

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E FACULDADE DE ENGENHARIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA COMPUTACIONAL**

Gustavo Morais Rodrigues Costa

Estudo Experimental de Emulação de Redes 5G com Free5GC e UERANSIM

Juiz de Fora

2026

Gustavo Morais Rodrigues Costa

Estudo Experimental de Emulação de Redes 5G com Free5GC e UERANSIM

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao corpo docente do curso de graduação em Engenharia Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Computacional.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Jerez Chaves

Juiz de Fora

2026

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Costa, Gustavo Morais Rodrigues.

Estudo Experimental de Emulação de Redes 5G com Free5GC e UERANSIM / Gustavo Morais Rodrigues Costa. – 2026.

33 f. : il.

Orientador: Luciano Jerez Chaves

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Exatas e Faculdade de Engenharia. Bacharelado em Engenharia Computacional, 2026.

1. Redes 5G. 2. Emulação de redes. 3. Free5GC. 4. UERANSIM. I. Chaves, Luciano Jerez, orient. II. Título.

Gustavo Morais Rodrigues Costa

Estudo Experimental de Emulação de Redes 5G com Free5GC e UERANSIM

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao corpo docente do curso de graduação em Engenharia Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Computacional.

Aprovada em 22 de janeiro de 2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luciano Jerez Chaves - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Edelberto Franco Silva
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Alex Borges Vieira
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico este trabalho à todos que me acompanharam nessa jornada até aqui e que, de alguma forma, contribuíram para que eu chegasse a essa etapa da graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo suporte incondicional à minha jornada acadêmica. Por terem removido montanhas e tirado todas as pedras do caminho para que eu pudesse ter a dedicação necessária nos estudos. À minha mãe, Elisangela, pelo suporte e inspiração a perseverar mesmo frente ao cansaço. Ao meu pai, Ronaldo, pelo exemplo em sua exímia carreira acadêmica, fonte de inspiração. Ao meu irmão, Vinícius, pela sua dedicação aos estudos e resiliência, mesmo frente à inúmeras dificuldades enfrentadas.

Agradeço a meus amigos, que levei e conheci durante a graduação, sem vocês o caminho com certeza teria sido mais árduo. Obrigado por terem me inspirado, apoiado e, principalmente, entendido as minhas ausências na construção desse trabalho de caminho tão tortuoso.

Agradeço ao meu orientador, Luciano. Sua paciência e didática durante a construção dessa pesquisa foram, sem dúvidas, um dos principais motivos pelos quais posso escrever esse agradecimento hoje. Obrigado por ter me acompanhado durante esses quase 2 anos de TCC e me ensinado tanto. Não é à toa o encanto de todos que têm a chance de ser seu aluno. Verei sempre com orgulho a oportunidade de ter sido seu orientando.

Agradeço à Gabi, minha amada namorada, por todo o suporte durante essa etapa e todas as outras da minha graduação. Sua organização e dedicação aos estudos me inspiram a ser sempre mais. Ter você ao meu lado faz com que eu queira ser cada dia uma pessoa melhor e isso não foi diferente nos meus estudos. Obrigado por todos os conselhos, por ter comemorado as minhas vitórias comigo e, principalmente, partilhado os momentos difíceis. Até mesmo a noite mais chuvosa brilha ensolarada na sua companhia.

RESUMO

As redes móveis de quinta geração (5G) introduzem uma arquitetura mais flexível e orientada a serviços, capaz de atender a diferentes requisitos de desempenho, escalabilidade e conectividade. Contudo, a realização de experimentos em ambientes reais de redes 5G envolve elevados custos e complexidade operacional, o que torna o uso de ferramentas de emulação e simulação uma alternativa relevante para fins acadêmicos e de pesquisa. Este trabalho tem como objetivo avaliar a aplicabilidade de ferramentas de software para a emulação de redes 5G, com foco na análise de suas capacidades e limitações. Para isso, foi conduzida inicialmente uma revisão da fundamentação teórica sobre redes 5G e sobre ferramentas de emulação e simulação disponíveis. Em seguida, foi construído um ambiente experimental utilizando as ferramentas Free5GC, para a emulação do núcleo da rede 5G, e UERANSIM, para a emulação da rede de acesso e dos equipamentos de usuário. A partir desse ambiente, foram realizados experimentos organizados em três categorias: autenticação, conectividade e carga. Os testes de autenticação analisaram a capacidade das ferramentas em registrar diferentes equipamentos de usuário simultaneamente. Os experimentos de conectividade avaliaram o acesso dos usuários à rede externa por meio da infraestrutura emulada. Por fim, os testes de carga investigaram o comportamento da rede sob diferentes volumes de tráfego. Os resultados indicam que as ferramentas são adequadas para experimentos com quantidades reduzidas de equipamentos de usuário, porém apresentam limitações de escalabilidade, especialmente em cenários com muitos usuários simultâneos, afetando tanto o processo de autenticação quanto o suporte a cargas mais intensas de tráfego. Esses achados evidenciam tanto o potencial quanto as restrições do uso de ferramentas de emulação no estudo de redes 5G.

Palavras-chave: redes 5G; emulação de redes; Free5GC; UERANSIM.

ABSTRACT

Fifth-generation (5G) mobile networks introduce a more flexible, service-oriented architecture capable of meeting diverse requirements in terms of performance, scalability, and connectivity. However, conducting experiments in real 5G network environments involves high costs and operational complexity, making the use of emulation and simulation tools a relevant alternative for academic and research purposes. This work aims to evaluate the applicability of software tools for 5G network emulation, with a focus on analyzing their capabilities and limitations. To this end, an initial review of the theoretical foundations of 5G networks and of available emulation and simulation tools was conducted. Subsequently, an experimental environment was built using the Free5GC tool to emulate the 5G core network and the UERANSIM tool to emulate the radio access network and user equipment. Based on this environment, experiments were carried out in three categories: authentication, connectivity, and load. The authentication tests analyzed the ability of the tools to register different user equipments simultaneously. The connectivity experiments evaluated user access to the external network through the emulated infrastructure. Finally, the load tests investigated the behavior of the network under different traffic volumes. The results indicate that the tools are suitable for experiments with a limited number of user equipments but exhibit scalability limitations, particularly in scenarios with a large number of simultaneous users, affecting both the authentication process and the support for higher traffic loads. These findings highlight both the potential and the limitations of using emulation tools in the study of 5G networks.

Keywords: 5G networks; network emulation; Free5GC; UERANSIM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Arquitetura de uma rede 5G.	13
Figura 2	–	Elementos que constituem o ambiente experimental.	19
Figura 3	–	Interfaces virtuais criadas ao longo do tempo para diferentes intervalos entre requisições no experimento com um total de 100 UEs.	22
Figura 4	–	Interfaces virtuais criadas ao longo do tempo para diferentes intervalos entre requisições no experimento com um total de 500 UEs.	23
Figura 5	–	Latência média de <i>pings</i> ao servidor de DNS da Google para testes de conectividade com diferentes quantidades de UEs simultaneamente conectados.	24
Figura 6	–	Vazão média alcançada por cada usuário em cenários com diferentes quantidades de UEs simultaneamente conectados.	26
Figura 7	–	Quantidade média de retransmissões de pacotes por cada usuário em cenários com diferentes quantidades de UEs simultaneamente conectados.	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	<i>Third-Generation Partnership Project</i>
4G	<i>Quarta Geração</i>
5G	<i>Quinta Geração</i>
5GC	<i>5G Core</i>
AMF	<i>Access and Mobility Management Function</i>
DNS	<i>Domain Name Server</i>
gNB	<i>Next-Generation Node B</i>
IMSI	<i>International Mobile Subscriber Identity</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
NG-RAN	<i>Next Generation Radio Access Network</i>
NSA	<i>Non-Standalone</i>
OAI	<i>OpenAirInterface</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RTT	<i>Round-Trip Time</i>
SA	<i>Standalone</i>
SBA	<i>Service-Based Architecture</i>
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
SMF	<i>Session Management Function</i>
SRD	<i>Software-Defined Radio</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UDR	<i>Unified Data Repository</i>
UPF	<i>User Plane Function</i>
VM	<i>Virtual Machine</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	AS REDES 5G	12
2.1.1	Rádio de acesso NG-RAN	12
2.1.2	Núcleo 5GC	14
2.2	SIMULADORES E EMULADORES	15
2.2.1	Simuladores	15
2.2.2	Emuladores	15
3	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	18
3.1	INSTALAÇÃO E CONFIGURAÇÃO	18
3.1.1	Ferramentas utilizadas	18
3.1.2	Ambiente experimental	19
3.1.3	Preparação dos experimentos	20
3.2	EXPERIMENTOS REALIZADOS	20
3.2.1	Autenticação	21
3.2.2	Conectividade	23
3.2.3	Carga	25
4	CONCLUSÃO	28
	REFERÊNCIAS	29
	APÊNDICE A – INSTALAÇÃO DOS EMULADORES	31

1 INTRODUÇÃO

A presença da internet é cada vez mais ubíqua na sociedade atual. Estima-se que mais de dois terços da população mundial têm acesso à internet, sendo que 50% de toda a população possui cobertura 5G para acessá-la (Cisco Systems, Inc., 2020). No Brasil, assim como em diversas outras regiões do mundo, o acesso às redes de telecomunicação foi fundamental para a continuidade de atividades durante a pandemia da COVID-19, como o ensino remoto, o comércio eletrônico e a tele saúde. Nesse contexto, a internet consolidou-se como um elemento central do cotidiano, tanto no lazer quanto em diferentes setores da economia (Panné, 2020).

