INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA

COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARIA DA CONCEIÇÃO ZELO BARBOSA PATRICIO

UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM REDES 5G

João Pessoa - PB

2026

MARIA DA CONCEIÇÃO ZELO BARBOSA PATRICIO

UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM REDES 5G

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Michel Coura Dias

João Pessoa - PB

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *campus* João Pessoa

P314a Patricio, Maria da Conceição Zelo Barbosa.
Uma abordagem experimental para avaliação de desempenho em redes 5G / Maria da Conceição Zelo Barbosa Patricio. – 2026.
65 f. : il.

TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB / Coordenação de Engenharia Elétrica.
Orientador: Michel Coura Dias.

1. Redes 5G privativas. 2. Arquitetura standalone. 3. Observabilidade. 4. Open5GS. 5. OpenAirInterface. I. Título.

CDU 621.39

Bibliotecário responsável Marx da Silva Medeiros – CRB15/470

MARIA DA CONCEIÇÃO ZELO BARBOSA PATRICIO

UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM REDES 5G

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO submetido à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), em cumprimento dos requisitos institucionais para a obtenção do Título de **ENGENHEIRA ELETRICISTA**

Aprovado em 20 de fevereiro de 2026.

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Me. Michel Coura Dias
Instituto Federal da Paraíba (IFPB)
Orientador

Prof. Dr. Ruan Delgado Gomes
Instituto Federal da Paraíba (IFPB)
Examinador

Prof. Dr. Paulo Ditarso Maciel Júnior
Instituto Federal da Paraíba (IFPB)
Examinador

Documento assinado eletronicamente por:

- **Michel Coura Dias**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 24/02/2026 12:33:33.
- **Ruan Delgado Gomes**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 24/02/2026 12:34:31.
- **Paulo Ditarso Maciel Junior**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 25/02/2026 07:29:09.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 24/02/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/ e forneça os dados abaixo:

Código 839548
Verificador: b83fb918ac
Código de Autenticação:

"Se você desenvolveu o hábito de ver a vida apenas de sua perspectiva, pode cometer o engano de acreditar que suas limitações são, de fato, a medida correta das limitações."

Napoleon Hill

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta a implementação, validação e análise de desempenho de uma rede 5G privativa (*Non-Public Network* – NPN), baseada na arquitetura *Standalone* (SA) e em soluções de código aberto, como Open5GS e OpenAirInterface. O trabalho contempla a construção de um *testbed* experimental composto pelo núcleo 5G virtualizado em contêineres, pela Rede de Acesso por Rádio (*Radio Access Network* – RAN) implementada via *software* e rádio definido por *software* (*Software-Defined Radio* – SDR), e por um Equipamento de Usuário (*User Equipment* – UE) real. São descritos os procedimentos de configuração, integração entre RAN e núcleo da rede (*Core Network*), estabelecimento de sessões *Protocol Data Unit* (PDU) e validação da conectividade fim a fim. Adicionalmente, é apresentado um mecanismo de observabilidade baseado em Prometheus e Grafana, desenvolvido para converter *logs* do *Next Generation Node B* (gNB) em métricas estruturadas, permitindo monitoramento contínuo de indicadores-chave de desempenho (*Key Performance Indicators* – KPIs) da rede. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade técnica de arquiteturas 5G privativas em ambiente experimental, evidenciando a interoperabilidade entre núcleo, RAN e UE, bem como a capacidade de monitoramento estruturado por meio de ferramentas modernas de observabilidade.

Palavras-chave: Redes 5G Privativas; Arquitetura *Standalone*; Observabilidade; Open5GS; OpenAirInterface.

ABSTRACT

This Undergraduate Thesis presents the implementation, validation, and performance analysis of a private 5G network (Non-Public Network – NPN) based on the Standalone (SA) architecture and open-source solutions, including Open5GS and OpenAirInterface. The work encompasses the construction of an experimental testbed composed of a virtualized 5G Core Network deployed in containers, a software-based Radio Access Network (RAN) implemented using Software-Defined Radio (SDR), and a real User Equipment (UE). The configuration procedures, RAN–Core integration, Protocol Data Unit (PDU) session establishment, and end-to-end connectivity validation are described in detail. Additionally, an observability mechanism based on Prometheus and Grafana is presented, developed to convert Next Generation Node B (gNB) logs into structured performance metrics, enabling continuous monitoring of Key Performance Indicators (KPIs). The results demonstrate the technical feasibility of private 5G architectures in an experimental environment, highlighting interoperability among the 5G Core Network, RAN, and UE, as well as the effectiveness of structured monitoring through modern observability tools.

Keywords: Private 5G Networks; Standalone Architecture; Observability; Open5GS; OpenAirInterface.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE QUADROS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP *3rd Generation Partnership Project*

5G Quinta Geração de Redes Móveis

5GC *5G Core Network* (Núcleo 5G)

5GS *5G System* (Sistema 5G)

AF *Application Function* (Função de Aplicação)

AES-CMAC *Advanced Encryption Standard – Cipher-based Message Authentication Code*

AES-CTR *Advanced Encryption Standard – Counter Mode*

AMF *Access and Mobility Management Function*

ANATEL Agência Nacional de Telecomunicações

API *Application Programming Interface* (Interface de Programação de Aplicações)

APN *Access Point Name* (Nome do Ponto de Acesso)

ASIC *Application-Specific Integrated Circuit* (Circuito Integrado de Aplicação Específica)

AUSF *Authentication Server Function*

BLER *Block Error Rate* (Taxa de Erro de Bloco)

BSS *Business Support System* (Sistema de Suporte ao Negócio)

COTS *Commercial Off-The-Shelf*

CP *Control Plane* (Plano de Controle)

CPU *Central Processing Unit* (Unidade Central de Processamento)

CU *Centralized Unit*

CUPS *Control and User Plane Separation*

DL *Downlink* (Enlace de Descida)

DNN *Data Network Name*

DU *Distributed Unit*

eMBB *Enhanced Mobile Broadband*

eNB *Evolved NodeB*

ETSI *European Telecommunications Standards Institute*

FPGA *Field-Programmable Gate Array*

gNB *Next Generation NodeB*

GPRS *General Packet Radio Service*

GTP *GPRS Tunneling Protocol*

GTP-U *GPRS Tunneling Protocol – User Plane*

GPSDO *Global Positioning System Disciplined Oscillator*

HARQ *Hybrid Automatic Repeat Request*

HTTP *Hypertext Transfer Protocol*

HTTP/2 *Hypertext Transfer Protocol version 2*

ICMP *Internet Control Message Protocol*

IFPB Instituto Federal da Paraíba

IP *Internet Protocol*

I/Q *In-phase and Quadrature*

IoT *Internet of Things*

KPI *Key Performance Indicator* (Indicador-Chave de Desempenho)

LTE *Long-Term Evolution*

MAC *Medium Access Control*

MCC *Mobile Country Code*

MNC *Mobile Network Code*

mMTC *Massive Machine-Type Communications*

MTTR *Mean Time To Repair*

NAS *Non-Access Stratum*

NEA2 *128-bit Encryption Algorithm 2* (Algoritmo de Cifragem baseado em AES-CTR)

NEF *Network Exposure Function*

NF *Network Function*

NFV *Network Functions Virtualization*

NG-RAN *Next Generation Radio Access Network*

NGAP *Next Generation Application Protocol*

NIA2 *128-bit Integrity Algorithm 2* (Algoritmo de Integridade baseado em AES-CMAC)

NPN *Non-Public Network*

NR *New Radio*

NRF *Network Repository Function*

NSSF *Network Slice Selection Function*

NWDAF *Network Data Analytics Function*

O-RAN *Open Radio Access Network*

OAI *OpenAirInterface*

OSS *Operations Support System*

PCF *Policy Control Function*

PDU *Protocol Data Unit*

PFCP *Packet Forwarding Control Protocol*

PLMN *Public Land Mobile Network*

PNI-NPN *Public Network Integrated Non-Public Network*

QoS *Quality of Service* (Qualidade de Serviço)

RAN *Radio Access Network*

RIC *RAN Intelligent Controller*

RNTI *Radio Network Temporary Identifier*

RRC *Radio Resource Control*

RRM *Radio Resource Management*

RSRP *Reference Signal Received Power*

RTT *Round Trip Time*

RU *Radio Unit*

S-NSSAI *Single Network Slice Selection Assistance Information*

SA *Standalone*

SBA *Service-Based Architecture*

SCTP *Stream Control Transmission Protocol*

SDN *Software-Defined Networking*

SDR *Software-Defined Radio*

SDSF *Structured Data Storage Function*

SMF *Session Management Function*

SNMP *Simple Network Management Protocol*

SNPN *Standalone Non-Public Network*

SON *Self-Organizing Network*

SQL *Structured Query Language*

SST *Slice/Service Type*

TAC *Tracking Area Code*

TDD *Time Division Duplex*

TEID *Tunnel Endpoint Identifier*

TSDB *Time Series Database*

UDM *Unified Data Management*

UDP *User Datagram Protocol*

UDSF *Unstructured Data Storage Function*

UE *User Equipment*

UL *Uplink* (Enlace de Subida)

UP *User Plane*

UPF *User Plane Function*

URLLC *Ultra-Reliable Low-Latency Communications*

USB *Universal Serial Bus*

UHD *USRP Hardware Driver*

USRP *Universal Software Radio Peripheral*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

As redes móveis de quinta geração (5G) representam um avanço significativo em relação às gerações anteriores ao introduzirem uma arquitetura mais flexível, modular e orientada a serviços, capaz de atender a requisitos heterogêneos de desempenho. Diferentemente das gerações anteriores, o 5G foi concebido para suportar não apenas comunicações de alta taxa de dados, mas também aplicações com requisitos rigorosos de latência, confiabilidade e escalabilidade, incluindo cenários industriais avançados associados ao conceito de Indústria 4.0 (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Esse avanço é viabilizado pela arquitetura do *5G System* (5GS), que incorpora conceitos como a separação entre plano de controle e plano de usuário, virtualização de funções de rede e uso intensivo de *software*. Essa arquitetura permite maior flexibilidade na implantação e no gerenciamento da rede, ao mesmo tempo em que aumenta sua complexidade operacional (European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2021b). Como consequência, torna-se fundamental adotar mecanismos adequados para a avaliação de desempenho e o acompanhamento do comportamento da rede em diferentes condições de operação.

Nesse cenário, a avaliação sistemática do desempenho de redes 5G torna-se um desafio relevante, especialmente quando considerada a adoção de arquiteturas virtualizadas e baseadas em *software*. A literatura recente aponta diferentes propostas para monitoramento e análise de métricas de desempenho, com base em *Key Performance Indicators* (KPIs), indicando a necessidade de estudos experimentais que permitam avaliar, na prática, o comportamento dessas redes em ambientes controlados (PAPAIOANNOU et al., 2021; TRUJILLO et al., 2022).

1.1 JUSTIFICATIVA

A avaliação de desempenho em redes móveis de quinta geração (5G) é um aspecto fundamental para garantir que os requisitos de qualidade e confiabilidade dos serviços sejam atendidos. Em virtude da adoção de arquiteturas virtualizadas e orientadas a serviços, o acompanhamento do comportamento da rede passa a exigir mecanismos mais elaborados do que aqueles tradicionalmente utilizados em gerações anteriores. Nesse contexto, a análise sistemática do desempenho torna-se um elemento central para a operação e o gerenciamento de redes 5G.

Uma abordagem adotada para essa finalidade consiste no monitoramento de indicadores-chave de desempenho, conhecidos como KPIs. Esses indicadores permitem quantificar diferentes aspectos do funcionamento da rede, como eficiência, confiabilidade e qualidade dos serviços oferecidos. O *European Telecommunications Standards Institute*

(ETSI) define um conjunto de KPIs ponta a ponta para redes 5G, abrangendo diferentes domínios e possibilitando uma avaliação estruturada do desempenho da rede como um todo (European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2021a). A utilização de métricas padronizadas é essencial para assegurar consistência e comparabilidade entre diferentes estudos e cenários de avaliação.

Apesar da existência de definições normativas para KPIs, a literatura aponta que abordagens tradicionais de monitoramento apresentam limitações quando aplicadas a redes 5G. Essas limitações tornam-se mais evidentes em ambientes altamente dinâmicos e virtualizados, nos quais a simples coleta de métricas não é suficiente para capturar o comportamento complexo da rede. Trabalhos recentes destacam a necessidade de metodologias e arquiteturas de monitoramento mais flexíveis, capazes de lidar com a heterogeneidade dos serviços e com a dinâmica operacional característica das redes 5G (TRUJILLO et al., 2022; SAHA et al., 2023).

Diante dessas limitações, o uso de ambientes experimentais tem se mostrado uma alternativa relevante para a investigação e validação de estratégias de monitoramento em redes 5G. Ambientes desse tipo permitem a reprodução controlada de cenários reais de rede, possibilitando a implementação prática de mecanismos de monitoramento e a coleta detalhada de KPIs sob diferentes condições de operação. Além disso, plataformas experimentais baseadas em código aberto favorecem a transparência, a reprodutibilidade dos experimentos e a comparação com resultados reportados na literatura (NIKAEIN et al., 2014; MATZAKOS et al., 2021).

Do ponto de vista acadêmico, a realização de estudos experimentais voltados ao monitoramento e à avaliação de desempenho em redes 5G contribui para o aprofundamento do conhecimento sobre arquiteturas modernas de telecomunicações e sobre o uso de métricas padronizadas em ambientes complexos. Sob a perspectiva prática, esses estudos auxiliam no desenvolvimento e na validação de soluções mais eficazes para o gerenciamento de redes 5G, evidenciando a relevância do presente trabalho tanto no contexto científico quanto aplicado.

1.2 OBJETIVOS

Esta seção apresenta os objetivos do trabalho, definidos de forma a orientar o desenvolvimento do estudo e a delimitar seu escopo.

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho de uma rede 5G privativa, implementada em ambiente experimental, por meio de uma estratégia estruturada de monitoramento baseada em indicadores de desempenho padronizados e em abordagens reportadas na literatura.

