

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
Campus Campina Grande
Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Telemática

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE REDES 5G: COMPARATIVO ENTRE CORES ON-PREMISE E REMOTO

EDNALDO DA SILVA JUNIOR

Orientador: Ruan Delgado Gomes

Campina Grande, Novembro de 2025

©Ednaldo da Silva Junior

Catálogo na fonte:

Ficha catalográfica elaborada por Gustavo César Nogueira da Costa - CRB 15/479

S586a Silva Junior, Ednaldo da

Avaliação de desempenho de redes 5G: comparativo entre cores on-premise e remoto / Ednaldo da Silva Junior. – Campina Grande, – 2025.

36 f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Curso Superior de Tecnologia em Telemática) - Instituto Federal da Paraíba, 2025.

Orientador: Porf. Ruan Delgado Gomes.

1. Telemática. 2. Redes 5G. 3. Redes privadas - Avaliação de desempenho. 4. Open5GS. I. Gomes, Ruan Delgado. II. Título.

CDU 621.3

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
Campus Campina Grande
Coordenação do Cursos Superior de Tecnologia em Telemática

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE REDES 5G: COMPARATIVO ENTRE CORES ON-PREMISE E REMOTO

EDNALDO DA SILVA JUNIOR

Monografia apresentada à Coordenação do
Curso de Telemática do IFPB - Campus
Campina Grande, como requisito parcial
para conclusão do curso de Tecnologia em
Telemática.

Orientador: Ruan Delgado Gomes

Campina Grande, novembro de 2025

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE REDES 5G: COMPARATIVO ENTRE CORES ON-PREMISE E REMOTO

EDNALDO DA SILVA JUNIOR

Ruan Delgado Gomes
Orientador

Ewerton Romulo Silva Castro
Membro da Banca

Marcelo Portela Sousa
Membro da Banca

Campina Grande, Paraíba, Brasil
Novembro/2025

Se sonhar um pouco é perigoso, a solução não é sonhar menos é sonhar mais.

Marcel Proust

Agradecimentos

Aos meus pais, Ednaldo e Izaneide, que me deram suporte e proporcionaram um ambiente que me permitiu dedicar-me a esta etapa. À minha noiva, Wenderlânia, que esteve comigo em momentos difíceis. Aos meus amigos Amanda, Isis e Yalli, que ajudaram a tornar tudo mais leve. Aos professores do IFPB, que me orientaram e me proporcionaram um ambiente para crescer. Aos professores e pesquisadores do projeto IBM Flextronics que me auxiliaram no aprendizado e proporcionaram o ambiente necessário para que este trabalho pudesse existir.

Resumo

Com o aumento da relevância das redes 5G privadas e o desenvolvimento de soluções *open source*, está se tornando cada vez mais necessária a avaliação de desempenho dessa arquitetura sob diversos tipos de situações. O projeto IBM Flextronics da Universidade Federal de Campina Grande implementou uma rede 5G privada para experimentos. Considerando a necessidade de testes em relação à infraestrutura de prédios e redes distintas. Aqui se propõe a avaliação de desempenho de uma rede 5G privada com o core Open5GS e uma gNB implementada *on-premise* no Laboratório de Sistemas Distribuídos, e uma implantada remotamente no Laboratório de Práticas de Software, traçando um comparativo tanto em métricas de rede quanto na avaliação da experiência por parte de usuário, com sua utilização comum.

Palavras-chave: Redes 5G, redes privadas, arquitetura 5G, Open5GS.

Abstract

With the increasing relevance of private 5G networks and the development of open-source solutions, the performance evaluation of this architecture under various conditions is becoming increasingly necessary. The IBM Flextronics project at the Federal University of Campina Grande implemented a private 5G network for experiments. Considering the need for testing in relation to the infrastructure of distinct buildings and networks, this work proposes the performance evaluation of a private 5G network featuring the Open5GS core and one gNB implemented on-premise at the Distributed Systems Laboratory, and another deployed remotely at the Software Practices Laboratory, drawing a comparison in terms of both network metrics and user experience assessment during common usage.

Keywords: 5G networks, private networks, 5G architecture, Open5GS.

Sumário

Lista de Abreviaturas	x
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Justificativa e Relevância do Trabalho	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Metodologia	2
1.4 Organização do Documento	3
2 Fundamentação Teórica	4
2.1 Conceitos Gerais	4
2.1.1 Arquitetura de Redes 5G	4
2.1.2 Transmissão de Rádio	4
2.1.3 <i>Radio Access Network</i>	5
2.1.4 <i>Mobile Core</i>	6
2.1.5 NFV (<i>Network Functions Virtualization</i>)	7
2.1.6 SDN (<i>Software Defined Network</i>)	7
2.1.7 IPSec (<i>Internet Protocol Security</i>)	7
3 Materiais e Métodos	8
3.1 Materiais	8
3.1.1 <i>Baremetal</i>	8
3.1.2 Rádio 5G	9
3.1.3 <i>User Equipment</i> (UE)	9
3.1.4 Topologia de rede	10
3.2 Métodos	12
3.2.1 Descrição do Teste 1	12
3.2.2 Descrição do Teste 2	12

4	Desenvolvimento	14
4.1	Testes 1	14
4.2	Teste 2	15
5	Resultados e Conclusão	20
5.1	Resultados	20
5.1.1	Testes 1	20
5.1.2	Testes 2	21
5.2	Conclusão	22
	Referências Bibliográficas	24

Lista de Abreviaturas

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
5GC	<i>5G Core</i> (Core da Rede 5G)
5QI	<i>5G QoS Identifier</i>
AMF	<i>Access and Mobility Management Function</i> (Função de Gestão de Acesso e Mobilidade)
API	<i>Application Programming Interface</i>
AUSF	<i>Authentication Server Function</i> (Função de Servidor de Autenticação)
CP	<i>Control Plane</i> (Plano de Controle)
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i>
CU	<i>Central Unit</i> (Unidade Central)
DNS	<i>Domain Name System</i>
DU	<i>Distributed Unit</i> (Unidade de Distribuição)
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i> (Potência Isotrópica Radiada Equivalente)
FQDN	<i>Fully Qualified Domain Name</i>
gNB	<i>Next-Generation Node B</i> (Estação Rádio-Base 5G)
GTP	<i>General Packet Radio Service Tunneling Protocol</i>
IMSI	<i>International Mobile Subscriber Identity</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPSec	<i>Internet Protocol Security</i>
LSD	Laboratório de Sistemas Distribuídos
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
NEF	<i>Network Exposure Function</i> (Função de Exposição de Rede)
NFV	<i>Network Functions Virtualization</i> (Virtualização de Funções de Rede)
NOS	<i>Network Orchestration System</i> (Sistema de Orquestração de Rede)
NR	<i>New Radio</i>
NRF	<i>Network Repository Function</i>
O-RAN	<i>Open Radio Access Network</i>
PCF	<i>Policy Control Function</i> (Função de Controle de Política)
PSK	<i>Pre-Shared Key</i> (Chave Pré-Compartilhada)
QoS	<i>Quality of Service</i> (Qualidade de Serviço)
RAN	<i>Radio Access Network</i> (Rede de Acesso de Rádio)
RIC	<i>RAN Intelligent Controller</i> (Controlador Inteligente da RAN)