A quinta geração de redes móveis, conhecida como 5G, representa uma evolução das tecnologias de comunicação sem fio, com o objetivo de atender às crescentes demandas por conectividade, desempenho e suporte a novos serviços. O 5G foi concebido para oferecer maiores taxas de transmissão de dados, menor latência e maior capacidade de conexão simultânea de dispositivos, quando comparado às gerações anteriores. Para viabilizar esses objetivos, a tecnologia adota uma arquitetura mais flexível e descentralizada, com amplo uso de virtualização, permitindo que diferentes serviços coexistam sobre a mesma infraestrutura física de forma escalável. Segundo a *International Telecommunication Union* (ITU), o 5G pode atingir picos de até 1 Gbps por usuário, mesmo em cenários urbanos densos (Jiang e Liu, 2017).

O estudo das redes 5G e de suas aplicações é fundamental, porém a realização de experimentos em ambientes reais apresenta elevado custo e complexidade. A implantação de uma rede móvel envolve antenas, hardware especializado, diferentes equipamentos de usuário e mão de obra qualificada para configuração e operação, o que dificulta a reprodução de cenários realistas em ambientes acadêmicos. Nesse contexto, o uso de software de simulação e emulação surge como uma alternativa à infraestrutura real, permitindo a reprodução controlada de redes 5G por meio de ferramentas que abstraem ou virtualizam parte da infraestrutura real, viabilizando análises com menor custo e maior flexibilidade (Pantovic *et al.*, 2022).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar o uso de ferramentas de software para emulação e simulação de redes 5G, analisando suas capacidades, limitações e os desafios envolvidos em sua implantação e utilização em cenários experimentais.

Como metodologia adotada, realizou-se inicialmente uma revisão da fundamentação teórica das redes 5G, com foco em sua arquitetura e nos principais elementos que a compõem. Em seguida, foi conduzido um levantamento das principais ferramentas de simulação e emulação disponíveis, analisando características gerais de cada uma com relação a sua usabilidade, disponibilidade, dentre outras. A partir desse levantamento, foram selecionadas as ferramentas UERANSIM e Free5GC para a realização de experimentos

práticos, envolvendo sua instalação, configuração e execução de testes. Os resultados obtidos permitiram identificar limitações relacionadas à complexidade de configuração e à escalabilidade das ferramentas, especialmente em cenários com maior número de usuários.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, abordando os principais conceitos relacionados às redes 5G e às ferramentas de simulação e emulação utilizadas em seu estudo. O Capítulo 3 descreve os experimentos realizados com as ferramentas selecionadas, bem como a discussão dos resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 4 reúne as conclusões do trabalho e aponta possibilidades para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os principais conceitos relacionados às redes 5G, descrevendo seus elementos constituintes, funcionalidades e finalidades. Na Seção 2.1, é abordada a fundamentação teórica das redes 5G, enquanto a Seção 2.2 discute ferramentas de emulação e simulação de redes 5G. Com isso, o capítulo estabelece a base teórica necessária para a análise das ferramentas adotadas neste trabalho, permitindo relacionar suas funcionalidades aos elementos correspondentes da arquitetura das redes 5G.

2.1 AS REDES 5G

As redes móveis de quinta geração, conhecidas como 5G, foram projetadas para atender a uma ampla variedade de serviços e aplicações, com requisitos distintos de desempenho, latência e escalabilidade. Para isso, o 5G adota uma arquitetura mais flexível e modular quando comparada às gerações anteriores, rompendo com o modelo fortemente centralizado característico das redes de quarta geração (4G) (Shukla e Sawarkar, 2022).

De forma geral, a arquitetura do 5G é composta por dois domínios: a Rede de Acesso por Rádio de Nova Geração (NG-RAN – *Next Generation Radio Access Network*), responsável pela conexão entre os equipamentos móveis dos usuários e a rede, e o Núcleo 5G (5GC – *5G Core*), que concentra as funções de controle, gerenciamento de mobilidade, autenticação e encaminhamento de dados. Além disso, a arquitetura é organizada em dois planos lógicos: o plano de controle, responsável pela sinalização e pelo gerenciamento das conexões, e o plano de usuário, encarregado do transporte efetivo dos dados.

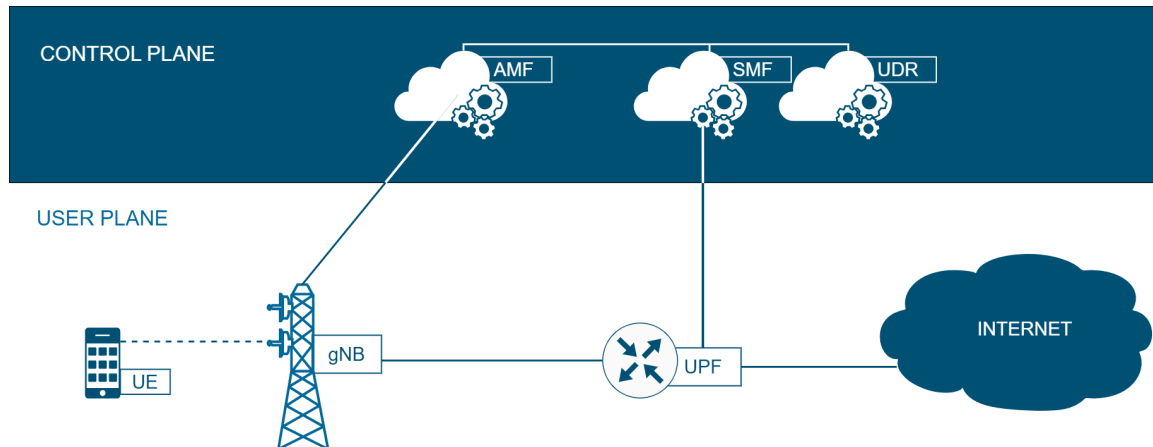
Diferentemente do 4G, cujo núcleo é baseado em um conjunto reduzido de entidades centralizadas, o 5G adota uma Arquitetura Orientada a Serviços (SBA – *Service-Based Architecture*), na qual as funções de rede são desacopladas, virtualizadas e disponibilizadas como serviços independentes (Rommer *et al.*, 2019). Essa abordagem, associada a conceitos como virtualização de funções de rede, permite maior flexibilidade, escalabilidade e facilidade de adaptação a diferentes cenários de uso (Akyildiz *et al.*, 2015).

A Figura 1 ilustra, de forma simplificada, a arquitetura de uma rede 5G, destacando a separação entre os planos de dados e controle, bem como os principais elementos envolvidos na comunicação entre o usuário e a internet. Essa visão geral serve como base para o detalhamento apresentado nas próximas subseções, nas quais são discutidos, separadamente, a rede de acesso sem fio e o núcleo da rede 5G.

2.1.1 Rádio de acesso NG-RAN

A rede de acesso por rádio NG-RAN é o componente da arquitetura 5G responsável por estabelecer a conexão entre os equipamentos dos usuários e o núcleo 5GC. Por meio da NG-RAN, os dispositivos móveis acessam a rede 5G utilizando comunicação via ondas

Figura 1 – Arquitetura de uma rede 5G.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

de rádio, sendo o tráfego posteriormente encaminhado ao núcleo para processamento de controle ou transporte de dados.

A NG-RAN é composta principalmente pelos Equipamentos dos Usuários (UEs – *User Equipments*) e pelas Estações Rádio-Base de Nova Geração (gNBs – *Next-Generation Node B*). O UE representa o ponto de acesso do usuário à rede e é tipicamente constituído por um dispositivo móvel e um Módulo de Identidade do Assinante (SIM – *Subscriber Identity Module*), utilizado nos procedimentos de autenticação. A interface aérea que conecta o UE ao gNB é conhecida como Novo Rádio, sendo responsável pela transmissão e recepção dos sinais de rádio.

