Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação

Giulia Ferreira Gomes
Ytalo Breno Barbara Silva

Implantação de estação base 5G de baixo custo

Goiânia
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): **Giulia Ferreira Gomes e Ytalo Breno Barbara Silva**

Título do trabalho: **Implantação de estação base 5G de baixo custo**

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [ ] NÃO[1]

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;

- Submissão de artigo em revista científica;

- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.

Documento assinado eletronicamente por **Flavio Geraldo Coelho Rocha**, **Professor do Magistério Superior**, em 18/12/2024, às 09:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .

Documento assinado eletronicamente por **Giulia Ferreira Gomes**, **Discente**, em 18/12/2024, às 14:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Ytalo Breno Barbara Silva**, **Discente**, em 18/12/2024, às 16:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5049923** e o código CRC **A0661D18**.

Referência: Processo nº 23070.046699/2024-10 SEI nº 5049923

Giulia Ferreira Gomes
Ytalo Breno Barbara Silva

Implantação de estação base 5G de baixo custo

Trabalho de Conclusão apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia de Computação da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Geraldo Coelho Rocha

Goiânia
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Gomes, Giulia Ferreira
Implantação de estação base 5G de baixo custo [manuscrito] / Giulia Ferreira Gomes, Ytalo Breno Barbara Silva. - 2024.
0 17 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Geraldo Coelho Rocha.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia da Computação, Goiânia, 2024.
Bibliografia.
Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, tabelas.

1. Rede 5G. 2. Baixo custo. 3. Licenciamento. 4. Rede desacoplada. 5. Raspberry Pi 5. I. Silva, Ytalo Breno Barbara. II. Rocha, Flávio Geraldo Coelho, orient. III. Título.

CDU 621.3

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao(s) onze dia(s) do mês de dezembro do ano de 2024 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado "**Implantação de estação base 5G de baixo custo**", de autoria de **Giulia Ferreira Gomes e Ytalo Breno Barbara Silva**, do curso de Engenharia de Computação, do(a) EMC da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Prof. Dr. Flávio Geraldo Coelho Rocha (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Marcelo Stehling de Castro (EMC/UFG) e Rodrigo Pinto Lemos (EMC/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de (**10,0**) , tendo sido o TCC considerado **aprovado**.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.

Documento assinado eletronicamente por **Flavio Geraldo Coelho Rocha**, **Professor do Magistério Superior**, em 18/12/2024, às 08:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Stehling De Castro**, **Professor do Magistério Superior**, em 18/12/2024, às 08:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Pinto Lemos**, **Professor do Magistério Superior**, em 18/12/2024, às 09:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5049723** e o código CRC **67DF8F4D**.

Implantação de estação base 5G de baixo custo

Giulia Ferreira Gomes, Ytalo Breno Barbara Silva, Flávio Geraldo Coelho Rocha

***Resumo*— Este trabalho apresenta a implantação de uma rede 5G destinada a Pequenas e Médias Empresas (PMEs) através do uso de equipamentos de baixo custo, Raspberry Pi 5 e *desktop* de montagem própria, e softwares de uso livre que atuam nos papéis de *Radio Access Network* (RAN) e núcleo de rede (CN). Para tanto, esta pesquisa aborda a compreensão sobre a arquitetura de redes de quinta geração (5G), o licenciamento para uso de redes e do espectro de radiofrequências no Brasil sob a outorga da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e uma visão geral sobre o funcionamento dos componentes de redes 5G definidos por *software*. Os *softwares* foram selecionados a partir de análise quanto ao licenciamento de uso da solução em produtos comerciais, sendo eles, o srsRAN Project e Open5GS. Assim, são apresentados dois protótipos de rede: RAN e CN integradas no Raspberry Pi 5; RAN e CN desacopladas no *desktop* e Raspberry Pi 5, com conexão através de interface Ethernet. Apesar dos resultados limitados, os protótipos desenvolvidos apresentam o primeiro passo para aprimoramento de soluções que buscam o atendimento de PMEs através de *hardware* de fácil acesso e *software* gratuito.**

***Palavras-chaves* — Rede, 5G, Baixo custo, Licenciamento, srsRAN, Open5GS, OAI, PMEs, USRP X310, Rede desacoplada, Raspberry Pi 5.**

***Abstract* — This work presents the deployment of a 5G network designed for Small and Medium-sized Enterprises (SMEs) using low-cost equipment, including a Raspberry Pi 5 and a self-assembled desktop, along with open-source software serving as the Radio Access Network (RAN) and Core Network (CN). To achieve this, the research addresses the understanding of the architecture of fifth-generation (5G) networks, the licensing requirements for the use of networks and the radiofrequency spectrum in Brazil under the regulation of the National Telecommunications Agency (ANATEL), and an overview of the functionality of software-defined 5G network components. The software solutions were selected based on an analysis of their licensing for commercial use, specifically focusing on srsRAN Project and Open5GS. Two network prototypes are presented: one with the RAN and CN integrated on a Raspberry Pi 5, and another with the RAN and CN decoupled, deployed on the desktop and Raspberry Pi 5, respectively, connected via an Ethernet interface. Despite the limited results, the developed prototypes represent a first step toward refining solutions aimed at serving SMEs using accessible hardware and open-source software.**

***Index Terms* — Network, 5G, Low cost, Licensing, srsRAN, Open5GS, OAI, SMEs, USRP X310, Decoupled network, Raspberry Pi 5.**

I. Introdução

Os recentes avanços tecnológicos provenientes da atual quarta revolução industrial trouxeram à tona a necessidade de soluções com o intuito de promover a melhoria nos processos de comunicação entre dispositivos conectados à rede, de maneira que houve grande aumento na demanda por redes mais confiáveis e de melhor desempenho. Atendendo a tais demandas, a rede de quinta geração (5G) surge como uma tecnologia inovadora, com capacidade de largura de banda aprimorada (em inglês, *enhanced Mobile Broadband*), Comunicação Massiva entre Dispositivos (em inglês, *massive Machine Type Communication*) e transferência de dados com baixa latência e alta confiabilidade (em inglês, *Ultra-reliable Low-Latency Communication*) [1].

No contexto empresarial e industrial, a necessidade de comunicação se manifesta, entre outros aspectos, no controle de dispositivos monitoramento de um grande volume de informações. O controle associa-se à execução de ações automáticas com o intuito de gerenciar maquinários que participem de operações industriais, enquanto o monitoramento configura a obtenção do estado atual ou passado de equipamentos, produtos e ambientes. Atualmente, as tecnologias sem fio disponíveis como o 4G e o WiFi, o *Radio Frequency Identification*, *Long Range Wireless Network* e Zigbee são utilizadas para tais intuitos, entretanto, essas tecnologias não são capazes de atender aos requisitos mais exigentes da Indústria 4.0, principalmente com relação à latência e a quantidade de dispositivos conectados [2]. Em uma ampla gama de casos, é necessário que ambientes industriais façam uso de redes cabeadas para garantir a confiabilidade e o tempo de resposta de operações de caráter crítico que não podem ser atendidas por redes sem fio legadas. Logo, existe a demanda por uma solução com capacidade de unificar os processos, algo que a tecnologia 5G, mais especificamente com a utilização de redes privativas, torna possível [3].

Mesmo com o grande potencial de melhoria intrínseca no dia a dia empresarial, através da possibilidade de cobertura dedicada, uso exclusivo da capacidade de rede, confiabilidade e adaptação, o uso de redes privativas se difunde em solo brasileiro de maneira vagarosa, sendo notavelmente inacessível para grande parte do setor empresarial do país, especialmente o setor de Pequenas e Médias Empresas (PMEs), devido aos altos custos de infraestrutura necessários [4].

Dentre as iniciativas que visam democratizar o acesso ao uso de redes 5G tanto na área de pesquisa quanto na área industrial para otimizar a produtividade utilizando tecnologia de última geração, pode-se destacar iniciativas de *software* livre como o *Software Radio Systems Radio Access Network* (srsRAN) [5], o OpenAirInterface (OAI) [6], Open5GS [7] e Free5GC [8]. Essas iniciativas trouxeram facilidade na realização de estudos e pesquisas que visam a implementação de redes sem fio, ocasionando o surgimento de uma variedade de

Giulia F. Gomes e Ytalo B. B Silva, graduandos em Engenharia da Computação. Flávio G. C. Rocha, Professor Associado, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, Goiás, e-mails: giuliafgomes, ytalobreno@discente.ufg.br, flaviogcr@ufg.br

dispositivos comerciais que implementam redes 5G de ponta a ponta a partir destes *softwares* livres. Estes equipamentos são normalmente comercializados de maneira que o *software* permanece livre e personalizável e o *hardware* conta com especificação capaz de atender padrões condizentes a redes de quinta geração. Entretanto, é notável que grande parte destes equipamentos, mesmo que desenvolvidos a partir de soluções de código livre, têm sido oferecidos comercialmente com altos valores, trazendo consigo o questionamento sobre a possibilidade de implantação de tais soluções para PMEs em *hardware* de baixo custo.

Este trabalho desenvolve um estudo de viabilidade da implantação de uma rede privativa 5G de baixo custo para PMEs a partir do desenvolvimento de um protótipo funcional. Para tanto, serão apresentados a arquitetura 5G, as licenças necessárias para o uso de redes privativas e do espectro de radiofrequências no Brasil, uma análise sobre soluções *open source* disponíveis no mercado, a apresentação do custo e especificações de *hardware* e desenvolvimento do protótipo de rede 5G a partir das tecnologias fornecidas pelas empresas *Software Radio Systems* e Open5GS com interface de rádio e dispositivo de usuário físicos.

O restante do artigo está organizado da maneira que segue. A seção II aborda os trabalhos relacionados. A seção III promove compreensão sobre o referencial teórico, base para a construção dos protótipos e entendimento das soluções de software livre: srsRAN e Open5GS. A seção IV aborda o desenvolvimento dos protótipos e o processo de implantação. A seção V apresenta os resultados obtidos. A seção VI apresenta conclusões e as perspectivas para trabalhos futuros.

II. Trabalhos Relacionados

O constante crescimento no interesse por redes de comunicações móveis de última geração pode ser evidenciado pela quantidade de publicações científicas relevantes sobre o tema e pela quantidade de produtos e serviços que tem sido disponibilizados pelas empresas de telecomunicações em todo o mundo. Entretanto, poucos desses trabalhos abordam soluções de baixo custo, ou especificamente voltadas para pequenas empresas. Assim, esta seção apresenta trabalhos importantes com o foco em baixo custo e PMEs.

Em 2020, Aijaz [3] discute como o avanço das tecnologias de comunicação móvel sem fio, principalmente do 5G privativo, irão beneficiar o campo industrial. O autor destaca que inovações como aumento da conectividade de dispositivos de maneira simultânea, menor latência, maior confiabilidade durante a comunicação e redução de manutenção são realidades possíveis no 5G, algo anteriormente alcançado apenas por tecnologias cabeadas. Aijaz ressalta ainda que a construção de redes privativas confere às empresas cobertura dedicada, possibilidade de personalização e a unificação dos métodos para monitoramento e controle de equipamentos industriais em uma única solução.

Apresentando o conceito "*5G on the Cheap*", Grohmann, Seidel, Lehmann, Höschele, Reisslein e Fitzek em 2022 [2], elucidam que diversas empresas contam com o WiFi para conectividade sem fio mesmo com limitações quanto à conexão de múltiplos usuários, confiabilidade e baixa latência. Assim, apesar do 5G se apresentar como uma solução adequada para casos de uso com as características mencionadas, a especificidade do *hardware* necessário para a garantia da melhor qualidade de serviço, *Quality of Service* (QoS), torna o acesso a essa tecnogia restrito devido aos altos custos. Entretanto, os autores evidenciam que altos índices de QoS podem ser requisitos para algumas empresas, mas não todas, permitindo a parametrização da rede de maneira simplificada através de soluções de rádio definido por software, *Software Defined Radio* (SDR) e equipamentos de hardware de fácil acesso, garantindo assim uma redução significativa dos custos para construção da estação base e maior acessibilidade para PMEs.

Em frente aos diversos casos de uso relacionados à aplicação de redes sem fio, Chepkoech, Mombeshora, Malila e Mwangama em 2023 [9] destacaram a importância da construção de casos de teste com tecnologias de redes de quarta (4G) e quinta geração (5G) juntamente da análise dos resultados obtidos por elas a fim de que seja possível determinar suas aplicabilidades e proximidade dos resultados obtidos com os valores teóricos esperados. Neste sentido, o trabalho foca na montagem de protótipos de redes de baixo custo através do uso de equipamentos comerciais de fácil acesso, sistemas de radiocomunicação definidos por *software* e soluções *open source* para rede de acesso via rádio e rede de núcleo, com foco nas soluções OAI [6], srsRAN [5] e Open5GS [7].

Adicionalmente, Mamushiane, Lysko, Kobo e Mwangama, em 2023 [10] abordaram o desenvolvimento de uma rede 5G *Stand Alone* (SA) de maneira mais específica para os *frameworks* srsRAN e Open5GS. O estudo apresenta as melhores práticas para implantação da rede juntamente com a definição do equipamento de *hardware* necessário, tratando sobre os principais problemas encontrados durante a construção do protótipo como erros de integração, problemas de desempenho e as soluções empregadas para resolvê-los.

Em um outro trabalho de Mamushiane, Lysko, Kobo e Mwangama, também em 2023 [11], é abordada a avaliação de desempenho da Função de Plano de Usuário (UPF) em uma rede 5G, com foco em metodologias de teste de estresse. Os autores destacam a crescente demanda por tecnologia 5G e a necessidade de operadores de rede avaliarem a prontidão de sua infraestrutura para lidar com um número crescente de assinantes.

