

Metodologia para Geração de *Radio Environment Maps* de Redes 5G SA Privadas

Carlos Lima, Everaldo Costa, Matheus Dória, Paulo Silva, Ricardo Silva, Antonio Campos, Vicente Sousa e Augusto Neto

Resumo—Enquanto redes metropolitanas continuam sendo alvo comercial das operadoras, o 5G traz a perspectiva de redes privadas, geralmente com cobertura *indoor*. Nesse contexto, *site surveys* podem ser conduzidos visando maximizar o potencial da rede e garantir que ela atenda certas exigências de desempenho, como baixa latência e alta taxa de transmissão. Este trabalho tem o objetivo de apresentar uma metodologia de geração de *Radio Environment Map* (REM), construído a partir de métricas obtidas de um conjunto de medições em um laboratório da UFRN. Com tal metodologia, REMs de *Reference Signal Received Power* (RSRP) de uma rede 5G virtualizada com o OpenAirInterface foram construídos para discutir a qualidade do sinal 5G no laboratório.

Palavras-Chave—OpenAirInterface, 5G, *Radio Environment Map*, *Site Survey*.

Abstract—While metropolitan networks remain a commercial target for operators, 5G brings the perspective of private networks, usually with *indoor* coverage. In this context, *site surveys* can be conducted to maximize the network's potential and ensure that it meets specific performance requirements, such as low latency and high throughput. This paper aims to present a methodology for generating a *Radio Environment Map* (REM), built from metrics obtained from a set of measurements in a laboratory at UFRN. With this methodology, REMs of *Reference Signal Received Power* (RSRP) of a 5G network virtualized with OpenAirInterface were built to discuss the quality of the 5G signal in the laboratory.

Keywords—OpenAirInterface, 5G, *Radio Environment Map*, *Site Survey*.

I. INTRODUÇÃO

A quinta geração dos sistemas de telecomunicações (5G) representa um progresso significativo no campo das comunicações móveis. Com uma estrutura de rede flexível, capaz de atender a uma variedade de casos de uso, o 5G traz características inovadoras, como velocidades ultra rápidas, baixa latência e alta confiabilidade. Estas características permitem suportar uma ampla gama de aplicações, desde experiências imersivas em realidade virtual até redes de dispositivos de Internet das Coisas. Essa evolução está comumente associada a altos custos de implementação e operação da rede. Contudo, o 5G consegue empregar princípios de rede inovadores, como a virtualização e

Todos os autores são do centro de pesquisa *Leading Advanced Technologies Center of Excellence* (LANCE), da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, e-mails: {carlos.lima.106, everaldo.faustino.047, matheus.fagundes.067, paulo.eduardo.093, ricardo.queiroz.105}@ufrn.edu.br, {antonio.campos, vicente.sousa}@ufrn.br e augusto@dimap.ufrn.br.

Esse estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

arquitetura de Rede Definida por *Software*, do inglês *Software-Defined Network* (SDN) [1], [2].

Nesse contexto, o uso de soluções em *software* desempenha um papel crucial para superar desafios associados aos altos custos de implementação das redes 5G. Entre as soluções disponíveis, destacam-se as que são gratuitas e de código aberto, pois, além de serem úteis para a indústria, são fundamentais para estudos acadêmicos, nos quais orçamentos altos nem sempre estão disponíveis [3]. Um exemplo de *software* que segue essa premissa é o OpenAirInterface (OAI).

O OAI é um *software* de código aberto, que permite que pesquisadores e desenvolvedores implementem novas tecnologias patenteadas, sem renunciar a seus direitos de propriedade privada. Além disso, o uso desse *software* possibilita a implementação de redes 4G e 5G privadas em sua totalidade. Como o código do OAI implementa a sinalização padronizada pelo 3GPP, é possível usar dispositivos comerciais, como *smartphones*, para realizar experimentos de conectividade de ponta a ponta. Isso torna o *software* amplamente atraente no meio acadêmico e no setor privado, sendo o único requisito para a sua implantação o acesso a uma plataforma de Rádio Definido por *Software*, do inglês *Software-Defined Radio* (SDR), compatível com o código do OAI [4] e a licença para transmissão na faixa de frequências na qual se deseja operar.