Os gNBs atuam como estações base responsáveis pela comunicação rádio com os UEs e pela interconexão com o núcleo 5G. Além de realizarem a transmissão e recepção de dados, os gNBs participam de funções relacionadas ao controle de acesso e à mobilidade dos usuários, interagindo com funções do núcleo. Para aumentar a flexibilidade de implantação e facilitar a escalabilidade da rede, o gNB pode ser estruturado de forma centralizada ou distribuída, sendo dividido em uma unidade central e uma ou mais unidades distribuídas. De forma geral, a unidade central concentra funções de controle e gerenciamento, enquanto as unidades distribuídas lidam com aspectos mais próximos da transmissão rádio.

A NG-RAN permite que a rede 5G opere tanto no modo Autônomo (SA – *Standalone*), no qual apenas elementos da arquitetura 5G são utilizados, quanto no modo Não Autônomo (NSA – *Non-Standalone*), em que componentes da infraestrutura 4G podem ser empregados em conjunto com o 5G. Essa flexibilidade facilita a implantação gradual da tecnologia e influencia o comportamento das redes em ambientes reais e simulados.

No contexto deste trabalho, a NG-RAN é particularmente relevante por representar o ponto de interação entre os usuários simulados e o núcleo da rede em ambientes de

emulação e simulação, sendo um elemento central da ferramenta UERANSIM.

2.1.2 Núcleo 5GC

O núcleo 5GC é responsável por orquestrar as principais funções de controle, gerenciamento de mobilidade, estabelecimento de sessões e encaminhamento de dados. O 5GC adota uma arquitetura orientada a serviços, na qual as funções de rede são desacopladas e implementadas como componentes modulares (Rommer *et al.*, 2019).

Entre as principais funções do núcleo 5G, destaca-se a Função de Gerenciamento de Acesso e Mobilidade (AMF – *Access and Mobility Management Function*), responsável por procedimentos relacionados ao controle de acesso e à mobilidade dos usuários. A AMF gerencia a sinalização de controle associada aos equipamentos de usuário, incluindo autenticação, autorização, manutenção de contexto de conexão e aspectos de segurança. A comunicação da AMF com a rede de acesso ocorre por meio das interfaces N1 e N2.

A Função de Gerenciamento de Sessão (SMF – *Session Management Function*) é responsável pelo gerenciamento das sessões de usuário no 5G, incluindo o estabelecimento, a modificação e o encerramento das sessões. Entre suas atribuições estão a alocação e a manutenção de endereços do Protocolo da Internet (IP – *Internet Protocol*) para os UEs, o suporte a mecanismos de configuração dinâmica, bem como o controle do direcionamento de tráfego no plano de usuário.

A Função do Plano de Usuário (UPF – *User Plane Function*) é responsável pelo tratamento e encaminhamento efetivo dos dados no plano de usuário. Suas funções incluem o roteamento e a inspeção de pacotes, a aplicação de políticas de Qualidade de Serviço (QoS – *Quality of Service*) e o suporte a mecanismos de cobrança e limitação de uso de dados. Além disso, a UPF atua como ponto de ancoragem para o tráfego de dados, auxiliando na gestão de mobilidade e no tratamento de congestionamento por meio da priorização de pacotes. A SMF atua na configuração da UPF, garantindo que o encaminhamento dos dados ocorra de forma adequada, em conformidade com a sessão do usuário.

Complementarmente, o Repositório Unificado de Dados (UDR – *Unified Data Repository*) é o componente responsável pelo armazenamento centralizado de informações relacionadas aos usuários, como dados de inscrição, políticas e perfis de serviço. Essas informações são disponibilizadas às demais funções do núcleo 5G conforme necessário, apoiando os processos de autenticação, autorização e gerenciamento de sessões.

No contexto deste trabalho, a compreensão das funções centrais do 5GC é essencial para a análise das ferramentas de emulação e simulação adotadas, uma vez que soluções como o Free5GC implementam um subconjunto dessas funções para possibilitar a experimentação de cenários de redes 5G.

2.2 SIMULADORES E EMULADORES

Para o estudo de redes móveis 5G, diversas ferramentas de software podem ser empregadas, variando quanto ao nível de abstração e à fidelidade com o comportamento de uma rede real. De modo geral, essas ferramentas podem ser agrupadas em duas categorias principais: simuladores e emuladores. Os simuladores utilizam modelos abstratos para representar o funcionamento da rede e são amplamente empregados na análise de desempenho e escalabilidade. Já os emuladores buscam reproduzir, de forma funcional, os principais componentes e protocolos das redes 5G, permitindo experimentos mais próximos do comportamento real, ainda que sem a necessidade de infraestrutura física completa. Nesta seção, são apresentadas e discutidas ferramentas representativas dessas duas abordagens, com foco em seu uso em atividades acadêmicas e de pesquisa.

2.2.1 Simuladores

Entre as ferramentas de simulação de redes 5G, destaca-se o *ns-3*. Gratuito e de código aberto, o ns-3 é um simulador de eventos discretos amplamente utilizado em pesquisas acadêmicas e industriais para a análise de desempenho, avaliação de protocolos e estudo de novos mecanismos de comunicação. A ferramenta permite a modelagem abstrata de diferentes tecnologias de redes móveis e tem recebido extensões voltadas ao estudo de sistemas 4G e 5G (Lacava *et al.*, 2023).

Outra ferramenta relevante é o OMNeT++, em conjunto com a biblioteca Simu5G. O OMNeT++ também é um simulador de eventos discretos e de código aberto, desenvolvido de forma colaborativa (Nardini *et al.*, 2020). A biblioteca Simu5G estende suas funcionalidades para a simulação de redes 5G, com foco na análise de desempenho ponta a ponta, comunicações veiculares e cenários envolvendo computação de borda. Essas características tornam a ferramenta especialmente adequada para estudos em larga escala e avaliações comparativas de arquiteturas e estratégias de rede.

De forma geral, os simuladores se caracterizam pelo uso de modelos abstratos que permitem avaliar o comportamento da rede sob diferentes configurações e cargas, oferecendo alta flexibilidade e escalabilidade. Contudo, por não executarem pilhas reais de protocolo, essas ferramentas não são voltadas à validação funcional ou à integração direta com implementações reais de redes 5G.

2.2.2 Emuladores

Os emuladores de redes 5G caracterizam-se por executar pilhas reais de protocolos e funções definidas pelo *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*, entidade responsável pela padronização das redes 5G. Esses emuladores permitem a interação funcional entre diferentes elementos da rede por meio de interfaces reais. Essas ferramentas possibilitam

experimentos mais próximos do comportamento de uma rede 5G real quando comparadas aos simuladores, ainda que, em muitos casos, não exijam o uso de infraestrutura física completa, como equipamentos de rádio.

Entre os emuladores com viés mais experimental, destaca-se o UERANSIM. Trata-se de uma ferramenta de código aberto amplamente utilizada para a emulação de gNBs e UEs, permitindo sua integração com núcleos 5G emulados, como o Open5GS e o Free5GC, sem a necessidade de hardware de rádio (Hosseinishamoushaki, 2025). O UERANSIM executa pilhas reais de sinalização e cria interfaces de rede no sistema hospedeiro, o que o torna especialmente adequado para testes funcionais, validação de procedimentos de registro e experimentos controlados em ambientes acadêmicos. A ferramenta encontra-se em desenvolvimento ativo e aberta a contribuições por meio da plataforma GitHub.

No que se refere à emulação do núcleo da rede 5G, o Free5GC é uma das ferramentas mais utilizadas em contextos de pesquisa. De código aberto, o Free5GC implementa as principais funções do núcleo 5G, buscando conformidade com as Releases 15 e posteriores do 3GPP (Hosseinishamoushaki, 2025). A ferramenta é amplamente empregada em estudos experimentais devido à sua facilidade de integração com emuladores de RAN e UE, como o UERANSIM, além de apresentar uma comunidade ativa que contribui continuamente para sua evolução, incluindo melhorias relacionadas à escalabilidade e ao suporte a novas funcionalidades (Anglada *et al.*, 2023).

Outra ferramenta relevante é o Open5GS, também de código aberto e amplamente adotada em pesquisas acadêmicas e ambientes de teste (Hosseinishamoushaki, 2025). O Open5GS implementa funções de núcleo 5G compatíveis com a Release 17 e apresenta, em alguns aspectos, maior maturidade e eficiência de escalonamento quando comparado a outras soluções semelhantes (Mukute *et al.*, 2024). Embora possa ser utilizado em conjunto com hardware real, é frequentemente empregado como núcleo em ambientes emulados para experimentação e validação funcional.