1.2.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. descrever a arquitetura da rede 5G privativa implementada no ambiente experimental;
2. selecionar e caracterizar indicadores-chave de desempenho adequados à avaliação da rede;
3. implementar um mecanismo de monitoramento baseado em plataformas abertas para a coleta e visualização das métricas;
4. analisar os resultados obtidos a partir dos dados coletados, considerando os indicadores definidos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, abordando a evolução arquitetural das redes 5G, a arquitetura baseada em serviços do 5G Core, os protocolos do plano de usuário e os conceitos de observabilidade aplicados a ambientes virtualizados. O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada, detalhando a implementação da rede 5G privativa em arquitetura *Standalone*, a configuração do núcleo Open5GS, da RAN baseada em OpenAirInterface e do Equipamento de Usuário, bem como o mecanismo de exportação e monitoramento de métricas. O Capítulo 4 apresenta a análise de desempenho da rede, discutindo os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados, com base em indicadores de integridade do enlace, capacidade de transporte e latência fim-a-fim. Por fim, o Capítulo 5 reúne as considerações finais, destacando as contribuições do trabalho e as possibilidades de evolução da infraestrutura experimental.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

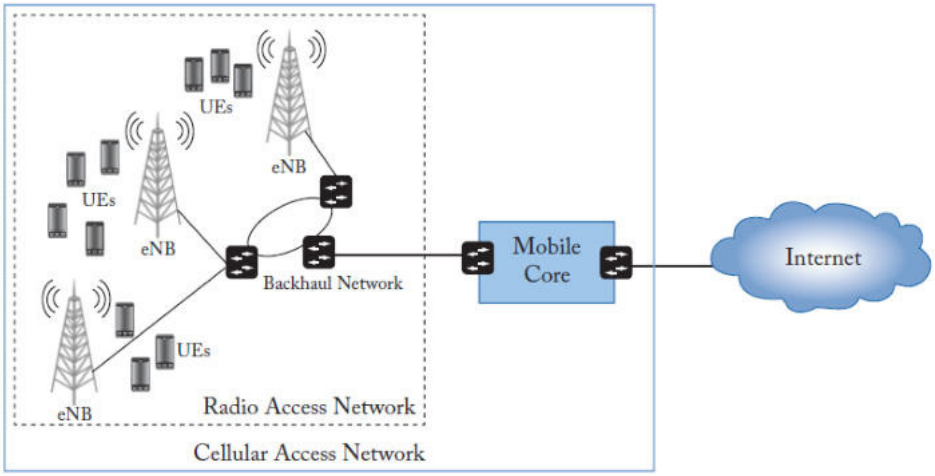
Este capítulo apresenta os alicerces teóricos necessários para a compreensão das atividades desenvolvidas no estágio. Discute-se a evolução arquitetural das redes móveis em direção à softwarização, a arquitetura baseada em serviços do 5G, os protocolos de tunelamento no plano de usuário e os paradigmas de observabilidade em ambientes virtualizados.

2.1 EVOLUÇÃO E SOFTWARIZAÇÃO DAS REDES MÓVEIS

A evolução das redes móveis celulares tem sido marcada pela busca contínua por maior capacidade e eficiência espectral. Segundo Both et al. (2020), enquanto as gerações anteriores focaram no aumento da taxa de transmissão e na transição da comutação de circuitos para pacotes IP, o 5G introduz uma ruptura paradigmática baseada na **Softwarização da Rede**.

Esse conceito transcende a simples virtualização de *hardware*. A softwarização envolve a reestruturação completa da arquitetura de rede para operar segundo princípios de computação em nuvem (*Cloud-Native*). Isso permite que Funções de Rede (*Network Functions* - NFs), anteriormente executadas em equipamentos proprietários monolíticos, sejam decompostas e implantadas como microsserviços em contêineres, proporcionando a flexibilidade exigida pelos cenários industriais modernos (BOTH et al., 2020). A Figura 2.1 ilustra a visão geral dessa arquitetura moderna.

Figura 2.1 – Visão geral da arquitetura de redes celulares e seus componentes.



Sigla	Descrição
UE	*User Equipment* (Equipamento de Usuário)
eNB	*Evolved NodeB* (Estação Base 4G)

Fonte: (PETERSON; SUNAY, 2020).

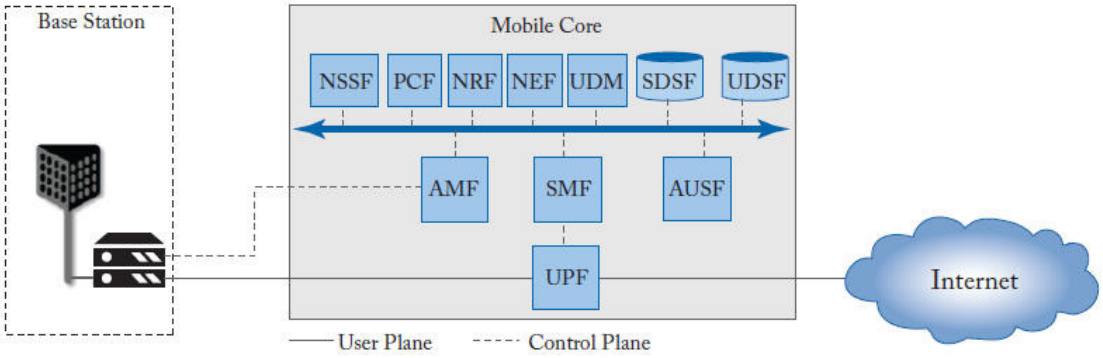
2.2 ARQUITETURA DO SISTEMA 5G (5GS)

Conforme definido nas especificações do Projeto de Parceria de 3ª Geração (*3rd Generation Partnership Project* - 3GPP) *Release* 15 e detalhado por Silva et al. (2025), o Sistema 5G é composto por dois subsistemas principais: a Rede de Acesso de Nova Geração (*Next Generation Radio Access Network* - NG-RAN) e o Núcleo 5G (*5G Core Network* - 5GC).

2.2.1 Núcleo de Rede e Arquitetura SBA

O 5GC abandona as interfaces ponto-a-ponto tradicionais em favor da Arquitetura Baseada em Serviços (*Service-Based Architecture* - SBA), ilustrada na Figura 2.2. Nesse modelo, as NFs abandonam protocolos legados de telecomunicações (como o Diameter) e passam a expor seus serviços através de APIs RESTful sobre HTTP/2. Essa mudança é crucial pois converte o núcleo da rede em uma plataforma programável, permitindo que aplicações externas interajam nativamente com a infraestrutura 5G utilizando padrões *web* consolidados (PETERSON; SUNAY, 2020).

Figura 2.2 – Arquitetura do Núcleo 5G (*NG-Core*) baseada em serviços e separação de planos.



Sigla	Descrição
AMF	*Access and Mobility Management Function* (Gerência de Acesso e Mobilidade)
SMF	*Session Management Function* (Gerência de Sessão)
UPF	*User Plane Function* (Função de Plano de Usuário)
UDM	*Unified Data Management* (Gerência Unificada de Dados)
AUSF	*Authentication Server Function* (Servidor de Autenticação)
NEF	*Network Exposure Function* (Função de Exposição de Rede)
NRF	*Network Repository Function* (Repositório de Funções de Rede)
PCF	*Policy Control Function* (Controle de Políticas)
NSSF	*Network Slice Selection Function* (Seleção de Fatias de Rede)
UDSF	*Unstructured Data Storage Function* (Dados Não-Estruturados)
SDSF	*Structured Data Storage Function* (Dados Estruturados)

Fonte: (PETERSON; SUNAY, 2020).

Dentre as NFs podem ser destacadas:

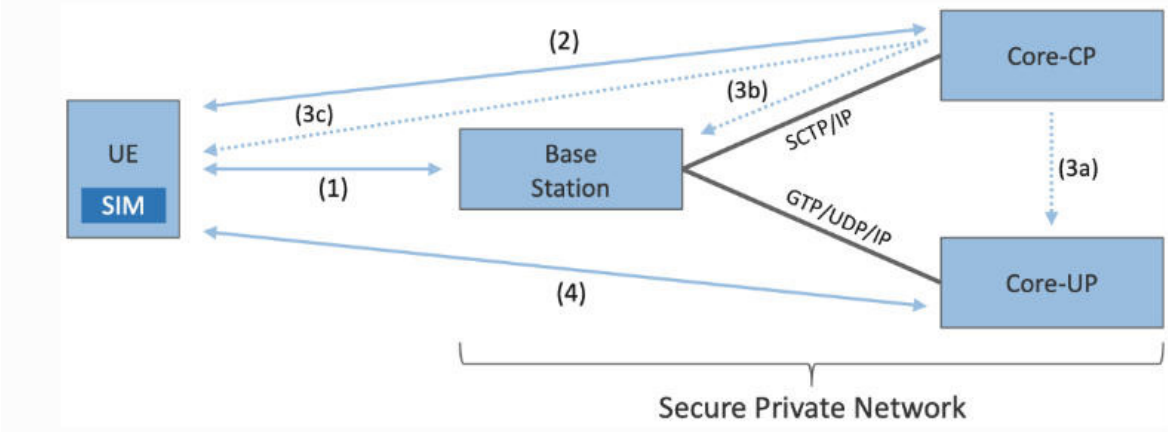
- **AMF (*Access and Mobility Management Function*):** Atua como o ponto único de entrada para a sinalização do plano de controle do Equipamento de Usuário (*User Equipment* - UE) (SILVA et al., 2025).
- **SMF (*Session Management Function*):** Encarregada do gerenciamento das sessões de dados e controle de políticas de *Quality of Service* (QoS) (PETERSON; SUNAY, 2020).
- **UPF (*User Plane Function*):** Responsável pelo transporte de dados. A separação funcional entre SMF e UPF, conhecida como CUPS (*Control and User Plane Separation*), permite posicionar a UPF na borda da rede para reduzir a latência (SILVA et al., 2025).

2.2.2 Protocolo de Tunelamento (GTP-U) e Estabelecimento de Sessão

Um aspecto técnico fundamental para a operação do plano de dados é o protocolo GTP-U (*GPRS Tunneling Protocol - User Plane*). De acordo com Silva et al. (2025), o GTP cria túneis lógicos identificados por um cabeçalho contendo o TEID (*Tunnel Endpoint Identifier*). Esse mecanismo isola o tráfego do usuário da infraestrutura de transporte, permitindo que o endereço IP do UE permaneça inalterado mesmo durante a mobilidade entre células.

A formação desse túnel não é automática; ela requer uma orquestração precisa entre a estação base e o núcleo da rede. A Figura 2.3 detalha a sequência de sinalização necessária para estabelecer essa comunicação segura.

Figura 2.3 – Fluxo de sinalização para estabelecimento dos planos de Controle e Usuário.



Fonte: (PETERSON; SUNAY, 2020).

O processo pode ser descrito em quatro etapas principais, conforme numerado na figura:

1. **Conexão Inicial (RRC):** O Equipamento de Usuário (UE) estabelece uma conexão física e lógica de rádio com a Estação Base (conhecida no 5G como gNodeB ou *Next Generation NodeB*) através do protocolo de Controle de Recursos de Rádio (*Radio Resource Control* - RRC).
2. **Sinalização NAS (Plano de Controle):** Uma vez conectado ao rádio, o UE envia uma requisição de registro e estabelecimento de sessão de Unidade de Dados de Protocolo (*Protocol Data Unit* - PDU) diretamente para o Plano de Controle do Núcleo (*Core-CP*), especificamente para a AMF e SMF. Essa comunicação (linha pontilhada) utiliza o protocolo NAS (*Non-Access Stratum*) e trafega sobre a rede IP utilizando o protocolo de transmissão SCTP (*Stream Control Transmission Protocol*) para garantir confiabilidade.
3. **Orquestração do Túnel:** O *Core-CP*, após autenticar o usuário, orquestra a criação do túnel GTP em três sub-etapas simultâneas:
   - **(3a):** O *Core-CP* instrui o Plano de Usuário (*Core-UP* ou UPF) a preparar recursos para receber dados desse usuário, gerando um TEID de destino no lado do *Core*.
   - **(3b):** O *Core-CP* envia para a Estação Base o endereço IP do UPF e o TEID gerado. Isso ensina a estação base para onde ela deve encaminhar os pacotes que chegarem do usuário.
   - **(3c):** A Estação Base confirma a configuração ao UE (Reconfiguração RRC), finalizando o caminho de rádio.
4. **Transmissão de Dados (Plano de Usuário):** Com o túnel estabelecido (linha sólida), os dados gerados pelo UE trafegam encapsulados pelo protocolo GTP-U sobre o protocolo de datagrama de usuário (*User Datagram Protocol* - UDP) e IP. O pacote do usuário viaja dentro desse túnel entre a Estação Base e o *Core-UP*, sendo totalmente invisível para os roteadores intermediários da rede de transporte.

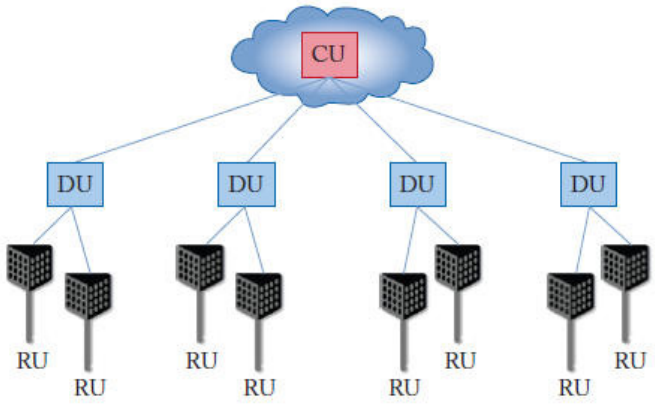
Essa separação garante que o *Core-CP* gerencie a inteligência da rede (quem pode conectar, qual a QoS), enquanto o fluxo pesado de dados ocorre diretamente no caminho (4) entre a rádio e o UPF, otimizando a latência.

2.3 REDES DE ACESSO ABERTA (O-RAN)

A arquitetura de rádio evoluiu para permitir a desagregação funcional. O conceito de *Open Radio Access Network* (O-RAN) propõe a decomposição da estação base 5G

(gNB) em Unidade Centralizada (*Centralized Unit* - CU), Unidade Distribuída (*Distributed Unit* - DU) e Unidade de Rádio (*Radio Unit* - RU), conforme ilustrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Hierarquia *Split-RAN* com CU servindo múltiplas DUs e RUs.



Fonte: (PETERSON; SUNAY, 2020).

Essa desagregação viabiliza o uso de *hardware* de propósito geral, conhecidos como *Commercial Off-The-Shelf* (COTS), para o processamento de banda base, rompendo com a necessidade de equipamentos proprietários monolíticos (PETERSON; SUNAY, 2020). A evolução arquitetural apresentada na Figura 2.5 ilustra diferentes níveis de desagregação que podem ser adotados conforme os requisitos da aplicação.