Arnez et al. [12] apresenta um estudo sobre a implementação de uma rede móvel 5G *Non Stand Alone* (NSA) utilizando tecnologia de Rádio Definido por *Software* (SDR) e um dispositivo periférico universal de *software* de radio (do inglês, *Universal Software Radio Peripheral*) para fornecer serviços de Voz sobre LTE (VoLTE) e conectividade à Internet. O foco é a transição suave de uma rede 4G para 5G, com o texto concluindo que a implementação da rede SDR 5G NSA pode facilitar a migração para uma rede 5G completa, destacando a importância de futuras pesquisas para comparar cenários de laboratório com a rede apresentada.

Com o intuito de selecionar a plataforma mais adequada para um projeto financiado pelo governo brasileiro, de Souza Neto et al. [13] reporta uma análise que compara três plataformas de código aberto para a implementação de uma rede

central 5G: Magma [14], Open5GS e Free5GC. A comparação entre as plataformas é feita em termos de infraestrutura, documentação, maturidade do código, base de projetos e gerenciamento. Magma se destaca por sua comunidade ativa, documentação detalhada e recursos como separação de plano de controle e plano de usuário, que permite maior flexibilidade e escalabilidade. Open5GS e Free5GC também apresentaram pontos vantajosos, mas Magma foi escolhida devido à sua robustez e suporte comunitário.

Em uma abordagem de descentralização de uma *testbed* 5G, Chamran et al. [15] apresenta um estudo experimental sobre uma nova abordagem para redes sem fio distribuídas utilizando *Universal Software Radio Peripheral* (USRP) e o Raspberry Pi 3 B+ como unidades de processamento. O foco é comparar um *testbed* tradicional, que utiliza uma unidade de processamento centralizada, com um testbed distribuído onde cada nó tem seu próprio Raspberry Pi. O estudo conclui que o *testbed* distribuído se aproxima mais de uma rede real implantada, mas enfrenta desafios em termos de desempenho devido à capacidade limitada do Raspberry.

III. Fundamentação Teórica

Nessa seção serão abordadas as bases teóricas para a execução deste trabalho.

A. Arquitetura do 5G

A arquitetura da rede 5G, definida em 2019 no *release* 15 da organização *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), é uma estrutura avançada e modular projetada para oferecer capacidades superiores de conectividade, flexibilidade e escalabilidade para atendimento de uma ampla gama de serviços e aplicações. De maneira simplificada, esta arquitetura é composta por três principais componentes: o equipamento de usuário (*User Equipment*, UE), a rede de acesso de rádio, (*Radio Access Network*, RAN ou NG-RAN) e a rede núcleo (*Core Network*, CN ou 5GC), conforme mostrado na Fig. 1.

Figura 1: Arquitetura da rede 5G
Fonte: 3GPP [16]

O UE representa os dispositivos finais como *smartphones*, computadores, sensores e máquinas autônomas com capacidade de conexão à rede 5G, dotados de um módulo universal de identidade do assinante. Já a RAN é definida por estações base gNodeB (gNB) que conectam os dispositivos de usuário ao CN por meio de uma interface de radio denominada NR-Uu. A CN é a parte central da rede e encarregada de diversas funções, conhecidas como microsserviços, voltados ao usuário como gerenciamento da conexão e mobilidade, encaminhamento do tráfego de dados entre a rede de acesso e a rede externa, gerenciamento das sessões de dados e endereços de *Internet Protocol* (IP), autenticação de dispositivos, aplicação das políticas de controle e fatiamento da rede para atendimento específico de um serviço ou aplicação [16]

A transição do 4G para a tecnologia 5G envolve duas arquiteturas principais, a *Non-Standalone* (NSA) e *Standalone* (SA), essas arquiteturas definem como a infraestrutura 5G é implantada e integrada com as redes de gerações anteriores. Para a arquitetura NSA, conforme ilustrado na Fig. 2, observa-se o uso de infraestrutura já existente como suporte à nova rede através da combinação de estações base 4G (eNB) e 5G (en-gNB) conectadas à uma CN 4G, denominada *Evolved Packet Core* (EPC) garantindo maior largura de banda e um aumento na capacidade de transmissão de dados [16]. Para que a conexão entre o núcleo LTE e as eNBs seja efetivada, é necessário o uso de uma interface denominada por S1, enquanto a interface utilizada para conexão com en-gNBs é chamada por S1-U; também são utilizadas interfaces para a transmissão de dados entre enGNBs, conhecida por X2-U, ou entre eNBs e entre gNBs e eNBs, denominada por X2.

A arquitetura SA, conforme a Fig. 3, fornece implementação completa da rede 5G com estações base (gNB) e CN (5GC) de quinta geração de maneira que o controle da rede e a transferência de dados são gerenciados exclusivamente por esta tecnologia.

Existe ainda um terceiro modelo responsável por realizar a combinação entre as tecnologias mencionadas e que permite a implantação tanto de redes SA quanto NSA. Este modelo, ilustrado na Fig. 4, é construído a partir da conexão de estações base 4G (ng-eNB) e 5G (gNB) a um núcleo 5G (5GC) [17].

O foco deste estudo é a implementação de um protótipo para rede 5G de baixo custo a partir da arquitetura SA.

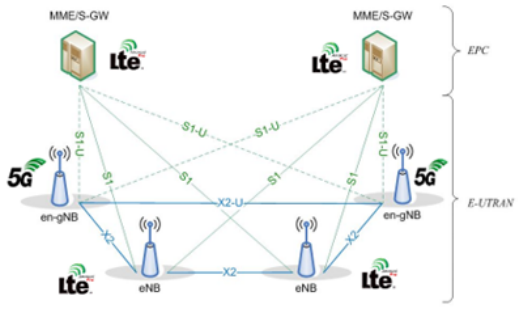


Figura 2: Arquitetura *Non-Standalone* 5G
Fonte: 3GPP [16]

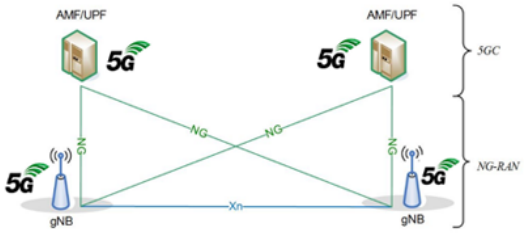


Figura 3: Arquitetura *Standalone* 5G
Fonte: 3GPP [16]

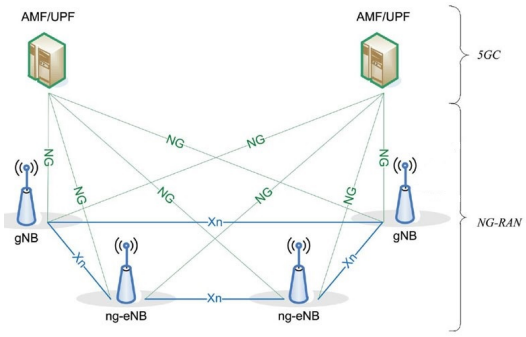


Figura 4: Arquitetura NG-RAN
Fonte: 3GPP [17]

B. Soluções 5G SA de software livre

Na computação, o *software* livre desempenha um papel importante na promoção e popularização de diversas soluções tecnológicas, dentre as quais pode-se citar a comunicação móvel sem fio. Desde gerações anteriores de padrões 3GPP, o *software* livre tem sido usado pela academia, por entusiastas e por grandes corporações em etapas de desenvolvimento e validação das mais diversas tecnologias. No 5G, soluções de código aberto têm sido amplamente utilizadas, inclusive para derivar soluções comerciais de redes privativas para a indústria. A qualidade do *software* livre para comunicações sem fio evoluiu muito ao longo dos anos, contando atualmente com componentes de *software* modularizados, uma equipe de desenvolvimento madura, e documentação ampla e bem elaborada.

Sob a ótica da construção de um produto comercial para PMEs a escolha adequada do *software* é crucial, pois influencia diretamente na usabilidade e no custo total da solução, tornando imperativo um entendimento sobre as soluções disponíveis e as necessidades específicas que o produto em construção busca atender. Dessa forma, serão discutidas a seguir as principais soluções de *software* livre consideradas para o desenvolvimento do protótipo deste trabalho.

1) OpenAirInterface: Consolidada como uma das melhores soluções *open source* disponíveis para a construção de redes privativas 4G e 5G de ponta a ponta, o OAI é uma iniciativa da empresa OpenAirInterface Software Alliance (OSA) que surgiu em 2014 com o propósito de reunir desenvolvedores ao redor do mundo para a construção de tecnologias sem fio com foco em soluções executáveis em plataformas computacionais de uso geral [18]. Um dos seus diferenciais se concentra na disponibilidade tanto da RAN quanto da CN integradas e de fácil implementação, tornando a solução bastante difundida para fins acadêmicos e industriais.

Apesar de ser considerado um *software* livre, o OAI possui outro diferencial relacionado à sua utilização para fins comerciais. Sob a licença desenvolvida pela própria empresa, denominada "OAI Public License v1.1" [19] é possível verificar na seção 3.1 do documento que a solução está garantido para uso livre e gratuito para propósitos relacionados à estudo, teste e pesquisa, mas não para aplicações comerciais. A seção 3.2 clarifica que quaisquer produtos comerciais desenvolvidos a partir dos componentes de *software* proprietários da OSA estarão sujeitos a negociação de uma licença "não exclusiva, não transferível e não atribuível de Patentes Essenciais com cada Contribuidor e/ou o Licenciante…" (OSA, 2017, tradução nossa) o que garante à empresa possibilidade de exigir compensação monetária caso as soluções da OAI sejam utilizadas para fins comerciais. Essa modificação da licença Apache v2.0 License [20], na qual ela é baseada, é justificada pelo intuito de garantir que companhias e indivíduos com um grande portfólio de patentes possam contribuir com o projeto sem necessidade de abdicar de seus direitos de patente [18].

Não foi identificada uma regra clara e bem definida para o pagamento de *royalties* relacionados ao uso das soluções da OAI com fins comerciais. Essas informações destacam o caráter de cobrança "não exclusiva" para o licenciamento da solução, o que pode comprometer sua viabilidade no desenvolvimento de produtos voltados para PMEs.

Algumas soluções comerciais desenvolvidos com os componentes de software da OAI ilustram a problemática do uso dessa solução por apresentarem custo monetário inacessível para a realidade em foco desse trabalho. A título de exemplo, a Tabela I lista alguns dos produtos desenvolvidos pela empresa Firecell [21] com o software da OAI para redes 5G SA sem considerar os custos de importação. O valor em reais apresenta a conversão direta para 30 de novembro de 2024 com o custo do euro a R$ 6,34.

Tabela I: Soluções para redes privativas 5G Firecell

Produto	Aplicação	Custo (€)	Custo (R$)
Orion Labkit	Estudo	11.900,00	75.463,85
Orion Test Kit 50	Empresarial	28.370,00	179.908,36
Pegasus Mid Power	Empresarial	37.793,00	239.664,31
Pop-Up 5G	Empresarial	43.000,00	272.684,50

2) srsRAN e Open5GS: O srsRAN, projeto desenvolvido pela empresa *Software Radio Systems* (SRS) fundada em 2014, também surge como uma ideia para o desenvolvimento de soluções 4G e 5G com a utilização de *hardware* de propósito geral. Especificamente para redes 5G, a SRS fornece um *software open source* conhecido por srsRAN Project, uma solução RAN completa em conformidade com as especificações da 3GPP.

Licenciadas sob a *Affero General Public License v3* (AGPLv3) [22] desenvolvida pela *GNU Operating System* através de uma iniciativa que busca garantir que softwares disponibilizados de maneira livre permaneçam livres, as soluções da SRS são fornecidas de maneira gratuita para usos diversos, o que inclui a comercialização, conforme descrito já no preâmbulo da documentação: "Nossas Licenças Públicas Gerais são designadas para garantir que você tenha liberdade para distribuir cópias do software livre (e cobrar por elas se você desejar) …" (*GNU Operating System*, 2007, tradução nossa).

É importante evidenciar que este caráter de utilização está condicionado à distribuição livre do código fonte, modificado ou não, também por parte daqueles que fazem uso da tecnologia para o desenvolvimento de novas soluções, conforme ressaltado na seção 6 do documento.

Diferentemente da OSA, a SRS possui garantia de livre utilização do software. Entretanto, os componentes de ponta

a ponta, RAN e CN, são disponibilizados apenas para redes 4G e 5G NSA. Para o propósito final deste trabalho, o desenvolvimento de uma rede 5G SA, se faz necessária a combinação entre o srsRAN Project e uma rede de núcleo de terceiros, mais especificamente, a rede de núcleo recomendada é o Open5GS, que também está sob a licença AGPLv3 e concentra no mesmo software soluções para núcleos de rede 4G (EPC) e 5G (5GC).

C. Arquitetura srsRAN Project e Open5GS

Em 2019, a 3GPP introduziu uma nova arquitetura para a RAN 5G através de sua compartimentalização em três unidades básicas: Unidade Centralizada (CU), Unidade Distribuída (DU) e Unidade de Rádio (RU), confome ilustrado na Fig. 5. As interfaces que interconecam essas unidades da RAN são chamadas de *fronthaul*, *midhaul* e *backhaul*. O *fronthaul* conecta a RU à DU, o *midhaul* conecta a DU à CU e o *backhaul* conecta a CU ao núcleo. Essas interfaces implementam os chamados *splits* funcionais, onde as funções de rede da pilha de protocolos da RAN são divididos e implantados nos diferentes nós da RAN. A disposição dessas funções nos nós da RAN determina qual *split* funcional está sendo adotado.