À medida que se avança para ferramentas mais próximas de implantações reais, destacam-se plataformas que permitem a integração direta com equipamentos de rádio. O srsRAN e o OpenAirInterface (OAI) são exemplos de projetos de código aberto baseados em Rádio Definido por Software (SDR – *Software-Defined Radio*), amplamente utilizados em pesquisas acadêmicas e laboratórios de 5G (Alves *et al.*, 2023; Motaung *et al.*, 2025). Essas ferramentas possibilitam tanto a operação em ambientes puramente emulados quanto a integração com hardware SDR, aproximando-se de cenários reais de implantação de redes 5G. O OAI, em particular, encontra-se em desenvolvimento ativo, com planos para suporte a funcionalidades avançadas, como fatiamento de rede RAN, *handovers* e *beamforming*.

Em um contexto ainda mais próximo de implantações reais, o Open5GCore é uma solução desenvolvida pelo instituto Fraunhofer FOKUS, voltada a testes avançados e projetos de nível operacional (Chang *et al.*, 2018). Diferentemente das ferramentas de

código aberto amplamente utilizadas em pesquisa, o Open5GCore é um produto comercial, cujo código-fonte é disponibilizado apenas a licenciados, sendo empregado principalmente por operadoras, empresas e instituições de pesquisa em conjunto com infraestrutura de rádio real (Hosseinishamoushaki, 2025).

Por fim, plataformas integradas como o Aether Project representam uma abordagem mais abrangente para a implantação de redes 5G. Mantido atualmente pela Linux Foundation, o Aether combina diferentes componentes, incluindo núcleo e ferramentas de emulação, com foco em ambientes corporativos e implantações reais. Ferramentas associadas a esse ecossistema, como o gNBSim, são utilizadas para a emulação em larga escala de sinalização de UEs e gNBs, principalmente para validação do plano de controle de núcleos 5G. Essas soluções, embora relevantes, extrapolam o escopo experimental deste trabalho, sendo mencionadas para fins de contextualização.

3 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Este capítulo apresenta os experimentos realizados com o objetivo de avaliar a aplicabilidade das ferramentas Free5GC e UERANSIM para a emulação de redes 5G. Os experimentos foram concebidos para investigar diferentes aspectos do funcionamento da rede emulada, considerando cenários inspirados em situações reais de uso.

Inicialmente, a Seção 3.1 descreve o ambiente experimental adotado, apresentando a infraestrutura de hardware e software, a organização das máquinas virtuais e a configuração das ferramentas utilizadas, fornecendo o contexto necessário para a compreensão dos testes realizados. Em seguida, a Seção 3.2 apresenta os experimentos e os resultados obtidos, organizados em três categorias: autenticação, conectividade e carga, que avaliam, respectivamente, a capacidade de registro de múltiplos usuários, o acesso à internet por meio da rede emulada e o comportamento das ferramentas quando submetidas a diferentes volumes de tráfego.

3.1 INSTALAÇÃO E CONFIGURAÇÃO

Esta seção descreve o ambiente experimental e as configurações adotadas para a realização dos experimentos com as ferramentas Free5GC e UERANSIM. São apresentados os recursos de hardware e software utilizados, a organização do ambiente virtual empregado nos testes e a preparação necessária para a execução dos experimentos, incluindo a configuração das ferramentas e o cadastro dos equipamentos de usuário.

3.1.1 Ferramentas utilizadas

Nesta subseção são apresentadas as ferramentas utilizadas para a emulação da rede 5G no ambiente experimental. O foco está nas ferramentas que compõem diretamente a infraestrutura emulada, responsáveis pelo núcleo da rede e pela rede de acesso, as quais constituem o objeto de estudo deste trabalho.

Para a emulação 5GC, foi utilizada a ferramenta Free5GC, um projeto de código aberto que implementa as principais funções do núcleo 5G. O Free5GC permite a instanciação de funções dos planos de controle e de usuário, viabilizando a autenticação, o gerenciamento de sessões e o encaminhamento de dados em um ambiente virtualizado.

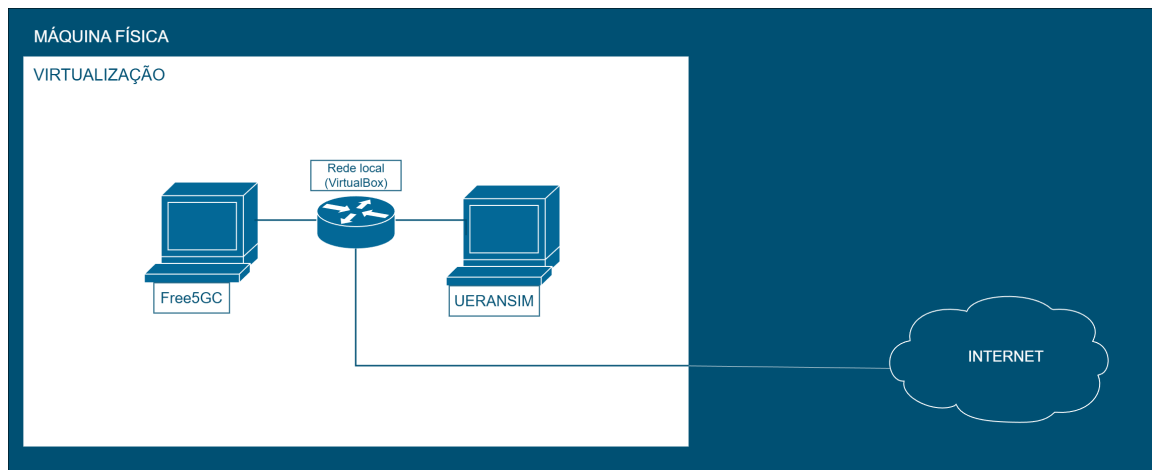
A emulação da rede de acesso e dos equipamentos de usuário foi realizada por meio da ferramenta UERANSIM. Essa ferramenta permite a emulação de estações rádio-base (gNBs) e de equipamentos de usuário (UEs), possibilitando a interação desses elementos com um núcleo 5G emulado, como o fornecido pelo Free5GC.

3.1.2 Ambiente experimental

A instalação e a configuração do ambiente experimental foram facilitadas pelo uso do conjunto de scripts Free5GC Auto Deploy, que automatiza etapas do processo de instanciação do Free5GC e do UERANSIM. Ressalta-se, contudo, que esses scripts foram empregados apenas como suporte operacional, não interferindo na arquitetura nem no funcionamento interno das ferramentas avaliadas. As sequências de comandos utilizadas nessa etapa encontram-se descritas no apêndice deste trabalho.

O ambiente experimental foi estruturado a partir da criação de duas Máquinas Virtuais (VMs – *Virtual Machines*), ambas executando o sistema operacional Ubuntu 22.04 LTS. Uma das máquinas foi destinada à execução do núcleo da rede 5G, por meio da ferramenta Free5GC, enquanto a outra foi utilizada para a emulação da rede de acesso e dos equipamentos de usuário, utilizando o UERANSIM. Essa separação reflete a divisão entre núcleo e rede de acesso presente em arquiteturas reais de redes 5G. A Figura 2 ilustra este ambiente experimental.

Figura 2 – Elementos que constituem o ambiente experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As VMs foram instanciadas em uma máquina física dedicada, equipada com 64GB de memória RAM e um processador Intel Core i3-10100F, utilizando o software de virtualização Oracle VirtualBox. Cada máquina virtual foi configurada com recursos equivalentes, incluindo 4GB de memória RAM e dois núcleos de processamento.

A execução do Free5GC e do UERANSIM em VMs distintas permite isolar as funções do núcleo daquelas associadas à rede de acesso e aos equipamentos de usuário. Nesse contexto, a comunicação entre as máquinas virtuais ocorre por meio de interfaces de rede virtuais criadas no sistema hospedeiro, possibilitando a troca de mensagens de controle e o encaminhamento de dados entre a NG-RAN e o 5GC. Para cada UE emulado, é criada uma interface de rede virtual no hospedeiro, que funciona como um túnel de

comunicação, permitindo que o tráfego de dados gerado pelos UEs seja encaminhado entre as máquinas virtuais e, quando configurado, para a internet externa. Dessa forma, cada UE passa a possuir uma interface lógica própria no ambiente de testes, viabilizando a execução de experimentos de conectividade e de carga com múltiplos usuários simultâneos.

Essa configuração resultou em um ambiente controlado e reproduzível para a execução dos experimentos, permitindo avaliar o comportamento das ferramentas em diferentes cenários de uso, conforme descrito nas seções seguintes.

3.1.3 Preparação dos experimentos

A preparação dos experimentos envolveu a configuração prévia dos elementos necessários para permitir a conexão e a autenticação de múltiplos equipamentos de usuário na rede 5G emulada. Essa etapa foi essencial para viabilizar a execução dos testes descritos nas seções seguintes, especialmente aqueles que avaliam o comportamento das ferramentas em cenários com diferentes quantidades de usuários simultâneos.