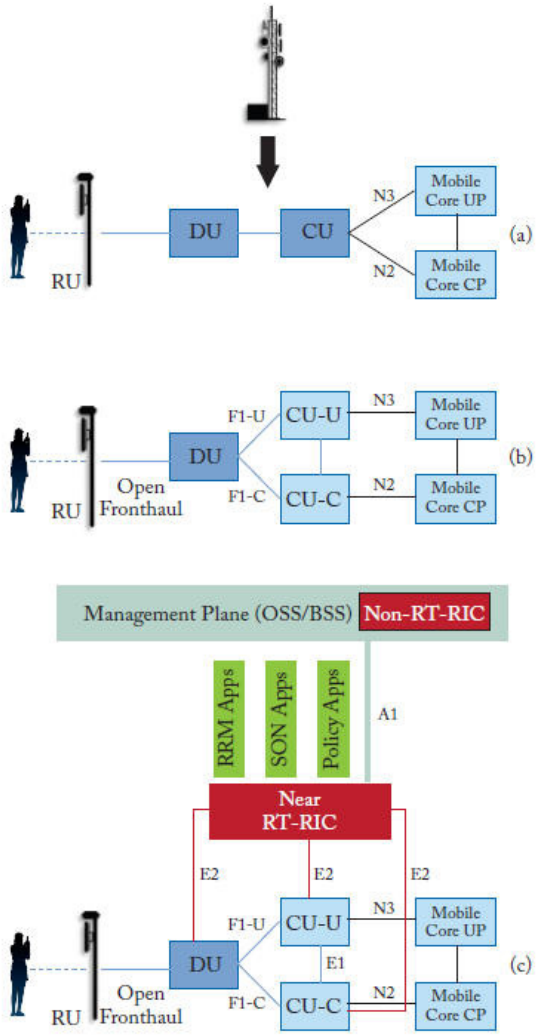
Inicialmente, o modelo apresentado em (a) estabelece a ruptura da estrutura monolítica tradicional, separando as funções de processamento em DU e CU. Avançando na flexibilidade arquitetural, o cenário (b) aprofunda essa granularidade ao aplicar a separação de planos (*Control and User Plane Separation* - CUPS) dentro da própria CU. Isso permite que o plano de controle (CU-CP) e o plano de usuário (CU-UP) sejam escalados de forma independente, configuração adequada para cenários que exigem processamento de dados na borda (*Edge Computing*) sem sobrecarregar a sinalização.

Por fim, o cenário (c) representa a arquitetura completa proposta pela O-RAN Alliance, integrando o *RAN Intelligent Controller* (RIC). Esse modelo permite a introdução de mecanismos de otimização baseados em *software* e Inteligência Artificial. O RIC atua como elemento de controle programável, permitindo a injeção de inteligência na rede por meio de aplicações que gerenciam os elementos (CU e DU) através de interfaces abertas padronizadas.

Nesse ecossistema, os componentes de *software* e interfaces desempenham papéis distintos na malha de controle:

- **Aplicações do RIC (xApps e rApps):** São microsserviços responsáveis pela

Figura 2.5 – Evolução da arquitetura da RAN e integração do Controlador Inteligente (RIC).



Sigla	Descrição
Near-RT RIC	*Near-Real-Time RAN Intelligent Controller* (< 1 s)
Non-RT RIC	*Non-Real-Time RAN Intelligent Controller* (> 1 s)
RU	*Radio Unit*
DU	*Distributed Unit*
CU	*Centralized Unit*
CP / UP	*Control Plane / User Plane*
OSS/BSS	*Operations Support System / Business Support System*
SON	*Self-Organizing Network*
RRM	*Radio Resource Management*
Interface A1	Interface entre Non-RT RIC e Near-RT RIC
Interface E2	Interface entre Near-RT RIC e nós E2 (CU/DU)
Interface F1	Interface entre CU e DU (F1-C e F1-U)
Interface N2/N3	Interfaces com o 5GC (N2 = Controle, N3 = Dados)

Fonte: (PETERSON; SUNAY, 2020).

lógica de otimização da rede. As **xApps** operam no *Near-RT RIC* para decisões com latência entre 10 ms e 1 s, enquanto as **rApps** executam no *Non-RT RIC* para orquestração de políticas de longo prazo e treinamento de modelos de Inteligência Artificial.

- **Interfaces abertas:** A interface **E2** conecta o *Near-RT RIC* aos nós da rede (CU/DU), permitindo coleta de métricas e envio de comandos; a interface **A1** viabiliza a gestão de políticas entre o *Non-RT RIC* e o *Near-RT RIC*; e a interface **F1** realiza a interconexão entre CU e DU.

2.4 REDES PRIVATIVAS (NPN) E ESPECTRO

As Redes Não-Públicas (*Non-Public Networks* - NPNs) representam um modelo de implantação focado em atender requisitos industriais. O modelo *Standalone Non-Public Network* (SNPN) caracteriza-se pela total independência da rede em relação às operadoras públicas, garantindo soberania sobre os dados (DAHLMAN; PARKVALL; SKÖLD, 2021). No Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) destinou a faixa de 3,7 GHz a 3,8 GHz para uso privado, democratizando o acesso à tecnologia (SILVA et al., 2025).

Além do modelo SNPN, o padrão 3GPP define a arquitetura *Public Network Integrated Non-Public Network* (PNI-NPN), onde a infraestrutura é compartilhada com a rede pública, mas com fatiamento lógico (*Network Slicing*) para garantir isolamento. Contudo, para aplicações críticas da Indústria 4.0 que demandam URLLC (*Ultra-Reliable Low Latency Communications*), o modelo *Standalone* NPN é preferível por eliminar dependências externas e garantir que o tráfego sensível jamais deixe as instalações da fábrica (*data residency*), atendendo a rigorosos requisitos de conformidade e segurança cibernética.

2.5 OBSERVABILIDADE EM REDES VIRTUALIZADAS

A transição para redes baseadas em *software* exige a evolução do monitoramento para a **observabilidade**. Segundo Both et al. (2020), a observabilidade moderna emprega exportadores de métricas (*exporters*) e bancos de dados de séries temporais (*Time Series Database* - TSDB) para correlacionar eventos de infraestrutura com a qualidade de experiência do usuário, superando as limitações do monitoramento estático tradicional baseado no Protocolo Simples de Gerenciamento de Rede (*Simple Network Management Protocol* - SNMP).

Nesse contexto, ecossistemas de código aberto baseados em coleta de métricas via *pull* e processamento de *streams* de eventos, frequentemente suportados por plataformas de *data streaming* como a plataforma Apache Kafka, têm se consolidado como abordagem

de referência para a gestão de redes 5G nativas em nuvem, ao possibilitar a ingestão e correlação de grandes volumes de dados de telemetria em tempo quase real (Barrachina-Muñoz et al., 2024).

Ferramentas como o Prometheus (Cloud Native Computing Foundation, 2026) (para coleta e armazenamento de métricas em TSDB) e o Grafana (Grafana Labs, 2026) (para visualização via *dashboards*) tornaram-se o *stack* de fato para a observabilidade em redes 5G. A integração desses componentes permite a criação de alertas granulares baseados em regras dinâmicas, essenciais para monitorar KPIs (*Key Performance Indicators*) de rádio e núcleo, como taxa de transferência (*throughput*), latência de plano de usuário e taxa de sucesso de estabelecimento de sessões PDU, garantindo a visibilidade ponta a ponta da infraestrutura.

3 METODOLOGIA

A implementação da rede 5G privativa descrita neste trabalho foi conduzida segundo uma abordagem incremental, estruturada em três domínios principais do Sistema 5G (5GS): Núcleo de Rede (*5G Core* - 5GC), Rede de Acesso por Rádio (*Next Generation Radio Access Network* - NG-RAN) e Equipamento de Usuário (*User Equipment* - UE). A arquitetura adotada segue o modelo *Standalone* (SA), no qual o núcleo 5G opera de forma independente de infraestruturas *Long-Term Evolution* (LTE) legadas, garantindo autonomia operacional, característica fundamental em Redes Não-Públicas (*Non-Public Networks* - NPN).

A Figura 3.1 apresenta o diagrama consolidado do *testbed* experimental. Observa-se que o Núcleo 5G (5GC) foi virtualizado por meio de contêineres Docker, executados em servidor dedicado com sistema operacional Linux. A Rede de Acesso (gNB) foi implementada em *software*, executando diretamente no *host* da RAN e utilizando um rádio definido por *software* (*Software Defined Radio* – SDR), modelo USRP B210, como unidade de rádio (RU). Na extremidade do usuário, empregou-se uma Raspberry Pi acoplada a um *modem* 5G comercial, configurado como UE real.

A comunicação entre os componentes seguiu as *interfaces* padronizadas pelo 3GPP *Release* 15, destacando-se:

- *Interface* N2: responsável pela sinalização do plano de controle entre o gNB e a *Access and Mobility Management Function* (AMF);
- *Interface* N3: responsável pelo transporte de dados do plano de usuário entre o gNodeB e a *User Plane Function* (UPF), utilizando o protocolo GTP-U;
- *Interface* N6: responsável pela interconexão entre a UPF e a rede externa de dados (*Data Network*).

O fluxo operacional do sistema inicia-se no Equipamento de Usuário (UE), que, ao energizar-se, realiza a sincronização com o gNB e envia uma mensagem de *Registration Request*. Essa mensagem é encaminhada pela estação base ao núcleo 5G por meio da interface N2, utilizando associação *Stream Control Transmission Protocol* (SCTP) e o protocolo *Next Generation Application Protocol* (NGAP).

Após o processamento do procedimento de registro pela *Access and Mobility Management Function* (AMF), o núcleo autentica o usuário e estabelece o contexto de mobilidade. Em seguida, é iniciado o procedimento de estabelecimento de sessão PDU, no qual o núcleo coordena a criação de túneis *GPRS Tunneling Protocol – User Plane* (GTP-U) na interface N3 entre o gNB e a *User Plane Function* (UPF).

Uma vez configurado o túnel GTP-U, os pacotes *Internet Protocol* (IP) gerados pelo UE passam a trafegar encapsulados entre a estação base e a UPF. Finalmente, a UPF encaminha o tráfego à rede externa de dados (*Data Network*) por meio da interface N6, completando o estabelecimento do plano de usuário.

A separação entre plano de controle e plano de usuário (*Control and User Plane Separation* – CUPS), intrínseca à arquitetura do 5GC, permite isolar as funções de sinalização das funções de encaminhamento de tráfego, contribuindo para maior clareza metodológica na análise de desempenho realizada nas seções subsequentes.

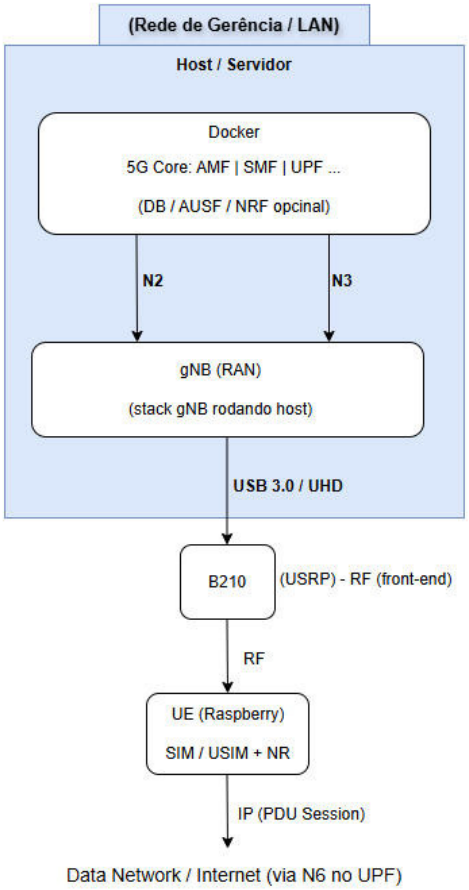


Figura 3.1 – Arquitetura do *testbed* experimental da rede 5G privativa implementada. O núcleo Open5GS foi virtualizado via Docker, o gNodeB executa no *host* da RAN conectado à USRP B210 via USB 3.0, e o Equipamento de Usuário (UE) é implementado em Raspberry Pi com *modem* 5G.

Fonte: Autoria própria.

3.1 ESPECIFICAÇÕES DE HARDWARE E INFRAESTRUTURA

A infraestrutura física e computacional do *testbed* foi dimensionada para suportar a execução simultânea das Funções de Rede do núcleo 5G, do processamento de sinal da camada física da RAN e das ferramentas de monitoramento. A arquitetura foi dividida

em três blocos principais: servidor do núcleo (5GC), servidor da RAN e equipamento de usuário (UE).

A disposição física dos equipamentos utilizados no ambiente experimental é apresentada na Figura 3.2. Observa-se a organização modular dos componentes, evidenciando a separação entre o núcleo virtualizado, a estação base baseada em SDR e o terminal de usuário real.

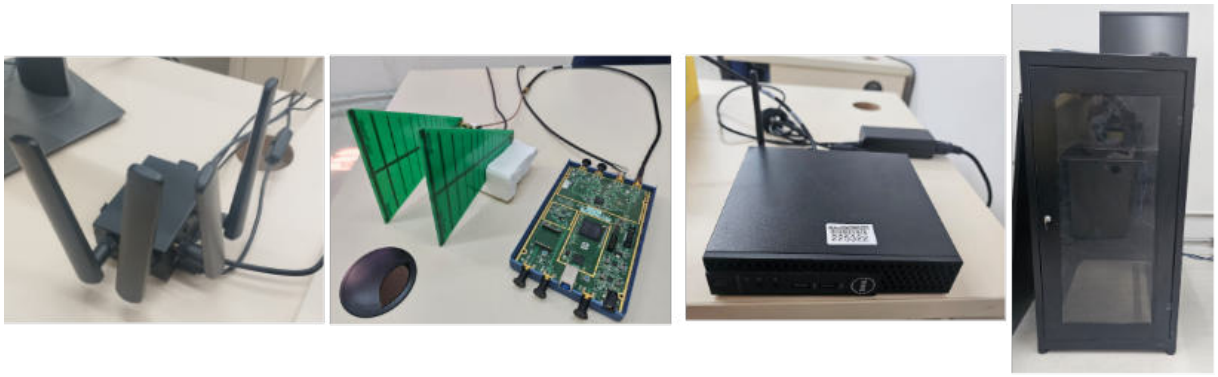


Figura 3.2 – *Testbed* físico da rede 5G privativa implementada. Da esquerda para a direita: Equipamento de Usuário (Raspberry Pi com modem 5G), antenas log-periódicas utilizadas na RAN, unidade de rádio USRP B210, servidor da RAN (OpenAirInterface) e servidor do núcleo 5G (Open5GS).

Infraestrutura do Núcleo 5G

O Núcleo da rede foi hospedado em um servidor Dell PowerEdge R750, equipado com processador Intel Xeon Silver 4314 e 128 GB de memória RAM. O sistema operacional adotado foi o Ubuntu 22.04 LTS, sobre o qual foram executados os contêineres Docker contendo as Funções de Rede do Open5GS.