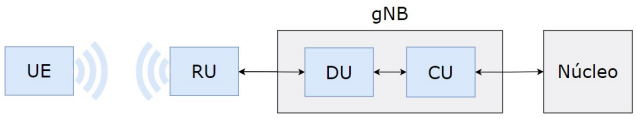


Figura 5: Arquitetura RAN 5G
Fonte: srsRAN Project [23]

O *Split* 7.2 no fronthaul é o *split* funcional defendido pelo Open RAN (O-RAN), uma iniciativa da AT&T, China Mobile, Deutsche Telekom, NTT DOCOMO, e Orange, um consórcio de empresas de telecomunicações, operadoras e academia, possuindo atualmente mais de 300 participantes que tem por objetivo remodelar a indústria da RAN de maneira a criar arquiteturas inteligentes, abertas, virtualizadas e interoperáveis. Nesse *split*, a camada física da gNB é dividida em duas unidades principais. Essa separação permite a virtualização das funções e a implementação de uma arquitetura mais flexível e modular, facilitando a integração com soluções de diferentes fornecedores, um dos principais objetivos do O-RAN. Já o *Split* 8, é uma das opções de *splits* do 3GPP e representa uma divisão em que o processamento de rádio e controle é menos segregado. A srsRAN, como uma implementação de *software* para a RAN 5G, suporta ambos os *splits*, neste estudo, para implantação da rede através de rádio definido por *software* (*Software Defined Radio*, SDR) o gNB segue os padrões do *Split* 8, pois o SDR não tem a capacidade de executar funções da camada física que seriam atribuídos a ele caso o *split* 7.2 fosse adotado.

Desta maneira, a unidade CU é responsável por funções de controle e processamento de alto nível através dos protocolos *Radio Resource Control* (RRC), *Service Data Adaptation Protocol* (SDAP) e *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP). O RRC realiza o controle de recursos de rádio e conexões UE-RAN com a configuração e liberação de recursos de rádio, controle de mudanças de estação base e transmissão de mensagens de controle para o UE. O SDAP mapeia os fluxos de dados das aplicações para garantir que eles sejam tratados em acordo com os requisitos de QoS através da separação de fluxos com diferentes prioridades como dados de imagens, vídeos e navegação. Por fim, o PDCP realiza o processamento de pacotes e segurança para envio eficiente [24].

A DU executa funções de processamento em tempo real, sendo responsável por gerenciar os recursos de rádio com o *Radio Link Control* (RLC), o *Medium Access Control* (MAC) e a *Physical Layer* (PHY). O RLC é um protocolo de segmentação e reconstrução de dados que realiza o controle de retransmissão em caso de falhas e priorização de tráfego, atuando como uma camada intermediária entre o PDCP e o MAC. O MAC, é responsável pelo gerenciamento do espectro e controle dos recursos de rádio compartilhados através do agendamento de transmissão, retransmissões rápidas e coordenando o acesso à camada física. O PHY, é a camada física que realiza a transmissão e recepção de sinais no espectro de rádio, modulando e demodulando o sinal, codificando e decodificando o canal e realizando outras tarefas de processando sinais [24].

A RU atua como interface direta entre RAN e os UEs, realizando a preparação do sinal para a transmissão via espectro eletromagnético. Este mapeamento conta com os conversores *Digital-to-Analog* para conversão do sinal digital em analógico e *Analog-to-Digital* para a conversão analógica em digital [24]. A Fig. 6 mostra uma visualização geral da arquitetura da gNB baseada nos protocolos e camadas apresentados, e a Tabela II descreve as funções exercidas por cada uma das camadas da pilha de protocolos da RAN.

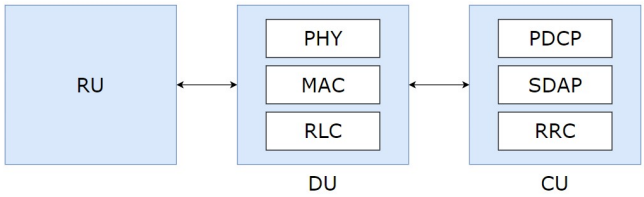


Figura 6: Arquitetura gNB srsRAN *Split* 8
Fonte: srsRAN Project [23]

Tabela II: Funções das camadas e protocolos da gNB

Camada/Protocolo	Função
RRC (CU)	Controle de recursos rádio e conexões UE-RAN
SDAP (CU)	Mapeamento de QoS para fluxos de dados
PDCP (CU)	Processamento de pacotes, segurança
RLC (DU)	Fragmentação, reconstrução, controle de erros
MAC (DU)	Gerenciamento de acesso ao espectro
PHY (DU)	Processamento de sinais e transmissão física

Adicionalmente, a CN disponibilizada pela Open5GS para redes 5G SA utiliza uma arquitetura baseada em serviços conforme ilustrado na Fig. 7.

O *Network Repository Function* (NRF) centraliza informações sobre os serviços operantes na rede 5G e seus respectivos endereços, permitindo a descoberta e

integração eficiente entre eles. O *Network Slice Selection Function* (NSSF) suporta o fatiamento da rede, atribuindo redes lógicas completas e específicas a dispositivos ou serviços conforme necessário. O *Unified Data Management* (UDM) gerencia logicamente os dados dos assinantes, trabalhando em conjunto com o *Unified Data Repository* (UDR), que armazena informações essenciais sobre dispositivos e serviços no banco de dados. O *Authentication Server Function* (AUSF) autentica os UEs na rede, garantindo segurança. O *Policy Control Function* (PCF) define e aplica políticas de QoS e regras para sessões e serviços. Já o *Session Management Function* (SMF) gerencia as sessões de usuários, incluindo a atribuição de endereços IP. O *Access and Mobility Management Function* (AMF) cuida da mobilidade dos dispositivos e da conexão com a gNB usando o protocolo *Stream Control Transmission Protocol* (SCTP). Por último, o *User Plane Function* (UPF) encaminha pacotes de dados dos UEs, conectando-os à Internet ou a redes públicas/privadas, garantindo o tráfego de dados eficiente [25].

A Tabela III apresenta um resumo das funções desempenhadas por cada serviço.

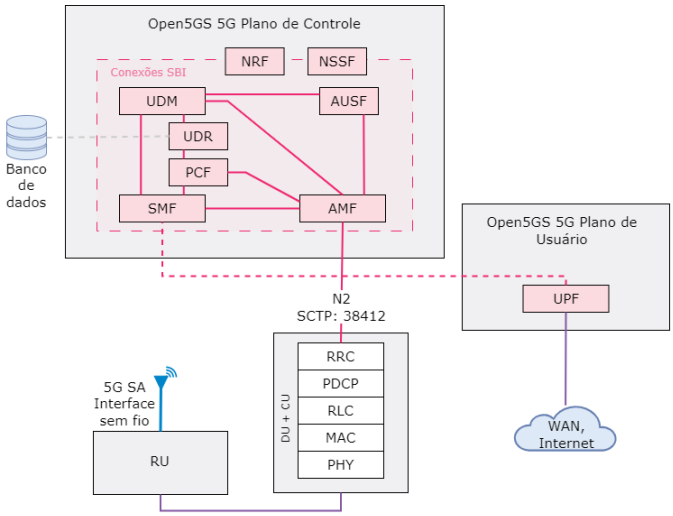


Figura 7: Arquitetura do 5GC open5GS
Fonte: Autor [25]

Tabela III: Funções dos serviços presentes do 5GC do Open5GS

Serviço	Função
NRF	Registro e descoberta de serviços
NSSF	Controle de fatiamento da rede
UDM	Gestão lógica dos dados dos UEs
UDR	Armazenamento dados dos UEs
AUSF	Autenticação
PCF	Políticas de QoS e cobrança
SMF	Gerenciamento de sessões de dados
AMF	Gerenciamento de mobilidade e acesso
UPF	Encaminhamento de tráfego

D. Licenciamento do espectro de redes no Brasil

Para possibilitar o acesso da população aos serviços de telecomunicações, estimular o desenvolvimento social e garantir o uso racional e econômico do espectro de radiofrequências no Brasil, a distribuição de radiofrequências para serviços públicos e privados é submetida ao controle e regulamentação da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Da mesma forma, todos os equipamentos que fazem uso do espectro de frequências em território nacional estão sujeitos às normas estabelecidas pela agência, bem como ao pagamento de taxas que são determinadas de acordo com o serviço fornecido.

Ao considerar a construção de uma rede privativa, caracterizada pela ANATEL como uma solução destinada a uso próprio ou de um grupo específico de usuários, seu desenvolvimento está vinculado ao Serviço de Interesse Restrito (SIR) nos termos do artigo 18º do Regulamento dos Serviços de Telecomunicações [26]. Especificamente, o Serviço Limitado Privado (SLP), uma categoria de SIR, é aplicável neste caso por se tratar de uma exploração realizada em um contexto privado [27]. O valor para obtenção da outorga para atuação em SIR definido pelo Preço Público pelo Direito de Exploração de Serviços de Telecomunicações e pelo Direito de Exploração de Satélite (PPDESS) é de R$ 20,00 a ser pago uma única vez. A solicitação deve ser realizada de maneira virtual através do envio dos documentos exigidos pela ANATEL juntamente com a notificação do interesse em explorar o SLP [28].

É importante ressaltar que existem ainda outros aspectos relacionados ao uso de radiofrequências quando tratamos de SIR. Este tipo de serviço é de caráter secundário, não tendo prioridade para o uso das frequências e estando sujeito a interferências de outros sinais que ocupam a mesma faixa. Complementarmente, a licença para uso do espectro é determinada pelo Preço Público pelo Direito de Uso de Radiofrequências (PPDUR) sendo proporcional a frequência utilizada, largura de faixa, área de cobertura e tempo de autorização [27]. A ANATEL fornece uma calculadora para simulações do PPDUR. Para a região de Goiânia/GO, largura de banda de 100 MHz, faixas de 3,5 GHz e 27,5 GHz e SLP, o custo calculado foi de R$ 280,70 por 10 anos de autorização [29].

Por fim, após obtenção da outorga para uso de radiofrequências, é necessário realizar o cadastro das estações transmissoras ainda por meio eletrônico, nessa etapa, serão cobradas: A Taxa de Fiscalização de Instalação (TFI) e a Taxa de Fiscalização de Funcionamento (TFF). Para o SLP, a TFI é cobrada uma única vez no valor de R$ 134,08 aplicada na emissão da licença para o funcionamento da estação, já a TFF deve ser paga anualmente e representa um terço do TFI, correspondendo a R$ 44,69 para este tipo de serviço [27]. A Tabela IV apresenta um resumo dos custos levantados.

Tabela IV: Custos para licenciamento do espectro de uma rede privativa 5G

Tipo de licença	Custo (R$)
SIR	20,00
PPDUR	280,70
TFI	134,08
TFF	44,69 (anual)

IV. Estação 5G de baixo custo

Nesta seção serão apresentados os os materiais, métodos e etapas executadas para desenvolvimento dos protótipos de rede 5G SA de baixo custo.

A. Materiais e Métodos

Para a implantação de uma rede de comunicação móvel de baixo custo, a escolha do hardware é variável e está atrelada, principalmente, ao orçamento disponível e caso de uso da rede. Em 2022, a SRS publicou um pacote de componentes baseado em *hardware* simples que implementam o conceito de *"ultra low cost"* através do uso de Raspberrys para desenvolvimento de redes 4G [30]. Seguindo esta possibilidade, os protótipos desenvolvidos neste trabalho contam com o teste de combinações entre diferentes equipamentos disponibilizados pelo Centro de Excelência em Redes Inteligentes sem fio e Serviços Avançados (CERISE) [31] na Universidade Federal de Goiás (UFG) de maneira a analisar o desempenho de funcionamento de uma rede simples baseada na arquitetura 5G SA.

Dado que as demandas de *hardware* em redes 5G são significativamente mais exigentes que em redes 4G, devido aos seus recursos avançados, a possibilidade de reutilizar *hardware* de baixo custo, anteriormente empregado em redes 4G, tornou-se uma questão central neste trabalho, através da investigação se o uso de *hardware* de baixo custo na implantação de um *testbed* 5G poderia acarretar problemas de desempenho. Uma solução potencial para viabilizar essa abordagem consiste no desacoplamento dos elementos da rede em diferentes dispositivos, permitindo a distribuição da carga de processamento entre eles, ao mesmo tempo que é em linha com as diretrizes do 3GPP e da ORAN Alliance para desagregação da RAN 5G. Esta abordagem será apresentada neste trabalho de maneira simplificada, ao implantarmos as soluções *open-source* para *Radio Access Network* (RAN) e *Core Network* (CN) em dois equipamentos distintos, diferente do que é encontrado nos *testbeds* da literatura, como em Arnez et al. [12] e Mamushiane et al. [10].

Nos papéis da gNB e 5GC, foram utilizados, um Raspberry Pi 5 e um *desktop* de uso geral. O Pi 5 conta com 8 GB de RAM, Micro SD de 128 GB e processador *Advanced RISC Machines* (ARM) 8.2 com 4 núcleos e 4 *threads*. Já o *desktop* possui 16 GB de RAM, SSD com 128 GB e processador Intel Core i5 com 4 núcleos e 4 *threads*.