Inicialmente, foram realizadas as inscrições dos UEs no banco de dados MongoDB utilizado no núcleo 5G emulado pelo Free5GC. Para isso, foram definidos identificadores e parâmetros de autenticação distintos para cada UE, permitindo a criação de um conjunto de usuários capaz de suportar os experimentos planejados. Ao todo, foram cadastrados até 1000 equipamentos de usuário na base de dados do núcleo 5G.

Em seguida, foram preparados os arquivos de configuração necessários para a autenticação dos UEs no ambiente emulado. Esses arquivos contêm as informações utilizadas durante o registro e foram gerados de forma automatizada, de modo a garantir consistência entre os dados registrados no núcleo e aqueles utilizados pelo UERANSIM.

Com essas configurações concluídas, o ambiente experimental tornou-se apto para a execução dos experimentos de autenticação, conectividade e carga apresentados a seguir.

3.2 EXPERIMENTOS REALIZADOS

Esta seção apresenta os experimentos realizados com o objetivo de avaliar o comportamento e as limitações das ferramentas Free5GC e UERANSIM na emulação de redes 5G. Os experimentos foram concebidos a partir de cenários inspirados em situações que buscam analisar a capacidade da infraestrutura emulada de lidar com múltiplos usuários, prover conectividade e suportar diferentes níveis de carga.

Para organizar a análise, os experimentos foram agrupados em três categorias: autenticação, conectividade e carga. Os experimentos de autenticação avaliam a capacidade da rede emulada de registrar e manter simultaneamente diferentes quantidades de UEs. Os experimentos de conectividade investigam a possibilidade de acesso dos usuários à rede externa por meio da infraestrutura 5G emulada. Por fim, os experimentos de carga

analisam o comportamento da rede sob diferentes volumes de tráfego, permitindo identificar limitações relacionadas à vazão e à escalabilidade das ferramentas utilizadas.

Em todos os experimentos, buscou-se observar não apenas se os cenários propostos podiam ser reproduzidos com sucesso, mas também quais restrições técnicas emergem à medida que o número de usuários ou o volume de dados aumenta, fornecendo subsídios para a avaliação crítica das ferramentas estudadas.

3.2.1 Autenticação

A autenticação dos equipamentos de usuário constitui uma etapa fundamental no funcionamento de redes 5G, pois envolve o registro dos UEs no núcleo da rede e a criação das estruturas necessárias para a comunicação entre o usuário e a infraestrutura. No contexto da emulação, esse processo é particularmente relevante, uma vez que a capacidade de registrar múltiplos UEs simultaneamente influencia diretamente a viabilidade de experimentos mais complexos, como testes de conectividade e de carga.

Durante testes preliminares, foi possível observar que, à medida que a quantidade de UEs aumenta, as interfaces virtuais associadas aos usuários não são criadas de forma instantânea. Em cenários com um número elevado de UEs, verificou-se que o processo de criação dessas interfaces pode tornar-se instável, chegando a interromper a instanciação antes que todos os usuários sejam autenticados, o que resulta na falha de parte dos UEs em se registrar na rede emulada.

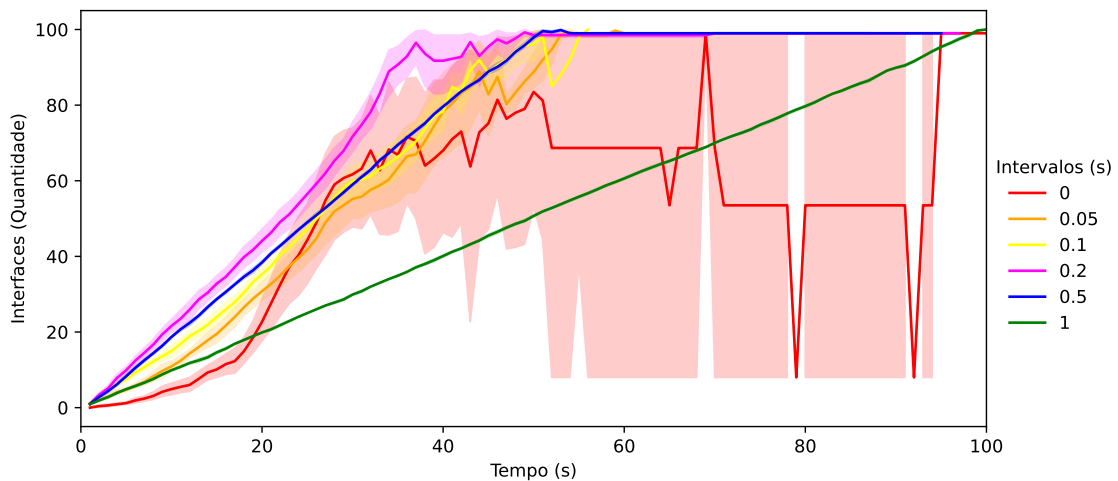
Diante desse comportamento, foi realizado um experimento específico com o objetivo de investigar se tais falhas estão relacionadas à criação simultânea de um grande número de interfaces virtuais — o que poderia indicar limitações externas às ferramentas, como restrições do sistema hospedeiro — ou se decorrem de limitações internas à implementação das ferramentas de emulação. Para isso, foi introduzido um intervalo de tempo entre as requisições de registro de cada UE, de forma a controlar a taxa de criação das interfaces.

Foram realizados testes considerando diferentes intervalos de espera entre as requisições de autenticação dos UEs. Ao longo da execução dos experimentos, foi monitorada, a cada segundo, a quantidade de interfaces virtuais criadas no sistema hospedeiro. Os testes foram conduzidos em cenários com 100 e 500 UEs, e os resultados são apresentados nas Figuras 3 e 4, que mostram a evolução do número de interfaces criadas ao longo do tempo para cada intervalo considerado.

Cada experimento foi repetido 10 vezes para garantir maior consistência estatística. Nos gráficos apresentados, os diferentes intervalos de espera são representados por cores distintas. Para cada intervalo, a linha central indica a média da quantidade de interfaces criadas ao longo do tempo, enquanto a região sombreada ao redor da linha representa o intervalo de confiança de 95%. Assim, quanto menor a área sombreada, menor a variabilidade observada entre as execuções e maior a confiabilidade dos resultados obtidos.

No cenário com 100 UEs, apresentado na Figura 3, foi possível realizar os testes com todos os intervalos definidos: 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5 e 1 segundo entre as requisições. Observa-se que o intervalo de 0.2s apresenta um bom equilíbrio entre velocidade e estabilidade na criação das interfaces, alcançando tempos próximos aos obtidos com intervalos como 0.1s e 0.5s, porém com menor variabilidade entre as execuções. Dessa forma, esse intervalo mostrou-se adequado para evitar instabilidades no processo de autenticação sem impor um atraso excessivo à conexão dos usuários.

Figura 3 – Interfaces virtuais criadas ao longo do tempo para diferentes intervalos entre requisições no experimento com um total de 100 UEs.



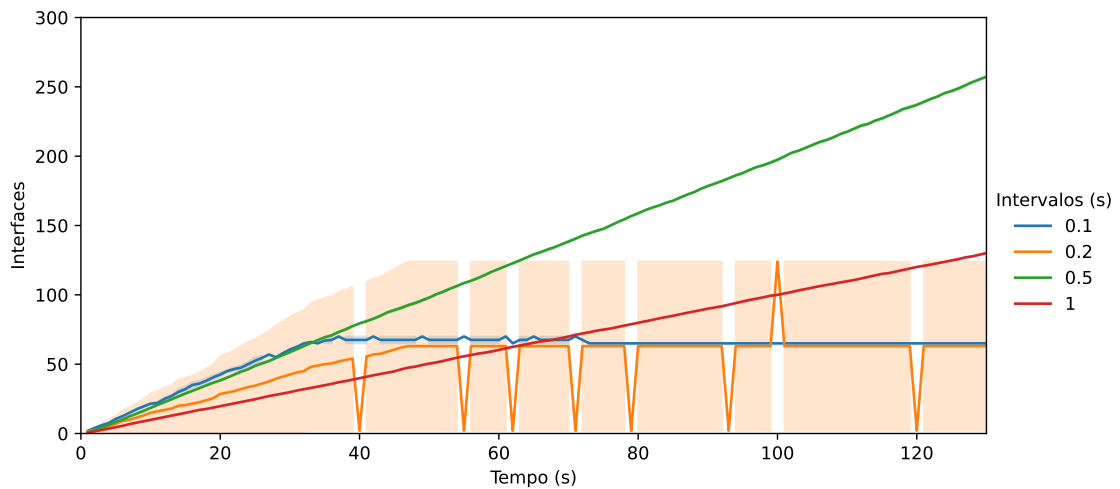
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Por outro lado, o maior intervalo testado (1s) apresentou o comportamento mais estável, com variação mínima entre os resultados observados. Essa estabilidade, contudo, ocorre ao custo de um maior tempo total para a criação das interfaces, o que pode comprometer a usabilidade da rede em cenários que demandam conexões mais rápidas de múltiplos usuários. Em contraste, a ausência de intervalo (0s) entre as requisições resultou em comportamento instável, com grande variação no número de interfaces criadas ao longo do tempo e diferenças significativas entre as execuções.

