

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE BLUMENAU  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO E  
COMPUTAÇÃO

Christian Mailer

**Plataforma de CORE 5G em nuvem para disponibilização de funções de rede como  
serviço**

Blumenau

2020

Christian Mailer

**Plataforma de CORE 5G em nuvem para disponibilização de funções de rede como  
serviço**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos  
requisitos necessários para a obtenção do Título de  
Engenheiro de Controle e Automação.  
Orientador: Prof. Dr. Adão Boava.

Blumenau

2020

Christian Mailer

**Plataforma de CORE 5G em nuvem para disponibilização de funções de rede como  
serviço**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de  
Engenheiro de Controle e Automação.

Blumenau, 16 de julho de 2020.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Adão Boava  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Ciro André Pitz  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Mauri Ferrandin  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

A todos que por esse trabalho se interessarem.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, Professor Dr. Adão Boava, pelo suporte na elaboração desse trabalho, contribuindo com ideias, sugestões e motivações antes mesmo do início do semestre letivo. Estendo os agradecimentos também aos Professores do curso de Engenharia de Controle e Automação que, apesar de não contarem com estrutura e recursos adequados nos primeiros semestres do Campus, esforçaram-se e cumpriram com todos os requisitos para prover umas das melhores formações do Brasil aos seus graduandos.

Por fim, agradeço à minha família e aos meus pais pelo incentivo ao longo desses anos de graduação e pela ajuda na escolha da minha carreira quando ainda não tinha certeza do caminho que iria seguir.

Os esquemas de evolução não se fariam mais somente segundo modelos de descendência arborescente, indo do menos diferenciado ao mais diferenciado, mas segundo um rizoma que opera imediatamente no heterogêneo e salta de uma linha já diferenciada a uma outra (DELEUZE e GUATTARI, 1995).

## RESUMO

O 5G é a nova geração de rede móvel que, dentre outros fatores, visa melhorar a latência, a velocidade e a capacidade das comunicações sem fio, atendendo aplicações de Internet das Coisas, Indústria 4.0 e cidades inteligentes. O componente principal de uma rede 5G é o CORE, responsável por gerenciar a conexão dos dispositivos de usuário e o tráfego de informações. Neste trabalho, propôs-se uma plataforma de CORE implementada em *containers* e disponível em um ambiente em nuvem com o intuito de popularizar a utilização das funções de rede por pequenas e médias instituições, fomentando o modelo de negócios de rede como serviço. Escolheu-se o pacote free5GC para desempenhar as tarefas das funções de rede 5G e criou-se uma imagem base da implementação através do aplicativo Docker. Para gerenciamento dos *containers*, empregou-se o aplicativo Docker Compose. Configurou-se as informações do dispositivo de usuário no CORE por meio de uma interface Web disponível no pacote free5GC e adaptou-se alguns algoritmos de simulação de acesso que também estavam presentes em tal pacote. Instalou-se o conjunto de *containers* em uma máquina virtual local e em uma máquina na nuvem da empresa Amazon. Realizou-se, então, testes de gerenciamento dos *containers*, de registro de dispositivo de usuário na rede 5G, de requisição de sessão, de *ping* e de exclusão de registro da rede 5G, capturando-se o tráfego com o *software* Wireshark. Ao final, comprovou-se que a arquitetura em *containers* foi de fácil manuseamento e que a plataforma de CORE foi eficaz em ambiente local e também em nuvem, podendo ser acessada por meio da Internet.

**Palavras-chave:** 5G. CORE. Nuvem. Internet. Container. IoT.

## ABSTRACT

5G is the new mobile network generation that, among other factors, aims to improve latency, speed and capacity of wireless communications, serving applications of Internet of Things, Industry 4.0 and smart cities. The main component of a 5G network is the CORE, that is responsible for managing the user equipment connections and the data traffic. In order to promote the Network as Service business model and to spread the use of the network functions by small and medium companies, this work proposes a CORE platform deployed in containers and available in the cloud. The free5GC package was chosen for performing the 5G network functions tasks and a base image of the deploy was created using Docker. For container management, the Docker Compose application was used. The user equipment information was configured in the CORE through a Web interface included in the free5GC package and access simulation algorithms, also present in the package, were adjusted for the tests. The containers were installed on a local virtual machine and on an Amazon cloud instance. Container management tests, registration of user equipment in the 5G network, session establishment, ping and deregistration from 5G network were performed while capturing the traffic with the Wireshark software. In the end, it was proved that the container architecture was easy to manage and that the CORE platform was effective in local and cloud environment, being accessible through the Internet.