Para a conexão da rede com os dispositivos de usuário, foi utilizado o rádio definido por *software* USRP X310, fabricado pela *Ettus Research*. Este dispositivo é amplamente utilizado em aplicações de pesquisa e desenvolvimento de redes móveis devido à sua versatilidade e alto desempenho. Com dois canais independentes, faixa de frequência de 10 MHz a 6 GHz e conectividade por interfaces de 1 Gbps e 10 Gbps, ele possibilita altas taxas de transferência de dados [32]. Entretanto, o custo elevado do X310 acaba por torná-lo inviável para PMEs, alternativas mais acessíveis incluem dispositivos como o LimeSDR Mini 2.0, que opera em frequências de 10 MHz a 3,5 GHz, como o BladeRF Micro 2.0 xA4, que oferece uma faixa de frequência de 47 MHz a 6 GHz com custo reduzido e boa compatibilidade com ferramentas de código aberto, como o srsRAN [30] e como o USRP B200, um rádio definido por *software* que opera em uma faixa de frequência contínua de 70 MHz a 6 GHz, tornando-o adequado para diversas aplicações em telecomunicações e radiofrequência.

A Tabela V fornece o custo total dos equipamentos mencionados referente à data de publicação do trabalho e desconsiderando taxas de transporte, adicionalmente, a Tabela VI apresenta a especificação completa e custos individuais para a montagem do *desktop*.

Assim, os protótipos apresentados consistem em: RAN e CN instaladas no Raspberry Pi 5, emulando uma configuração integrada de baixo custo e RAN instalada no *desktop* com CN no Raspberry Pi 5, formando uma arquitetura desacoplada. A validação dos protótipos foi conduzida utilizando o SDR USRP X310 para transmissão e recepção e dispositivo UE físico, Google Pixel, como terminal de teste.

Tabela V: Especificação e custo de *hardware* utilizado/recomendado para protótipos de rede 5G SA de baixo custo

Equipamento	Especificação	Custo (R$)
Raspberry Pi 5	8 GB RAM Micro SD 128 GB Processador ARM 8.2 4 Núcleos e 4 *Threads*	972,00
Desktop	16 GB RAM SSD 128 GB Processador Intel Core i5 4 Núcleos e 4 *Threads*	738,38
USRP X310	Frequência 10 MHz a 6 GHz Canais 2x2 Máxima largura de banda 160 MHz	65.210,03
Lime SDR Mini 2.0	Frequência 10 MHz a 3.5 GHz Canais 1x1 Máxima largura de banda 40 MHz	2.383,77
BladeRF Micro 2.0 xA4	Frequência 47 MHz a 6 GHz Canais 2x2 Máxima largura de banda 56 MHz	3.226,15
USRP B200	Frequência 70 MHz a 6 GHz Canais 1x1 Máxima largura de banda 56 MHz	8.722,54

Tabela VI: Especificação e custo para montagem do *desktop*

Descrição	Equipamento	Custo (R$)
CPU	Intel Core i5-4570 @3.2 GHz	161,90
RAM	2x8GB DDR3 @1333 MHz	149,00
Placa mãe	ASRock H81M-HG4	193,99
Disco	SSD 128 GB	155,00
Fonte	C3tech 200 W	45,00
Gabinete	C3tech	73,49

B. Protótipo de rede com RAN e CN integradas no Raspberry Pi 5

Para a instalação e configuração do srsRAN e Open5GS em um mesmo dispositivo, são necessárias a execução de alguns passos para que todos os componentes da rede possam se conectar de maneira efetiva.

O USRP X310 realiza conexão via cabo Ethernet para comunicação com o aparelho onde se encontra o *software* da srsRAN, exigindo uma interface de rede dedicada. O Raspberry Pi possui apenas uma porta Ethernet, por isso dois cenários são possíveis: (i) os dispositivos que compõem a gNB podem ser interconectados diretamente com acesso à Internet feito por meio da rede WiFi; e (ii) um *switch* pode ser utilizado para que o acesso à Internet seja realizado via rede cabeada. O dois cenários foram avaliados através da ferramenta de teste de vazão "speedtest-cli". Essa análise, conforme Fig. 8 e Fig. 9, confirma que a conexão cabeada para o dispositivo apresenta melhores resultados e, portanto, optou-se pelo uso do *switch* para conexão simultânea do Raspberry Pi 5, USRP X310 e rede de Internet.

```
pfc2-core@ubuntu:~/srsRAN_Project/configs$ speedtest-cli
Retrieving speedtest.net configuration...
Testing from Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (200.137.220.91)...
Retrieving speedtest.net server list...
Selecting best server based on ping...
Hosted by Vtal (Rio de Janeiro) [946.61 km]: 31.002 ms
Testing download speed................................................
Download: 7.33 Mbit/s
Testing upload speed..................................................
Upload: 18.51 Mbit/s
```

Figura 8: Teste de velocidade utilizando conexão via WiFi
Fonte: Autor

```
pfc2-core@ubuntu:~$ speedtest-cli
Retrieving speedtest.net configuration...
Testing from Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (200.137.220.91)...
Retrieving speedtest.net server list...
Selecting best server based on ping...
Hosted by NWI Internet Telecom (Brasília) [162.49 km]: 10.501 ms
Testing download speed................................................
Download: 725.72 Mbit/s
Testing upload speed..................................................
Upload: 633.27 Mbit/s
```

Figura 9: Teste de velocidade utilizando conexão via Ethernet
Fonte: Autor

Ainda, o SDR exige que o dispositivo da gNB esteja em sua mesma sub-rede. Como o Raspberry Pi 5 possui apenas uma porta Ethernet, foi necessário criar interfaces virtuais para conectar simultaneamente a gNB ao SDR, conforme pode ser observado na Fig. 10. A Fig. 11 apresenta o esquemático para o protótipo com RAN e CN integradas no Raspberry Pi 5 e endereços de IP virtualizados.

Após realizada essa configuração e com os equipamentos devidamente conectados, é importante verificar se o X310 está visível ao Raspberry e realizar através da instalação e atualizações necessárias para o *driver* responsável pela conexão entre os aparelhos o *USRP Hardware Driver* (UHD). Os passos executados para configuração do *driver* são listados a seguir:

1) Instalar driver UHD

```
sudo apt-get install libuhd-dev uhd-host
```

2) Verificar se o X310 está visível para o Raspberry

```
uhd_find_devices
```

3) Atualizar o X310

```
uhd_images_downloader
uhd_image_loader --args="type=x300,addr
    =192.168.10.2,fpga=HG"
```

```
2: eth0: <BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP> mtu 1500 qdisc fq_codel state UP gro
    link/ether d8:3a:dd:bb:d4:a2 brd ff:ff:ff:ff:ff:ff
    inet 192.168.10.110/24 brd 192.168.10.255 scope global eth0
       valid_lft forever preferred_lft forever
    inet 172.16.2.52/23 metric 100 brd 172.16.3.255 scope global dynamic eth0
       valid_lft 6942sec preferred_lft 6942sec
    inet6 fe80::da3a:ddff:febb:d4a2/64 scope link
       valid_lft forever preferred_lft forever
```

Figura 10: Interface física Ethernet e interfaces lógicas do Raspberry 5
Fonte: Autor

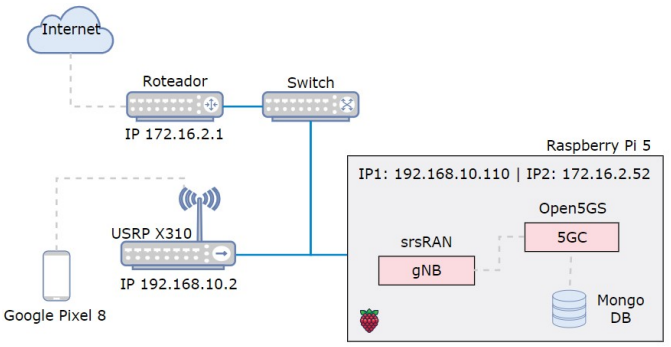


Figura 11: Esquemático de rede 5G SA com srsRAN e Open5GS integrados no Raspberry Pi 5.
Fonte: Autor

1) Configuração srsRAN: A configuração do srsRAN Project foi realizada no Raspberry Pi 5 utilizando as documentações disponibilizadas pela própria SRS. O primeiro documento faz referência à instalação do projeto e suas dependências [33] e o segundo à execução da gNB instalada [34].

Quanto às dependências do projeto, a gNB comunica-se com o 5GC por meio do serviço AMF, utilizando a porta padrão 38412 e protocolo SCTP, como ilustrado na Fig. 7. Esse protocolo, projetado para transporte confiável de mensagens entre sistemas de rede, é essencial para estabelecer e manter a comunicação entre a RAN e o núcleo da rede sendo imprescindível que o equipamento utilizado para operar a rede ofereça suporte ao SCTP.

Para a configuração da gNB, foram definidos os parâmetros para as unidades CU, RU e DU, que especificam, respectivamente, a conexão com o 5GC, a interação com o SDR e os recursos de espectro utilizados na comunicação com os dispositivos de usuário.

A conexão com a CN (Open5GS) foi configurada na seção "cu_cp" do arquivo, onde foram especificados o endereço IP e porta para o AMF 127.0.1.100:38412, o endereço do CU 127.0.0.1 e as informações de área geográfica para registro e gerenciamento dos dispositivos conectados. A área geográfica é representada pelo código de rastreamento de área (*Tracking Area Code*, TAC) 7, associado ao código da rede móvel terrestre pública (*Public Land Mobile Network*, PLMN) "00101", destinado ao teste de redes.

Na seção de configuração do SDR, "ru_sdr", o *driver* foi ajustado para UHD, e os argumentos definidos para especificar o modelo x300, o endereço IP do dispositivo SDR 192.168.10.2 e o valor de unidade de transmissão máxima (*Maximum Transmission Unit*, MTU) como 1472 bytes, que corresponde ao tamanho máximo de pacote suportado pela in-

terface Ethernet do Raspberry Pi. Ainda, a taxa de amostragem foi definida em 15,36 MHz e os ganhos de transmissão (Tx) e recepção (Rx) em 25 dB e 20 dB respectivamente.

A seção "cell_cfg" define os parâmetros de espectro, incluindo a alocação do canal de frequência na banda 78 e uma largura de banda de 10 MHz, uma escolha que reduz a utilização de recursos. O espaçamento entre subportadoras (SCS) foi definido para 30 kHz, o que corresponde à numerologia 1 do 5G NR. A banda 78 foi selecionada por ser uma faixa de frequência com duplexação por divisão de tempo (TDD), amplamente aplicada em redes 5G devido à sua compatibilidade com dispositivos modernos e suporte nativo à tecnologia. As bandas 3 e 28 foram testadas, mas sem sucesso de conexão.

Os passos realizados para a configuração da gNB são listados a seguir:

1) Garantir suporte ao protocolo SCTP

```
sudo apt update
sudo apt upgrade
sudo apt install lksctp-tools
sudo apt install linux-modules-extra-$(uname -r)
checksctp
```

2) Instalar de dependências do srsRAN Project

```
sudo apt-get install cmake make gcc g++ pkg-config libfftw3-dev libmbedtls-dev libsctp-dev libyaml-cpp-dev libgtest-dev
```

3) Compilar e instalar srsRAN Project

```
git clone https://github.com/srsran/srsRAN_Project.git
cd srsRAN_Project
mkdir build
cd build
cmake ../
make -j `nproc`
make test -j $(nproc)
sudo make install
```

4) Criar arquivo de configuração da gNB com o X310

```
cd srsRAN_Project/configs
sudo nano gNB_x310.yml
```

5) Editar arquivo de configuração da gNB

```
cu_cp:
  amf:
    addr: 127.0.1.100
    port: 38412
    bind_addr: 127.0.0.1
    supported_tracking_areas:
      - tac: 7
        plmn_list:
          - plmn: "00101"
            tai_slice_support_list:
              - sst: 1
    inactivity_timer: 7200

ru_sdr:
  device_driver: uhd
  device_args: type=x300, addr=192.168.10.2, master_clock_rate=184.32e6, send_frame_size=1472, recv_frame_size=1472
  clock: internal
  sync: internal
  srate: 15.36
  tx_gain: 25
  rx_gain: 20

cell_cfg:
  dl_arfcn: 641000
  band: 78
  channel_bandwidth_MHz: 10
  common_scs: 30
  plmn: "00101"
  tac: 7
  pdcch:
    common:
      ss0_index: 0
      coreset0_index: 1
    dedicated:
      ss2_type: common
      dci_format_0_1_and_1_1: false
    prach:
      prach_config_index: 1

log:
  filename: /tmp/gnb.log
  all_level: info
  hex_max_size: 0

pcap:
  mac_enable: false
  mac_filename: /tmp/gnb_mac.pcap
  ngap_enable: false
  ngap_filename: /tmp/gnb_ngap.pcap
```

6) Rodar script de performance

```
cd srsRAN_Project
sudo ./scripts/srsran_performance
```

2) Configuração Open5GS: A configuração do Open5GS no Raspberry Pi 5 foi realizada através da documentação disponibilizada para implantação da rede de maneira simplificada [35]. As etapas neste documento contam com a instalação da base da dados, configuração dos serviços para uma rede 5G SA, instalação da interface gráfica do Open5GS e adição de rotas para conexão da rede com a Internet.