Após a implantação, a análise de desempenho e de cobertura desses sistemas de telecomunicações é essencial para validar eficiência e qualidade, sendo a realização de *site surveys* uma prática amplamente adotada para esse fim. O *site survey* consiste em uma série de medições e coleta de dados para mapear a cobertura da rede, avaliar sua capacidade, medir os níveis de potência recebidos e identificar áreas de sombra e zonas de interferência. Essa abordagem permite identificar problemas de cobertura e desempenho, possibilitando ajustes para melhor desempenho da rede [5], [6].

Uma ferramenta que auxilia o *site survey* é o *Radio Environment Map* (REM), que reúne informações sobre a intensidade do sinal e o comportamento da propagação no ambiente, construindo um mapa colorido que proporciona uma visão geral da cobertura da rede. Essa visualização permite a análise de possíveis interferências, além de fornecer informações sobre a qualidade do sinal, provendo um conhecimento sobre o ambiente, do ponto de vista de propagação. Esse mecanismo é de extrema importância, tanto para análise quanto do desenvolvimento da rede [7].

A. Trabalhos Relacionados

Na bibliografia acerca de SDN, é possível encontrar alguns trabalhos que avaliam o desempenho e a usabilidade de redes móveis privadas estabelecidas com a infraestrutura de *software* de projetos com código aberto, como o OAI combinado com SDR.

Os autores de [8] propuseram uma aplicação de localização *indoor* baseada em medições de *Reference Signal Received Power* (RSRP) do equipamento do usuário, do inglês *User Equipment* (UE), de uma rede 4G estabelecida com três *Evolved Node Bs* (eNBs). Foi realizada uma comparação entre o classificador *k-nearest neighbors* e uma rede neural treinada, para dar suporte à localização baseada em impressão digital. Os testes efetuados demonstraram que a abordagem pode levar a resultados de posicionamento precisos, se os mapas de impressões digitais forem atualizados em intervalos regulares, capturando as variações do ambiente.

Em [9], os autores implementaram uma rede 4G com o *software* do projeto srsLTE (atualmente chamado de srsRAN), da *Software Radio Systems*, e analisaram parâmetros de cobertura e de desempenho do sistema, em cenários de transmissão *indoor* e *outdoor*. Foram conduzidas medições de RSRP, *Signal to Noise Ratio* (SNR) e de *Block Error Rate* (BLER) em diferentes distâncias entre o UE e a eNB, bem como para diferentes configurações da *Radio Access Network* (RAN), todavia não foram gerados mapas de cobertura.

O trabalho [3] conduziu testes de desempenho (taxa de transferência e latência) e de cobertura (RSRP, *Reference Signal Received Quality* (RSRQ) e *Signal to Interference plus Noise Ratio* (SINR) em uma rede 5G *Non-Standalone* (NSA). Os autores utilizaram uma aplicação de terceiros (Cellular-Pro Play) e, por meio de um *drive test*, obtiveram uma visualização espacial do desempenho das métricas analisadas.

Uma avaliação de desempenho (taxa de transferência e latência) e de cobertura (RSRP, RSRQ e SINR) de uma rede 5G *Standalone* (SA) foi feita em [10]. Os resultados expressam taxas de transferência da ordem de 390 Mbps e *Round Trip Time* (RTT) médio de 19,32 ms. A cobertura foi avaliada realizando duas medições de RSRP, RSRQ e SINR, em cada sala do cenário *indoor* avaliado, sendo feita uma medida na entrada e outra nos fundos de cada sala.

Este trabalho visa propor uma metodologia de construção de REM de RSRP de uma rede 5G *Standalone* (SA) *indoor*, que utiliza a infraestrutura de *software* do projeto OAI. O trabalho complementa a bibliografia atual apresentando uma metodologia para criação de mapas de cobertura para *site surveys* de redes celulares privadas com várias gNBs.

O artigo se encontra dividido da seguinte forma: a Seção II apresenta as possibilidades de implantação de redes móveis do projeto OAI; a Seção III retrata o ambiente e a rede objetos de estudo do trabalho; a Seção IV descreve a metodologia proposta para a coleta das métricas avaliadas e para a geração dos REM; a Seção V apresenta e discute os resultados obtidos. Por fim, a Seção VI aborda as principais conclusões dos autores sobre o estudo realizado.

II. ARQUITETURA DO OAI

O *software* OAI foi projetado para fornecer sistemas completos fim-a-fim 4G LTE e 5G NR, conforme as partes definidas pelo 3GPP: a RAN, o *Core Network* (CN) e o UE [4], [11]. Possui uma comunidade internacional de desenvolvedores e está organizada em três projetos principais, como detalhado nas três próximas subseções.

