso, o número de *handovers* iniciados foi estável em todas as simulações. O número de conexões estabelecidas foi de apenas 6, sendo uma por UE, conforme esperado. A segunda linha, já com o RIC sendo adicionado e aumentando a latência até o início dos *handovers* em aproximadamente 10 ms não causou nenhuma diferença no número de *handovers* concluídos ou conexões estabelecidas. É um resultado interessante que mostra que o atraso de comunicação com o near-RT RIC não deve impactar, por si só, no desempenho da RAN.

Tabela 1. Resultado de diferentes técnicas de *handover*

Fonte do Disparo	Decisor	Disparos		<i>Handovers</i>		Conexões Restabelecidas
		Efetuados	Cancelados	Iniciados	Concluídos	
	eNB			30±0	30±0	0±0
eNB	RIC+eNB	30±0	0	30±0	30±0	0±0
eNB	$xApp$ K-Means	1802±102	1784±102	17±1	17±1	24±1
eNB	$xApp$ MaxRsrq	1528±90	1512±90	16±0	16±0	18±1
RIC	$xApp$ K-Means	125±24	0	122±24	122±24	134±25
RIC	$xApp$ MaxRsrq	18±1	0	18±1	18±1	20±0

Na terceira linha, temos os resultados de um dos *xApps* construídos utilizando a técnica K-Means de ML. Neste caso, o número de disparos e cancelamentos é grande. Isto ocorre porque o eNB está acionando o RIC de acordo com a política do algoritmo A2A4, usado também nos dois primeiros cenários, mas o *xApp* julga o *handover* desnecessário em razão de sua política interna baseada no K-Means. Para uso eficiente do canal de controle entre nós E2 e near-RT RIC, é necessário que ambas as políticas sejam coincidentes ou que o RIC tome as decisões sem ser acionado pelo eNB, como veremos adiante nos quinto e sexto cenários. Ainda neste terceiro cenário, o número de *handovers* iniciados e concluídos é menor que o caso de referência, porém o número médio de conexões reestabelecidas é próximo de 5 vezes por UE, indicando a interrupção do serviço por 4 vezes durante os 10 minutos simulados.

Na quarta linha, temos os resultados de outro cenário com um *xApp*, desta vez utilizando apenas o máximo Rsrq das células vizinhas ao UE que se deseja fazer *handover*. O número de disparos e cancelamentos continua alto, pelo mesmo motivo do caso anterior. O número de *handovers* iniciados e concluídos é menor, porém o número de conexões reestabelecidas também é menor, indicando superioridade à política do K-Means, ainda que seja pior que a política do A2A4 do caso de referência.

Na quinta linha, o resultado do *xApp* com K-Means mostra a forte redução do número de disparos de *handover*. Isto se deve a fonte do disparo, que deixa de ser o eNB conectado ao UE e passa a ser o próprio *xApp*. Por outro lado, o *xApp* iniciou mais *handovers*, devido à instabilidade do K-Means implementado e a falta de um intervalo de guarda ou algoritmo de saturação. A instabilidade resultou no efeito ping-pong, onde o *handover* era feito consecutivamente entre um conjunto de eNBs.

Na sexta e última linha, o resultado do *xApp* com MaxRsrq mostra uma redução ainda maior do número de *handovers* disparados e iniciados. Esta redução, porém, não se reflete no número de conexões restabelecidas, que também estão aumentadas quando comparada ao caso de referência.

5. Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo a respeito da arquitetura O-RAN e mecanismos de HO. Os resultados obtidos nos permitem concluir que o near-RT RIC proposto pela O-RAN Alliance não afeta negativamente o desempenho do procedimento de HO inter-eNB para velocidades compatíveis com pedestres e veículos. Também é possível afirmar que, caso o eNB seja a fonte dos disparos de HO, o mesmo deve ser configurado com a mesma política implementada pelo *xApp* no RIC para que haja uso eficiente do canal de controle. Já no caso do *xApp* atuar disparando *handovers*, é necessária uma implementação de política temporalmente estável, evitando o efeito ping-pong.

Como trabalhos futuros, planeja-se implementar novos *xApps* experimentando políticas com maior longo prazo, como por exemplo mantendo histórico de células próximas e suas potências percebidas por um UE ao longo de dias, permitindo a antecipação de seus movimentos.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente suportado pela FAP-DF e pela Softex/MCTI Futuro através dos projetos PLEDESIR e Residência em TIC 8, respectivamente.