O Open5GS utiliza o banco de dados MongoDB [36] para armazenar informações relacionadas aos UEs configurados na rede. No entanto, a compatibilidade com *hardware* específico representa um desafio, uma vez que certos dispositivos não oferecem suporte às versões mais recentes do MongoDB [37]. Um exemplo notável é o Raspberry Pi 4, cujo processador, baseado na arquitetura ARM 8.0, não é compatível com versões atuais do banco de dados. Embora a versão 4.4 do MongoDB fosse anteriormente suportada, ela atingiu o fim de sua vida útil em 2024. Atualmente, apenas processadores ARM 8.2 ou superiores oferecem suporte às versões recentes do MongoDB [37]. Portanto, apesar do Raspberry Pi 4 figurar na documentação da SRS como uma opção viável para implantação de um testbed 4G de baixo custo, ele não pode ser usado para implantar um testbed 5G SA. Em virtude dessa limitação, optou-se pelo uso de um Raspberry Pi 5, que incorpora um processador ARM 8.2, possibilitando a instalação e execução do banco de dados de maneira compatível.

Em uma rede integrada, os endereços dos serviços do Open5GS podem ser definidos com IP de *loopback* da máquina, é importante, no entanto que o endereço definido para o AMF, serviço do plano de controle responsável pela comunicação entre o RAN e o CN, seja o mesmo indicado anteriormente na gNB, 127.0.1.100. Essa definição é realizada no arquivo de configuração do AMF para a interface responsável

por estabelecer a comunicação entre as redes, a *Next Generation Application Protocol* (NGAP). Além disso, os parâmetros de PLMN e TAC foram configurados em conformidade com as definições da gNB, uma vez que discrepâncias nesses valores podem ocasionar erros críticos durante a ativação da rede.

O mapeamento de equipamentos de usuário no Open5GS pode ser realizado via interface gráfica, a *Web User Interface* (WebUI). Para o Ubuntu Server, essa interface se torna inacessível, exigindo que o cadastro de UEs ocorra diretamente via banco de dados. Em frente a esta realidade, foi realizado um ajuste no arquivo de configuração da WebUI de maneira a alterar o IP de acesso para 0.0.0.0:9999, assim, quaisquer dispositivos conectados à mesma rede de Internet do Raspberry Pi 5 podem acessar a interface e cadastrar dispositivos de usuário na rede 5G, evitando que possíveis configurações erradas no arquivo de assinantes do banco de dados originem tentativas falhas de conexão. É importante ressaltar que a interface WebUI exige autenticação, por padrão configurada com usuário “admin” e senha “1423”, mas que pode ser alterada de maneira a restringir o acesso ao cadastro de dispositivos na rede.

Após a instalação correta do Open5GS é esperado que todos os serviços 4G e 5G estejam ativos como mostrado na Fig. 12 e que seja possível acessar a WebUI no endereço de IP designado pelo roteador ao Raspberry (172.16.2.52:9999) conforme a Fig. 13. Os passos executados para instalação e configuração do Open5GS são listados a seguir:

1) Instalar o MongoDB

```
sudo apt update
sudo apt install gnupg
curl -fsSL https://pgp.mongodb.com/server-6.0.asc | sudo gpg -o /usr/share/keyrings/mongodb-server-6.0.gpg --dearmor
echo "deb [ arch=amd64,arm64 signed-by=/usr/share/keyrings/mongodb-server-6.0.gpg] https://repo.mongodb.org/apt/ubuntu jammy/mongodb-org/6.0 multiverse" | sudo tee /etc/apt/sources.list.d/mongodb-org-6.0.list
sudo apt install -y mongodb-org
```

2) Instalar o Open5GS

```
sudo add-apt-repository ppa:open5gs/latest
sudo apt update
sudo apt install open5gs
```

3) Acessar os arquivos de configuração

```
cd /etc/open5gs
ls
```

4) Editar o arquivo de configuração do AMF

```
amf:
  sbi:
    server:
        address: 127.0.0.5
        port: 7777
    client:
      scp:
        - uri: http://127.0.0.200:7777
  ngap:
    server:
      - addr: 127.0.1.100 #Mesmo indicado para a gNB.
  metrics:
    server:
      - address: 127.0.0.5
        port: 9090
  guami:
    - plmn_id:
        mcc: 001
        mnc: 01
      amf_id:
        region: 2
        set: 1
  tai:
    - plmn_id:
        mcc: 001
        mnc: 01
      tac: 7
  plmn_support:
    - plmn_id:
        mcc: 001
        mnc: 01
      s_nssai:
        - sst: 1
  security:
    integrity_order : [ NIA2, NIA1, NIA0 ]
    ciphering_order : [ NEA0, NEA1, NEA2 ]
  network_name:
    full: Open5GS
    short: Next
  amf_name: open5gs-amf0
  time:
    t3512:
      value: 540
```

5) Reiniciar os serviços e verificar os estados dos processos

```
sudo systemctl restart open5gs-*
ps ax|grep open5gs
```

6) Instalar NodeJS para WebUI

```
sudo apt install -y ca-certificates curl gnupg
sudo mkdir -p /etc/apt/keyrings
curl -fsSL https://deb.nodesource.com/gpgkey/nodesource-repo.gpg.key | sudo gpg --dearmor -o /etc/apt/keyrings/nodesource.gpg
NODE_MAJOR=20
echo "deb [signed-by=/etc/apt/keyrings/nodesource.gpg] https://deb.nodesource.com/node_$NODE_MAJOR.x nodistro main" | sudo tee /etc/apt/sources.list.d/nodesource.list
sudo apt update
sudo apt install nodejs -y
```

7) Instalar WebUI

```
curl -fsSL https://open5gs.org/open5gs/assets/webui/install | sudo -E bash -
```

8) Abrir arquivo de configuração do WebUI

```
cd /lib/systemd/system/
sudo nano open5gs-webui.service
```

9) Adicionar novo IP para acesso à interface WebUI

```
[Unit]
Description=Open5GS WebUI
Wants=mongodb.service mongod.service

[Service]
Type=simple

WorkingDirectory=/usr/lib/node_modules/open5gs
Environment=NODE_ENV=production
Environment=HOSTNAME=0.0.0.0 #IP alterado
ExecStart=/usr/bin/node server/index.js
Restart=always
RestartSec=2

[Install]
WantedBy=multi-user.target
```

10) Adicionar redirecionamento para conexão com a Internet

```
sudo sysctl -w net.ipv4.ip_forward=1
sudo iptables -t nat -A POSTROUTING -s
    10.45.0.0/16 ! -o ogstun -j MASQUERADE
```

```
pfc2-core@ubuntu:/etc/open5gs$ ps ax|grep open5gs
    758 ?        Ssl    0:01 /usr/bin/open5gs-bsfd -c /etc/open5gs/bsf.yaml
    760 ?        Ssl    0:05 /usr/bin/open5gs-nrfd -c /etc/open5gs/nrf.yaml
    765 ?        Ssl    0:11 /usr/bin/open5gs-scpd -c /etc/open5gs/scp.yaml
    766 ?        Ssl  597:40 /usr/bin/open5gs-seppd -c /etc/open5gs/sepp1.yaml
   1020 ?        Ssl    0:01 /usr/bin/open5gs-ausfd -c /etc/open5gs/ausf.yaml
   1023 ?        Ssl    0:05 /usr/bin/open5gs-mmed -c /etc/open5gs/mme.yaml
   1025 ?        Ssl    0:01 /usr/bin/open5gs-nssfd -c /etc/open5gs/nssf.yaml
   1026 ?        Ssl    0:00 /usr/bin/open5gs-sgwcd -c /etc/open5gs/sgwc.yaml
   1027 ?        Ssl    0:00 /usr/bin/open5gs-sgwud -c /etc/open5gs/sgwu.yaml
   1028 ?        Ssl    0:07 /usr/bin/open5gs-smfd -c /etc/open5gs/smf.yaml
   1029 ?        Ssl    0:00 /usr/bin/open5gs-udmd -c /etc/open5gs/udm.yaml
   1184 ?        Ssl    0:01 /usr/bin/open5gs-amfd -c /etc/open5gs/amf.yaml
   1189 ?        Ssl    0:00 /usr/bin/open5gs-upfd -c /etc/open5gs/upf.yaml
   1240 ?        Ssl    0:05 /usr/bin/open5gs-hssd -c /etc/open5gs/hss.yaml
   1242 ?        Ssl    0:01 /usr/bin/open5gs-pcfd -c /etc/open5gs/pcf.yaml
   1243 ?        Ssl    0:05 /usr/bin/open5gs-pcrfd -c /etc/open5gs/pcrf.yaml
   1244 ?        Ssl    0:01 /usr/bin/open5gs-udrd -c /etc/open5gs/udr.yaml
   3688 pts/0    S+     0:00 grep --color=auto open5gs
```

Figura 12: Serviços ativos após instalação do Open5GS
Fonte: Autor

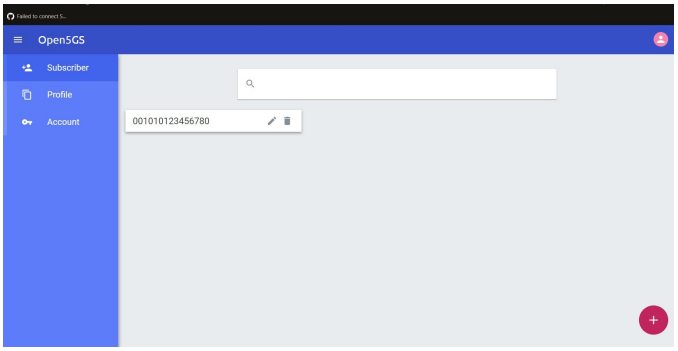


Figura 13: WebUI Open5GS
Fonte: Autor

3) Configuração do UE: A configuração do dispositivo de usuário para a rede integrada foi realizada utilizando a documentação disponibilizada para uso do *software* srsRAN Project com UEs comerciais, como *smartphones* que contam com suporte à tecnologia 5G [38].

Para tanto, as informações de conexão do dispositivo foram registradas no banco de dados do núcleo da rede por meio da interface gráfica do Open5GS. Essas informações incluem: a chave K, que é armazenada no cartão SIM e empregada na geração de outras chaves durante o processo de autenticação; e a chave de operador (*Operator Key*, OPC), uma chave derivada da chave K utilizada para autenticação segura entre o dispositivo e a rede; o *International Mobile Subscriber Identity* (IMSI), um identificador exclusivo do assinante, essencial para sua identificação global na rede móvel e o *Access Point Name* (APN), para definição do *gateway* de conexão com a rede. A inserção correta desses parâmetros assegura a autenticação e o roteamento adequados na rede 5G durante os testes.

4) Execução da rede: Realizadas as configurações de rede e o cadastro do dispositivo no banco de dados do núcleo, o cartão SIM foi inserido no Pixel 8 e um novo ponto de acesso foi configurado para o cartão com as mesmas informações definidas no APN, isso irá garantir o reconhecimento do dispositivo e proporcionar conectividade com a Internet.

Assim, a gNB deve ser inicializado via terminal no Raspberry Pi 5, o comportamento esperado caso a conexão com o USRP X310 e com o AMF no endereço 127.0.1.100:38412 seja bem-sucedida, pode ser encontrado na Fig. 14. Para garantir a conexão do UE com a rede, é indicado manter apenas o cartão SIM configurado no dispositivo e desligar o WiFi, a Fig. 15 mostra o Google Pixel 8 conectado.

```
pfc2-core@ubuntu:~/srsRAN_Project/configs$ sudo nice -n -10 gnb -c gnb_x310.yml

--== srsRAN gNB (commit 9d5dd742a) ==--


The PRACH detector will not meet the performance requirements with the configurat
Lower PHY in dual executor mode.
Available radio types: uhd.
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 13.2.0; Boost_108300; UHD_4.6.0.0+ds1-5.1ubu
[INFO] [LOGGING] Fastpath logging disabled at runtime.
Making USRP object with args 'type=x300,addr=192.168.10.2,master_clock_rate=184.1
[INFO] [X300] X300 initialization sequence...
[INFO] [X300] Maximum frame size: 1472 bytes.
[INFO] [X300] Radio 1x clock: 184.32 MHz
[WARNING] [0/Radio#0] Attempting to set tick rate to 0. Skipping.
Cell pci=1, bw=10 MHz, 1T1R, dl_arfcn=641000 (n78), dl_freq=3615.0 MHz, dl_ssb_a

N2: Connection to AMF on 127.0.1.100:38412 completed
==== gNB started ===
Type <h> to view help
```

Figura 14: Execução da gNB
Fonte: Autor

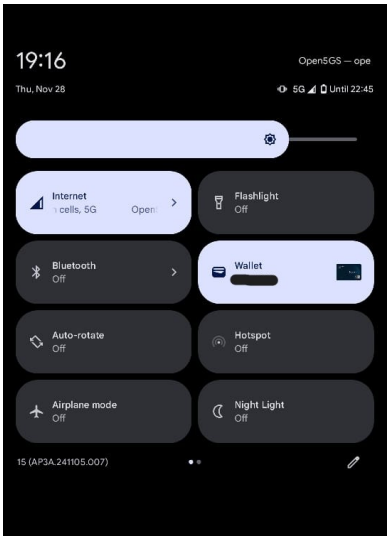


Figura 15: Google Pixel 8 conectado à rede 5G
Fonte: Autor

C. Protótipo de rede RAN e CN desacoplada com Desktop e Raspberry Pi 5

Neste protótipo a gNB foi executada através do *desktop* e a rede de núcleo permaneceu no Raspberry Pi 5. A escolha de executar a gNB da srsRAN em um computador de maior desempenho e o núcleo Open5GS em um dispositivo mais simples, como o Raspberry Pi 5, justifica-se pela diferença dos requisitos computacionais entre os componentes das redes. A gNB é responsável por funções intensivas como modulação, codificação, gerenciamento e sincronização de comunicação com equipamentos de usuário, papéis que exigem do computador maior capacidade de processamento e memória, além de poder se beneficiar de uma maior largura de banda, processamento paralelo e recursos que possibilitem menor latência e maior capacidade de I/O. Em contraste, a rede de núcleo realiza tarefas centradas em sinalização, roteamento e autenticação que possuem menor demanda computacional.