A virtualização por contêineres permitiu isolamento entre as NFs, além de facilitar a manutenção e replicação do ambiente experimental. A comunicação interna entre os serviços foi realizada por meio de redes virtuais Docker configuradas em modo *bridge*, com mapeamento explícito das interfaces utilizadas pelas funções AMF, SMF e UPF.

Infraestrutura da Rede de Acesso (RAN)

O processamento da estação base (gNodeB) foi executado em um *desktop* Dell OptiPlex 3070, equipado com processador Intel Core i5-9500T e 16 GB de memória RAM. Este equipamento foi dedicado exclusivamente à execução da pilha de protocolos do OpenAirInterface, responsável pelo processamento de banda base do 5G NR.

A unidade de rádio (*Radio Unit* – RU) foi implementada utilizando um *transceptor* SDR modelo USRP B210 (Ettus Research, 2024), conectado ao servidor da RAN por meio de interface USB 3.0. A comunicação entre o *software* do gNB e o *front-end* de RF ocorreu

via *driver* UHD (*USRP Hardware Driver*), responsável pelo envio e recepção de amostras complexas em banda base, representadas pelas componentes em fase e em quadratura (*In-phase* e *Quadrature* – I/Q), em tempo real.

A *interface* aérea operou na banda n78 (3,7 GHz), com largura de banda de 40 MHz e duplexação TDD (*Time Division Duplex*). O padrão de alocação temporal foi configurado como 7D2U, priorizando tráfego de *Downlink*, adequado ao perfil de aplicações industriais avaliadas.

Foram utilizadas antenas direcionais do tipo log-periódica (BRITAIN, 2024), com ganho nominal entre 5 e 6 dBi, configuradas em arranjo MIMO 2x2. O espaçamento horizontal entre as antenas foi de aproximadamente 15 cm, mantendo-se alinhamento em linha de visada (LoS) com o equipamento de usuário a uma distância média de 1,5 metro.

Equipamento de Usuário (UE)

O Equipamento de Usuário foi implementado utilizando uma Raspberry Pi 4 acoplada a um modem 5G industrial modelo Quectel RM520N-GL (Quectel Wireless Solutions, 2024a). O módulo foi conectado via adaptador M.2 para USB 3.0, permitindo comunicação direta com o sistema operacional da Raspberry Pi.

Para recepção e transmissão de sinal, foram utilizadas quatro antenas omnidirecionais modelo Quectel YECT005W1A (Quectel Wireless Solutions, 2024b), cobrindo a faixa de 600 MHz a 6000 MHz. Essa configuração garantiu compatibilidade com a banda n78, além de permitir flexibilidade para cenários de mobilidade e aplicações industriais embarcadas.

Topologia Física e Integração

A integração entre os componentes seguiu a topologia apresentada na Figura 3.1. O servidor responsável pelo núcleo 5G (5GC) foi conectado à rede local de gerência para fins de configuração e monitoramento. Já o servidor da RAN, onde executa o gNB, estabeleceu comunicação com o 5GC por meio das interfaces N2 (plano de controle) e N3 (plano de usuário), ambas implementadas sobre rede IP dedicada entre os dois servidores. Ou seja, as *interfaces* N2 e N3 não representam enlaces físicos distintos, mas canais lógicos transportados sobre a mesma infraestrutura IP.

A conexão entre o gNB e a USRP B210 foi realizada via barramento USB 3.0, responsável pelo transporte das amostras de banda base. Por sua vez, o enlace entre a unidade de rádio e o UE ocorreu exclusivamente no domínio de radiofrequência, caracterizando o trecho sem fio do sistema.

Essa organização modular permitiu isolamento entre os planos de processamento e facilitou a análise posterior de desempenho por domínio (RAN, *Core* e fim-a-fim).

3.2 IMPLANTAÇÃO DO NÚCLEO 5G COM OPEN5GS

A implementação do núcleo da rede 5G foi realizada utilizando a plataforma de código aberto Open5GS (versão 2.7.x), compatível com as especificações do 3GPP *Release* 15 para arquiteturas *Standalone* (SA). A escolha dessa solução fundamentou-se na aderência à Arquitetura Baseada em Serviços (*Service-Based Architecture* – SBA), na estabilidade operacional e na ampla adoção em ambientes acadêmicos e experimentais.

A implantação foi baseada no repositório *docker_open5gs* (SUPREETH et al., 2025), o qual fornece arquivos de orquestração `docker-compose` para instanciamento automatizado das Funções de Rede (*Network Functions* – NFs). O ambiente foi executado sobre sistema operacional Ubuntu Server 22.04 LTS.

A Figura 3.3 apresenta a organização das Funções de Rede instanciadas no ambiente Docker, evidenciando a separação entre plano de controle e plano de usuário.

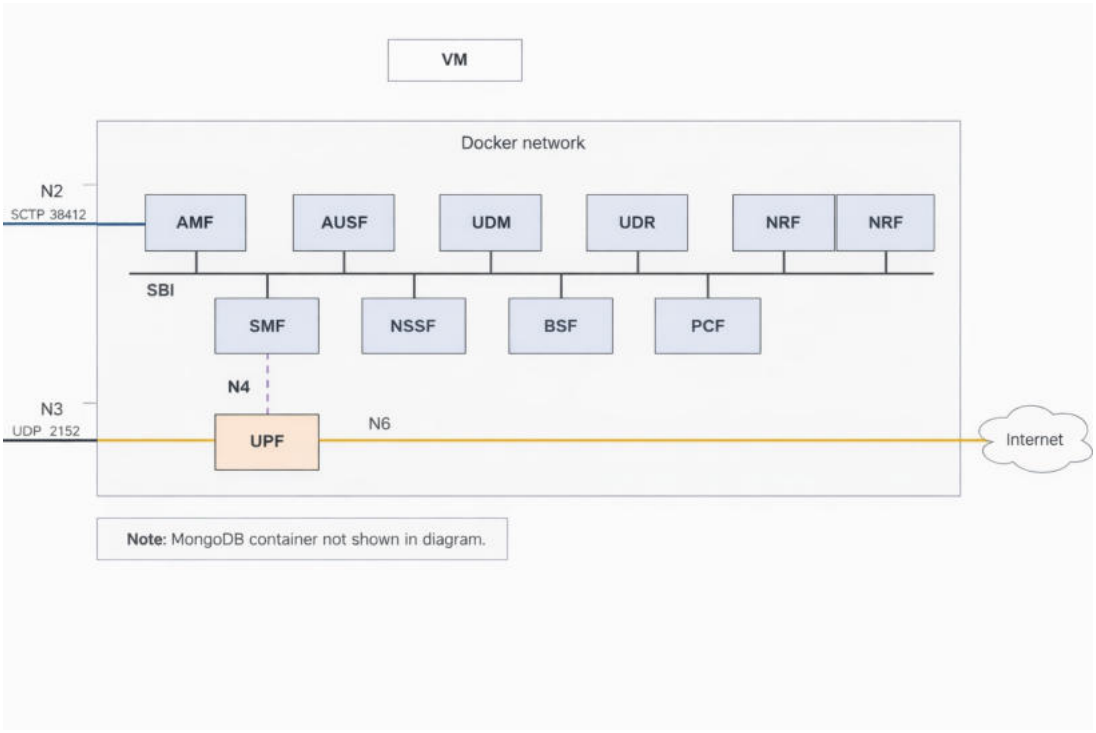


Figura 3.3 – Arquitetura do núcleo 5G implementado com Open5GS em ambiente Docker.

Fonte: (SUPREETH et al., 2025).

3.2.1 Arquitetura e Orquestração em Contêineres

As Funções de Rede do 5GC foram instanciadas como contêineres Docker independentes, interconectados por meio de uma rede virtual do tipo *bridge*, configurada automaticamente pelo Docker com endereçamento interno na faixa 172.22.0.0/24.

Essa abordagem permitiu:

- Isolamento entre as NFs;
- Facilidade de manutenção e reinicialização de serviços;
- Reprodutibilidade do ambiente experimental;
- Separação clara entre plano de controle e plano de usuário.

A inicialização do núcleo foi realizada por meio do comando:

```
docker compose up -d
```

3.2.2 Funções de Rede Instanciadas

As principais Funções de Rede configuradas no núcleo foram:

- **AMF (*Access and Mobility Management Function*)**;
- **SMF (*Session Management Function*)**;
- **UPF (*User Plane Function*)**;
- **UDM (*Unified Data Management*)**;
- **AUSF (*Authentication Server Function*)**;
- **NRF (*Network Repository Function*)**.

A arquitetura implementada preserva o princípio de separação entre plano de controle e plano de usuário (CUPS – *Control and User Plane Separation*).

3.2.3 Parametrização da Identidade da Rede

A identidade global da rede foi configurada por meio dos arquivos `amf.yaml`, `smf.yaml` e `upf.yaml`.

Os arquivos de configuração utilizam variáveis de ambiente para definição dos parâmetros operacionais, permitindo maior flexibilidade e reutilização do ambiente experimental.

A Figura 3.4 apresenta o trecho do arquivo `amf.yaml` responsável pela definição da *Public Land Mobile Network* (PLMN) e do *Tracking Area Code* (TAC). Observa-se que os valores são referenciados por variáveis, as quais são definidas no arquivo `.env` do projeto.

```
tai:
  - plmn_id:
      mcc: MCC
      mnc: MNC
    tac: 1
plmn_support:
  - plmn_id:
      mcc: MCC
      mnc: MNC
    s_nssai:
      - sst: SST
      - sst: SST
        sd: SD
      - sst: SST2
        sd: SD2
security:
    integrity_order : [ NIA2, NIA1, NIA0 ]
    ciphering_order : [ NEA0, NEA1, NEA2 ]
network_name:
    full: Open5GS
amf_name: open5gs-amf0
metrics:
  server:
    - address: AMF_IP
      port: 9091
time:
  t3512:
    value: 540
```

Figura 3.4 – Trecho do arquivo `amf.yaml` com parametrização do PLMN e TAC por meio de variáveis de ambiente.

```
# Set proper timezone to sync times between docker host and containers
#TZ=Europe/Berlin

MCC=001 #724
MNC=01 #98

SST=1
SST2=1
SST3=1

SD=010203
SD2=112233

SERVER_HOST=172.22.0.1

APN_NAME=internet #default #apn1
APN_NAME2=iot

TEST_NETWORK=172.22.0.0/24
DOCKER_HOST_IP=10.252.8.245 #10.100.0.150

# MONGODB
MONGO_IP=172.22.0.2

# HSS - open5gs
HSS_IP=172.22.0.3

# PCRF
PCRF_IP=172.22.0.4
PCRF_BIND_PORT=3873

# SGW
SGWC_IP=172.22.0.5
SGWU_IP=172.22.0.6
SGWU_ADVERTISE_IP=172.22.0.6

# SMF
SMF_IP=172.22.0.7
SMF_DNS1=8.8.8.8
SMF_DNS2=8.8.4.4

# UPF
UPF_IP=172.22.0.8
UPF_ADVERTISE_IP=10.252.8.245 #172.22.0.8 #10.252.8.245

# MME
MME_IP=172.22.0.9
".env" 169L, 2202C
```

Figura 3.5 – Trecho do arquivo `.env` contendo a declaração das variáveis globais do núcleo 5G.

Os valores de *Mobile Country Code* (MCC) e *Mobile Network Code* (MNC) pertencem à faixa reservada pelo 3GPP para redes de teste, evitando interferência com operadoras comerciais. O *Single Network Slice Selection Assistance Information* (S-NSSAI) foi configurado com *Slice/Service Type* (SST) igual a 1, correspondente ao serviço do tipo *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB).

3.2.4 Configuração das *Interfaces* N2, N3 e N4

A interface N2 foi configurada na AMF para operar sobre *Stream Control Transmission Protocol* (SCTP) na porta 38412. A interface N3 foi configurada na UPF para terminação dos túneis *GPRS Tunneling Protocol – User Plane* (GTP-U) na porta *User Datagram Protocol* (UDP) 2152. A interface N4 foi estabelecida entre SMF e UPF por meio do *Packet Forwarding Control Protocol* (PFCP).

3.2.5 Configuração de Endereçamento IP

Foram definidos *pools* de endereçamento IPv4 para atribuição dinâmica aos Equipamentos de Usuário durante o estabelecimento das sessões PDU.

A Figura 3.6 apresenta trecho do arquivo `upf.yaml` evidenciando a definição da *subnet* e das interfaces virtuais `ogstun`.

```
logger:
    file:
      path: /open5gs/install/var/log/open5gs/upf.log

global:
  max:
    ue: MAX_NUM_UE

upf:
    pfcp:
      server:
        - address: UPF_IP
      client:
        smf:
          - address: SMF_IP
    gtpu:
      server:
        - address: UPF_IP
          advertise: UPF_ADVERTISE_IP
    session:
      - subnet: UE_IPV4_INTERNET_SUBNET
        gateway: UE_IPV4_INTERNET_TUN_IP
        dnn: APN_NAME
        dev: ogstun
      - subnet: 2001:230:cafe::/48
        gateway: 2001:230:cafe::1
        dnn: APN_NAME
        dev: ogstun
      - subnet: UE_IPV4_IMS_SUBNET
        gateway: UE_IPV4_IMS_TUN_IP
        dnn: ims
        dev: ogstun2
      - subnet: 2001:230:babe::/48
        gateway: 2001:230:babe::1
        dnn: ims
        dev: ogstun2
      - subnet: UE_IPV4_IOT_SUBNET
        gateway: UE_IPV4_IOT_TUN_IP
        dnn: APN_NAME2
        dev: ogstun3
      - subnet: 2001:230:bafe::/48
        gateway: 2001:230:bafe::1
        dnn: APN_NAME2
        dev: ogstun3
    metrics:
      server:
        - address: UPF_IP
```

Figura 3.6 – Trecho do arquivo `upf.yaml` com definição de *subnet* e interfaces `ogstun`.

3.2.6 Validação Operacional do Núcleo

A validação operacional do núcleo 5G foi conduzida por meio da análise dos *logs* gerados pelas Funções de Rede após a inicialização dos contêineres Docker. Essa verificação teve como objetivo comprovar a integridade estrutural do 5GC e o correto funcionamento das interfaces internas e externas.

A Figura 3.7 apresenta trecho do *log* da AMF, no qual se observa a mensagem *gNB-N2 accepted*. Esse evento corresponde à conclusão bem-sucedida do procedimento *NG Setup*, estabelecendo a conexão entre o *gNodeB* e a AMF por meio da interface N2 (SCTP/NGAP). Tal registro confirma que a AMF encontra-se ativa, escutando na porta

38412 e apta a processar sinalização proveniente da RAN.