Referências

- 3GPP (2017). Performance measurements Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) - 3GPP TS 32.425 version 14.1.0 Release 14. https://www.etsi.org/deliver/etsi_TS/132400_132499/132425/14.01.00_60/ts_132425v140100p.pdf. Accessed: 2022-10-04.
- 3GPP (2021). 5G performance measurements - 3GPP TS 28.552 version 16.10.0 Release 16. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/128500_128599/128552/16.10.00_60/ts_128552v161000p.pdf. Accessed: 2022-10-04.
- 3GPP (2022). Performance measurements Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) - 3GPP TS 36.331 version 17.2.0 Release 17. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136331/17.02.00_60/ts_136331v170200p.pdf. Accessed: 2022-12-04.
- Bonati, L., Polese, M., D'Oro, S., Basagni, S., and Melodia, T. (2022). Openran gym: Ai/ml development, data collection, and testing for o-ran on pawr platforms. *Computer Networks*, page 109502.
- Cao, Y., Lien, S.-Y., Liang, Y.-C., Chen, K.-C., and Shen, X. (2022). User access control in open radio access networks: A federated deep reinforcement learning approach. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(6):3721–3736.
- CTTC (2014). The LENA ns-3 LTE Module Documentation. [Online; accessed 28-February-2018].
- Dryjański, M., Kułacz, Ł., and Kliks, A. (2021). Toward modular and flexible open RAN implementations in 6g networks: Traffic steering use case and o-RAN xApps. *Sensors*, 21(24):8173.
- Gabriel, C. and Kompany, R. (2021). Open RAN: ready for prime time? https://www.analysysmason.com/contentassets/bf99e24c249e444fb5c03fd125aaa8/analysys_mason_open_ran_reality_apr2021_rdns0_rma18.pdf.
- Habibi, M. A., Nasimi, M., Han, B., and Schotten, H. D. (2019). A comprehensive survey of ran architectures toward 5g mobile communication system. *IEEE Access*, 7:70371–70421.
- ITU (2017). Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s). https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2410-2017-PDF-E.pdf.
- Kumar, H., Sapru, V., and Jaisawal, S. K. (2020). O-RAN based proactive ANR optimization. In *2020 IEEE Globecom Workshops (GC Workshops)*, pages 1–4. IEEE.
- Lacava, A., Polese, M., Sivaraj, R., Soundrarajan, R., Bhati, B. S., Singh, T., Zugno, T., Cuomo, F., and Melodia, T. (2022). Programmable and customized intelligence for traffic steering in 5g networks using open ran architectures. *arXiv:2209.14171*.
- Niknam, S., Roy, A., Dhillon, H. S., Singh, S., Banerji, R., Reed, J. H., Saxena, N., and Yoon, S. (2020). Intelligent o-ran for beyond 5g and 6g wireless networks. <https://arxiv.org/abs/2005.08374>.

- O-RAN Alliance (2022a). O-RAN Architecture Description v07.00. <https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/download?id=310>. Accessed: 2022-12-13.
- O-RAN Alliance (2022b). O-RAN Near-Real-time RAN Intelligent Controller Architecture & E2 General Aspects and Principles 2.02. <https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/download?id=262>. Accessed: 2022-10-04.
- O-RAN Alliance (2022c). O-RAN Near-Real-time RAN Intelligent Controller, E2 Application Protocol (E2AP) 2.02. <https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/download?id=165>. Accessed: 2022-10-04.
- O-RAN Alliance (2022d). O-RAN Near-Real-time RAN Intelligent Controller, E2 Key Performance Metrics Service Model (E2SM-KPM) 2.02. <https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/download?id=264>. Accessed: 2022-10-04.
- O-RAN Alliance (2022e). O-RAN Near-Real-time RAN Intelligent Controller, E2 RAN Control Service Model (E2SM-RC) 1.02. <https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/download?id=265>. Accessed: 2022-10-04.
- O-RAN Alliance (2022f). O-RAN Use Cases Detailed Specification v09.00. <https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/specifications>. Accessed: 2022-13-12.
- Papa, A., Kutsevol, P., Mehmeti, F., and Kellerer, W. (2022). Effects of SD-RAN control plane design on user quality of service. In *2022 IEEE 8th International Conference on Network Softwarization (NetSoft)*. IEEE.
- Polese, M., Bonati, L., D'oro, S., Basagni, S., and Melodia, T. (2022). Understanding o-ran: Architecture, interfaces, algorithms, security, and research challenges. *ArXiv*, abs/2202.01032.
- Prananto, B. H., Iskandar, and Kurniawan, A. (2022). O-RAN intelligent application for cellular mobility management. In *2022 International Conference on ICT for Smart Society (ICISS)*. IEEE.
- Solis, P., Ferreira, G. C., Jr., R. G. S., and de Carvalho, P. H. P. (2022). Uma análise do open RAN e os desafios da sua experimentação em plataformas de código aberto. In *Anais do XL Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*. Sociedade Brasileira de Telecomunicações.
- Tayyab, M., Gelabert, X., and Jantti, R. (2019). A survey on handover management: From LTE to NR. *IEEE Access*, 7:118907–118930.
- TECKNEXUS (2022). Current State of Open RAN-Countries and Operator Delployn and Trailing Open RAN. <https://tecknexus.com/5g-network/current-state-of-open-ran-countries-operators-deploying-trailing-open-ran/>. Accessed: 2022-13-12.
- Wypiór, D., Klinkowski, M., and Michalski, I. (2022). Open ran—radio access network evolution, benefits and market trends. *Applied Sciences*, 12:1–18.