A. OAI RAN

O projeto OAI RAN desenvolve uma solução de RAN compatível com o 3GPP e implementa as arquiteturas 4G e 5G [12]. No 5G, apresenta tanto a arquitetura NSA quanto a SA. Esta última oferece suporte a dois modos de operação:

- O ***split mode***, que divide a RAN em três componentes: *Next Generation NodeB Centralized Unit* (gNB-CU), *Next Generation NodeB Distributed Unit* (gNB-DU) e *Radio Unit* (RU). A gNB-CU é a entidade responsável pelas camadas *Radio Resource Control* (RRC) e *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP), enquanto a gNB-DU é responsável pelas camadas física (PHY), *Media Access Control* (MAC) e *Radio Link Control* (RLC). A RU é responsável por toda a parte de rádio da RAN [4];
- O **modo monolítico**, que não possui a separação presente no *split mode*, de modo que todas as camadas fazem parte de uma mesma entidade [4].

B. OAI Core Network

O projeto OAI CN se concentra no desenvolvimento das funções de rede tanto do CN do 4G, que compreende todo o *Evolved Packet Core* (EPC) do OAI [13], quanto do 5G [14]. O CN da rede 5G possui diferentes configurações, sendo elas:

- ***Minimalist 5GC***: A configuração mais básica, que compreende as funções virtuais de rede *Access and Mobility Management Function* (AMF), *Session Management Function* (SMF), *Network Repository Function* (NRF) e *User Plane Function* (UPF) [14];
- ***Basic 5GC***: Configuração que agrega os componentes do cenário *minimalist* com as funções *Unified Data Management* (UDM), *Authentication Server Management Function* (AUSF) e *Unified Data Repository* (UDR) [14];
- ***Slicing 5GC***: A configuração mais completa, contendo todas as funções do *Basic 5GC* e também a *Network Slicing Selection Function* (NSSF) [14].

O OAI CN tem uma plataforma de implantação automatizada em imagens Docker, utilizando Docker-Compose, e uma nativa da nuvem, usando o *Helm Chart* [14].

C. OAI Operations and Maintenance (OAM)

O projeto OAI OAM concentra-se na implementação e toda a manutenção, orquestração e monitoramento do OAI RAN e das funções de rede do OAI CN. Além disso, ele implementa e mantém as interfaces propostas pela O-RAN Alliance. O projeto oferece soluções como o FlexRIC, um

Controlador Inteligente de RAN (RIC) compatível com a O-RAN, a interface E2 e o *Multi-access Edge Computing* (MEP) [15].

III. CENÁRIO AVALIADO

O estudo de caso apresentado neste artigo foi realizado em um laboratório do centro de pesquisa *Leading Advanced Technologies Center of Excellence* (LANCE), situado no Núcleo de Pesquisa e Inovação em Tecnologia da Informação (nPITI), da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). O ambiente possui dimensões de 5,8 m por 9 m, paredes e janelas de vidro, pilares de concreto, mobília em madeira e computadores, cuja distribuição física está ilustrada na Fig. 1.

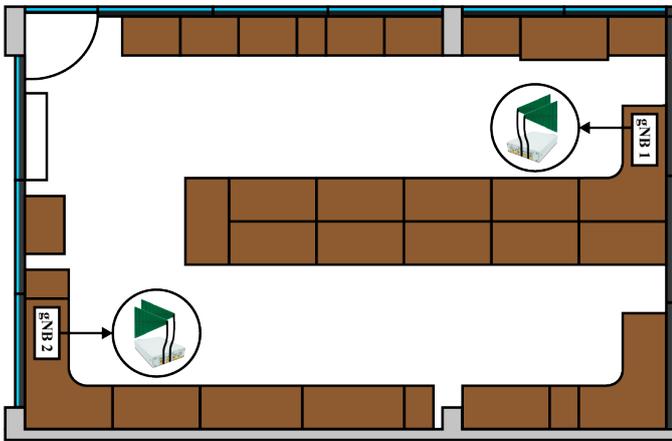


Fig. 1: Ilustração do laboratório no qual as medições foram realizadas.

A rede 5G implementada no laboratório utiliza o núcleo da rede (CN5G) em sua versão 1.5.0 e duas gNBs (OAI gNB) na versão 2.1.0, ambos implementados em *desktops* Lenovo, modelo ThinkCentre N50s Gen 3, com as seguintes especificações:

- Sistema Operacional: Linux 20.04 LTS;
- Processador: Intel(R) Core(TM) i7-12700, 12 núcleos, 2,10 GHz;
- Memória RAM: 64 GB.