**Keywords:** 5G. CORE. Cloud. Internet. Container. IoT.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Direcionamento do tráfego para diferentes redes. ....	18
Figura 2 – Evolução das taxas de transmissão. ....	20
Figura 3 – Classes de uso do 5G.....	21
Figura 4 – <i>Single beam</i> e <i>multibeam</i> , respectivamente. ....	24
Figura 5 – <i>Single User MIMO</i> e <i>Multi User MIMO</i> , respectivamente. ....	24
Figura 6 – Arquitetura da rede de rádio 5G.....	25
Figura 7 – Pilha de protocolos utilizada para transferência de dados de usuário. ....	26
Figura 8 – Pilhas de protocolos para a transferência de dados de sinal. ....	26
Figura 9 – Elementos essenciais de uma rede 5G.....	28
Figura 10 – Funções de rede de um Core 5G. ....	28
Figura 11 – Interfaces de rede utilizadas pelo AMF.....	29
Figura 12 – Interfaces de rede utilizadas pelo SMF. ....	30
Figura 13 – Interfaces de rede utilizadas pelo UPF. ....	31
Figura 14 – Direcionamento de tráfego através de UL CL. ....	31
Figura 15 – Interfaces de rede utilizadas pelo AUSF. ....	32
Figura 16 – Interfaces de rede utilizadas pelo PCF. ....	33
Figura 17 – N3IWF conectando uma rede não 3GPP ao Core 5G. ....	34
Figura 18 – Diferentes tipos de dispositivos utilizando o fatiamento de rede.....	35
Figura 19 – Formato do S-NSSAI. ....	35
Figura 20 – VMs e <i>Containers</i> no mesmo hospedeiro.....	36
Figura 21 – Modelo de Core implementado para o experimento. ....	39
Figura 22– Arquitetura dos testes de comunicação em nuvem. ....	41
Figura 23 - Página Web de configurações do Core 5G.....	42
Figura 24 – Lista de UEs registrados na rede exibida pela interface Web. ....	49
Figura 25 – Detalhes do UE retornados pelo AMF e exibidos pela interface Web.....	49
Figura 26 – Detalhes do UE retornados pelo SMF e exibidos pela interface Web. ....	50

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo da evolução das redes de comunicação móveis.....	19
Quadro 2 – Pacotes capturados durante procedimento de início da plataforma.....	43
Quadro 3 – Procedimento de registro. ....	44
Quadro 4 – Procedimento de obtenção da sessão PDU e teste de <i>ping</i> . ....	47
Quadro 5 – Procedimento de exclusão de registro. ....	48
Quadro 6 – Tráfego de registro, estabelecimento de PDU, <i>ping</i> e de exclusão de registro.....	50

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Principais diferenças entre o rádio 4G e 5G.....	22
Tabela 2 – Comparação das definições do quadro estrutural do 4G e do 5G. ....	23

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5GMM	5GS Mobility Management
5GSM	5GS Session Management
AF	Application Function
AMF	Access and Mobility Management Function
API	Application Programming Interface
AUSF	Authentication Server Function
CA	Carrier Aggregation
DN	Data Network
EC2	Elastic Compute Cloud
eMBB	enhanced mobile broadband
GTP-U	GPRS tunneling protocol for the User Plane
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IKE	Internet Key Exchange
IMEI	International Mobile Equipment Identity
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
Ipssec	IP Security Protocol
ITU-R	International Telecommunications Union Radiocommunication Sector
LI	Lawful Interception
LMF	Location Management Function
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMIMO	massive Multiple Input Multiple Output
mMTC	massive machine-type communication
MU-MIMO	Multi User Multiple Input Multiple Output
N3IWF	Non-3GPP Inter Working Function
NaaS	Network as a Service
NAS	Non-Access Stratum

NEF	Network Exposure Function
NF	Network Function
NFV	Network Function Virtualization
NG-RAN	NG-Radio Access Network
NGAP	NG Application Protocol
NR	New Radio
NRF	Network Repository Function
NSSF	Network Slice Selection Function
PCF	Policy Control Function
PDU	Protocol Data Unit
PFCP	Packet Forwarding Control Protocol
PLMN	Public Land Mobile Network
PWS	Public Warning System
QoS	Quality of Service
RAM	Random Access Memory
RAN	Radio Access Network
REST	Representational State Transfer
RRM	Radio Resource Management
S-NSSAI	Single Network Slice Selection Assistance Information
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SD	Slice Differentiator
SDN	Software Defined Networking
SINR	signal-to-interference-plus-noise ratio
SM	Session Management
SMF	Session Management Function
SMS	Short Message Service
SMSF	Short Message Service Function
SST	Slice/Service Type
SU-MIMO	Single User Multiple Input Multiple Output
SUPI	Subscription Permanent Identifier
TCP	Transmission Control Protocol
TLS	Transport Layer Security