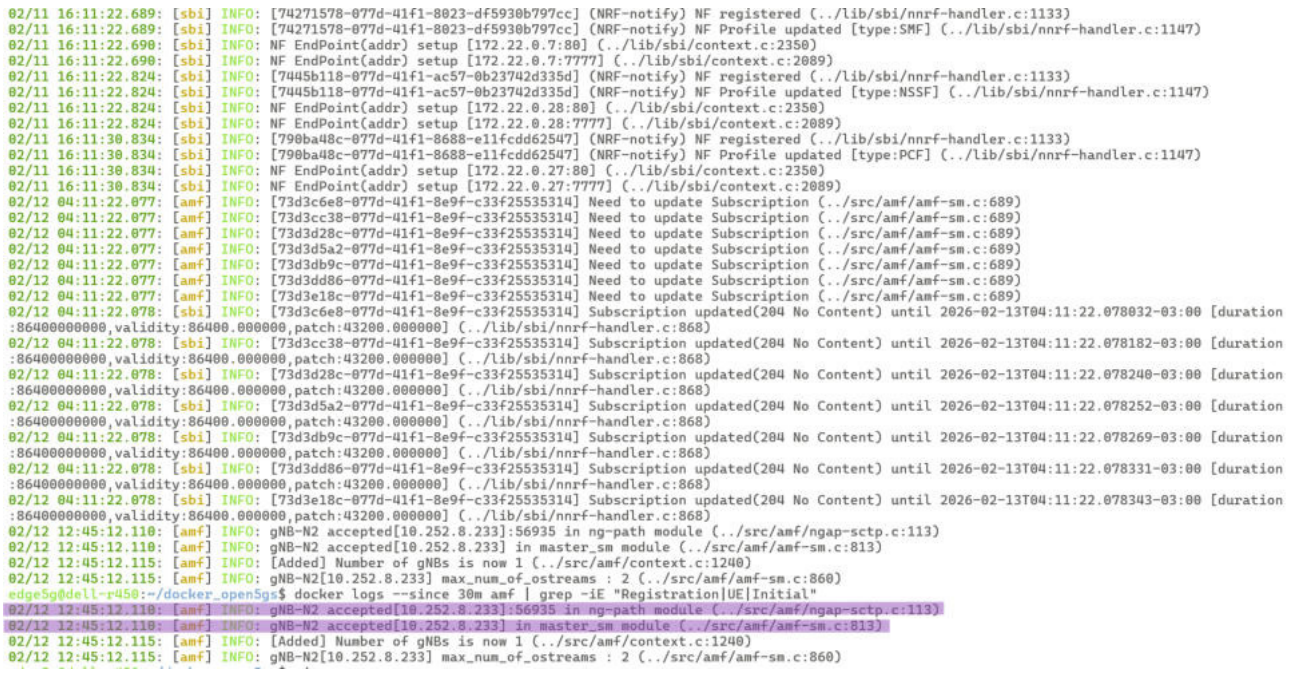


Figura 3.7 – Trecho do log da AMF evidenciando a conclusão do procedimento *NG Setup*.

Além da validação da interface N2, foram analisados os *logs* das funções SMF e UPF, nos quais se verificou:

- Associação PFCP entre SMF e UPF, confirmando a operacionalidade da interface N4;
- Inicialização do servidor GTP-U na porta UDP 2152, validando a ativação da interface N3;
- Registro das Funções de Rede no *Network Repository Function* (NRF), assegurando o funcionamento da *Service-Based Architecture*.

A ocorrência simultânea desses eventos confirma que:

1. O plano de controle encontra-se funcional;
2. O plano de usuário está corretamente configurado;
3. As interfaces N2, N3 e N4 estão ativas e operacionais.

Dessa forma, conclui-se que o núcleo 5G encontra-se estruturalmente íntegro e apto a suportar procedimentos de registro de UE e estabelecimento de sessões PDU em arquitetura *Standalone*.

3.3 CONFIGURAÇÃO DA REDE DE ACESSO

A Rede de Acesso Rádio (RAN) foi implementada utilizando a plataforma OpenAirInterface (OAI) (OpenAirInterface Alliance, 2024), configurada para operar como gNB em arquitetura *Standalone* (SA), interoperando com o núcleo 5G Open5GS descrito na Seção anterior.

O gNB foi executado em ambiente conteinerizado, identificado como `gNB-in-docker`, permitindo integração direta com a rede virtual do núcleo 5G. A interface de radiofrequência foi implementada por meio da placa USRP B210, controlada pela biblioteca UHD (*USRP Hardware Driver*), responsável pela abstração do *front-end* de RF.

3.3.1 Parametrização da Identidade da Célula

A identidade da célula foi definida no arquivo de configuração do gNB, assegurando coerência com os parâmetros previamente configurados no núcleo 5G. A Figura 3.8 apresenta o trecho do arquivo responsável pela definição do PLMN, TAC e S-NSSAI.

Foram definidos os seguintes parâmetros:

- **MCC (*Mobile Country Code*)**: 001;
- **MNC (*Mobile Network Code*)**: 01;
- **TAC (*Tracking Area Code*)**: 1;
- **SST (*Slice/Service Type*)**: 1;
- **SD (*Slice Differentiator*)**: 0x010203.

A consistência desses parâmetros entre RAN e núcleo é essencial para o procedimento NG Setup na interface N2, conforme especificado pelo 3GPP na TS 23.501 (3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2024c).

Ressalta-se que os parâmetros apresentados não são programados diretamente na USRP B210. O trecho exibido corresponde a um arquivo de configuração do OpenAirInterface (OAI), escrito no formato *libconfig*. Esses arquivos são interpretados pelo executável da gNB, implementado em linguagem C, o qual aplica as configurações à pilha 5G NR e, por meio do *driver* UHD, envia os parâmetros necessários ao *front-end* de radiofrequência da USRP B210. Assim, a placa atua apenas como *interface* RF, enquanto todo o processamento da pilha 5G ocorre no *host* da RAN.

```
Active_gNBs = ( "gNB-in-docker");
# Asn1_verbosity, choice in: none, info, annoying
Asn1_verbosity = "none";

gNBs =
(
 {
    ////////// Identification parameters:
    gNB_ID    =  0xe00;
    gNB_name  =  "gNB-in-docker";

    // Tracking area code, 0x0000 and 0xfffe are reserved values
    tracking_area_code  =  1;
    plmn_list = ({ mcc = 001; mnc = 01; mnc_length = 2; snssaiList = ({ sst = 1, sd = 0x010203 } ) } );

    nr_cellid = 12345678L;

    ////////// Physical parameters:


    servingCellConfigCommon = (
    {
 #spCellConfigCommon

      physCellId                                                    = 0;

#  downlinkConfigCommon
    #frequencyInfoDL
      # this is 3610.56 MHz
      absoluteFrequencySSB                                            = 640704;
      dl_frequencyBand                                                = 77; #78;
      # this is 3599.94 MHz
      dl_absoluteFrequencyPointA                                      = 639996;
      #scs-SpecificCarrierList
        dl_offstToCarrier                                             = 0;
# subcarrierSpacing
# 0=kHz15, 1=kHz30, 2=kHz60, 3=kHz120
        dl_subcarrierSpacing                                          = 1;
        dl_carrierBandwidth                                           = 106; #40 MHz #51;
     #initialDownlinkBWP
      #genericParameters
        # this is RBstart=27,L=48 (275*(L-1))+RBstart
        initialDLBWPlocationAndBandwidth                              = 28875; #13750;
```

Figura 3.8 – Trecho do arquivo de configuração do gNB com definição de MCC, MNC, TAC e S-NSSAI.

3.3.2 Configuração da Camada Física

Os parâmetros físicos da célula 5G NR foram configurados conforme apresentado na Figura 3.9.

A célula foi configurada para operar sob as seguintes condições:

- Banda *n77*, operando em frequência central de 3610,56 MHz (faixa de espectro compreendida entre 3300 e 4200 MHz);
- NR-ARFCN: 640704;
- Espaçamento de subportadora: 30 kHz (numerologia $\mu = 1$);
- Largura de banda: 40 MHz;
- Modo de duplexação: *Time Division Duplex* (TDD).

```
      #initialDownlinkBWP
       #genericParameters
         # this is RBstart=27,L=48 (275*(L-1))+RBstart
         initialDLBWPlocationAndBandwidth                    = 28875; #13750;
# subcarrierSpacing
# 0=kHz15, 1=kHz30, 2=kHz60, 3=kHz120
         initialDLBWPsubcarrierSpacing                        = 1;
       #pdcch-ConfigCommon
         initialDLBWPcontrolResourceSetZero                   = 12;
         initialDLBWPsearchSpaceZero                          = 0;

  #uplinkConfigCommon
     #frequencyInfoUL
       ul_frequencyBand                                  = 77; #78;
       #scs-SpecificCarrierList
       ul_offstToCarrier                                 = 0;
# subcarrierSpacing
# 0=kHz15, 1=kHz30, 2=kHz60, 3=kHz120
       ul_subcarrierSpacing                              = 1;
       ul_carrierBandwidth                               = 106; #51;
       pMax                                              = 20;
     #initialUplinkBWP
       #genericParameters
         initialULBWPlocationAndBandwidth                = 28875; #13750;
# subcarrierSpacing
# 0=kHz15, 1=kHz30, 2=kHz60, 3=kHz120
         initialULBWPsubcarrierSpacing                   = 1;
       #rach-ConfigCommon
         #rach-ConfigGeneric
           prach_ConfigurationIndex                      = 98;
#prach_msg1_FDM
#0 = one, 1=two, 2=four, 3=eight
           prach_msg1_FDM                                = 0;
           prach_msg1_FrequencyStart                     = 0;
           zeroCorrelationZoneConfig                     = 13;
           preambleReceivedTargetPower                   = -96;
#preamblTransMax (0...10) = (3,4,5,6,7,8,10,20,50,100,200)
           preambleTransMax                              = 6;
#powerRampingStep
# 0=dB0,1=dB2,2=dB4,3=dB6
         powerRampingStep                                = 1;
#ra_ReponseWindow
#1,2,4,8,10,20,40,80
```

Figura 3.9 – Configuração dos parâmetros físicos da célula 5G NR no arquivo de configuração do gNB.

O valor do NR-ARFCN (640704) corresponde, segundo a 3GPP TS 38.104, à frequência absoluta de 3610,56 MHz, situada na faixa *sub-6 GHz*. Tal frequência encontra-se dentro do intervalo definido para a banda *n78* (3300–3800 MHz), a qual está contida na banda *n77* (3300–4200 MHz).

O espaçamento de subportadora de 30 kHz implica numerologia $\mu = 1$, conforme definido na 3GPP TS 38.211 (3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2024b). Essa configuração é tipicamente empregada em bandas *sub-6 GHz*, oferecendo equilíbrio entre eficiência espectral e robustez a desvanecimentos em ambientes experimentais.

A largura de banda de 40 MHz foi definida por meio do parâmetro `<dl_carrierBandwidth>`, configurado com o valor `<106>`, correspondente ao número de *resource blocks* alocados para a numerologia $\mu = 1$, conforme mapeamento estabelecido pela 3GPP TS 38.104.

`<tdd-UL-DL-ConfigurationCommon>` foi o bloco utilizado para implementar a

configuração TDD, com periodicidade de 5 ms, definindo a distribuição temporal de *slots* de *downlink* e *uplink*. Essa escolha é adequada para ambiente de bancada, onde não há múltiplas células interferentes, permitindo maior previsibilidade na alocação de recursos.

3.3.3 Configuração das Interfaces N2 e N3

A comunicação entre o gNB e o núcleo 5G foi estabelecida por meio das interfaces padronizadas pelo 3GPP para arquiteturas *Standalone* (SA), conforme especificado na TS 23.501 (3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2024c).

- **N2** – NGAP sobre SCTP (plano de controle);
- **N3** – GTP-U sobre UDP (plano de usuário).

A Figura 3.10 apresenta os endereços IP definidos no arquivo de configuração do gNB para integração com o núcleo.

```
# 0 = pos2, 1 = pos3
      dmrs_TypeA_Position                                           = 0;

# subcarrierSpacing
# 0=kHz15, 1=kHz30, 2=kHz60, 3=kHz120
      subcarrierSpacing                                             = 1;


  #tdd-UL-DL-ConfigurationCommon
# subcarrierSpacing
# 0=kHz15, 1=kHz30, 2=kHz60, 3=kHz120
      referenceSubcarrierSpacing                                    = 1;
      # pattern1
      # dl_UL_TransmissionPeriodicity
      # 0=ms0p5, 1=ms0p625, 2=ms1, 3=ms1p25, 4=ms2, 5=ms2p5, 6=ms5, 7=ms10
      dl_UL_TransmissionPeriodicity                                 = 6; #6; #6;
      nrofDownlinkSlots                                             = 7; #6; #7;
      nrofDownlinkSymbols                                           = 6; #4; #4;
      nrofUplinkSlots                                               = 2; #3; #2;
      nrofUplinkSymbols                                             = 4; #6; #6;

      ssPBCH_BlockPower                                             = -25;
  }

  );

    # ------- SCTP definitions
    SCTP :
    {
        # Number of streams to use in input/output
        SCTP_INSTREAMS  = 2;
        SCTP_OUTSTREAMS = 2;
    };


    ////////// AMF parameters:
    amf_ip_address = ({ ipv4 = "10.252.8.245"; });


    NETWORK_INTERFACES :
    {
        GNB_IPV4_ADDRESS_FOR_NG_AMF              = "10.252.8.233";
        GNB_IPV4_ADDRESS_FOR_NGU                 = "10.252.8.233";
```

Figura 3.10 – Configuração dos endereços IP utilizados nas interfaces N2 e N3.

O gNB foi configurado com endereço IPv4 10.252.8.233, enquanto a *AMF* (*Access and Mobility Management Function*) operou no endereço 10.252.8.245. Ambos pertencem à mesma sub-rede experimental, permitindo comunicação direta sem necessidade de roteamento adicional.

Interface N2

A interface N2 foi configurada para operar sobre SCTP na porta 38412, conforme definido na TS 38.413 (3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2024a). Essa interface é responsável pela troca de mensagens NGAP entre o gNB e a AMF.

Após a inicialização do sistema, a associação SCTP foi confirmada por meio da mensagem *gNB-N2 accepted*, registrada no log da AMF. Tal evento indica o estabelecimento bem-sucedido do procedimento *NG Setup*.

Interface N3

A interface N3 foi configurada para operar com GTP-U sobre UDP na porta padrão 2152. Essa interface é responsável pelo transporte do tráfego de dados encapsulado em túneis GTP-U entre o gNB e a UPF.

A correta configuração da N3 permitiu o encaminhamento do tráfego IP proveniente do equipamento de usuário (UE) até a UPF, viabilizando os testes de conectividade e desempenho descritos na Seção de validação.