No cenário com 500 UEs, ilustrado na Figura 4, observa-se que os menores intervalos evidenciam dificuldades significativas das ferramentas em estabelecer a conexão de todos os usuários. Para os intervalos de 0.1s e 0.2s, a instabilidade do processo torna-se mais evidente ao não instanciar mais do que algumas dezenas de interfaces, sendo frequente a interrupção do registro antes que todos os UEs sejam autenticados, incluindo situações em que o processo foi encerrado devido a erros do tipo *segmentation fault*.

Esses resultados indicam que a autenticação de um grande número de UEs em ambientes emulados é sensível à taxa de criação de interfaces virtuais, sendo fortemente influenciada tanto pelo número de usuários quanto pelo intervalo entre as requisições de

Figura 4 – Interfaces virtuais criadas ao longo do tempo para diferentes intervalos entre requisições no experimento com um total de 500 UEs.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

registro. Assim, embora teoricamente seja possível autenticar centenas de UEs utilizando as ferramentas Free5GC e UERANSIM, a estabilidade do processo depende de uma configuração cuidadosa dos experimentos, evidenciando limitações práticas dessas ferramentas em cenários de alta simultaneidade.

3.2.2 Conectividade

Após verificar que a infraestrutura emulada é capaz de autenticar múltiplos UEs (mesmo que necessitando de intervalos entre as requisições), os experimentos avançaram para a avaliação da conectividade da rede 5G emulada. O objetivo dessa etapa foi investigar se os UEs conectados por meio do UERANSIM conseguem acessar a rede externa utilizando o núcleo emulado pelo Free5GC, conforme esperado no funcionamento de uma rede 5G real, e se esse acesso é mantido à medida que o número de usuários aumenta.

Para isso, foi elaborado um experimento baseado no envio de mensagens de *ping*, permitindo verificar a conectividade dos UEs com a rede mundial de computadores. O teste foi conduzido aumentando-se gradativamente a quantidade de UEs conectados à rede emulada, de modo a identificar possíveis limitações no acesso simultâneo aos recursos disponibilizados pela infraestrutura. Foram realizados oito testes, considerando quantidades de UEs variando de 1 a 128, em que cada teste utilizou o dobro de UEs do teste anterior.

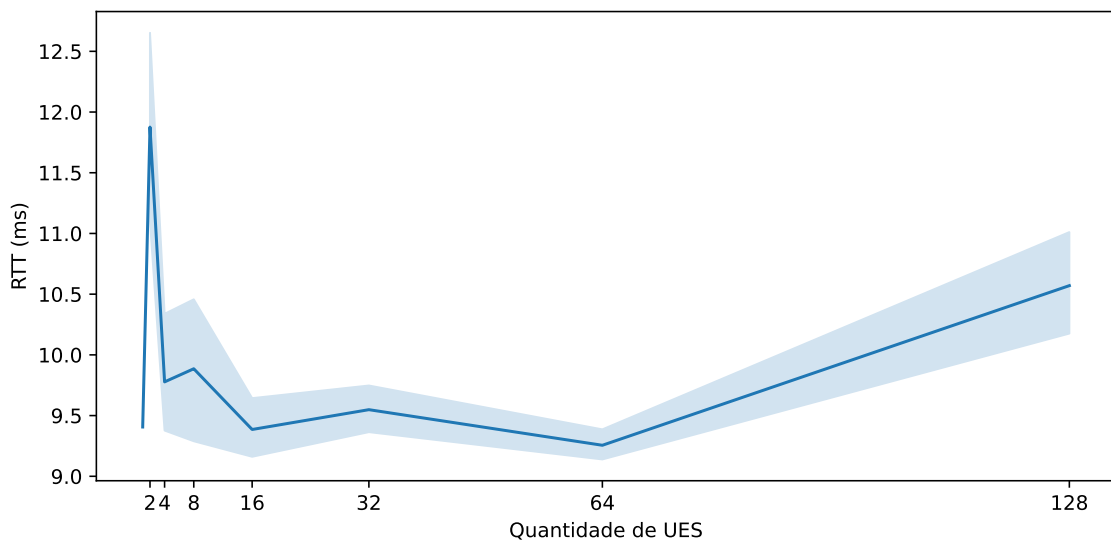
Para realizar esses testes, foi necessária a instalação de regras específicas no `iptables` da máquina hospedeira, permitindo que cada uma das interfaces virtuais criadas durante o processo de autenticação tivesse acesso à rede externa. Uma vez realizada essa configuração, em cada experimento foi executado um comando de *ping* a partir dos UEs emulados dentro da VM do UERANSIM para o Servidor de Nomes de Domínio (DNS –

Domain Name Server) do Google que atende no endereço IP 8.8.8.8. Em cada execução, três pacotes de dados foram enviados simultaneamente por cada UE, possibilitando avaliar a capacidade da infraestrutura emulada em suportar múltiplos usuários acessando a rede externa de forma concorrente.

Os resultados de cada comando de *ping* foram armazenados em arquivos de texto individuais, um para cada UE, e organizados em diretórios correspondentes a cada execução do experimento. Posteriormente, os arquivos foram analisados para extrair métricas desses arquivos, como a média do Tempo de Ida e Volta (RTT – *Round-Trip Time*), bem como os valores mínimo, máximo e o desvio padrão da latência.

A Figura 5 apresenta o RTT médio (em milissegundos) observado para cada quantidade de UEs conectados simultaneamente. Observa-se uma variação no RTT à medida que o número de usuários aumenta, com destaque para um pico de latência no cenário com quatro UEs. No entanto, essa variação é relativamente pequena e não apresenta um padrão consistente de crescimento, o que indica que o aumento da quantidade de UEs não impacta diretamente a conectividade dos usuários no cenário avaliado.

Figura 5 – Latência média de *pings* ao servidor de DNS da Google para testes de conectividade com diferentes quantidades de UEs simultaneamente conectados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em todos os experimentos realizados, foi possível estabelecer comunicação com o endereço IP externo sem perdas de pacotes para todos os UEs considerados. Adicionalmente, foi conduzido um teste exploratório com 500 UEs simultâneos, no qual também foi possível realizar com sucesso o envio de pacotes ICMP para a rede externa. Esse resultado sugere que a infraestrutura emulada apresenta boa escalabilidade em termos de conectividade, sendo limitada, no contexto deste estudo, principalmente pela disponibilidade de recursos computacionais para o estabelecimento das conexões entre os UEs.

3.2.3 Carga

O último conjunto de experimentos teve como objetivo avaliar o comportamento da infraestrutura 5G emulada sob condições de carga, sendo o cenário mais exigente imposto às ferramentas Free5GC e UERANSIM. Esses testes buscaram identificar limitações relacionadas à vazão e à capacidade de transmissão de dados da rede emulada, explorando o impacto do aumento do número de usuários simultâneos sobre o desempenho observado.

Para a realização dos testes de carga, foi utilizada a ferramenta *iPerf*, amplamente empregada para medições ativas de vazão em redes IP. Os experimentos foram conduzidos a partir da máquina que executa o UERANSIM. O teste consistiu no envio de uma carga simultânea de 5 MB de dados por cada UE conectado, utilizando as interfaces virtuais associadas a cada usuário.