RU	<i>Radio Unit</i> (Unidade de Rádio)
SCAS	<i>Small Cells Analytics Server</i> (Servidor de Análise de Small Cells)
SCTP	<i>Stream Control Transport Protocol</i>
SD-RAN	<i>Software-Defined Radio Access Network</i>
SDN	<i>Software Defined Network</i> (Rede Definida por Software)
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
SMF	<i>Session Management Function</i> (Função de Gestão de Sessão)
SPLab	Laboratório de Práticas de Software
UDM	<i>Unified Data Management</i> (Gestão Unificada de Dados)
UDR	<i>Unified Data Repository</i>
UE	<i>User Equipment</i> (Equipamento de Usuário)
UP	<i>User Plane</i> (Plano de Usuário)
UPF	<i>User Plane Function</i> (Função do Plano de Usuário)
VM	<i>Virtual Machine</i> (Máquina Virtual)
VPN	<i>Virtual Private Network</i> (Rede Privada Virtual)

Lista de Figuras

3.1	Mavenir Small Cell E511	9
3.2	Apple iPhone 13	10
3.3	Topologia da Rede com core <i>on-premise</i>	10
3.4	Fluxo dos dados da UE para a Internet	11
4.1	Ferramenta de Ping	15
4.2	Traceroute para google.com	16
4.3	Ferramenta de iPerf	17
4.4	Testes com o navegador	18
4.5	Testes com o YouTube	19
4.6	Jogo Online	19
5.1	Resultado Ping para google.com	21
5.2	Resultado do iPerf para VM	22

Lista de Tabelas

5.1	Comparativo de Valores Mínimo, Máximo e Médio	20
5.2	Comparativo de Taxas de Transferência 5G	20

Capítulo 1

Introdução

Com o passar dos anos, as redes celulares evoluíram, passando pelas tecnologias 3G e 4G (LTE) e, desde o fim de 2018, as redes de quinta geração (5G) têm tido uma maior visibilidade e relevância nos campos de pesquisa e mercado [Nester]. Em geral, as tecnologias utilizadas pelas empresas são ou *blackboxes*, com seus detalhes de funcionamento ocultos, ou monolíticas, tendo seus componentes integrados em uma única solução a ser vendida. A fim de mudar esse cenário, organizações como a *O-RAN Society* publicaram estudos sobre arquiteturas 5G de código aberto, com a finalidade de abrir o debate para todos os interessados e democratizar a pesquisa nesta área, a fim de ter uma evolução conjunta e *open source* [Polese *et al.* 2023].

A *O-RAN Society* utilizou o modelo de estação base da Rede de Acesso de Rádio (RAN) descrito na NR 7.2 da 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) e o fragmentou em três unidades: Unidade Central (CU), Unidade de Distribuição (DU) e Unidade de Rádio (RU). Desta forma, há possibilidade de contribuir com soluções para as unidades individualmente, permitindo diversas abordagens para soluções específicas e com necessidades individuais [Polese *et al.* 2023].

A partir deste contexto, aproveitando a estrutura e as necessidades de execução de testes do projeto *IBM 5G Flextronics* realizado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), com um core 5G implantado no Laboratório de Sistemas Distribuídos (LSD) e uma RU implantada junto a ele, além de outra RU implantada no Laboratório de Práticas de Software (SPLab), mostrou-se necessária a compreensão das diferenças de desempenho entre as duas RUs citadas para saber o quanto a infraestrutura provida influencia os resultados obtidos quando conectados às duas RUs.

1.1 Justificativa e Relevância do Trabalho

No projeto em que este trabalho está inserido, uma vez que a infraestrutura do SPLab não consegue suportar a máquina onde o 5GC está provisionado e não há possibilidade de autonomia sobre a rede que abrange os laboratórios, foi necessário desenvolver um projeto

que os conectasse de forma eficaz, a fim de que os testes pudessem ser realizados sem a necessidade de mobilizar o pessoal até o prédio do LSD para a conexão com a RU.

Considerando a existência dessas duas RUs implantadas em prédios diferentes, decidiu-se avaliar de que modo a distância de implantação da RU pode influenciar o desempenho de uma rede 5G privada. Dada a flexibilidade de implantação permitida pelas redes 5G, é possível que as funções de rede do *core* sejam implantadas em diferentes locais, seja em nuvens públicas, nuvens privadas ou infraestrutura *on-premise*. No entanto, é importante entender os possíveis impactos no desempenho relacionados aos diferentes tipos de implantação [Stallings 2021].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste na realização de experimentos para a avaliação de desempenho de uma rede 5G privada, considerando um cenário com o *core* implantado próximo à unidade de rádio e um cenário com o *core* implantado em servidores remotos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Configurar o ambiente experimental para a integração dos equipamentos de usuário, rádio e do *core*;
- Planejar os experimentos e configurar as ferramentas necessárias para a coleta dos dados;
- Executar experimentos considerando diferentes cargas de tráfego para a medição de parâmetros, como a taxa de transferência de dados e latência nos dois cenários;
- Realizar a análise comparativa dos dados obtidos para investigar a influência da distância do *core* no desempenho geral da rede 5G privada que está sendo avaliada.

1.3 Metodologia

As RUs utilizadas são as *Small Cells 5G Enterprise Small Cell E511* da empresa Mavenir. A base da infraestrutura é um servidor Dell PowerEdge R450 com o CentOS 7. Nele, há três máquinas virtuais: uma para o NOS (*Network Orchestration System* - Sistema de Orquestração de Rede), atuando como controladora das RUs; uma para o SCAS (*Small Cells Analytics Server* - Servidor de Análise das Small Cells), responsável pela exportação de métricas das *Small Cells*; e uma para o Open5GS, *Mobile Core* escolhido para a infraestrutura, que foi implementado em contêineres utilizando Docker. Em relação ao posicionamento

das *Small Cells*, há uma no Bloco CX3 (SPLab) e uma no Bloco CP (LSD). O servidor está localizado no Bloco CP. O equipamento de usuário disponível é um Apple iPhone 13.

A metodologia empregada para o desenvolvimento deste trabalho consiste na execução de experimentos utilizando ferramentas como *ping* e iPerf para medir indicadores de desempenho de rede, como a taxa de transferência de dados e a latência. Foram utilizados servidores públicos disponibilizados no site da ferramenta iPerf, com duração de cinco minutos, utilizando a taxa de bits máxima disponibilizada pela estrutura, para o posterior registro das capturas de pacotes. Cada teste foi efetuado em cada um dos *cores* individualmente, passando por uma bateria de dez testes para cada um.

1.4 Organização do Documento

No Capítulo Capítulo 2 são apresentados os conceitos necessários para o acompanhamento do trabalho, referenciando tanto os conceitos mais abrangentes quanto os mais específicos a respeito do trabalho desenvolvido. No Capítulo Capítulo 3 serão detalhados os equipamentos, softwares e metodologias utilizadas tanto na construção da arquitetura quanto nos testes desenvolvidos para a avaliação de desempenho. No Capítulo Capítulo 4 serão detalhadas as características da topologia considerada neste trabalho, incluindo a disposição física dos dispositivos e detalhando o funcionamento de seus componentes e da aplicação dos testes. No Capítulo Capítulo 5 serão apresentados os resultados obtidos com os experimentos e será fornecida uma discussão a respeito do desempenho da rede nos dois cenários considerados: com um core *on-premise* e um core remoto.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Conceitos Gerais

Dada a profundidade e complexidade do tema redes 5G, são necessárias algumas explicações prévias para ajudar na compreensão do trabalho em sua totalidade. Sendo assim, algumas explicações breves foram necessárias para proporcionar mais acessibilidade ao trabalho. Nesta seção são explicados temas relacionados a redes 5G, bem como redes de longa distância e segurança de redes.