3.3.4 Configuração do *Front-End* de Radiofrequência

A interface de radiofrequência do gNB foi implementada por meio da USRP B210, utilizada como *front-end* SDR (*Software Defined Radio*), conforme ilustrado na Figura 3.11.

```
    };

  }
);

MACRLCs = (
{
  num_cc                      = 1;
  tr_s_preference             = "local_L1";
  tr_n_preference             = "local_RRC";
  pusch_TargetSNRx10          = 200;
  pucch_TargetSNRx10          = 200;
  ul_prbblack_SNR_threshold   = 10;
}
);

L1s = (
{
  num_cc = 1;
  tr_n_preference       = "local_mac";
  prach_dtx_threshold   = 120;
  pucch0_dtx_threshold  = 100;
  ofdm_offset_divisor   = 8; #set this to UINT_MAX for offset 0
}
);

RUs = (
{
  local_rf       = "yes"
  nb_tx          = 1
  nb_rx          = 1
  att_tx         = 12;
  att_rx         = 5;
  bands          = [77];
  max_pdschReferenceSignalPower = -27;
  max_rxgain                    = 114;
  eNB_instances  = [0];
  clock_src = "internal";
}
);


security = {
```

Figura 3.11 – Parâmetros de configuração da USRP B210 utilizados pelo gNB.

A integração com o *OpenAirInterface* foi realizada utilizando a biblioteca UHD (*USRP Hardware Driver*), responsável pelo controle do dispositivo.

Os principais parâmetros configurados foram:

- Modo de operação: `local_rf`;
- Banda: 77 (operando na subfaixa correspondente à n78);
- Ganho de transmissão (TX): 12 dB;
- Ganho de recepção (RX): 5 dB;
- Fonte de sincronização: *clock* interno.

O modo `local_rf` foi adotado em função do cenário experimental de bancada, no qual o processamento da camada física é executado no próprio servidor hospedeiro.

Os valores de ganho foram definidos empiricamente durante os testes iniciais, de modo a evitar saturação do conversor analógico-digital e garantir nível adequado de potência para comunicação em curta distância com o equipamento de usuário.

A sincronização foi realizada utilizando a referência interna da USRP B210, considerada suficiente para o ambiente de laboratório. Não foi necessária a utilização de *Global Positioning System Disciplined Oscillator* (GPSDO) ou referência externa de *clock*, uma vez que não foram conduzidos experimentos que demandassem sincronização de alta precisão entre múltiplos nós.

3.3.5 Configuração de Segurança e Monitoramento

A configuração dos algoritmos de segurança e dos níveis de *log* do gNB foi realizada com o objetivo de garantir compatibilidade com o núcleo 5G implementado em Open5GS e, simultaneamente, viabilizar a rastreabilidade dos procedimentos de sinalização durante os testes experimentais.

A Figura 3.12 apresenta o trecho do arquivo de configuração correspondente aos parâmetros de segurança e registro de eventos.

```
security = {
  # preferred ciphering algorithms
  # the first one of the list that an UE supports in chosen
  # valid values: nea0, nea1, nea2, nea3
  ciphering_algorithms = ( "nea2", "nea0" );

  # preferred integrity algorithms
  # the first one of the list that an UE supports in chosen
  # valid values: nia0, nia1, nia2, nia3
  integrity_algorithms = ( "nia2", "nia0" );

  # setting 'drb_ciphering' to "no" disables ciphering for DRBs, no matter
  # what 'ciphering_algorithms' configures; same thing for 'drb_integrity'
  drb_ciphering = "yes";
  drb_integrity = "no";
};

log_config :
{
  global_log_level                      ="info";
  hw_log_level                          ="info";
  phy_log_level                         ="info";
  mac_log_level                         ="info";
  rlc_log_level                         ="info";
  pdcp_log_level                        ="info";
  rrc_log_level                         ="info";
  ngap_log_level                        ="debug";
  f1ap_log_level                        ="debug";
};
```

Figura 3.12 – Configuração dos algoritmos de segurança e níveis de log do gNodeB.

Algoritmos de Segurança

Foram definidos como prioritários:

- Integridade: `NIA2`;
- Cifragem: `NEA2`.

O *128-bit Integrity Algorithm 2* (NIA2) corresponde ao mecanismo de integridade baseado em *Advanced Encryption Standard – Cipher-based Message Authentication Code* (AES-CMAC), enquanto o *128-bit Encryption Algorithm 2* (NEA2) implementa cifragem baseada em *Advanced Encryption Standard – Counter Mode* (AES-CTR), ambos padronizados pelo 3GPP para o sistema 5G *New Radio* (NR). A escolha desses algoritmos fundamentou-se em sua ampla adoção como configuração padrão em implementações experimentais e na compatibilidade com os perfis de segurança do núcleo utilizado.

Configuração de Monitoramento

Os níveis de *log* foram configurados como *info* para as camadas PHY, MAC, RLC e PDCP, assegurando visibilidade dos eventos operacionais sem sobrecarga excessiva de processamento.

Para a camada NGAP, responsável pela sinalização na interface N2, foi adotado nível *debug*, permitindo análise detalhada de procedimentos como:

- *NG Setup*;
- *Initial UE Message*;
- Registro e liberação de contexto de UE.

Essa estratégia de configuração permitiu balancear desempenho e capacidade de diagnóstico durante os experimentos, aspecto fundamental para validação do ambiente.

3.3.6 Validação da Inicialização do gNB

Após a inicialização do serviço do *gNodeB*, foi realizada a verificação da integração com o núcleo 5G por meio da análise dos *logs* da *Access and Mobility Management Function* (AMF), conforme apresentado na Figura 3.13.

```
02/12 14:55:04.372: [amf] INFO: gNB-N2 accepted[10.252.8.233]:41865 in ng-path module (../src/amf/ngap-sctp.c:113)
02/12 14:55:04.372: [amf] INFO: gNB-N2 accepted[10.252.8.233] in master_sm module (../src/amf/amf-sm.c:813)
02/12 14:55:04.376: [amf] INFO: [Added] Number of gNBs is now 1 (../src/amf/context.c:1240)
02/12 14:55:04.376: [amf] INFO: gNB-N2[10.252.8.233] max_num_of_ostreams : 2 (../src/amf/amf-sm.c:860)
02/12 14:55:22.884: [amf] INFO: InitialUEMessage (../src/amf/ngap-handler.c:437)
02/12 14:55:22.884: [amf] INFO: [Added] Number of gNB-UEs is now 1 (../src/amf/context.c:2678)
02/12 14:55:22.884: [amf] INFO:     RAN_UE_NGAP_ID[1] AMF_UE_NGAP_ID[1] TAC[1] CellID[0xe0000] (../src/amf/ngap-handler.c:598)
```

Figura 3.13 – Trecho do *log* da AMF evidenciando aceitação da conexão N2 do gNB.

A ocorrência da mensagem:

```
gNB-N2 accepted[10.252.8.233]
```

indica que a associação SCTP foi estabelecida com sucesso entre o gNB e a AMF na porta 38412, conforme especificado na 3GPP TS 38.413 (3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2024a).

Adicionalmente, a mensagem:

```
[Added] Number of gNBs is now 1
```

confirma que o gNB foi corretamente registrado no contexto da AMF, concluindo o procedimento *NG Setup*.

Esses registros evidenciam que:

- A interface N2 encontra-se operacional;
- A sinalização NGAP está funcional;
- A RAN foi integrada com sucesso ao núcleo 5G;
- O sistema encontra-se apto a processar mensagens NAS e procedimentos de registro de UE.

Dessa forma, valida-se a correta interoperabilidade entre a rede de acesso e o núcleo 5G em arquitetura *Standalone*, constituindo pré-requisito para os testes de registro e estabelecimento de sessões PDU.

3.4 CONFIGURAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE USUÁRIO (RASPBERRY PI + MODEM 5G)

O equipamento de usuário (UE) foi implementado por meio de uma Raspberry Pi conectada a um *modem* 5G operando em modo NR *Standalone* (SA).

A verificação do estado da célula foi realizada por meio do comando:

```
AT+QENG="servingcell"
```

cuja resposta é apresentada na Figura 3.14.

```
Welcome to minicom 2.8

OPTIONS: I18n
Port /dev/ttyUSB2, 15:17:12

Press CTRL-A Z for help on special keys

AT+QENG="servingcell"
+QENG: "servingcell","NOCONN","NR5G-SA","TDD", 001,01,000BC614E,0,1,640704,77,6,-101,-12,10,1,-

OK
at+cgpaddr
+CGPADDR: 1,"10.45.0.2"
+CGPADDR: 2,""
+CGPADDR: 3,""

OK
```

Figura 3.14 – Resposta ao comando `AT+QENG="servingcell"` evidenciando operação em NR5G-SA.

A saída indica:

- Tecnologia: `NR5G-SA`;
- Duplexação: `TDD`;
- PLMN: 001-01;
- NR-ARFCN: 640704;
- Banda: 77 (subfaixa correspondente à n78);
- Estado: `NOCONN`.

O estado `NOCONN` indica que o UE encontra-se sincronizado à célula e registrado na rede, porém sem sessão ativa de tráfego no instante da consulta, caracterizando estado RRC Idle.

3.4.1 Registro na Rede e Atribuição de Endereço IP

O registro do UE na rede privada foi confirmado por meio do comando:

```
AT+COPS?
```

retornando:

```
+ COPS: 1,0,"Open5GS Magic",11
```

confirmando a associação ao PLMN configurado (00101).

A atribuição de endereço IP foi verificada por meio do comando:

```
AT+CGPADDR
```

que retornou:

```
+CGPADDR: 1,"10.45.0.2"
```

O endereço IP 10.45.0.2 pertence ao intervalo configurado na UPF (sub-rede 10.45.0.0/16), evidenciando:

- Autenticação bem-sucedida do UE;
- Estabelecimento de sessão PDU;
- Encaminhamento funcional pela interface N3.

Mesmo estando em estado RRC Idle no momento da consulta, a presença de endereço IP válido confirma que o processo de registro, autenticação e criação de contexto no núcleo 5G foi concluído com sucesso.

3.5 PROCEDIMENTO DE VALIDAÇÃO E TESTES

Após a configuração do núcleo 5G, da RAN e do equipamento de usuário, foi realizado um conjunto estruturado de testes com o objetivo de validar:

- Registro do UE no núcleo 5G;
- Estabelecimento de sessão PDU;
- Conectividade IP fim a fim;
- Encaminhamento correto pela UPF;
- Funcionamento das interfaces N2 e N3.

3.5.1 Validação do Registro e Autenticação

O registro do UE foi confirmado por meio da análise dos logs da AMF, conforme apresentado na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Trecho do *log* da AMF evidenciando o procedimento de registro do UE.

Observa-se a sequência de mensagens características do procedimento de registro em arquitetura *Standalone*:

- *InitialUEMessage*;
- *Registration request*;
- *Identity response*;
- *Registration complete*.

A presença explícita da mensagem:

```
[gmm] INFO: Registration complete
```

confirma que o procedimento de autenticação foi concluído com sucesso, incluindo interação com a AUSF e consulta de dados no UDM.

Adicionalmente, a criação do contexto do UE pode ser verificada pela mensagem:

```
[Added] Number of AMF-UEs is now 1
```

indicando que o UE foi corretamente inserido na base de contexto da AMF.

3.5.2 Validação do Estabelecimento de Sessão PDU

Após o registro, foi observada a criação da sessão PDU por meio das mensagens relacionadas à seleção de SMF e ao estabelecimento do *SM Context*, conforme ilustrado na Figura 3.16.

Figura 3.16 – Trecho do *log* da UPF evidenciando estabelecimento de sessão e túnel GTP-U.

No *log* da UPF observa-se:

```
[Added] Number of UPF-Sessions is now 1
UE F-SEID[...] APN[internet] PDN-Type[1] IPv4[10.45.0.2]
```

Essas mensagens confirmam:

- Criação da sessão na UPF;
- Estabelecimento do túnel GTP-U na interface N3;
- Atribuição de endereço IPv4 ao UE.

A atribuição do endereço IP também foi confirmada diretamente no equipamento de usuário por meio do comando:

```
AT+CGPADDR
```

retornando:

```
+CGPADDR: 1,"10.45.0.2"
```

O endereço IP pertence à sub-rede configurada na UPF, validando a correta operação do plano de usuário.

3.5.3 Teste de Conectividade IP

Para validação da conectividade fim a fim, foi realizado teste de *ping* a partir do UE, conforme ilustrado na Figura 3.17.

```
edge5g@Capture-CountPeople:~$ ping -I enxfe56fabf4049 10.45.0.1
PING 10.45.0.1 (10.45.0.1) from 192.168.225.43 enxfe56fabf4049: 56(84) bytes of data.
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=1 ttl=63 time=60.6 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=2 ttl=63 time=92.4 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=3 ttl=63 time=74.4 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=4 ttl=63 time=105 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=5 ttl=63 time=108 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=6 ttl=63 time=66.6 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=7 ttl=63 time=101 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=8 ttl=63 time=95.1 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=9 ttl=63 time=94.6 ms
^C
--- 10.45.0.1 ping statistics ---
9 packets transmitted, 9 received, 0% packet loss, time 8012ms
rtt min/avg/max/mdev = 60.555/88.639/107.732/16.221 ms
edge5g@Capture-CountPeople:~$
```

Figura 3.17 – Teste de conectividade IP realizado a partir do UE.

A recepção de respostas ICMP com 0% de perda de pacotes confirma:

- Encapsulamento correto em GTP-U;
- Processamento adequado na UPF;
- Encaminhamento pela interface N6;
- Retorno do tráfego até o UE.

Esse resultado valida o funcionamento completo do plano de usuário no núcleo 5G implementado.

3.5.4 Critérios de Validação

A arquitetura experimental foi considerada operacional quando os seguintes critérios foram simultaneamente atendidos:

- gNB aceito pela AMF (*gNB-N2 accepted*);
- UE registrado com sucesso (*Registration complete*);
- Sessão PDU criada na UPF;
- Endereço IP atribuído ao UE;
- Conectividade IP funcional;
- Estabelecimento de túnel GTP-U na *interface* N3.

Os resultados obtidos confirmam a correta interoperabilidade entre núcleo 5G, RAN e equipamento de usuário em arquitetura *Standalone*, validando a consistência funcional do ambiente experimental implementado.

3.6 IMPLEMENTAÇÃO DO MECANISMO DE AVALIAÇÃO E OBSERVABILIDADE

A avaliação de desempenho da rede 5G privativa foi conduzida por meio da geração controlada de carga no plano de usuário e da coleta sistemática de métricas em diferentes camadas da arquitetura. O objetivo foi analisar simultaneamente a capacidade de transporte no plano IP (interface N3), a latência fim-a-fim da sessão PDU e a qualidade do enlace rádio na camada MAC.