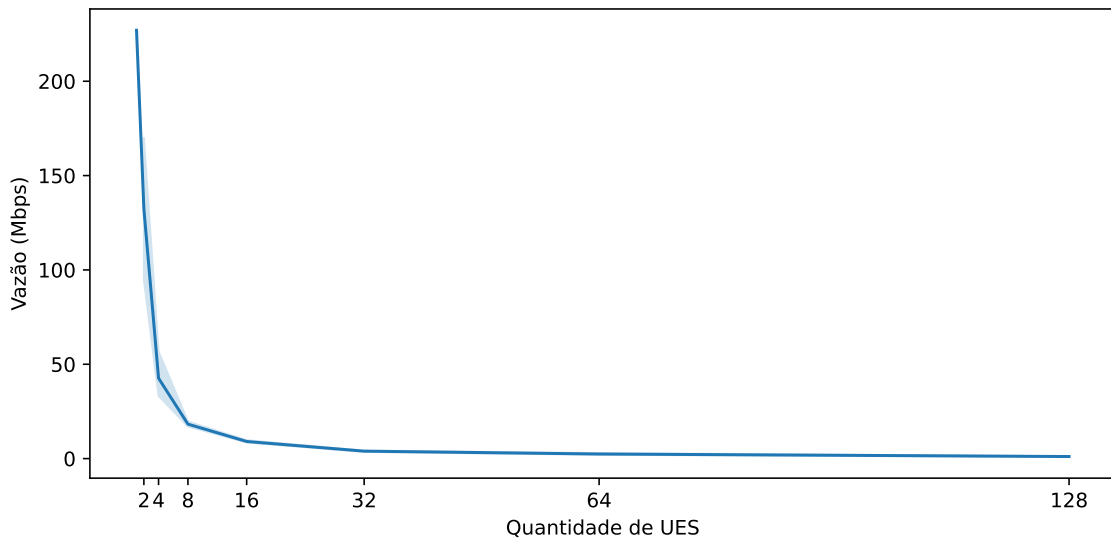
De forma análoga aos experimentos de conectividade, a quantidade de UEs foi aumentada progressivamente, partindo-se de um único usuário até atingir 128 UEs, dobrando-se o número de usuários a cada iteração. Para cada execução, os resultados retornados pelo *iPerf* foram armazenados em arquivos de texto individuais, permitindo a posterior extração de métricas relevantes, tais como a quantidade efetiva de dados transmitidos, o tempo necessário para a transmissão, a vazão média observada e o número de retransmissões realizadas durante o processo.

A Figura 6 apresenta a vazão média obtida por UE em cada cenário testado. No gráfico, a linha principal representa a média das vazões observadas, enquanto a região sombreada indica o intervalo de confiança de 95% dos valores medidos. Observa-se uma redução acentuada da vazão à medida que o número de UEs aumenta, possivelmente atribuída ao fato de todos os UEs compartilharem apenas um UPF e um único gNB. O cenário com apenas 1 UE apresenta a maior vazão média, enquanto já no caso com 2 usuários é possível notar uma queda significativa. No experimento com 4 UEs, a vazão média é reduzida para menos de um quarto do valor observado no cenário com um único usuário. Esse comportamento evidencia uma limitação das ferramentas em sustentar transmissões eficientes de dados quando múltiplos usuários estão ativos simultaneamente, mesmo considerando que a carga de 5 MB por UE é relativamente pequena quando comparada às capacidades esperadas de redes 5G em ambientes reais.

Além da queda expressiva da vazão, observou-se que, a partir do cenário com 128 UEs, parte dos usuários não conseguiu concluir a transmissão dos dados. Essa falha ocorreu tanto pela redução da vazão a valores próximos de zero quanto pela perda de conexão entre o UE e o núcleo da rede emulada. No experimento com 128 UEs, aproximadamente 35,94% dos usuários não conseguiram completar o envio da carga estabelecida.

A Figura 7 ilustra o número de pacotes retransmitidos em cada cenário avaliado. Assim como no gráfico anterior, a linha principal indica a média dos valores obtidos, enquanto a região sombreada representa o intervalo de confiança de 95%. Embora o

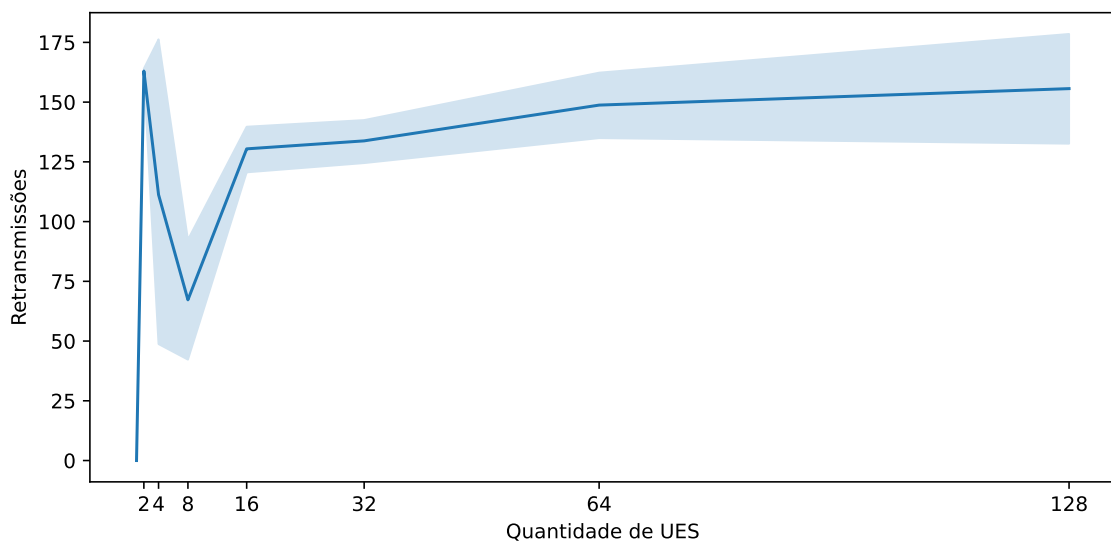
Figura 6 – Vazão média alcançada por cada usuário em cenários com diferentes quantidades de UEs simultaneamente conectados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

comportamento apresentado não seja tão uniforme quanto o observado na vazão, nota-se que, principalmente a partir de 16 UEs, a quantidade de retransmissões tende a aumentar de forma progressiva com o acréscimo do número de usuários. Esse aumento indica uma degradação na qualidade da transmissão de dados, exigindo múltiplas tentativas para que a informação seja entregue com sucesso.

Figura 7 – Quantidade média de retransmissões de pacotes por cada usuário em cenários com diferentes quantidades de UEs simultaneamente conectados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

De forma geral, os resultados dos testes de carga evidenciam que a infraestrutura emulada apresenta limitações significativas quando submetida a múltiplos fluxos simultâneos de dados. Embora seja adequada para experimentos de conectividade e autenticação, a combinação das ferramentas Free5GC e UERANSIM mostrou-se incapaz de sustentar transmissões de dados mais intensas em cenários com maior número de usuários, reforçando que os resultados obtidos refletem limitações das ferramentas de emulação e do ambiente experimental, e não o desempenho esperado de redes 5G em ambientes reais.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a aplicabilidade de ferramentas de software para a emulação de redes 5G, considerando o alto custo e a complexidade associados à implementação de ambientes reais dessa tecnologia. Para isso, foi construído um ambiente experimental utilizando o Free5GC para a emulação do núcleo da rede 5G e o UERANSIM para a emulação da rede de acesso e dos equipamentos de usuário, permitindo a realização de experimentos sem o uso de infraestrutura física especializada.

Durante a execução dos experimentos, foram enfrentados desafios relacionados ao consumo de recursos computacionais, como memória RAM e espaço de armazenamento, especialmente em função da geração de arquivos de log pelo Free5GC e da criação de múltiplas interfaces virtuais pelo UERANSIM. Essas limitações impactaram diretamente a escalabilidade do ambiente experimental e restringiram a quantidade máxima de equipamentos de usuário que puderam ser avaliados.

Os resultados dos experimentos de autenticação e conectividade indicaram que a infraestrutura emulada é capaz de registrar e manter conectados múltiplos equipamentos de usuário, desde que sejam adotadas medidas como o espaçamento entre as requisições de registro. Nesses cenários, os usuários conseguiram acessar a rede externa de forma estável. Em contrapartida, os testes de carga evidenciaram limitações significativas das ferramentas quando submetidas a múltiplos fluxos simultâneos de dados, resultando em queda acentuada da vazão e falhas na transmissão.

De forma geral, as ferramentas avaliadas mostraram-se adequadas para estudos em pequena escala, especialmente para a análise de processos de autenticação e conectividade básica. No entanto, apresentam restrições importantes de escalabilidade, o que limita sua aplicação em cenários mais próximos da operação real de redes 5G.

Como trabalhos futuros, sugere-se a investigação de ajustes e otimizações nas ferramentas utilizadas, bem como a avaliação de outras soluções de emulação e simulação de redes 5G, de modo a comparar diferentes abordagens quanto à escalabilidade, desempenho e fidelidade ao funcionamento de redes reais.