O núcleo da rede foi implementado com imagens Docker e o modo utilizado foi o *basic 5GC*.

As gNBs foram implementadas individualmente, em *desktops* distintos, cada um deles associado a uma USRP da Ettus, modelo B210¹, dotada de duas antenas LP0965², também da Ettus, cujas especificações são:

- Modelo: Log-periódica;
- Diagrama de Radiação: Direcional;
- Ganho: 5 - 6 dBi;
- Faixa de Frequências: 850 - 6500 MHz.

A Fig. 2 mostra o arranjo utilizado em ambas as gNBs implementadas e a Tabela I exhibe os principais parâmetros de configuração das gNBs.



Fig. 2: Arranjo utilizado nas gNBs.

TABELA I: Configurações das gNBs.

Parâmetro	Configuração
Modo de Implementação	Monolítico
Banda de Frequência	N78
Frequência Central	3750 MHz
Largura de Banda	40 MHz
Packet Resource Blocks (PRBs)	106
Duplexação	TDD
Modo de Transmissão	1 (Single Input Single Output)
Espaçamento de Subportadora	30 kHz

O UE utilizado nas medições foi um *Commercial off-the-Shelf* (COTS) da marca Motorola, modelo G50, dotado de um *Universal Subscriber Identity Module* (USIM) configurado para a conexão com o núcleo da rede do OAI.

A Fig. 3 esquematiza o arranjo completo da rede implementada e avaliada neste trabalho.

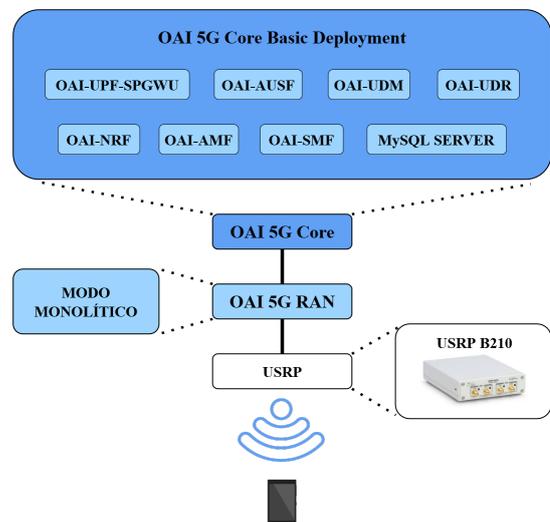


Fig. 3: Arquitetura do cenário avaliado.

¹USRP: <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/>

²Antenas: <https://www.ettus.com/all-products/lp0965/>

IV. METODOLOGIA

Para analisar a cobertura da rede 5G, foram estabelecidos pontos de medição ao longo do laboratório, utilizando como critério as dimensões da sala, de modo que o espaçamento entre os pontos fosse de aproximadamente 1 m, gerando uma grade de pontos de medição semelhante à que foi executada em [8]. Deste modo, a sala foi dividida em 10 pontos, com 1 m de espaçamento no eixo X, e 6 pontos, com 1,16 m de espaçamento no eixo Y, resultando em 60 pontos de medição, conforme ilustrado na Fig. 4. Alguns pontos foram deslocados de suas posições originais para se adequar à planta do laboratório.

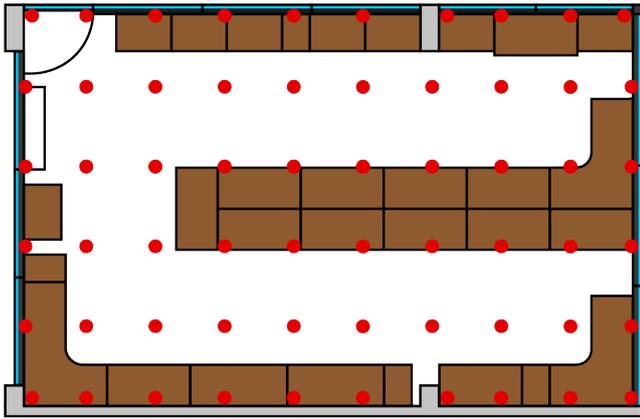


Fig. 4: Ilustração da distribuição dos pontos de medição no laboratório.