Foram consideradas três métricas principais:

- Capacidade de transporte (*Throughput*);
- Latência fim-a-fim (RTT);
- *Block Error Rate* (BLER).

Geração de Carga e Medição de Throughput

A capacidade de transporte foi avaliada por meio da ferramenta *iperf3*, amplamente utilizada para geração e medição de tráfego em redes IP. A ferramenta permite operar em modo TCP ou UDP. Neste trabalho, foi adotado o modo UDP por possibilitar controle explícito da taxa de transmissão, independentemente dos mecanismos de controle de congestionamento do TCP, permitindo avaliar diretamente a capacidade do plano de usuário sob carga configurada.

O tráfego foi gerado entre o UE e a UPF, de modo que os pacotes IP atravessassem o túnel GTP-U na interface N3, possibilitando medir a vazão efetivamente transportada entre o gNB e o núcleo.

A UPF foi configurada como servidor:

```
iperf3 -s
```

O UE foi configurado como cliente, executando experimentos nos sentidos de *uplink* e *downlink* com limitação explícita de banda. A taxa alvo configurada foi da ordem de dezenas de Mbit/s, mantida de forma sustentada ao longo de 24 horas, permitindo avaliar estabilidade temporal e comportamento do plano de usuário sob carga contínua.

Exemplo de configuração utilizada:

```
iperf3 -c <IP_UPF> -u -b <taxa_configurada> -t 86400 -i 1
```

No caso do *downlink*, foi utilizado o parâmetro `-R` para inverter o sentido do fluxo.

A escolha do modo UDP permitiu avaliar a capacidade de transporte do plano de usuário sem influência de mecanismos de retransmissão, possibilitando observar diretamente a vazão transportada pela interface N3. Os valores apresentados nos gráficos correspondem ao tráfego IP encapsulado em GTP-U entre gNB e UPF, incluindo impactos do enlace rádio, processamento no gNB e na UPF, bem como eventuais perdas no transporte.

Medição de Latência

A latência foi avaliada por meio do cálculo do *Round Trip Time* (RTT), medindo o tempo total de ida e volta de pacotes IP entre o UE e o endereço IP atribuído na sessão PDU.

A medição foi realizada por meio de requisições ICMP, permitindo obter a latência fim-a-fim da comunicação. O RTT inclui:

- Atraso na interface aérea (NR);
- Processamento no gNB;
- Encapsulamento e transporte via GTP-U;
- Processamento na UPF;
- Caminho de retorno completo.

Essa métrica representa a latência total da sessão PDU no plano IP, não se restringindo à camada física.

Coleta de Métricas de Camada Rádio (BLER)

Para avaliar a qualidade do enlace rádio, foram coletadas métricas diretamente do *softmodem* da OpenAirInterface, a partir do arquivo de depuração:

`/home/assert/oai5g_gnb_debug.log`

Foi desenvolvido um exportador em Python responsável por:

- Realizar leitura incremental do arquivo de *log*;
- Extrair BLER de Downlink e Uplink;
- Associar cada métrica ao respectivo RNTI;
- Exportar os valores em formato compatível com o Prometheus.

A extração foi realizada por meio de expressões regulares, capturando os campos "dlsch_rounds" (BLER DL) e "ulsch_rounds" (BLER UL).

O código completo do exportador desenvolvido encontra-se apresentado no Anexo A.

Procedimento de Leitura Incremental

Para evitar sobrecarga computacional no servidor do gNB, o exportador realiza leitura incremental do arquivo de *log*, posicionando o ponteiro próximo ao final do arquivo e retrocedendo em blocos fixos de 64 kB, limitando a análise às últimas 4.000 linhas.

O ciclo de coleta ocorre a cada 1 segundo, permitindo atualização quase em tempo real, sem impacto significativo no processamento do sistema.

Exportação e Armazenamento

As métricas foram expostas por meio da biblioteca `prometheus_client`, utilizando objetos do tipo *Gauge*, possibilitando atualização contínua dos valores coletados.

O exportador disponibiliza o endpoint:

`http://<host>:8007/metrics`

O Prometheus realiza *scrape* periódico, armazenando os dados em banco temporal, viabilizando posterior visualização e correlação no Grafana.

Visualização e Correlação

As métricas foram visualizadas no Grafana, permitindo correlação entre:

- Throughput (plano IP – interface N3);
- Latência fim-a-fim (RTT);
- BLER (camada MAC).

Essa abordagem possibilita analisar simultaneamente capacidade de transporte, estabilidade temporal e qualidade da interface aérea, permitindo identificar possíveis relações entre degradação do enlace rádio e impacto no desempenho fim-a-fim da sessão PDU.

Síntese das Métricas

Quadro 1 – Síntese das métricas avaliadas.

Métrica	**Camada**	**Origem**	**Finalidade**
Throughput	IP / N3	*iperf3*	Capacidade de transporte
RTT	IP fim-a-fim	ICMP / Sessão PDU	Latência total
BLER	MAC	Log OAI	Taxa de erro de blocos

Autoria própria.

4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DA REDE PRIVATIVA

A validação do ambiente experimental baseou-se na análise de Indicadores-Chave de Desempenho (*Key Performance Indicators* – KPIs) selecionados para cobrir os diferentes domínios funcionais da rede 5G, seguindo as recomendações da norma técnica ETSI TS 128 554 (ETSI, 2020). A estratégia de monitoramento foi segmentada em três camadas distintas:

- **Domínio da RAN (Rádio):** Métricas coletadas diretamente da interface aérea, com destaque para a Taxa de Erro de Bloco (*Block Error Rate* – BLER), indicador que reflete a integridade da transmissão de dados entre o UE e o gNB.
- **Domínio do *Core* (Plano de Dados):** Métricas extraídas da interface de túnel da UPF, com foco na Taxa de Transferência (*Throughput*), que evidencia a capacidade efetiva de processamento e transporte de pacotes no núcleo da rede.
- **Domínio Fim-a-Fim (Experiência do Usuário):** Métricas de latência, mensuradas por meio do Tempo de Ida e Volta (*Round Trip Time* – RTT) entre a aplicação do usuário e a borda da rede, sintetizando o desempenho conjunto de todos os elementos da infraestrutura.

Para a visualização e interpretação desses dados, utilizou-se a plataforma **Grafana** (Grafana Labs, 2026), que permitiu a criação de painéis dinâmicos alimentados pelas séries temporais armazenadas no **Prometheus** (Cloud Native Computing Foundation, 2026). Essa integração possibilitou a correlação visual entre métricas de rádio, transporte e latência, facilitando o diagnóstico de anomalias e a identificação de gargalos operacionais.

Essa abordagem em camadas permitiu isolar o impacto de cada subsistema na qualidade final do serviço. A seguir, são detalhados os resultados obtidos para cada grupo de indicadores.

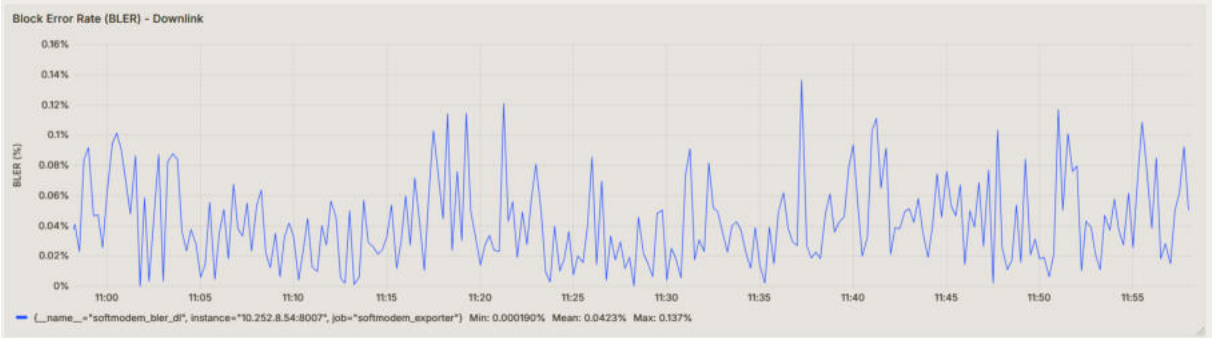
4.0.1 Integridade do Enlace de Rádio (BLER)

A confiabilidade do enlace sem fio é fundamental em cenários industriais, nos quais a perda excessiva de blocos pode comprometer aplicações críticas. Para avaliar a integridade da comunicação na interface aérea, monitorou-se a Taxa de Erro de Bloco (*Block Error Rate* – BLER) nos sentidos de descida (*Downlink*) e subida (*Uplink*).

O BLER representa a razão entre blocos transmitidos e blocos recebidos com erro após os mecanismos de detecção e correção da camada física do 5G NR, constituindo um indicador direto da robustez do enlace.

A Figura 4.1 apresenta o comportamento temporal do BLER no *Downlink*. Observa-se que a taxa de erro manteve-se consistentemente abaixo de 0,14%, mesmo durante variações operacionais do ambiente experimental.

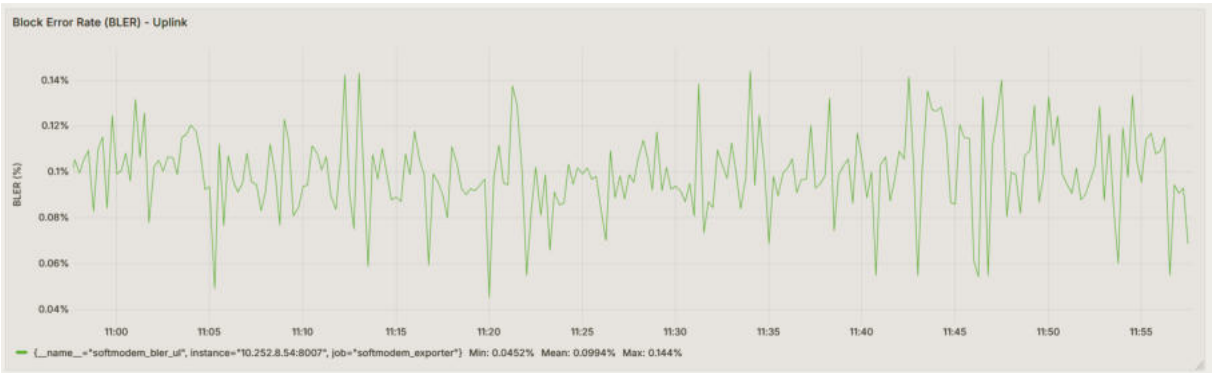
Figura 4.1 – Taxa de Erro de Bloco (BLER) no *Downlink*.



Fonte: Autoria própria.

De forma análoga, a Figura 4.2 ilustra o comportamento do BLER no sentido de *Uplink*. As taxas observadas permaneceram em níveis residuais, evidenciando estabilidade na transmissão do UE para o *gNodeB*.

Figura 4.2 – Taxa de Erro de Bloco (BLER) no *Uplink*.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos indicam que a configuração adotada para a banda n77 e para os parâmetros de camada física mostrou-se adequada para suportar tráfego de dados com elevada integridade, atendendo aos requisitos de confiabilidade do ambiente experimental.

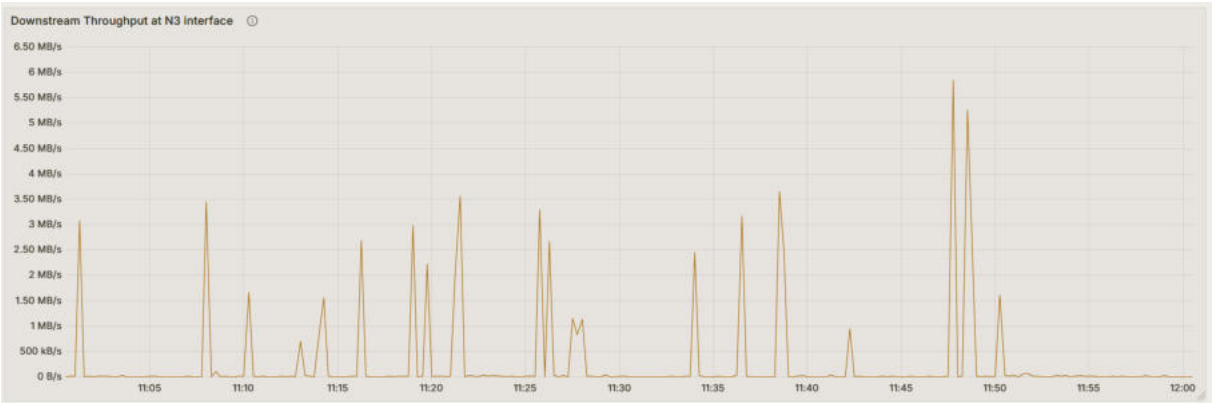
4.0.2 Capacidade de Transporte (*Throughput*)

A capacidade de transporte foi avaliada por meio do monitoramento da interface N3, responsável pelo encapsulamento GTP-U entre o gNB e a UPF. Como a coleta ocorre na N3, os valores representam o tráfego IP efetivamente transportado no plano de usuário entre gNB e núcleo.

Para os experimentos de throughput, foi utilizada a ferramenta *iperf3* em modo UDP, com limitação explícita de banda, permitindo impor uma taxa alvo controlada e analisar o comportamento da rede sob carga sustentada.

No sentido de *Downlink* (Figura 4.3), observa-se comportamento intermitente, caracterizado por picos de vazão intercalados por períodos com valores próximos de zero. Os picos correspondem aos intervalos em que o tráfego foi ativamente gerado no sentido núcleo–UE, enquanto os períodos sem vazão refletem ausência intencional de geração de carga nesse sentido durante determinadas janelas do experimento.

Figura 4.3 – Taxa de transferência (*Throughput*) no *Downlink*.



Fonte: Autoria própria.

Os valores máximos observados nos picos mostram-se compatíveis com a taxa configurada no gerador de tráfego, indicando que a interface N3 suportou adequadamente a carga imposta quando o fluxo esteve ativo.

No sentido de *Uplink* (Figura 4.4), verifica-se vazão sustentada ao longo de praticamente todo o período de medição, evidenciando estabilidade da sessão PDU e capacidade da infraestrutura em manter tráfego contínuo entre UE e núcleo.

Figura 4.4 – Taxa de transferência (*Throughput*) no *Uplink*.

Fonte: Autoria própria.