2.1.1 Arquitetura de Redes 5G

As redes 5G são formadas por duas partes principais: a Rede de Acesso de Rádio (*Radio Access Network* - RAN) e o 5G Core (5GC). O 5GC foi projetado considerando uma arquitetura baseada em serviços e opera com o objetivo de oferecer escalabilidade, interoperabilidade e flexibilidade. A RAN do 5G tem o papel de servir como interface aérea para conectar os equipamentos de usuário (*User Equipment* - UE) ao 5GC, de modo que os usuários possam acessar os serviços por meio da rede 5G. A RAN é composta pelos componentes: Unidade de Rádio (RU), Unidade de Distribuição (DU) e Unidade Central (CU) [Sharma, Vittal e Franklin 2023] [Cheng *et al.* 2024]. A comunicação entre a RAN e o 5GC utiliza a pilha de protocolos SCTP (*Stream Control Transport Protocol*)/IP a nível de camada de transporte, enquanto a comunicação entre as UEs e o Plano de Controle da Unidade Central (*Central Unit - Control Plane* CU-CP) utiliza a pilha GTP (*General Packet Radio Service*)/UDP/IP.

2.1.2 Transmissão de Rádio

A transmissão de rádio é a base da comunicação sem fio entre as estações rádio-base (*Next-Generation Node B* gNB) e as UEs. Existem dois indicadores-chave: o *Channel Quality Indicator* (CQI), que é uma medida da qualidade do sinal observada pela gNB ao se comunicar com um UE, e o 5G QoS Identifier (5QI), que é um valor que a rede

utiliza para determinar a qualidade de serviço que deve ser entregue a um UE específico. A qualidade de um enlace sem fio pode variar significativamente devido a fatores como distância, velocidade e interferência. Essa variabilidade torna a gestão da rede mais complexa, exigindo a coordenação entre as gNBs para suportar a mobilidade (*handover*) e otimizar o uso do espectro [Peterson, Sunay e Davie 2023]. Neste trabalho, as gNBs utilizadas são as *Small Cells* da Mavenir.

2.1.3 *Radio Access Network*

Uma gNB realiza seis funções principais: primeiro, ela estabelece o canal sem fio para o UE; segundo, ela estabelece a conectividade do plano de controle entre o UE e o *core*, permitindo a autenticação e o rastreamento do dispositivo; terceiro, ela cria túneis para o plano de usuário do *core* para transportar o tráfego de dados e voz; quarto, a estação rádio-base encaminha pacotes entre o *core* e o UE através de túneis baseados em IP. Quinto, ela coordena a transferência de um UE de uma gNB para outra (*handover*) com estações vizinhas; por fim, ela suporta a transmissão multi-ponto e a agregação de enlaces, permitindo que múltiplos caminhos sejam utilizados para se comunicar com um único UE. Em suma, a RAN atua não apenas no estabelecimento de conexões individuais, mas também na gestão global do tráfego, garantindo mobilidade, balanceamento de carga e uso eficiente do espectro de rádio [Peterson, Sunay e Davie 2023].

Divisão da RAN

A arquitetura tradicional da RAN, que concentra todas as funções em uma única estação rádio-base, está sendo substituída por um modelo dividido (*Split RAN*). Esse modelo distribui as funções da RAN entre três componentes principais: CU, DU e RU. A RU é a parte física responsável pela transmissão e recepção de sinais de rádio. A DU, que está localizada perto da RU para garantir baixa latência (menos de 1 ms), contém o agendador em tempo real. A CU gerencia as funções de controle que não precisam de tempo real, podendo estar mais distantes em uma nuvem. Essa divisão separa a rede em diferentes partes, cada uma com seu próprio tipo de conexão, como a *Fronthaul* (RU-DU), a *Midhaul* (DU-CU) e a *Backhaul* (CU-Mobile Core). Essa separação permite maior flexibilidade e o uso de componentes de diferentes fornecedores [Peterson, Sunay e Davie 2023].

RAN Definida por *Software* (SD-RAN)

O conceito de RAN Definida por Software (SD-RAN) aplica os princípios da Rede Definida por Software (SDN) à arquitetura da RAN. O principal objetivo é separar o controle da rede de sua função de encaminhamento. Isso é feito por meio de um componente chamado Controlador Inteligente da RAN (RIC). O RIC age como um controlador SDN, hospedando aplicações de controle (chamadas xApps) que tomam decisões de otimização global para a

rede. O RIC mantém um banco de dados com informações da rede RAN (R-NIB) que inclui dados como CQI médio e o estado dos UEs. As xApps utilizam esses dados para executar funções como gerenciamento de interferência, balanceamento de carga e controle de *handover* de forma centralizada e otimizada. Essa abordagem permite que a RAN seja gerenciada de forma mais eficiente e adaptável, superando as limitações dos sistemas legados [Peterson, Sunay e Davie 2023].

2.1.4 *Mobile Core*

Na arquitetura de rede 5G, o *Mobile Core* é referido como 5G Core (5GC). O 5GC é responsável por fornecer conectividade de dados aos usuários, garantindo que eles sejam autenticados e que recebam a qualidade de serviço prometida. Uma das suas funções mais importantes é a segurança. O 5GC confia que a conexão com a RAN é segura e utiliza um cartão SIM (*Subscriber Identity Module* - Módulo de Identidade de Assinante) com um identificador único (IMSI) e uma chave secreta para autenticar cada UE. O processo de autenticação envolve uma série de etapas para estabelecer um canal seguro e um túnel de dados para o UE. O 5GC também gerencia a mobilidade dos usuários, rastreando a localização dos dispositivos em nível de gNB e reconfigurando os túneis de dados conforme o UE se movimenta. Uma característica distintiva da rede celular é que o 5GC armazena dados em buffer para UEs inativos, evitando a perda de pacotes [Peterson, Sunay e Davie 2023].

Componentes Funcionais do 5GC

O 5GC foi projetado com uma arquitetura de microserviços. O componente principal do plano de usuário (UP) é a Função do Plano de Usuário (UPF), que encaminha o tráfego de pacotes entre a RAN e a Internet, aplicando políticas de QoS e medição de uso. No plano de controle (CP), dois componentes se destacam: a Função de Gestão de Acesso e Mobilidade (AMF), que gerencia a conexão e a mobilidade dos UEs, e a Função de Gestão de Sessão (SMF), que aloca endereços IP e gerencia o estado da sessão de cada UE. Além desses, o 5GC inclui outras funções, como a Função de Servidor de Autenticação (AUSF), a Gestão Unificada de Dados (UDM) e a Função de Controle de Políticas (PCF) [Peterson, Sunay e Davie 2023].

Plano de Controle (CP)

O CP é o conjunto de funções do 5GC responsável pelo gerenciamento da rede, desde o Gerenciamento de Sessões (*Session Management Function* - SMF) até a descoberta de serviços disponíveis (*Network Repository Function* - NRF). Outras funções são: *Authentication Server Function* (AUSF) para autenticar UEs, *Unified Data Repository* (UDR) para gerenciar informações estáticas relacionadas a inscritos.

]

O UP, que corresponde à *User Plane Function* (UPF), é responsável pelo encaminhamento de pacotes, conectando a RAN à Internet. Ele implementa uma coleção de regras de *Match/Action* para classificar pacotes e executar essencialmente quatro ações: encaminhar pacotes, armazenar dados em buffer para UEs inativas, enviar relatórios para o CP a respeito do uso de cada UE e garantir uma largura de banda mínima para assegurar a qualidade de serviço de cada UE [Peterson, Sunay e Davie 2023].