Uma vez que a rede OAI 5G SA implantada não possui o procedimento de *handover* implementado, executou-se o processo de medição com apenas uma gNB ativa por vez. O processo de medição consiste em posicionar o UE em cada ponto de medição e reproduzir uma *live streaming* de vídeo de alta resolução, para estabelecer uma carga na rede. Durante esse período, coletou-se os valores de RSRP obtidos da camada MAC, por meio dos *logs* do terminal da gNB e se estabeleceu o valor médio deles.

Visando garantir a confiabilidade estatística dos dados, realizou-se duas repetições do processo de medição (*jobs*), em cada ponto. A partir da média do valor de RSRP de todos os *jobs* de cada gNB, utilizou-se o maior valor médio de RSRP de cada ponto de medição para compor os dados da área de cobertura em comum das duas gNBs.

Utilizou-se um algoritmo de estimação de valores intermediários (interpolação) usando a função *griddata* da biblioteca *scipy* do Python, para realizar a plotagem do REM baseado nos valores de RSRP. Dentre os modos de interpolação disponíveis para essa função, usou-se o método *cubic*, que estima o valor intermediário entre os pontos a partir de uma *spline* cúbica.

V. RESULTADOS

A Fig. 5 exibe o REM do laboratório baseado nos valores de RSRP obtidos com o procedimento de medição estabelecido.

Nota-se na Fig. 5 que as regiões com melhor cobertura se situam ao redor dos pontos de medição logo à frente das gNBs,

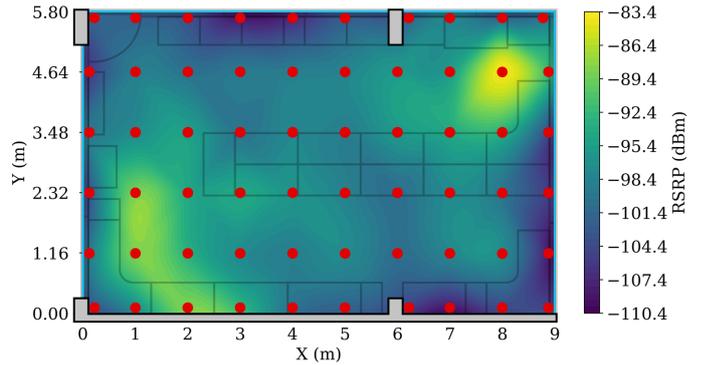


Fig. 5: REM baseado nos valores RSRP medidos.

enquanto algumas zonas apresentam pior desempenho devido ao sombreamento causado por elementos de alvenaria e do mobiliário do laboratório, que se situam entre o ponto e a gNB mais próxima deste.

A característica diretiva do diagrama de radiação das antenas é um fato que também pode ter contribuído para haver um menor desempenho nas regiões superior esquerda e inferior direita, visto que elas se situam longe das antenas no eixo horizontal e ao lado das gNBs no eixo vertical do mapa mostrado na Fig. 5.

Assim, como feito em [3] e em [10], estabeleceram-se quatro categorias de qualidade da cobertura da rede, a partir de valores de RSRP, exibidas na Tabela II. Do ponto de vista qualitativo, considera-se que a cobertura do ambiente está satisfatória, visto que, com base nos critérios estabelecidos na Tabela II, 6,67% dos pontos medidos apresentaram qualidade excelente, 50% qualidade boa, 41,67% qualidade regular e apenas 1,67% qualidade ruim de cobertura. A Fig. 6 exibe a quantidade de pontos em cada categoria.

TABELA II: Categorias de Qualidade do Sinal.

RSRP (dBm)	Qualidade do Sinal
RSRP > -90	Excelente
-90 > RSRP > -100	Boa
-100 > RSRP > -110	Regular
RSRP < -110	Ruim

VI. CONCLUSÕES

O presente trabalho estabeleceu uma metodologia de elaboração de REM para análise de cobertura de redes privadas de comunicação móveis, utilizando a infraestrutura de *software* do projeto OAI, gerando um mapa com base em medições de RSRP conduzidas em um laboratório da UFRN.

Os resultados obtidos levam à conclusão de que a cobertura no ambiente alvo do estudo é satisfatória e a metodologia desenvolvida cumpre seu objetivo.

Em trabalhos futuros, almeja-se aumentar o escopo de medições para outras métricas de cobertura do 5G, como RSRQ e SINR, bem como avaliar o comportamento da cobertura para diferentes valores de parâmetros de configuração da RAN da rede 5G SA implementada.