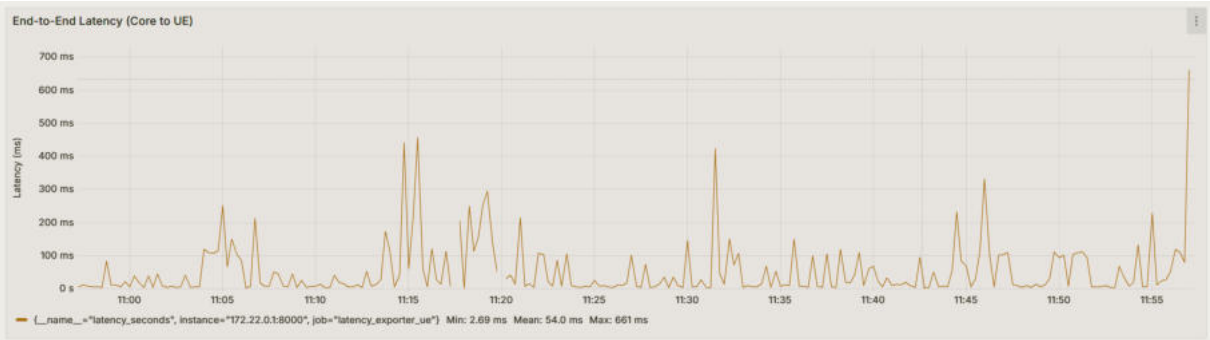
As quedas pontuais observadas no *uplink* são compatíveis com eventos transitórios típicos de ambientes experimentais baseados em SDR e processamento em *software*, como flutuações momentâneas de CPU ou variações no enlace rádio. A rápida retomada da taxa nominal após cada vale indica que não houve interrupção persistente da sessão PDU nem falha no túnel GTP-U.

Em síntese, os resultados demonstram que a interface N3 operou de forma estável durante o período de observação, apresentando comportamento coerente com a estratégia de geração de carga adotada.

4.0.3 Latência Fim-a-Fim (RTT)

Por fim, avaliou-se a latência de ida e volta (*Round Trip Time* - RTT) entre o Equipamento de Usuário (UE) e o Núcleo da rede. A Figura 4.5 mostra que a latência média oscilou na faixa de 50 a 100 ms, com alguns picos superiores a 400 ms.

Figura 4.5 – Latência fim-a-fim (RTT) entre UE e *Core*.



Fonte: Autoria própria.

A latência média observada (50-100 ms) é compatível com os requisitos de serviços de Banda Larga Móvel Melhorada (*Enhanced Mobile Broadband* - eMBB), suportando adequadamente aplicações de vídeo e telemetria não-crítica. Contudo, este valor situa-se acima dos limiares de Comunicações de Ultra-Confiabilidade e Baixa Latência (*Ultra-Reliable Low-Latency Communications* - URLLC) preconizados pelo padrão 5G para aplicações de tempo real estrito (< 10 ms). Essa magnitude de atraso é intrínseca a arquiteturas de rádio definidas por *software* (SDR) executadas em *hardware* de propósito geral, onde o processamento da banda base e o escalonamento da CPU do sistema operacional introduzem latências de processamento (*processing delay*) significativamente maiores que as encontradas em equipamentos comerciais baseados em *hardware* dedicado, como Circuitos Integrados de Aplicação Específica (*Application-Specific Integrated Circuits* - ASICs) ou Arranjos de Portas Programáveis em Campo (*Field-Programmable Gate Arrays* - FPGAs).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste trabalho possibilitou a implementação e validação experimental de uma rede 5G privativa em arquitetura *Standalone*, fundamentada em soluções de código aberto. A infraestrutura foi composta pelo núcleo Open5GS, pela plataforma de acesso OpenAirInterface e por rádio definido por *software*, permitindo a construção de um ambiente de testes em nível de laboratório.

A implantação do ambiente evidenciou a viabilidade técnica de arquiteturas *cloud-native* aplicadas a redes não públicas (NPN), demonstrando que soluções abertas são capazes de suportar cenários experimentais com requisitos de controle, flexibilidade e monitoramento estruturado.

5.1 CONTRIBUIÇÕES E RESULTADOS ALCANÇADOS

O principal resultado obtido foi a consolidação de uma infraestrutura 5G privativa plenamente operacional, contemplando:

- Registro e autenticação de *User Equipment* (UE);
- Estabelecimento e gerenciamento de sessões PDU;
- Encaminhamento de tráfego pelo plano de usuário via UPF;
- Validação de conectividade IP fim-a-fim;
- Implementação de mecanismo de observabilidade baseado em Prometheus e Grafana.

Destaca-se, como contribuição adicional, o desenvolvimento de um mecanismo de extração e exportação de métricas da RAN, responsável por converter *logs* do gNB em indicadores estruturados de desempenho. Essa abordagem permitiu integrar a rede 5G a um ecossistema de monitoramento temporal, viabilizando análise contínua e diagnóstico de eventos operacionais.

5.2 DESAFIOS TÉCNICOS E SOLUÇÕES ADOTADAS

Durante a execução do projeto, foram enfrentados desafios associados à configuração, interoperabilidade e validação dos componentes da arquitetura 5G:

- **Parametrização das Funções de Rede:** A correta configuração das NFs do núcleo exigiu alinhamento rigoroso de parâmetros como MCC, MNC, S-NSSAI e DNN entre núcleo, RAN e UE. A solução envolveu estudo detalhado das especificações do 3GPP e análise sistemática de *logs*.

- **Integração entre RAN e *Core*:** Problemas relacionados à associação SCTP e ao encapsulamento GTP-U foram solucionados por meio de inspeção de tráfego com ferramentas como *tcpdump* e Wireshark, permitindo identificar inconsistências de endereçamento e configuração.
- **Orquestração em Contêineres:** A utilização de Docker demandou compreensão aprofundada de redes virtuais, isolamento de serviços e gerenciamento de dependências entre funções de rede. A validação incremental dos componentes foi fundamental para estabilização do ambiente.

5.3 COMPETÊNCIAS DESENVOLVIDAS

A execução do projeto proporcionou consolidação prática de conhecimentos em:

- Arquitetura 5G baseada em SBA (*Service-Based Architecture*) e separação CUPS (*Control and User Plane Separation*);
- Implementação de redes NPN em ambiente experimental;
- Observabilidade aplicada a telecomunicações;
- Análise de indicadores de desempenho de RAN e *Core*.

Conclui-se que a infraestrutura desenvolvida constitui uma plataforma experimental robusta para investigações futuras em redes 5G privativas, especialmente no contexto de monitoramento estruturado, análise de desempenho e evolução de arquiteturas abertas voltadas a aplicações industriais.

REFERÊNCIAS

3rd Generation Partnership Project (3GPP). *NR; NG-RAN; NG Application Protocol (NGAP)*. [S.l.], 2024. Release 18. Disponível em: <https://www.3gpp.org>.

3rd Generation Partnership Project (3GPP). *NR; Physical channels and modulation (Release 18)*. [S.l.], 2024. Available at: https://www.3gpp.org.

3rd Generation Partnership Project (3GPP). *System Architecture for the 5G System (5GS); Stage 2*. [S.l.], 2024. Release 18. Disponível em: <https://www.3gpp.org>.

Barrachina-Muñoz, S. et al. Empowering beyond 5g networks: An experimental assessment of zero-touch management and orchestration. **IEEE Transactions on Network and Service Management**, 2024. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10776956>.

BOTH, C. B. et al. Soft5g+: explorando a softwarização nas redes 5g. In: _____. **Livro de Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)**. [S.l.: s.n.], 2020. cap. 3.

BRITAIN, K. **PCB Log Periodic Antenna 850-6500 MHz Datasheet**. [S.l.], 2024. Acessado em: 20 dez. 2025. Disponível em: <https://www.wa5vjb.com/pcb-pdfs/LP8565.pdf>.

Cloud Native Computing Foundation. **Prometheus: Monitoring system and time series database**. 2026. Acesso em: 20 dezembro 2025. Disponível em: <https://prometheus.io>.

DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKÖLD, J. **5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology**. 2. ed. London, UK: Academic Press, 2021. ISBN 978-0-12-822320-8.

ETSI. **5G; Management and orchestration; 5G end to end Key Performance Indicators (KPI)**. [S.l.], 2020.

Ettus Research. **USRP B210 Software Defined Radio Datasheet**. [S.l.], 2024. Acessado em: 20 dez. 2025. Disponível em: <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/>.

European Telecommunications Standards Institute (ETSI). **5G; Management and orchestration; 5G end to end Key Performance Indicators (KPI)**. [S.l.], 2021.

_____. **System architecture for the 5G System (5GS)**. [S.l.], 2021.

Grafana Labs. **Grafana: The Open Observability Platform**. 2026. Acesso em: 20 dezembro 2025. Disponível em: <https://grafana.com>.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**. [S.l.], 2013. Acesso em: 7 janeiro 2026. Disponível em: <https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf>.

MATZAKOS, P. et al. An open source 5g experimentation testbed. In: **Proceedings of the IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom)**. [S.l.: s.n.], 2021.

NIKAEIN, N. et al. Openairinterface: A flexible platform for 5g research. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, v. 44, n. 5, p. 33–38, 2014.

OpenAirInterface Alliance. **OpenAirInterface 5G Software Alliance**. 2024. Acessado em: 20 dez. 2025. Disponível em: <https://openairinterface.org/>.

PAPAIOANNOU, P. et al. Measuring 5g kpis for the media vertical. In: **Proceedings of the IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom)**. [S.l.: s.n.], 2021.

PETERSON, L.; SUNAY, O. **5G Mobile Networks: A Systems Approach**. San Rafael, CA: Morgan & Claypool Publishers, 2020. v. 1. (Synthesis Lectures on Network Systems, v. 1).

Quectel Wireless Solutions. **Quectel RM520N-GL 5G Sub-6GHz M.2 Module Specification**. [S.l.], 2024. Acessado em: 20 dez. 2025. Disponível em: <https://www.quectel.com/product/5g-rm520n-series>.

_____. **YECT005W1A 5G Terminal Mount Dipole Antenna Datasheet**. [S.l.], 2024. Acessado em: 20 dez. 2025. Disponível em: <https://www.quectel.com/product/yect005w1a-5g-terminal-mount-antenna/>.

SAHA, N. et al. Monarch: Network slice monitoring architecture for cloud native 5g deployments. In: **Proceedings of the IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS)**. [S.l.: s.n.], 2023.

SILVA, R. L. da et al. Experimentação em redes 5g privadas: Conceitos, ferramentas, configurações e aplicações. In: _____. **Minicursos do XLIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2025)**. [S.l.: s.n.], 2025. cap. 1.

SUPREETH, H. et al. **Docker files to run Open5GS, IMS, eNB, gNB, NR-UE in a docker**. 2025. Repositório GitHub. Última atualização em 2025. Acesso em: 20 dezembro 2025. Disponível em: <https://github.com/herlesupreeth/docker_open5gs>.

TRUJILLO, J. et al. Methodology for autonomous monitoring of mobile networks. In: **Proceedings of the IEEE Workshop on Complexity in Engineering (COMPENG)**. [S.l.: s.n.], 2022.

ANEXO A – SCRIPT PYTHON PARA EXPORTAÇÃO DE MÉTRICAS

Esse anexo apresenta o *script* desenvolvido para extração de métricas a partir dos *logs* do gNB e exportação em formato compatível com o Prometheus.

Listing A.1 – *Script* `softmodem_exporter.py` utilizado para exportação de métricas ao Prometheus.

```
#!/usr/bin/env python3
import re
import time
from prometheus_client import start_http_server, Gauge

LOGFILE = '/home/assert/oai5g_gnb_debug.log'

rsrp_metric = Gauge('softmodem_rsrp', 'RSRP average value from softmodem', ['rnti'])
bler_metric_ul = Gauge('softmodem_bler_ul', 'BLER uplink value from softmodem', ['rnti'])
bler_metric_dl = Gauge('softmodem_bler_dl', 'BLER downlink value from softmodem', ['rnti'])

# Aceita BLER "0" ou "0.09572"
BLER_RE = re.compile(r'BLER\s+([0-9]+(?:\.[0-9]+)?)')
# UE RNTI xxxx ... average RSRP -97
RSRP_RE = re.compile(r'UE RNTI\s+([0-9a-fA-F]+).*average RSRP\s+(-?\d+)')
# "UE d387: dlsch_rounds ..." / "UE d387: ulsch_rounds ..."
UE_PREFIX_RE = re.compile(r'^UE\s+([0-9a-fA-F]+):\s+')

def tail_lines(path, max_lines=4000):
    """L  apenas o final do arquivo para n o varrer tudo sempre."""
    with open(path, 'rb') as f:
        f.seek(0, 2)
        size = f.tell()
        block = 65536
        data = b''
        while size > 0 and data.count(b'\n') < max_lines:
            read_size = block if size >= block else size
            size -= read_size
            f.seek(size)
            data = f.read(read_size) + data
        return data.decode(errors='ignore').splitlines()[-max_lines:]

def parse_metrics(lines):
    # dicion rio por rnti
    rsrp = {}
```

```
36      bler_dl = {}
37      bler_ul = {}
38
39      for line in lines:
40          m = RSRP_RE.search(line)
41          if m:
42              rnti = m.group(1).lower()
43              rsrp[rnti] = float(m.group(2))
44              continue
45
46          # BLER lines: precisam do rnti no prefixo "UE <rnti>:"
47          p = UE_PREFIX_RE.match(line)
48          if not p:
49              continue
50          rnti = p.group(1).lower()
51
52          if "dlsch_rounds" in line:
53              b = BLER_RE.search(line)
54              if b:
55                  bler_dl[rnti] = float(b.group(1))
56          elif "ulsch_rounds" in line:
57              b = BLER_RE.search(line)
58              if b:
59                  bler_ul[rnti] = float(b.group(1))
60
61      return rsrp, bler_ul, bler_dl
62
63  def monitor():
64      print(f"[*] Monitoring {LOGFILE}")
65      while True:
66          try:
67              lines = tail_lines(LOGFILE, max_lines=4000)
68          except FileNotFoundError:
69              print(f"[!] File {LOGFILE} not found.")
70              time.sleep(2)
71              continue
72
73          rsrp, bler_ul, bler_dl = parse_metrics(lines)
74
75          for rnti, v in rsrp.items():
76              rsrp_metric.labels(rnti=rnti).set(v)
77
78          for rnti, v in bler_ul.items():
79              bler_metric_ul.labels(rnti=rnti).set(v)
80
81          for rnti, v in bler_dl.items():
82              bler_metric_dl.labels(rnti=rnti).set(v)
```

```
83
84          time.sleep(1)
85
86  if __name__ == "__main__":
87      print("[*] Starting Prometheus exporter on port 8007")
88      start_http_server(8007)
89      monitor()
```

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)
CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Trabalho de Conclusão de Curso

Assunto:	Trabalho de Conclusão de Curso
Assinado por:	Maria Patricio
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Maria da Conceição Zelo Barbosa Patricio, DISCENTE (20212610013) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 26/02/2026 15:05:17.

Este documento foi armazenado no SUAP em 26/02/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/ e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1780795
Código de Autenticação: 611d11bb4a