2.1.5 NFV (*Network Functions Virtualization*)

A Virtualização de Funções de Rede (NVF) permite que as funções de rede sejam executadas em máquinas virtuais, facilitando a implantação e o gerenciamento de serviços de maneira mais flexível e econômica [Farooq *et al.* 2017]. Em gerações anteriores de redes móveis, as funções do *core* eram geralmente implantadas com hardware dedicado. Já no 5GC, as funções de rede usualmente são implantadas como VNFs.

2.1.6 SDN (*Software Defined Network*)

Rede Definida por Software (SDN) é uma abordagem para a implementação de redes que busca acelerar a inovação ao dissociar o plano de controle do plano de dados. Essa separação permite que o controle da rede seja centralizado, facilitando a programação e o gerenciamento do comportamento geral da rede de forma lógica. Ao contrário das redes tradicionais, onde cada dispositivo opera de forma autônoma, o SDN permite que os operadores controlem a rede por meio de um sistema centralizado, substituindo o hardware proprietário por *switches* de baixo custo e impulsionando a inovação em todo o ecossistema de rede [Peterson, Cascone e Davie 2021].

2.1.7 IPSec (*Internet Protocol Security*)

A pilha de protocolos IPSec é uma implementação de rede privada virtual (VPN) que visa tunelar e proteger, por meio de criptografia, a conexão entre dois *hosts*. Ela é composta pelos protocolos AH (*Authentication Header*), IKE (*Internet Key Exchange*), ESP (*Encapsulating Security Payload*) e SA (*Security Associations*) [Dhall *et al.* 2012]. Neste trabalho, a solução escolhida para a aplicação do IPSec foi o StrongSwan.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Materiais

Nesta seção, são detalhados os materiais dos quais se dispunha para o projeto, tanto no que diz respeito a topologia quanto aos necessários para os testes.

3.1.1 *Baremetal*

O projeto conta com um *baremetal* chamado *UFCG-IBM-SERVER* para a execução de serviços localmente. As especificações da máquina são listadas a seguir:

- Modelo Dell PowerEdge R450;
- Processador Intel(R) Xeon(R) Silver 4310 CPU @ 2.10 GHz;
- Disco de Armazenamento com capacidade de 2TB;
- Memória Principal com capacidade de 64GB;
- Sistema operacional CentOS 7.

Este servidor inicialmente tinha como função a execução de duas das máquinas virtuais listadas na subseção seguinte, ambas importantes para o funcionamento das gNBs da Mavenir. Porém, com o andamento do projeto e a evolução da topologia, optou-se por uma implantação de um 5GC localmente para a execução de testes.

Máquinas Virtuais

No *UFCG-IBM-SERVER*, há três máquinas virtuais em execução, necessárias para a topologia, sendo elas:

- NOS: O orquestrador da topologia, atuando como controladora das *Small Cells*. É um software proprietário da Mavenir, fabricante das *Small Cells*;

- SCAS: É o servidor que armazena os arquivos de configuração e *logs* das *Small Cells*. É um software proprietário da Mavenir, fabricante das *Small Cells*;
- *Open5GS*: 5GC escolhido para a execução do experimento. Dentro desta VM, cada função do *core* é executada em um contêiner diferente, mas tanto as funções do CP quanto do UP executam nela.

3.1.2 Rádio 5G

O rádio 5G utilizado na topologia é a *Small Cell* E511 da Mavenir, mostrado na Figura 3.1. Ele possui uma EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power* - Potência Isotrópica Radiada Equivalente) entre 30 e 33 dBm, com suporte às bandas n78 (3300 MHz - 3800 MHz), n41 (2496 MHz - 2690 MHz) e n79 (4400 MHz - 5000 MHz), sendo todas as três faixas destinadas ao uso em redes privadas. O dispositivo foi desenvolvido para uso *indoor* em ambientes corporativos, então todos os experimentos executados levarão essa característica em consideração. A banda de frequência selecionada para a execução dos testes é a n78.



Figura 3.1: *Mavenir Small Cell E511*

3.1.3 User Equipment (UE)

A UE utilizada é um *smartphone* Apple iPhone 13, mostrado na Figura 3.2. A escolha dele ocorreu por conta da sua compatibilidade com a banda de frequência utilizada nos testes. Das suas especificações, podemos destacar:

- Processador 2x 3.23 GHz Avalanche + 4x 2.02 GHz Blizzard;
- *Chipset* T8110 Apple A15 Bionic;
- Memória principal 4 GB;
- Bandas de frequência 5G compatíveis: 1, 2, 3, 5, 7, 8, 12, 20, 25, 28, 29, 30, 38, 40, 41, 48, 66, 71, 77, 78, 79 Sub6/mmWave - A2633 [Arena].

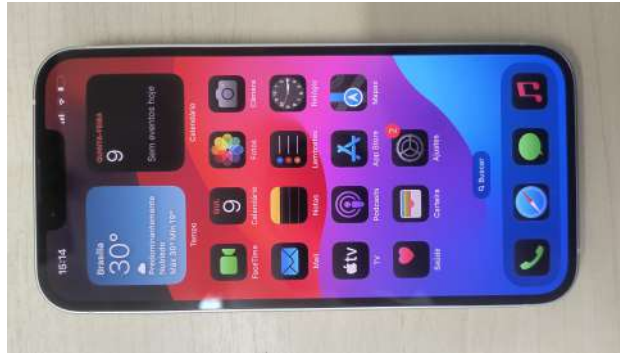


Figura 3.2: *Apple iPhone 13*

3.1.4 Topologia de rede

A Figura 3.3 representa a topologia do projeto com o 5GC *on-premise*, com a topologia interna de cada prédio oculta por motivos de segurança. O tunelamento da conexão com as gNBs ocorre entre o dispositivo de borda de cada laboratório e o *UFCG-IBM-SERVER*. Assim, eles podem se registrar no NOS, irradiando o sinal da rede e conectando as UEs à rede 5G.