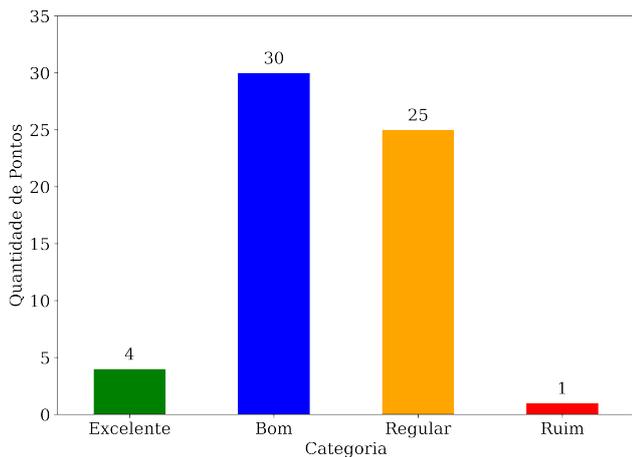


Fig. 6: Quantidade de pontos de medição em cada categoria de qualidade do sinal.

REFERÊNCIAS

- [1] T.-H. Wang, Y.-C. Chen, S.-J. Huang, K.-S. Hsu, and C.-H. Hu, "Design of a network management system for 5g open ran," in *2021 22nd Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, 2021, pp. 138–141.
- [2] K. Kiela, M. Jurgo, V. Macaitis, and R. Navickas, "5G Standalone and 4G Multi-Carrier Network-in-a-Box Using a Software Defined Radio Framework," *Sensors*, vol. 21, no. 16, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/16/5653>
- [3] L. P. Sanchez, J. R. Ramirez, F. S. Sulca, and D. M. Avilés, "Exploring the potential of a 5g nsa network deployed with open source and usrp b210 equipment," in *2023 IEEE Seventh Ecuador Technical Chapters Meeting (ECTM)*, 2023, pp. 1–6.
- [4] F. Kaltenberger, A. P. Silva, A. Gosain, L. Wang, and T.-T. Nguyen, "OpenAirInterface: Democratizing innovation in the 5G Era," *Computer Networks*, vol. 176, p. 107284, 2020.
- [5] Teleco, "Redes LAN/MAN Wireless III: Site Survey," 2024, acessado em: maio/2024. [Online]. Available: https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialrwanman3/pagina_2.asp
- [6] Tracenet IT Solutions, "Site survey: why is this technology so important?" 2024, acessado em: maio/2024. [Online]. Available: <https://www.tracenet.com/2024/01/18/site-survey-why-is-this-technology-so-important/>
- [7] K. Koutlia, B. Bojović, S. Lagén, and L. Giupponi, "Novel radio environment map for the ns-3 NR simulator," *ACM International Conference Proceeding Series*, pp. 41–48, 2021.
- [8] M. Gucciardo, I. Tinnirello, G. M. Dell'Aera, and M. Caretti, "A flexible 4g/5g control platform for fingerprint-based indoor localization," in *IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2019, pp. 744–749.
- [9] D. M. Molla, H. Badis, L. George, and M. Berbineau, "Coverage extension of software defined radio platforms for 3gpp 4g/5g radio access networks," in *2021 13th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*, 2021, pp. 55–62.
- [10] A. Sahbafard, R. Schmidt, F. Kaltenberger, A. Springer, and H.-P. Bernhard, "On the performance of an indoor open-source 5g standalone deployment," in *2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2023, pp. 1–6.
- [11] OSA, "About the OpenAirInterface Software Alliance," 2024, acessado em: fev/2024. [Online]. Available: <https://openairinterface.org/about-us/>
- [12] —, "OAI 5G RAN Project Group," 2024, acessado em: maio/2024. [Online]. Available: <https://openairinterface.org/oai-5g-ran-project/>
- [13] —, "OAI 4G Core Network Project Group," 2024, acessado em: maio/2024. [Online]. Available: <https://github.com/OPENAIRINTERFACE/openair-epc-fed/tree/master/docs>
- [14] —, "OAI-5G Core Network (CN) project group," 2024, acessado em: maio/2024. [Online]. Available: <https://openairinterface.org/oai-5g-core-network-project/>
- [15] —, "OAI Operations and Maintenance (OAM) project group," 2024, acessado em: maio/2024. [Online]. Available: <https://openairinterface.org/projects/oam-project-group/>