REFERÊNCIAS

- Akyildiz, I. F., Lin, S.-C., Wang, P., Dec 2015. Wireless software-defined networks (W-SDNs) and network function virtualization (NFV) for 5G cellular systems: An overview and qualitative evaluation. *Computer Networks* 93 (1), 66–79.
- Alves, R. P., Alves, João Guilherme A. da S. and Camelo, M. R., Feitosa, W. O. d., Monteiro, V. F., Cavalcanti, F. R. P., Experimental comparison of 5G SDR platforms: srsRAN x OpenAirInterface. In: Proc. of the XLI Brazilian Symposium on Telecommunications and Singal Processing (SBrt), 2023. pp. 1–5.
- Anglada, H., Nahum, C., Gonçalves, G., Correa, I., Lins, S., Klautau, A., Automated Generation of RAN Scenarios for Experimentation. In: Anais da XIII Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação (ENCOM), 2023. pp. 1–2.
- Chang, H.-C., Qiu, B.-J., Chen, J.-C., Tan, T.-J., Ho, P.-F., Chiu, C.-H., Lin, B.-S. P., 2018. Empirical experience and experimental evaluation of Open5GCore over hypervisor and container. *Wireless Communications and Mobile Computing* 2018 (1), 6263153.
- Cisco Systems, Inc., 2020. Cisco Annual Internet Report (2018—2023). White Paper.
- Hosseinishamoushaki, S., 2025. Comparative Performance Analysis of free5GC and Open5GS Core Networks Using UERANSIM Integration. Tese de doutorado, Università di Padova.
- Jiang, D., Liu, G., 2017. An Overview of 5G Requirements. In: Xiang, W., Zheng, K., Shen, X. S. (Eds.), *5G Mobile Communications*. Springer International Publishing, pp. 3–26.
- Lacava, A., Bordin, M., Polese, M., Sivaraj, R., Zugno, T., Cuomo, F., Melodia, T., ns-o-ran: Simulating o-ran 5g systems in ns-3. In: Proc. of the Workshop on ns-3 (wns3), 2023. pp. 35–44.
- Motaung, M., Mthethwa, N., Nokane, B., Masonta, M., Comparative Analysis of 5G SDR-Based Open-Source Software Platforms: OpenAirInterface and srsRAN. In: Proc. of the IEEE 3rd Wireless Africa Conference (WAC), 2025. IEEE, pp. 1–7.
- Mukute, T., Mamushiane, L., Lysko, A. A., Modroiu, E.-R., Magedanz, T., Mwangama, J., 2024. Control plane performance benchmarking and feature analysis of popular open-source 5G core networks: OpenAirInterface, Open5GS, and Free5GC. *IEEE Access* 12, 113336–113360.
- Nardini, G., Sabella, D., Stea, G., Thakkar, P., Viridis, A., 2020. Simu5G—An OMNeT++ Library for End-to-End Performance Evaluation of 5G Networks. *IEEE Access* 8, 181176–181191.
- Panné, A., 2020. Ubiquitous Computing: From 5G to the Edge and Beyond. In: Glauner, P., Plugmann, P. (Eds.), *Innovative Technologies for Market Leadership: Investing in the Future*. Springer International Publishing, Cham, pp. 133–151.
- Pantovic, V., Milovanovic, D., Starcevic, D., Bojkovic, Z., 5G mobile networks and Digital Twins concept: Research challenges in network DT emulation. In: Proc. of the 4th

International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronic and Communications Engineering (ELECOM), 2022. pp. 1–4.

Rommer, S., Hedman, P., Olsson, M., Frid, L., Sultana, S., Mulligan, C., 2019. 5G core networks: powering digitalization. Academic Press.

Shukla, D., Sawarkar, S. D., A study of wireless network evolution from 4G to 5G: standalone vs non-standalone. In: Proc. of the International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON), 2022. pp. 1–6.

APÊNDICE A – INSTALAÇÃO DOS EMULADORES

Este apêndice descreve os procedimentos adotados para a instalação e a configuração dos emuladores utilizados nos experimentos deste trabalho. Para esse fim, foi empregada a ferramenta *Free5GC Auto Deploy*, desenvolvida por Leonardo Azalim de Oliveira, então discente do programa de pós-graduação da UFJF. Essa ferramenta consiste em um conjunto de *scripts* em Bash que automatizam e simplificam o processo de instalação tanto do núcleo de rede 5G emulado (Free5GC) quanto do emulador da rede de acesso e dos equipamentos de usuário (UERANSIM), além de dependências adicionais necessárias ao funcionamento do ambiente experimental.

A instalação do Free5GC foi realizada em uma VM dedicada, destinada à execução do núcleo da rede 5G emulada. Como base para esse processo, foi utilizado o repositório *free5gc-auto-deploy*, disponibilizado na plataforma GitHub. Inicialmente, foram obtidos os *scripts* responsáveis pela instalação da linguagem Go, utilizada no desenvolvimento do Free5GC, bem como pela instalação e configuração do próprio núcleo 5G emulado.

```
curl -L0 https://github.com/oliveiraleo/free5gc-auto-deploy/raw/v1
.3.0/install-go.sh
curl -L0 https://github.com/oliveiraleo/free5gc-auto-deploy/raw/v1
.3.0/deploy-free5gc.sh
chmod +x deploy-free5gc.sh install-go.sh
```

O comando a seguir executa o *script* responsável pela instalação do ambiente Go e atualiza as variáveis de ambiente do sistema para que a linguagem possa ser utilizada.

```
./install-go.sh && source ~/.bashrc
```

Em seguida, procedeu-se à instalação do Free5GC propriamente dito. O *script* a seguir automatiza o processo de obtenção do código-fonte, instalação das dependências e preparação do ambiente necessário para a execução do núcleo 5G emulado.

```
./deploy-free5gc.sh
```

Após a conclusão da instalação, foi realizado um teste preliminar com o objetivo de verificar se o Free5GC foi corretamente configurado. Esse teste executa um procedimento básico de registro, permitindo validar o funcionamento inicial do núcleo 5G emulado.

```
$ cd free5gc/
$ cd tests/
$ ./TestRegistration.sh
```

Com a instalação validada, o núcleo 5G emulado pôde ser inicializado. Ao executar o comando a seguir no diretório raiz do projeto, todas as funções de rede do Free5GC são iniciadas, juntamente com a conexão ao banco de dados MongoDB, utilizado para armazenar informações relacionadas aos equipamentos de usuário e às sessões de rede.

```
cd free5gc/
./run.sh
```

Para possibilitar o gerenciamento visual do núcleo da rede e o cadastro de equipamentos de usuário, foi realizada a instalação do *Webconsole* do Free5GC. Essa ferramenta, desenvolvida com o *framework* React, permite a administração do núcleo 5G por meio de uma interface gráfica, facilitando a criação, consulta e monitoramento dos UEs registrados.

```
curl -fsSL https://deb.nodesource.com/setup_20.x | sudo -E bash -
sudo apt update
sudo apt install -y nodejs
corepack enable # setup yarn automatically
```

Após a instalação das dependências do Webconsole, foi realizada sua compilação a partir do diretório do Free5GC, conforme apresentado a seguir.

```
cd ~/free5gc
make webconsole
```

Ao final dessas etapas, o ambiente do Free5GC encontrava-se devidamente configurado, permitindo a execução do núcleo da rede 5G emulada e o registro de múltiplos equipamentos de usuário em sua base de dados.

Após a configuração do núcleo da rede 5G, procedeu-se à instalação do UERANSIM, ferramenta responsável pela emulação da rede de acesso (gNB) e dos equipamentos de usuário. Essa etapa foi realizada em uma VM distinta, possibilitando a comunicação entre a NG-RAN emulada e o núcleo 5G executado pelo Free5GC.

Assim como no caso do Free5GC, a instalação do UERANSIM teve como base o repositório *free5gc-auto-deploy*. Inicialmente, foram obtidos os *scripts* responsáveis pelo *download* e preparação do ambiente necessário para a instalação da ferramenta.

```
curl -LO https://github.com/oliveiraleo/free5gc-auto-deploy/raw/main/
  deploy-UERANSIM.sh
chmod +x deploy-UERANSIM.sh
```

O comando a seguir executa o *script* responsável por obter o código-fonte do UERANSIM, compilar a ferramenta e preparar os binários necessários para sua execução, utilizando a versão estável disponível no repositório.

```
./deploy-UERANSIM.sh -stable
```

Com o UERANSIM devidamente instalado, foi possível iniciar a emulação do gNB. O comando a seguir utiliza um arquivo de configuração previamente ajustado para permitir a comunicação entre o gNB emulado e o núcleo 5G executado na máquina do Free5GC.

```
sudo build/gnb-ue -c config/free5gc-gnb.yaml
```

De forma análoga, a instanciação de um equipamento de usuário é realizada por meio de um comando semelhante, utilizando um arquivo de configuração específico para cada UE cadastrado. No exemplo inicial, foi utilizado a Identidade Internacional de Assinante Móvel (IMSI – *International Mobile Subscriber Identity*) IMSI-208930000000001, sendo o valor subsequente um identificador único associado ao usuário na rede 5G emulada.

As etapas e comandos apresentados neste apêndice permitem a reprodução do ambiente experimental utilizado neste trabalho, servindo como referência para a instalação e a configuração do Free5GC e do UERANSIM em cenários semelhantes de estudo e experimentação de redes 5G.