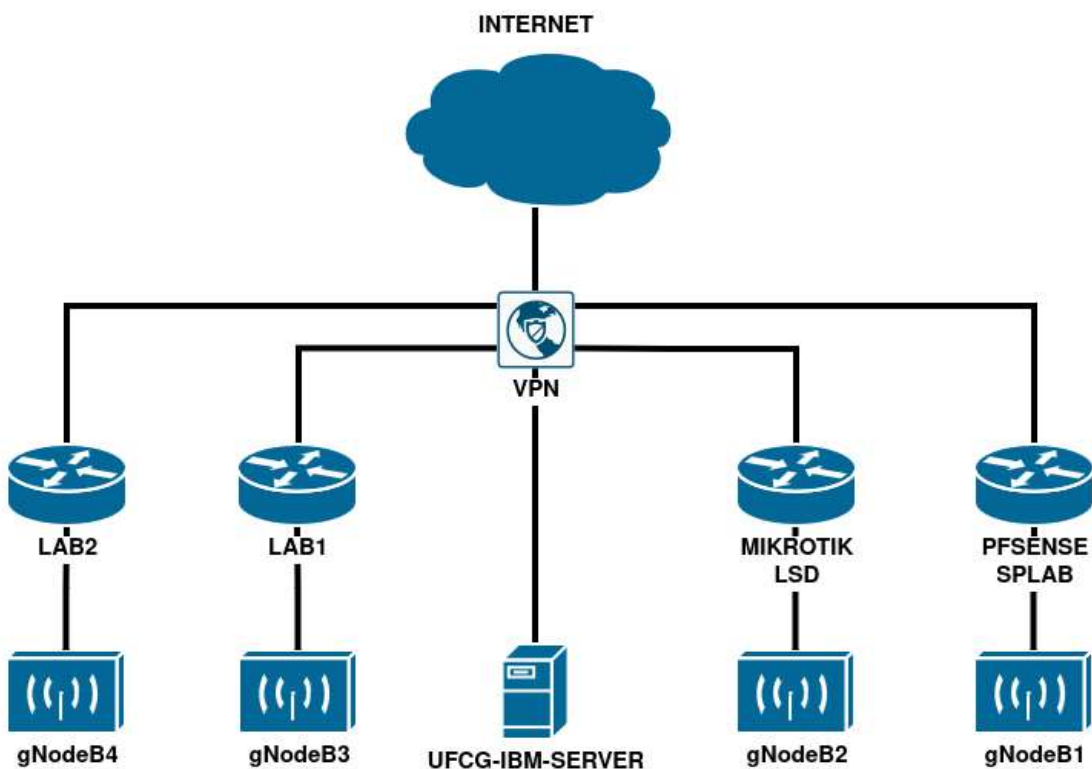


Figura 3.3: *Topologia da Rede com core on-premise*

Fisicamente, os prédios do Laboratório de Sistemas Distribuídos (LSD) e do Laboratório de Práticas de Software (SPLab) encontram-se nas dependências da Universidade Federal de Campina Grande, sendo prédios próximos conectados pela rede do Serviço de Tecnologia da Informação (STI). Apesar disso, o tráfego é tunelado via VPN utilizando IP-

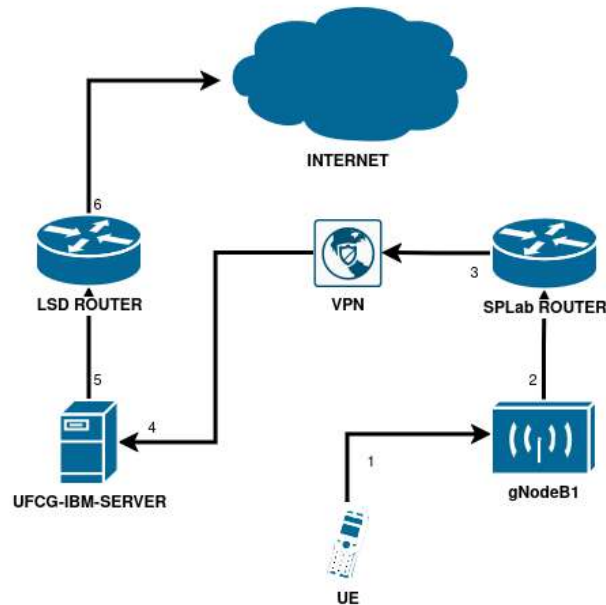


Figura 3.4: Fluxo dos dados da UE para a Internet

Sec para conectar as redes privadas empregadas nas configurações, além de criptografar os dados.

As redes existem localmente no LSD, que é onde está implantado o servidor e onde estão os gateways da topologia. Há uma subrede identificada como a rede das gNBs, em que todas possuem um endereço IP associado a elas. A gNB implementada no SPLab também o possui; no entanto, seu endereço associado é de uma rede privada /30 para criar o enlace ponto-a-ponto com o PFSense, roteador de borda do laboratório.

VPN

Existe um túnel VPN do tipo *site-to-site* configurado entre os laboratórios LSD e SPLab. O propósito deste túnel é proporcionar a conectividade das redes do LSD, onde estão configuradas as outras gNBs, bem como as interfaces de N2 e N3 do 5GC com a rede privada configurada para a gNB localizada no SPLab.

O serviço utilizado para o estabelecimento deste túnel foi o StrongSwan, que o faz usando a pilha de protocolos IPSec e IKEv2, proporcionando uma criptografia eficiente dos dados e realizando a autenticação por PSK (*Pre-Shared Key* - Chave Pré-Compartilhada). De acordo com a Figura 3.4, que simboliza o fluxo de dados da UE conectada a gNB no SPLab, os dados partem da UE para a gNB (1), para em seguida serem encaminhados ao roteador de borda do SPLab (2), que é um dos peers da VPN. Em seguida, os dados são criptografados (3) e transmitidos até o outro peer da VPN (4), onde são descriptografados e encaminhados ao roteador de borda do LSD (5) e, por fim, transmitidos para a internet (6). Se considerarmos o cenário da UE conectada a gNB do LSD, não há os fluxos (2), (3) e (4), apenas da UE diretamente para o UFCG-IBM-SERVER.

3.2 Métodos

Considerando que a topologia 5G está alcançando níveis operacionais, é necessário começar a gerar tráfego real e simulado nesta rede para identificar problemas e necessidades de melhorias. Para isso, foram executados testes para avaliar a latência, o *jitter* e a taxa de transferência para uma variedade de serviços, considerando seus diversos protocolos. Os testes abrangem:

- Serviços de *streaming* de áudio e vídeo;
- Jogos online;
- Navegação na web.

Os experimentos foram divididos em duas rodadas de teste (Teste 1 e Teste 2), utilizando ferramentas e aplicativos diversos, tanto para medição e avaliação quanto para simulação de uso por um usuário comum. O Teste 1 utilizou ferramentas de avaliação de redes, e o Teste 2 foi realizado considerando o uso comum de um *smartphone*, com aplicativos utilizados no dia-a-dia por um usuário regular. Todos os métodos citados a seguir foram executados na UE mencionada na Seção 3.1.3.

3.2.1 Descrição do Teste 1

O objetivo desta rodada de experimentos é a obtenção de métricas mais genéricas a respeito da rede, sem considerar nenhum uso específico. Foram utilizadas ferramentas de avaliação de redes com o único propósito de fornecer métricas gerais. As ferramentas utilizadas são:

- Ping, com 60 iterações de 1 segundo cada;
- MTR, com duração de 60 segundos, avaliando a perda de pacotes;
- iPerf3, utilizando servidores públicos em outros países.

3.2.2 Descrição do Teste 2

Nesta rodada de experimentos, foi considerado o uso de um usuário comum conectado à rede 5G, para fornecer métricas reais de conexão com a Internet para atividades diversas. Durante a execução das atividades, foi feita a captura de pacotes diretamente na UPF para avaliação do tráfego destinado à UE. As atividades selecionadas para a execução do experimento são:

- Navegação na web em navegador;
- Navegação em aplicativos de redes sociais;

- Navegação em lojas de aplicativos;
- YouTube, para teste de *streaming* de vídeo e transmissões ao vivo;
- Jogos online com alto tráfego de dados, como PlayerUnknown's Battlegrounds (PUBG).

Capítulo 4

Desenvolvimento

4.1 Testes 1

Cada uma das rodadas de testes foi conduzida com as gNBs conectadas no LSD e no SPLab . A UE foi configurada para se conectar ao sinal da rede irradiada pela gNB e, após isso, a conexão foi confirmada nos *logs* dos contêineres da UPF, AMF e SMF. Em sequência, iniciou-se a rodada de Testes 1, em que foram executados os testes com cada uma das ferramentas.