Essa separação permite uma alocação mais eficiente de recursos, explorando a flexibilidade das arquiteturas e otimizando os custos computacionais.

Para o desacoplamento da RAN e CN com comunicação efetuada via cabo Ethernet, os endereços corretos devem ser informados no arquivo de configuração da gNB e do AMF para que os serviços possam se conectar de maneira devida. Uma boa prática é fixar os valores de IP para a interface de rede utilizada de maneira a garantir que os serviços do srsRAN e Open5GS sempre executem no mesmo endereço sem sofrer alterações devido a designação do roteador.

A Fig. 16 apresenta um esquemático do protótipo da rede construída com o Raspberry Pi 5 atuando como 5GC e com o *desktop* executando o papel de gNB.

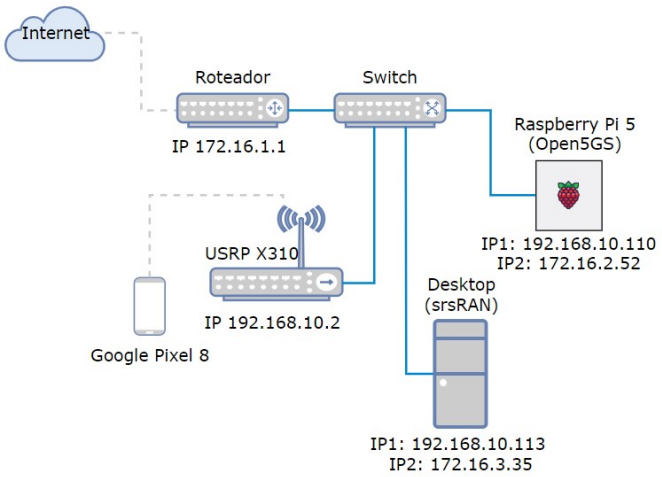


Figura 16: Esquemático rede 5G SA desacoplada com Open5GS no Raspberry Pi 5 e srsRAN em *desktop*.
Fonte: Autor

1) Configuração srsRAN e Open5GS: A instalação da solução srsRAN Project no *desktop* foi executada conforme o protótipo de rede integrada descrito anteriormente. Entretanto, são necessárias alterações nos parâmetros da gNB para a conexão com a CN desacoplada. O endereço da CU passa a ser 192.168.10.113, IP fixado para o *desktop*, e da AMF 192.168.10.110, IP fixado para o Raspberry Pi 5. Este último também deve ser informado para a interface NGAP no arquivo de configuração da AMF executando no Raspberry Pi 5.

Adicionalmente, o encaminhamento de pacotes dos dispositivos de usuário, configurado no serviço UPF, ocorre através de uma interface de tunelamento própria do Open5GS, a "ogstun" que pode ser verificada através do comando "ip a" no terminal do Linux. Por padrão a interface opera com o IP 10.45.0.1 e os IPs de dispositivos de usuário são gerados com a mesma sub-rede 10.45.0.X. Em uma rede com RAN e CN desacopladas, a conexão do UE e 5GC via gNB será estabelecida caso a interface de rede "ogstun" for configurada para receber suas informações a partir do canal de comunicação entre os dispositivos desacoplados. Assim, foi necessário alterar o IP para o qual a interface espera a conexão dos usuários para 192.168.10.110, IP fixado na interface Ethernet do Raspberry Pi 5. Essa alteração não irá impactar o IP de designação do Open5GS para os UEs, apenas indicar o caminho de conexão entre eles.

As alterações nos arquivos de configuração do srsRAN e Open5GS são listadas a seguir:

1) Adicionar arquivo de configuração da gNB no *desktop*

```
cu_cp:
  amf:
    addr: 192.168.10.110
    port: 38412
    bind_addr: 192.168.10.113
    supported_tracking_areas:
      - tac: 7
        plmn_list:
          - plmn: "00101"
            tai_slice_support_list:
              - sst: 1
    inactivity_timer: 7200

ru_sdr:
  device_driver: uhd
  device_args: type=x300, addr=192.168.10.2,
    master_clock_rate=184.32e6, send_frame_size
    =1472, recv_frame_size=1472
  clock: internal
  sync: internal
  srate: 15,36
  tx_gain: 25
  rx_gain: 20

cell_cfg:
  dl_arfcn: 641000
  band: 78
  channel_bandwidth_MHz: 10
  common_scs: 30
  plmn: "00101"
  tac: 7
  pdcch:
    common:
      ss0_index: 0
      coreset0_index: 1
    dedicated:
      ss2_type: common
      dci_format_0_1_and_1_1: false
    prach:
      prach_config_index: 1

log:
  filename: /tmp/gnb.log
  all_level: info
  hex_max_size: 0

pcap:
  mac_enable: false
  mac_filename: /tmp/gnb_mac.pcap
  ngap_enable: false
  ngap_filename: /tmp/gnb_ngap.pcap
```

2) Editar arquivo de configuração do AMF no Raspberry

```
amf:
  sbi:
    server:
        address: 127.0.0.5
        port: 7777
    client:
      scp:
        - uri: http://127.0.0.200:7777
  ngap:
    server:
      - addr: 192.168.10.110
  metrics:
    server:
      - address: 127.0.0.5
        port: 9090
  guami:
```

```
    - plmn_id:
        mcc: 001
        mnc: 01
      amf_id:
        region: 2
        set: 1
  tai:
    - plmn_id:
        mcc: 001
        mnc: 01
      tac: 7
  plmn_support:
    - plmn_id:
        mcc: 001
        mnc: 01
      s_nssai:
        - sst: 1
  security:
    integrity_order : [ NIA2, NIA1, NIA0 ]
    ciphering_order : [ NEA0, NEA1, NEA2 ]
  network_name:
    full: Open5GS
    short: Next
  amf_name: open5gs-amf0
  time:
    t3512:
      value: 540
```

3) Editar arquivo de configuração do UPF

```
upf:
  pfcp:
    server:
      - address: 127.0.0.7
  gtpu:
    server:
      - address: 192.168.10.110
  session:
    - subnet: 10.45.0.0/16
      gateway: 10.45.0.1
    - subnet: 2001:db8:cafe::/48
      gateway: 2001:db8:cafe::1
```

4) Reiniciar serviços e verificar os processos em execução

```
sudo systemctl restart open5gs-*
ps ax|grep open5gs
```

2) Execução da rede: Com o dispositivo de usuário já cadastrado no banco de dados da rede conforme descrito para o protótipo integrado, a execução da rede pode ser realizada sem a necessidade de um novo cadastro. Assim, considerando os serviços do Open5GS já ativos no Raspberry Pi 5, inicia-se a gNB no *desktop* que irá se conectar ao AMF do Open5GS no endereço 192.168.10.110:38412, conforme Fig. 17. O comportamento esperado para o dispositivo de usuário é o mesmo indicado na Fig. 15.

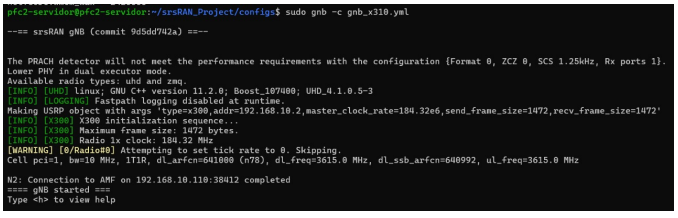


Figura 17: Execução gNB rede desacoplada
Fonte: Autor

D. Resultados

Os dados para análise foram obtidos a partir de testes de velocidade de rede executados no Pixel 8 através da conexão com a Internet e *trace* da gNB, que pode ser ativado utilizando a opção "t" no terminal do Linux onde a estação base está sendo executada.

Os dados do teste de velocidade apresentam as taxas de *Download* e *Upload* em mega bits por segundo (Mbps). O *trace* apresenta as métricas referentes ao *Downlink* (DL) e ao *Uplink* (UL) da RAN trazendo outras informações importantes para a análise do desempenho da rede.

Considerando as métricas para DL e UL, o *Modulation and Coding Scheme* (MCS) indica o esquema de modulação e codificação utilizado para a transmissão de dados da estação base ao UE. O "brate" (*Bitrate*) refere-se à taxa de bits por segundo, vazão (*throughput*) dos dados, representando a velocidade de transferência que está sendo alcançada na transmissão, assim, quanto maior seu valor, maior a eficiência da rede. Por fim, as colunas "ok", "nok" e "%" referem-se, respectivamente, à quantidade de pacotes recebidos, a quantidade de pacotes perdidos e a porcentagem de pacotes perdidos considerando a soma das duas outras colunas como a quantidade total de pacotes.

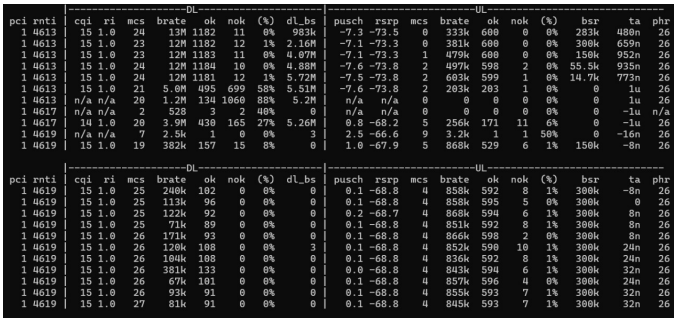
Entre os dados específicos de UL, o *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH) indica o canal de *uplink* físico compartilhado e utilizado para a transmissão dos dados do usuário, já o *Reference Signal Received Power* (RSRP) avalia a potência do sinal recebido por um equipamento de usuário e pode variar entre –44 dBm (sinal muito forte) e –140 dBm (sinal muito fraco). O *Power Headroom Report* (PHR) demonstra a margem de potência disponível para ajuste da transmissão quando necessário, o valor zero neste índice indica que os dispositivos móveis conectados à rede não possuem margem adicional para aumentar sua transmissão sem causar interferências na rede. O *Buffer Status Report* (BSR) é uma mensagem enviada do UE para a gNB para informar sobre a quantidade de dados que o UE tem em seu *buffer* esperando para ser transmitida no *uplink*. O *Timing Advance* (TA) é um valor calculado pela gNB para ajustar a sincronização de tempo do UE no *uplink* compensando o atraso causado pela distância física entre o UE e a gNB, quando maior a distância entre eles, maior os índices de TA.

Ainda, sobre os valores específicos de DL, o *Channel Quality Indicator* (CQI) representa a qualidade do canal entre o dispositivo e a estação base, quando existem dados para análise, o valor do indicador está no intervalo de 1 a 15, sendo 15 a maior qualidade possível. O *Rank Indicator* (RI) indica o número de caminhos de múltipla entrada e múltipla saída (MIMO) que estão sendo usados para a comunicação, valores iguais a 1 indicam que há somente um caminho comunicando com os dispositivos UE. Um resumo com os significados para cada uma das métricas pode ser encontrado na Tabela VII.

A fim de verificar o impacto do desacoplamento da RAN e CN no desempenho da rede, ambos os protótipos foram executados em condições similares e com base nos mesmos parâmetros de configuração: ganho de transmissão (Tx) em 25 dB; ganho de recepção (Rx) em 20 dB; banda 78; largura de banda 10 MHz; taxa de amostragem em 15,36 MHz e espaçamento entre subportadoras de 30 kHz. Esses valores foram obtidos com base em experimentação na busca de otimização do sinal produzido.