Foram realizados testes utilizando ping para alguns endereços específicos que garantem a conectividade:

- Gateway da rede das UEs, para garantir que a UE é capaz de alcançar o gateway da rede;
- 8.8.8.8: DNS público do Google, para garantir que a UE alcance um servidor DNS público;
- 1.1.1.1: DNS público da CloudFlare, para garantir que a UE alcança outro servidor DNS público;
- google.com: FQDN do Google, para garantir que a UE está conseguindo resolver nomes normalmente.

Cada ping para cada *host* teve 60 iterações, com intervalos de 1 segundo. Para cada um dos pings, foram registradas as latências (mínima, máxima, média), como pode ser visto na Figura 4.1.

Em sequência, foram efetuados os testes com as ferramentas *Traceroute*, a fim de verificar a sequência de saltos seguida a partir da UE para garantir que a rota tomada é a definida e, caso possível, identificar perdas de pacotes entre os saltos, como observado na Figura 4.2. Os endereços utilizados para a execução dos testes foram os mesmos definidos para os testes com a ferramenta ping.

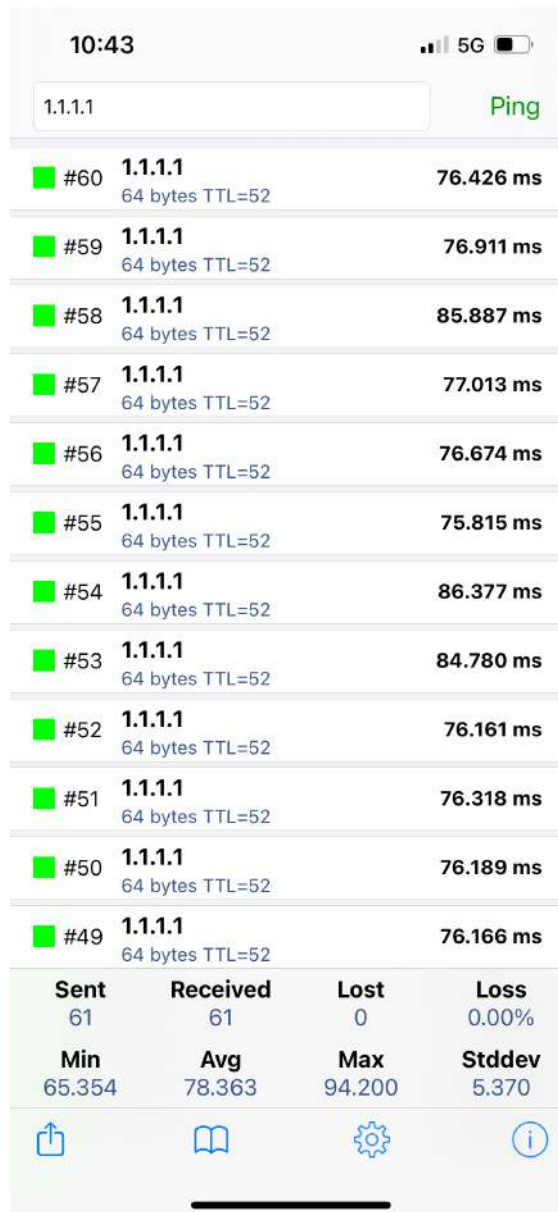


Figura 4.1: Ferramenta de Ping

O último experimento da rodada Testes 1 é o de taxa de transferência. Aqui, o objetivo foi avaliar a taxa de transferência de dados da UE até a UPF. A partir deste ponto, a avaliação diz respeito à qualidade do enlace com a internet, fugindo do foco deste trabalho. Assim, um servidor iPerf é colocado na VM onde está o contêiner da UPF, e os testes de upload e download são executados pela UE, como mostrado na Figura 4.3.

4.2 Teste 2

A segunda rodada de testes foi realizada com a intenção de verificar o uso cotidiano de um usuário, a fim de obter uma compreensão mais profunda da qualidade da rede, além de meramente indicadores. Para isso, foram executados os testes a seguir, em sequência aos testes descritos na Seção 4.1.

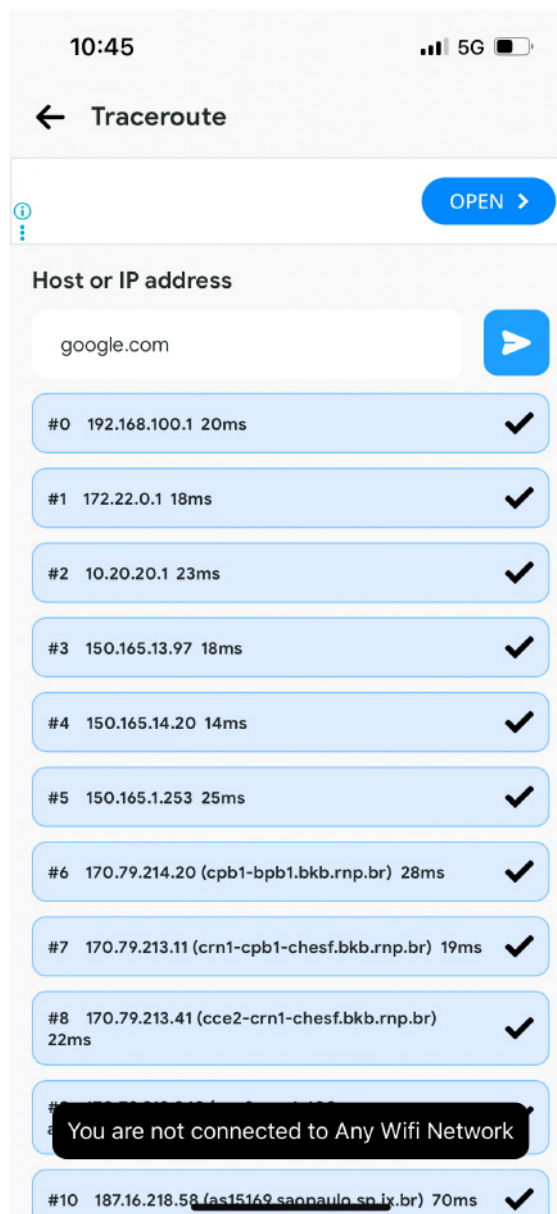


Figura 4.2: *Traceroute para google.com*

Uma vez aberto o Safari, navegador disponível na UE, a ferramenta de busca Google foi acessada, e foram realizadas pesquisas e abertos alguns dos links fornecidos para verificar como estava a resposta de cada um deles às requisições enviadas, conforme exemplificado na Figura 4.4.

Foram instaladas redes sociais, como Instagram e TikTok, na UE e, após isso, navegou-se nos aplicativos com o objetivo de verificar se a navegação, em algum momento, era interrompida ou se o *buffer* de vídeo, em alguns casos, não era suficiente para a velocidade da conexão fornecida e a qualidade dos vídeos.

Em seguida, foi utilizado o YouTube com o objetivo de empregar outra plataforma de vídeos para realizar a avaliação, com uma abrangência maior, uma vez que a plataforma oferece tanto vídeos quanto transmissões ao vivo. Primeiro, foram abertos diversos vídeos na página inicial com a qualidade automática para avaliar qual seria a resposta da experiência

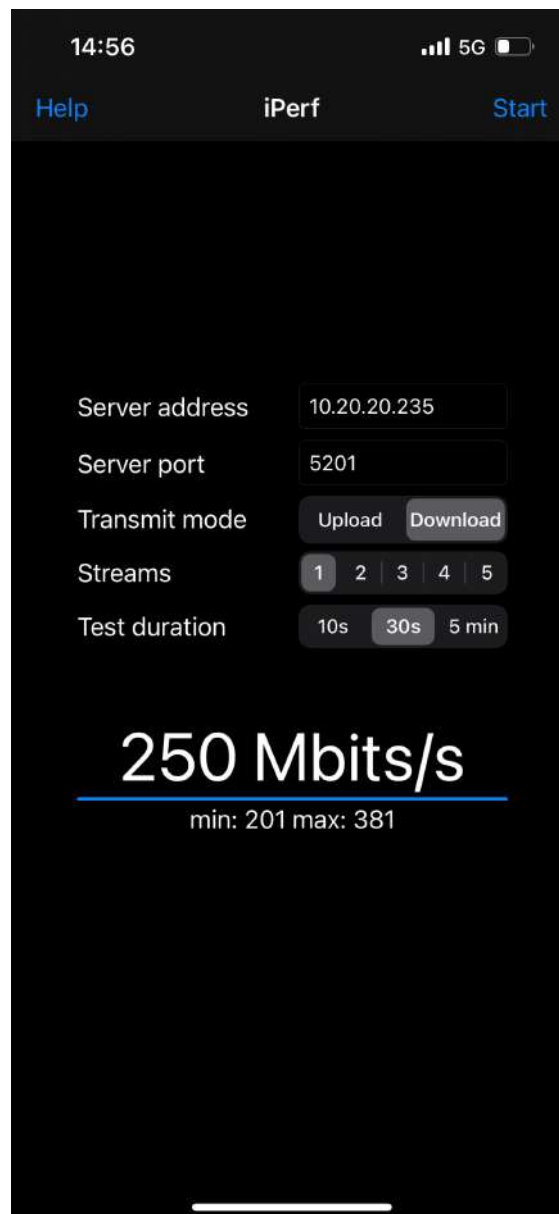


Figura 4.3: *Ferramenta de iPerf*

(se há ou não travamentos) e se há oscilações na qualidade do vídeo, como exemplificado na Figura 4.5. Em sequência, foram abertas transmissões ao vivo para verificar oscilações na qualidade da transmissão e, caso ocorresse, com que frequência isso acontecia.

Por fim, foi avaliada a experiência do usuário ao utilizar um serviço com alto tráfego de dados e uma necessidade de imediatismo maior, uma vez que se enviam comandos e recebem informações a todo momento. Os próprios jogos possuem ferramentas de avaliação de latência em tempo real; portanto, além da experiência, existe uma métrica para quantificar a qualidade da experiência, como mostrado na Figura 4.6.



Figura 4.4: Testes com o navegador

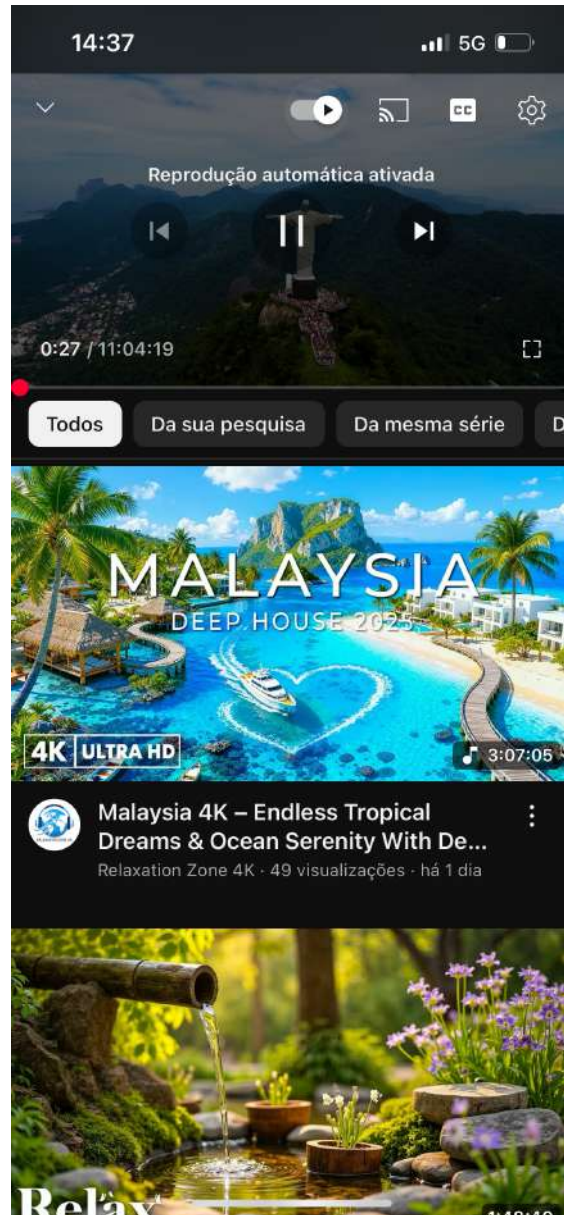


Figura 4.5: Testes com o YouTube



Figura 4.6: Jogo Online

Capítulo 5

Resultados e Conclusão

5.1 Resultados

5.1.1 Testes 1

De acordo com o que pode ser visto na Tabela 5.1, os valores mínimos e máximos de latência obtidos no LSD são menores e maiores do que os valores obtidos no SPLab. No entanto, a média das latências obtidas entre os dois laboratórios mostrou um comportamento diferente, no qual o LSD manteve uma latência média menor do que a latência mostrada no SPLab, sendo aproximadamente 2,1% menor, como pode ser visto na Figura 5.1.

Tabela 5.1: *Comparativo de Valores Mínimo, Máximo e Médio*

Cenário	Mínimo (ms)	Máximo (ms)	Média (ms)	Desvio Padrão Mínimo	Desvio Padrão Máximo	Desvio Padrão Médio
LSD	56,443	289,283	77,4033	3,178	28,139	10,1344
SPLAB	55,32	107,302	79,0296	4,3	7,443	5,8131

Conforme pode ser visto na Tabela 5.2, há uma diferença significativa entre os testes de *upload* e *download*. Por ter a gNB implementada localmente na mesma subrede, já era esperado que os testes realizados no LSD demonstrassem um desempenho de rede melhor, sendo 29,11% melhores no *download* e 44,44% no caso do *upload*.

Tabela 5.2: *Comparativo de Taxas de Transferência 5G*

Cenário	Upload (Mbps)	Mínimo (Mbps)	Máximo (Mbps)	Download (Mbps)	Mínimo (Mbps)	Máximo (Mbps)
LSD	52	0	80	306	306	438
SPLAB	36	4	89	237	237	411

Já na Figura 5.2, temos um exemplo de uma execução do iPerf partindo do LSD, em que observamos que a taxa de transferência média para o servidor iPerf localizado na VM da UPF é de 329 Mbps, com um mínimo de 241 Mbps e um máximo de 438 Mbps.