Tabela VII: Métricas geradas pelo *trace* da gNB

Indicador	Descrição
mcs	Esquema de modulação e codificação
brate	Taxa de bits por segundo
ok	Quantidade de pacotes recebidos
nok	Quantidade de pacotes perdidos
%	Porcentagem de pacotes perdidos
pusch	Canal de *uplink* físico.
rsrp	Potência do sinal recebido
phr	Margem de potência para ajuste de transmissão
bsr	Quantidade de dados no *buffer* do UE
ta	Ajuste de sincronização de tempo do UE
cqi	Qualidade do canal
ri	Número de caminhos para MIMO



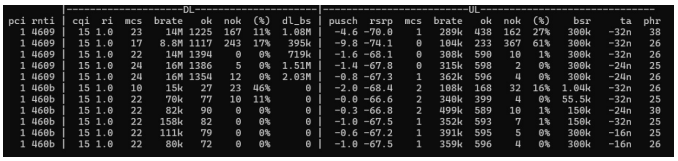
```
                |-------------------DL--------------------|-----------------------UL-----------------------
pci rnti | cqi  ri  mcs  brate   ok  nok  (%)  dl_bs | pusch  rsrp  mcs  brate   ok  nok  (%)    bsr     ta  phr
  1 4613 |  15 1.0   24   13M 1182   11   0%   983k | -7.3 -73.5    0   333k  600    0   0%   283k   480n   26
  1 4613 |  15 1.0   23   12M 1182   12   1% 2.16M | -7.1 -73.3    0   381k  600    0   0%   300k   659n   26
  1 4613 |  15 1.0   23   12M 1183   11   0% 4.07M | -7.1 -73.3    1   479k  600    0   0%   150k   952n   26
  1 4613 |  15 1.0   24   12M 1184   10   0% 4.88M | -7.6 -73.8    2   497k  598    2   0%  55.5k   935n   26
  1 4613 |  15 1.0   24   12M 1181   12   1% 5.72M | -7.5 -73.8    2   603k  599    1   0%  14.7k   773n   26
  1 4613 |  15 1.0   21  5.0M  495  699  58% 5.51M | -7.6 -73.8    2   203k  203    1   0%     0     1u   26
  1 4613 | n/a n/a   20  1.2M  134 1060  88%  5.2M |  n/a   n/a    0     0    0    0   0%     0     1u   26
  1 4617 | n/a n/a    2   528    3    2  40%     0 |  n/a   n/a    0     0    0    0   0%     0    -1u  n/a
  1 4617 |  14 1.0   20  3.9M  430  165  27%  5.26M | 0.8 -68.2    5   256k  171   11   6%     0    -1u   26
  1 4619 | n/a n/a    7  2.5k    1    0   0%     3 | 2.5 -66.6    9   3.2k    1    1  50%     0   -16n   26
  1 4619 |  15 1.0   19   382k  157   15   8%     0 | 1.0 -67.9    5   868k  529    6   1%   150k   -8n   26

                |-------------------DL--------------------|-----------------------UL-----------------------
pci rnti | cqi  ri  mcs  brate   ok  nok  (%)  dl_bs | pusch  rsrp  mcs  brate   ok  nok  (%)    bsr     ta  phr
  1 4619 |  15 1.0   25   240k  102    0   0%     0 | 0.1 -68.8    4   858k  592    8   1%   300k   -8n   26
  1 4619 |  15 1.0   25   113k   96    0   0%     0 | 0.1 -68.8    4   858k  595    5   0%   300k     0   26
  1 4619 |  15 1.0   25   122k   92    0   0%     0 | 0.2 -68.7    4   868k  594    6   1%   300k    8n   26
  1 4619 |  15 1.0   25    71k   89    0   0%     0 | 0.1 -68.8    4   851k  592    8   1%   300k    8n   26
  1 4619 |  15 1.0   26   171k   93    0   0%     0 | 0.1 -68.8    4   866k  598    2   0%   300k    8n   26
  1 4619 |  15 1.0   26   120k  108    0   0%     3 | 0.1 -68.8    4   852k  590   10   1%   300k   24n   26
  1 4619 |  15 1.0   26   104k  108    0   0%     0 | 0.1 -68.8    4   836k  592    8   1%   300k   24n   26
  1 4619 |  15 1.0   26   381k  133    0   0%     0 | 0.0 -68.8    4   843k  594    6   1%   300k   32n   26
  1 4619 |  15 1.0   26    67k  101    0   0%     0 | 0.1 -68.8    4   857k  596    4   0%   300k   24n   26
  1 4619 |  15 1.0   26    93k   91    0   0%     0 | 0.1 -68.8    4   855k  593    7   1%   300k   32n   26
  1 4619 |  15 1.0   27    81k   91    0   0%     0 | 0.1 -68.8    4   845k  593    7   1%   300k   32n   26
```

Figura 19: *Trace* da gNB para teste de rede desacoplada com 11,8 Mpbs de *download* e 0,75 Mbps de *upload*
Fonte: Autor

Com o Raspberry Pi 5 dedicado à execução da RAN e CN, a otimização da rede se mostrou uma tarefa árdua, visto que o dispositivo apresenta sensibilidade quanto à configuração de parâmetros para a gNB, ocasionando alertas de *overflow*/*underflow* que indicam a falta de coordenação entre a taxa com que os dados são enviados e processos entre a gNB e o X310. Para a rede desacoplada, mesmo com a gNB sendo executado em um computador de maior desempenho, os resultados foram semelhantes aos de rede integrada. A Tabela VIII apresenta as taxas máximas, mínimas e a média de *download* e *upload* obtidas nos testes de vazão executados para a rede integrada e desacoplada no dispositivo Google Pixel 8 juntamente com a média de latência em milissegundos. Ainda, a Fig. 19 e Fig. 18 apresentam o *trace* da gNB durante a execução de testes para as redes integrada e desacoplada, respectivamente.

Tabela VIII: Resultados máximos de *download* e *upload* obtidos durante os testes de velocidade de rede

Teste	Indicador	Rede integrada	Rede desacoplada
Download	Máximo	14,70 Mbps	14,90 Mbps
	Média	6,05 Mbps	6,30 Mbps
	Mínimo	0,01 Mbps	0,03 Mbps
	Latência	2613,25 ms	1803,00 ms
Upload	Máximo	1.34 Mbps	1.5 Mbps
	Média	0,44 Mbps	0,44 Mbps
	Mínimo	0,00 Mbps	0,00 Mbps
	Latência	4815,63 ms	7470,00 ms



```
                |-------------------DL--------------------|-----------------------UL-----------------------
pci rnti | cqi  ri  mcs  brate   ok  nok  (%)  dl_bs | pusch  rsrp  mcs  brate   ok  nok  (%)    bsr     ta  phr
  1 4609 |  15 1.0   23   14M 1225  167  11% 1.08M | -4.6 -70.0    1   289k  438  162  27%   300k   -32n   38
  1 4609 |  15 1.0   17  8.8M 1117  243  17%   395k | -9.8 -74.1    0   104k  233  367  61%   300k   -32n   26
  1 4609 |  15 1.0   22   14M 1394    0   0%   719k | -1.6 -68.1    0   308k  598   10   1%   300k   -32n   26
  1 4609 |  15 1.0   24   16M 1386    5   0%  1.51M | -1.4 -67.8    0   315k  598    2   0%   300k   -24n   25
  1 4609 |  15 1.0   24   16M 1354   12   0%  2.03M | -0.8 -67.3    1   362k  596    4   0%   300k   -24n   26
  1 460b |  15 1.0   10   15k   27   23  46%     0 | -2.0 -68.4    2   108k  168   32  16%  1.04k   -32n   26
  1 460b |  15 1.0   22   70k   77   10  11%     0 | -0.0 -66.6    2   340k  399    4   0%  55.5k   -32n   25
  1 460b |  15 1.0   22   82k   90    0   0%     0 | -0.3 -66.8    2   499k  589   10   1%   150k   -24n   30
  1 460b |  15 1.0   22  158k   82    0   0%     0 | -1.0 -67.5    1   352k  593    7   1%   150k   -32n   25
  1 460b |  15 1.0   22  111k   79    0   0%     0 | -0.6 -67.2    1   391k  595    5   0%   300k   -16n   25
  1 460b |  15 1.0   22   80k   72    0   0%     0 | -1.0 -67.5    1   359k  596    4   0%   300k   -16n   26
```

Figura 18: *Trace* da gNB para teste de rede integrada com 14,7 Mpbs de *download* e 0,29 Mbps de *upload*
Fonte: Autor

E. Discussões

A fim de estabelecer um parâmetro de comparação para os resultados obtidos de *throughput*, foi calculado o valor teórico para este indicador a partir da ferramenta "5G NR Throughput calculator" disponível em [39]. Para este cálculo, é necessário identificar nas configurações da gNB: o modo de transferência de dados atrelado à banda selecionada, TDD para banda 78; número de portadoras componentes agregadas, valor 1 para redes que não operam com agregação de portadoras; número máximo de camadas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), valor 1 para configurações de entrada e saída únicas (SISO); modulação usada para transmissão de dados; largura de banda, configurada em 10 MHz; espaçamento entre subportadoras, definido em 30 kHz e modo de alocação de símbolos para TDD.

A modulação e o modo de alocação de símbolos podem ser verificados através do log da gNB que imprime a configuração completa da RAN. Na seção que indica as características de célula, a modulação é determinada no item MCS dentro das configurações de canais físicos para transmissão de dados compartilhados de DL (*Physical Downlink Shared Channel*, PDSCH) e UL (*Physical Uplink Shared Channel*, PUSCH). Por padrão, o srsRAN define o MCS como Modulação de Amplitude em Quadratura 64 (64-QAM). Ainda nas definições de célula, o modo de alocação de símbolos para a transferência de dados é indicado na seção de configuração para o TDD, "tdd_ul_dl_cfg". Como os valores estabelecidos não estão em formato pré-determinado pela 3GPP, o cálculo deste índice foi realizado de maneira manual a partir da razão entre o número de símbolos de *downlink* e o número total de símbolos, conforme indicado pela documentação [39]. A partir destas informações, os valores teóricos de DL e UL foram calculados em 22,013 Mbps e 23,548 Mbps, respectivamente, os valores máximos encontrados experimentalmente representam aproximadamente 66,78% do valor teórico para DL e 12,74% para UL.

Conforme os resultados obtidos experimentalmente, observa-se que a implantação de uma rede 5G SA a partir de um Raspberry Pi 5 é desafiadora, suportando parâmetros de configuração limitados e apresenta qualidade de serviço reduzida para tecnologias de quinta geração que promovem baixa latência, conexão massiva de dispositivos e largura de banda aprimorada. Essa limitação está atrelada à ambos os componentes de *software* e *hardware* utilizados na composição da rede.

O srsRAN exige alta capacidade computacional devido ao processamento intensivo de sinal em tempo real, o que pode

levar a limitações de desempenho em dispositivos de baixo custo, especialmente em cenários com alta carga de tráfego. Os erros de *overflow* e *underflow* ocorrem quando os *socket buffers*, áreas reservadas na memória RAM pelo sistema operacional para o gerenciamento de dados em trânsito, atingem sua capacidade máxima, impedindo o armazenamento de novas informações e resultando em perdas de dados [40]. Este estado indica que a velocidade de processamento das informações está abaixo do esperado, influenciando diretamente no potencial da rede e impedindo o suporte a parâmetros aprimorados de largura de banda e taxa de amostragem condizentes com as especificações do 5G. Embora o Raspberry Pi 5 utilize um processador Broadcom BCM2712 de 2,4 GHz com arquitetura Arm Cortex-A76, sua capacidade de processamento é significativamente inferior à de *hardware* recomentado para o uso do X310: processador Intel Core i7 com quatro núcleos [41], que oferece velocidades de *clock* superiores, maior número de *threads* simultâneos graças ao *Hyper-Threading*, *caches* maiores (tipicamente acima de 12 MB) e suporte a instruções otimizadas para cargas pesadas.

No Raspberry Pi 5, os *buffers* foram alocados para 2,45 MB, valores indicados para o uso do X310, por este motivo o uso de memória se mantém em níveis controlados durante os testes de velocidade realizados para o dispositivo de usuário, conforme Fig. 20, enquanto os núcleos encontram-se saturados para o controle de todos os processos sendo executados. Uma possibilidade de contorno dessa limitação seria a alocação de maior espaço para os *buffers*, possibilitando aumento no armazenamento de dados em memória. Entretanto, essa abordagem deve ser realizada com cautela, pois apesar do armazenamento maior, a velocidade de processamento dos dados permanecerá a mesma ocasionando, eventualmente, os mesmos erros. Ainda, o aumento dos *buffers* tende a aumentar a latência da comunicação visto que existe uma fila maior de dados a serem processados.

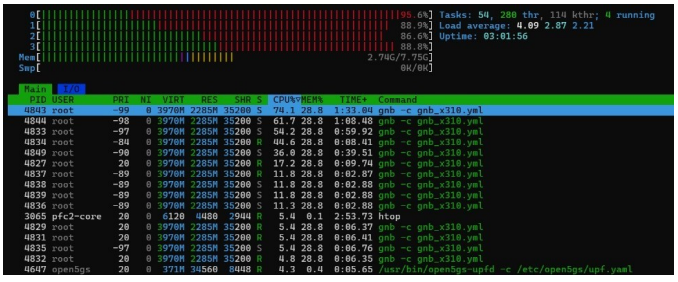


Figura 20: Uso computacional Raspberry Pi 5 durante testes de velocidade com a ocorrência de *overflow* e *underflow*
Fonte: Autor

No cenário com o *desktop* executando como gNB e CN no Raspberry Pi 5, foi possível verificar que o desacoplamento de rede para execução da gNB em máquina dedicada não apresentou melhora significativa. Dessa forma, apesar da comunicação entre RAN e SDR ser processada através de um Intel Core i5-4570 3.2 GHz, ocorreram eventuais erros de *overflow* e *underflow* indicando que a velocidade de processamento ainda está abaixo do esperado para a troca de dados entre a gNB e o SDR com os parâmetros de configuração estabelecidos, mostrando que o *fronthaul* é o gargalo para o testbed em análise, demandando que mais recursos de processamento e I/O devem ser alocados para a gNB, e que o núcleo pode ser implementado com *hardware* de baixo custo.

V. Conclusões e Trabalhos Futuros

A implementação de redes 5G privativas marca um avanço importante na unificação dos processos de monitoramento e controle no setor industrial, oferecendo um nível de confiabilidade comparável ao das tecnologias cabeadas. Além disso, o uso de ferramentas de código aberto desempenha um papel essencial na democratização do acesso à tecnologia, impulsionando a inovação e simplificando o desenvolvimento de infraestruturas mais sofisticadas.

Visando fomentar o desenvolvimento das tecnologias de rede no país, a ANATEL simplifica o acesso e reduz os custos associados ao licenciamento de redes privativas e ao espectro de radiofrequências no Brasil. As etapas necessárias para obtenção da licença podem ser realizadas virtualmente, com a maioria dos custos sendo pagos apenas uma vez e totalizando um valor inferior a R$ 500,00. Facilitando o acesso à essa tecnologia para as PMEs.

Este estudo detalhou os procedimentos necessários para implantação de redes 5G SA a partir das soluções srsRAN e Open5GS integradas em um Raspberrry Pi 5 e desacopladas com RAN executando em um *desktop* de montagem própria. Os resultados indicam que a implementação nestes dispositivos de baixo custo é possível, mas apresenta desempenho abaixo do esperado de uma rede 5G graças ao gargalo imposto pelo *fronthaul*, mostrando que para a implementação de uma *testbed* que atenda às necessidades de PMEs, será necessário um *hardware* com mais recursos para a gNB. Ainda, o X310 apresenta custos elevados para um produto destinado a PMEs, dessa forma, ele pode ser substituído por SDRs de menor custo como o URSP B200, de forma que os recursos financeiros sejam alocados para a compra de um *hardware* mais potente voltado a execução do *software* da gNB. O desacoplamento de rede permitiu uma verificação interessante deste estudo, indicando que o núcleo da rede não necessita de tantos recursos, podendo então ser implementado por meio de *hardwares* mais simples.

Em resumo, esta pesquisa apresenta o ponto de partida para o uso do Raspberry Pi 5 no desenvolvimento de uma solução de rede 5G de ponta a ponta destinada a PMEs. Para trabalhos futuros, é de interesse a análise de compatibilidade da rede com rádio definido por *software* mais acessível, a fim de reduzir os custos de implantação completa da rede. Adicionalmente, o desempenho dos protótipos pode ser aprimorado por meio de um entendimento mais profundo das configurações e otimizações do srsRAN e do Open5GS, permitindo alcançar resultados mais eficientes e adequados às necessidades específicas do ambiente de aplicação.

VI. Agradecimentos

Agradecemos a nosso professor e orientador Flávio Geraldo Coelho Rocha, por sua dedicação, paciência e orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua expertise,

apoio constante e valiosas sugestões foram fundamentais para superar os desafios enfrentados durante esta pesquisa. Ainda, ao professor Álisson Assis Cardoso que se prontificou a nos emprestar material de seu acervo pessoal para possibilitar a execução da pesquisa. Estendemos o agradecimento ao nosso colega Ezequiel Tavares por auxilio durante a realização de testes e debates importantes para o entendimento sobre os resultados obtidos. À nossa colega Fernanda de Castro Fernandes por auxiliar em todas as etapas da apresentação do trabalho. Por fim, somos gratos aos nossos familiares, parceiros e amigos que nos acompanharam ao longo desta jornada. O apoio incondicional, especialmente nos momentos desafiadores, foi essencial para a conclusão deste trabalho, nos proporcionando a oportunidade de aprender e compartilhar.

VII. Lista de siglas e acrônimos

3GPP	*3rd Generation Partnership Project*
AGPLv3	*Affero General Public License v3*
AMF	*Access and Mobility Management Function*
APN	*Access Point Name*
ARM	*Advanced RISC Machines*
AUSF	*Authentication Server Function*
BSR	*Buffer Status Report*
CN	*Core Network*
CQI	*Channel Quality Indicator*
DL	*Downlink*
EPC	*Evolved Packet Core*
gNB	*gNodeB*
IMSI	*International Mobile Subscriber Identity*
IP	*Internet Protocol*
MAC	*Medium Access Control*
MCS	*Modulation and Coding Scheme*
MTU	*Maximum Transmission Unit*
NSA	*Non-Stand Alone*
NRF	*Network Repository Function*
NSSF	*Network Slice Selection Function*
OAI	OpenAirInterface
OPC	*Operator Key*
ORAN	*Open RAN Alliance*
OSA	*OpenAirInterface Software Alliance*
PCF	*Policy Control Function*
PDSCH	*Physical Downlink Shared Channel*
PHR	*Power Headroom Report*
PLMN	*Public Land Mobile Network*
PDCP	*Packet Data Convergence Protocol*
PUSCH	*Physical Uplink Shared Channel*
QoS	*Quality of Service*
RAN	*Radio Access Network*
RI	*Rank Indicator*
RLC	*Radio Link Control*
RRC	*Radio Resource Control*
RSRP	*Reference Signal Received Power*
SA	*Stand Alone*
SCTP	*Stream Control Transmission Protocol*
SDAP	*Service Data Adaptation Protocol*
SDR	*Software Defined Radio*
SMF	*Session Management Function*
srsRAN	*Software Radio Systems Radio Access Network*
TA	*Timing Advance*
TAC	*Tracking Area Code*
UDM	*Unified Data Management*
UDR	*Unified Data Repository*
UE	*User Equipment*
UHD	*USRP Hardware Driver*
UL	*Uplink*
USRP	*Universal Software Radio Peripheral*

Referências

[1] O. O. Erunkulu, A. M. Zungeru, C. K. Lebekwe, M. Mosalaosi, e J. M. Chuma, "5G Mobile Communication Applications: A Survey and Comparison of Use Cases," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 97 251–97 295, 2021.

[2] A. I. Grohmann, M. Seidel, C. Lehmann, T. Höschele, M. Reisslein, e F. H. Fitzek, "5g on the cheap: Configurable low-cost cellular industrial communication," em *2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, 2022, pp. 1–6.

[3] A. Aijaz, "Private 5G: The Future of Industrial Wireless," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 14, no. 4, pp. 136–145, 2020.

[4] Agência Nacional de Telecomunicações, "Atos de RF - Redes Privativas," 2023, Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/outorga-e-licenciamento/atos-de-rf-redes-privativas>. Acesso em: 06 de jun. de 2024.

[5] Software Radio Systems, "Simplify Open RAN," 2023, Disponível em: <https://srs.io>. Acesso em: 11 de mar. de 2024.

[6] OpenAirInterface, "THE FASTEST GROWING COMMUNITY AND SOFTWARE ASSETS IN 5G WIRELESS," 2024, Disponível em: <https://openairinterface.org>. Acesso em: 11 de mar. de 2024.

[7] Open5GS, "Open5GS," 2024, Disponível em: <https://open5gs.org>. Acesso em: 11 de mar. de 2024.

[8] free5GC, "What is free5GC?" Disponível em: <https://free5gc.org>. Acesso em: 05 de jul. de 2024.

[9] M. Chepkoech, N. Mombeshora, B. Malila, e J. Mwangama, "Evaluation of Open-Source Mobile Network Software Stacks: A Guide to Low-cost Deployment of 5G Testbeds," em *2023 18th Wireless On-Demand Network Systems and Services Conference (WONS)*, 2023, pp. 56–63.

[10] L. Mamushiane, A. Lysko, H. Kobo, e J. Mwangama, "Deploying a Stable 5G SA Testbed Using srsRAN and Open5GS: UE Integration and Troubleshooting Towards Network Slicing," em *2023 International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD)*, 2023, pp. 1–10.

[11] L. Mamushiane, A. A. Lysko, T. Makhosa, J. Mwangama, H. Kobo, A. Mbanga, e R. Tshimange, "Towards stress testing open5gs core (upf node) on a 5g standalone testbed," em *2023 IEEE AFRICON*, 2023, pp. 1–6.

[12] J. J. Abularach Arnez, W. Medeiros Silva, R. K. Gomes Do Reis, L. A. Da Silva, e M. G. Lima Damasceno, "Sdr 5g nsa mobile network and an ims core to provide voice over ip lte service," em *2022 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, 2022, pp. 071–076.

[13] F. J. De Souza Neto, E. Amatucci, N. A. Nassif, e P. A. Marques Farias, "Analysis for comparison of framework for 5g core implementation," em *2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT)*, 2021, pp. 1–5.

[14] Magma, "A modern mobile core network solution," 2024, Disponível em: <https://magmacore.org>. Acesso em: 15 de nov. de 2024.

[15] M. K. Chamran, K.-L. A. Yau, R. M. D. Noor, e R. Wong, "A distributed testbed for 5g scenarios: An experimental study," *Sensors*, vol. 20, no. 1, 2020. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1424-8220/20/1/18

[16] 3rd Generation Partnership Project, "5G System Overview," 2022, Disponível em: <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview>. Acesso em: 17 de maio de 2024.

[17] ——, "NG-RAN Architecture," 2021, Disponível em: <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/ng-ran-architecture>. Acesso em: 17 de maio de 2024.

[18] F. Kaltenberger, A. P. Silva, A. Gosain, L. Wang, e T.-T. Nguyen, "OpenAirInterface: Democratizing innovation in the 5G Era," *Computer Networks*, vol. 176, p. 107284, 2020.

[19] OpenAirInterface Software Alliance, "OAI Public License," 2017, Disponível em: <https://openairinterface.org/legal/oai-public-license/>. Acesso em: 20 de mar. de 2024.

[20] Apache Software Foundation, "Apache License Version 2.0," 2004, Disponível em: <https://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0>. Acesso em: 20 de mar. de 2024.

[21] Firecell, "Private 5G made simple," 2023, Disponível em: <https://firecell.io>. Acesso em: 20 de abr. de 2024.

[22] GNU Operating System, "GNU Affero General Public License," 2007, Disponível em: <https://www.gnu.org/licenses/agpl-3.0.en.html>. Acesso em: 12 de abr. de 2024.

[23] Software Radio Systems, "O-RAN gNB Overview," 2023, Disponível em: <https://docs.srsran.com/projects/project/en/latest/knowledge_base/source/orangnb/source>. Acesso em: 16 de set. de 2024.

[24] O-RAN Alliance, “O-RAN Architecture Overview,” 2023, Disponível em: <https://docs.o-ran-sc.org/en/latest/architecture/architecture.html components-definition>. Acesso em: 17 de set. de 2024.

[25] Suckchan Lee, “Quickstart,” 2024, Disponível em: <https://open5gs.org/open5gs/docs/guide/01-quickstart/>. Acesso em: 16 de set. de 2024.

[26] Agência Nacional de Telecomunicações, “Resolução nº 73, de 25 de novembro de 1998,” 1998, Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/13-1998/34-resolucao-73>. Acesso em: 25 de jun. de 2024.

[27] ——, “Espectro,” 2022, Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/espectro>. Acesso em: 25 de jun. de 2024.

[28] ——, “Serviço Limitado Privado,” 2023, Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/outorga/servico-limitado-privado>. Acesso em: 25 de jun. de 2024.

[29] ——, “Simulação de Cálculo PPDUR,” 2018, Disponível em: <https://sistemas.anatel.gov.br/apoio_sitarweb/SPPDUR/telaz.asp>. Acesso em: 25 de jun. de 2024.

[30] Software Radio Systems, “Hardware Options,” 2022, Disponível em: <https://docs.srsran.com/projects/4g/en/latest/app_notes/source/hw_packs/source/index.html>. Acesso em: 06 de jun. de 2024.

[31] Centro de Excelência em Redes Inteligentes Sem Fio e Serviços Avançados, “Redes que pensam, Aplicações que sentem,” 2024, Disponível em: <https://website-cerise.vercel.app>. Acesso em: 30 de nov. de 2024.

[32] Etthus Research, “USRP X310,” 2024, Disponível em: <https://www.ettus.com/all-products/x310-kit/>. Acesso em: 30 de nov. de 2024.

[33] Software Radio Systems, “Installation Guide,” 2024, Disponível em: <https://docs.srsran.com/projects/project/en/latest/user_manuals/source/installation.htmlmanual-installation-build>. Acesso em: 17 de set. de 2024.

[34] ——, “Running srsRAN Project,” 2023, Disponível em: <https://docs.srsran.com/projects/project/en/latest/user_manuals/source/running.html>. Acesso em: 17 de set. de 2024.

[35] Sukchan Lee, “Quickstart,” 2024, Disponível em: <https://open5gs.org/open5gs/docs/guide/01-quickstart/>. Acesso em: 17 de set. de 2024.

[36] MongoDB, “MongoDB Atlas,” 2024, Disponível em: <https://www.mongodb.com/pt-br>. Acesso em: 16 de set. de 2024.

[37] ——, “Notas de produção para implantações autogerenciadas,” 2024, Disponível em: <https://www.mongodb.com/pt-br/docs/manual/administration/production-notes/>. Acesso em: 17 de set. de 2024.

[38] Software Radio Systems, “srsRAN gNB with COTS UEs,” 2024, Disponível em: <https://docs.srsran.com/projects/project/en/latest/tutorials/source/cotsUE/source/index.html>. Acesso em: 30 de out. de 2024.

[39] 5G Tools, “5G NR Throughput calculator,” 2024, Disponível em: <https://5g-tools.com/5g-nr-throughput-calculator/>. Acesso em: 01 de dez. de 2024.

[40] Ettus Research, “USRP Hardware Driver and USRP Manual: General Application Notes,” 2024, Disponível em: <https://files.ettus.com/manual/page_general.html>. Acesso em: 30 de out. de 2024.

[41] ——, “X300/X310,” 2024, Disponível em: <https://kb.ettus.com/X300/X310Option:_General_Purpose_Input.2FOutput_.28GPIO.29_Kit>. Acesso em: 01 de dez. de 2024.

Flávio G.C. Rocha possui experiência em Engenharia Elétrica, com ênfase em Telecomunicações, Engenharia da Computação e Ciência da Computação. Trabalhando majoritariamente nos seguintes tópicos: modelagem, análise de performance, predição, e controle de tráfego de redes de computadores e redes sem fio. Atualmente, ele atua como professor na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação na UFG.

Giulia F. Gomes é uma estudante de graduação de Engenharia da Computação na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás (UFG). Atualmente, trabalha como desenvolvedora de software e conduz pesquisa na área de tecnologia 5G, voltada para pequenas e médias empreses, com foco em soluções acessíveis e de baixo custo.

Ytalo B. B. Silva é um estudante de graduação em Engenharia de Computação na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG. Ele atualmente está conduzindo pesquisas no campo de soluções 5G de baixo custo para pequenas e médias empresas.