16:01		5G
google.com		Ping
#60	172.217.30.14 64 bytes TTL=111	58.938 ms
#59	172.217.30.14 64 bytes TTL=111	58.922 ms
#58	172.217.30.14 64 bytes TTL=111	58.986 ms
#57	172.217.30.14 64 bytes TTL=111	70.737 ms
#56	172.217.30.14 64 bytes TTL=111	58.948 ms
#55	172.217.30.14 64 bytes TTL=111	59.467 ms
#54	172.217.30.14 64 bytes TTL=111	59.336 ms
#53	172.217.30.14 64 bytes TTL=111	58.758 ms
#52	172.217.30.14 64 bytes TTL=111	69.882 ms
#51	172.217.30.14 64 bytes TTL=111	58.883 ms
#50	172.217.30.14 64 bytes TTL=111	59.507 ms
#49	172.217.30.14 64 bytes TTL=111	58.789 ms
Sent	Received	Lost
61	60	1
Loss		
1.64%		
Min	Avg	Max
53.561	61.140	73.677
Stddev		
4.854		

Figura 5.1: Resultado Ping para google.com

5.1.2 Testes 2

Utilizando o navegador, ambos os testes mostraram uma navegação estável, com baixo tempo de resposta para a exibição dos sites. Foi utilizado o Google para realizar pesquisas, e o carregamento de imagens e de páginas *web* foi satisfatório. Em redes sociais, não foi identificada nenhuma interrupção, tanto no Instagram quanto no TikTok, mostrando um nível de serviço satisfatório para essas atividades.

Com relação aos vídeos no YouTube, as execuções se mantiveram na qualidade 1920×1080 (Full HD ou 1080p), não tendo sido identificada nenhuma oscilação em nenhum deles. Quando o teste passou para as transmissões ao vivo, no LSD a transmissão ficou estável em 1080p, mas no SPLab houve quedas para 720p e retornos para 1080p, reforçando o cenário visto na Seção 5.1.1, que pode ser observado neste ponto também.

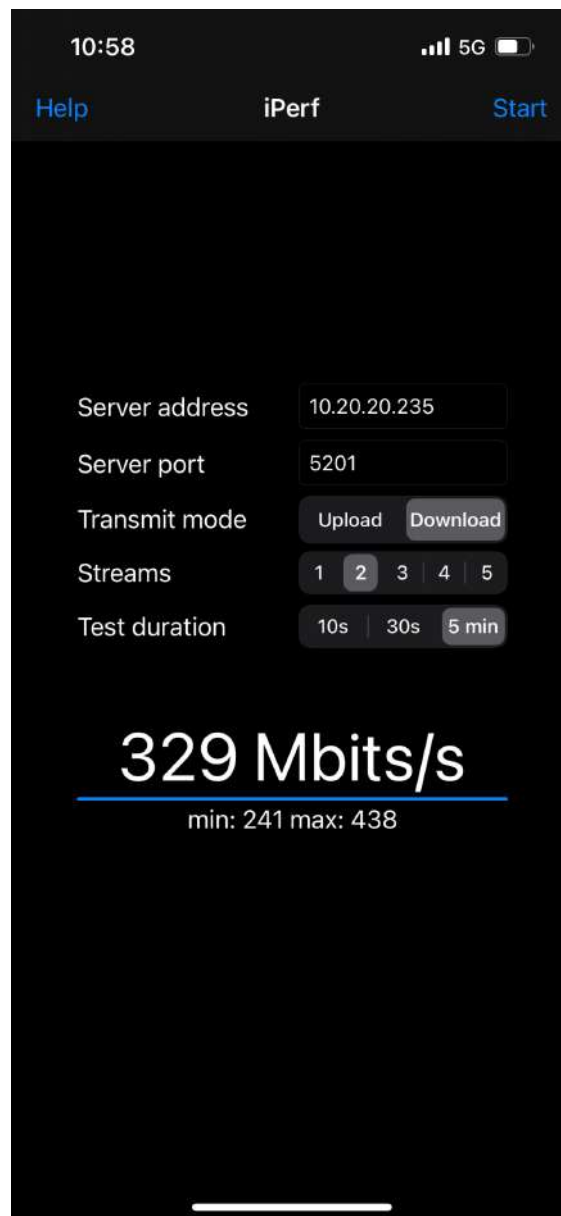


Figura 5.2: *Resultado do iPerf para VM*

Por fim, em jogos online, pode-se observar uma média de 48 ms de tempo de resposta ao acessar o servidor do jogo a partir do LSD. Ao analisar o cenário do SPLab, houve uma leve alta na latência, indo para 52 ms, mas também se manteve estável nessa média, com variações pequenas.

5.2 Conclusão

Os resultados descritos na Seção 5.1.2 corroboram os resultados descritos na Seção 5.1.1, mostrando que as métricas obtidas podem ser percebidas na experiência do usuário comum. No entanto, não se trata de uma diferença considerável, sendo sentida em alguns momentos e em alguns tipos de uso da rede. Portanto, é possível concluir que a diferença é mínima, apesar de todas as camadas de protocolos e limitações físicas que impactam o

desempenho da topologia.

Referências Bibliográficas

[Arena] ARENA, G. *Apple iPhone 13*. <https://www.gsmarena.com/apple_iphone_13-11103.php>. Acessado em 07 de outubro de 2025 às 12:08:37. 9

[Cheng *et al.* 2024] CHENG, H. *et al.* Oranslice: An open source 5g network slicing platform for o-ran. In: *Proceedings of the 30th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2024. (ACM MobiCom '24), p. 2297–2302. ISBN 9798400704895. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/3636534.3701544>>. 4

[Dhall *et al.* 2012] DHALL, H. *et al.* Implementation of ipsec protocol. In: *2012 Second International Conference on Advanced Computing Communication Technologies*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 176–181. 7

[Farooq *et al.* 2017] FAROOQ, M. U. *et al.* Understanding 5g wireless cellular network: challenges, emerging research directions and enabling technologies. *Wireless Personal Communications*, Springer, v. 95, n. 2, p. 261–285, 2017. 7

[Nester] NESTER, R. *5G Technology Market Size, Share, Trends Analysis 2025-2035*. <<https://www.researchnester.com/reports/5g-technology-market/2257>>. Acessado em 21 de setembro de 2025 às 18h50min27s. 1

[Peterson, Cascone e Davie 2021] PETERSON, L.; CASCONI, C.; DAVIE, B. *Software-Defined Networks: A Systems Approach*. [S.l.]: Systems Approach, LLC, 2021. 7

[Peterson, Sunay e Davie 2023] PETERSON, L. L.; SUNAY, O.; DAVIE, B. S. *Private 5G: A Systems Approach*. [S.l.]: Systems Approach, LLC, 2023. 5, 6, 7

[Polese *et al.* 2023] POLESE, M. *et al.* Understanding o-ran: Architecture, interfaces, algorithms, security, and research challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 25, n. 2, p. 1376–1411, 2023. 1

[Sharma, Vittal e Franklin 2023] SHARMA, B.; VITTAL, S.; FRANKLIN, A. A. Flexcore: Leveraging xdp-sctp for scalable and resilient network slice service in future 5g core. In: *Proceedings of the 7th Asia-Pacific Workshop on Networking*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2023. (APNet '23), p. 61–66. ISBN 9798400707827. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/3600061.3600073>>. 4

[Stallings 2021] STALLINGS, W. *5G Wireless: A Comprehensive Introduction*. [S.l.]: Addison-Wesley, 2021. 2

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus Campina Grande - Código INEP: 25137409
	R. Tranquilino Coelho Lemos, 671, Dinamérica, CEP 58432-300, Campina Grande (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0003-37 - Telefone: (83) 2102.6200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Monografia

Assunto:	Monografia
Assinado por:	Ednaldo Junior
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Ednaldo da Silva Junior, DISCENTE (202211210010) DE TECNOLOGIA EM TELEMÁTICA - CAMPINA GRANDE, em 03/02/2026 14:45:43.

Este documento foi armazenado no SUAP em 03/02/2026. 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: 1752836
Código de Autenticação: b87a2f4771