UDM	Unified Data Management
UDP	User Datagram Protocol
UDR	Unified Data Repository
UE	User Equipment
UL CL	Up Link Classifier
UPF	User Plane Function
URLLC	ultra-reliable and low-latency communication
XnAP	Xn Application Protocol

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	PROBLEMA .....	16
1.2	OBJETIVO.....	17
1.3	ESTRUTURA DO DOCUMENTO .....	18
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>19</b>
2.1	GERAÇÕES DE REDE MÓVEL .....	19
2.2	SISTEMA MÓVEL DE QUINTA GERAÇÃO (5G) .....	20
<b>2.2.1</b>	<b>Rádio .....</b>	<b>22</b>
2.2.1.1	<i>Beamforming</i> .....	23
2.2.1.2	<i>Massive MIMO</i> .....	24
2.2.1.3	<i>Arquitetura da rede de rádio</i> .....	25
<b>2.2.2</b>	<b>Core .....</b>	<b>27</b>
2.2.2.1	<i>AMF</i> .....	28
2.2.2.2	<i>SMF</i> .....	29
2.2.2.3	<i>UPF</i> .....	30
2.2.2.4	<i>NRF</i> .....	31
2.2.2.5	<i>UDM</i> .....	32
2.2.2.6	<i>UDR</i> .....	32
2.2.2.7	<i>AUSF</i> .....	32
2.2.2.8	<i>PCF</i> .....	33
2.2.2.9	<i>NSSF</i> .....	33
2.2.2.10	<i>N3IWF</i> .....	34
<b>2.2.3</b>	<b>Fatiamento de rede .....</b>	<b>34</b>
2.3	CONTAINERS.....	36
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>38</b>

<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>52</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>53</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Com o surgimento de conceitos e tecnologias como IoT (*Internet of Things*), Indústria 4.0, *Blockchain*, *Big Data* e outras que são voltadas ao acúmulo de informações e comunicação, deparou-se com um empecilho: a falta de recursos das tecnologias sem fio existentes para lidar com grandes volumes de dados e prover o gerenciamento adequado desses dados na rede.

A solução que visa resolver esse problema é a nova geração de comunicação sem fio chamada de 5G, que aumenta consideravelmente a velocidade de troca de informações, apresenta baixa latência e maior eficiência espectral comparada às gerações anteriores. Além disso, essa nova geração conta com recursos que possibilitam gerenciar o tráfego de informações baseado na exigência de cada dispositivo, como fatiamento de rede (*network slicing*), permitindo que operadoras disponibilizem redes como serviço para seus clientes.

Ressalta-se a importância de tecnologias como *Software Defined Networking* (SDN) e *Network Function Virtualization* (NFV) para o 5G, termos que, respectivamente, nomeiam redes que são estabelecidas em ambiente virtual e funções de rede que, também, são criadas e executadas virtualmente.

O componente por trás da infraestrutura que fará o gerenciamento dos dispositivos de usuário e das virtualizações de rede é o *Core Network*, porém, até o 4G, essa tecnologia ficou restrita às operadoras de telecomunicações. O Core do 5G, chamado de 5G Core, foi concebido de forma a suprir as deficiências do Core do 4G (*Evolved Packet Core*) e baseia-se em conceitos como micro serviços, nuvem, *container*, virtualização e automação.

### 1.1 PROBLEMA

A tecnologia 5G não melhora somente a velocidade de transmissão, mas também torna a comunicação mais estável, eficiente e disponibiliza novos serviços de Core. Altas frequências (aproximadamente 27 GHz) e MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) são algumas das técnicas que possibilitam esses avanços, no entanto, as antenas de alta frequência possuem curto alcance (300 m). Logo, para cobrir todos os centros urbanos com tal frequência, seria necessária a instalação de milhares de antenas, fato que atrasaria a adoção das tecnologias mais avançadas da quinta geração.

Oferecer novos recursos, que atendam demandas específicas, seria uma alternativa para a popularização do 5G, cativando o interesse de empresas e órgãos governamentais.

Em vista disso, defende-se a disponibilização de acesso e flexibilidade dos serviços de Core aos clientes corporativos, permitindo a criação de redes sem fio privadas ou com outras customizações que desejarem. Além do mais, um serviço de Core privado e flexível contribuirá para tornar o gerenciamento e acúmulo de dados, das instituições, mais inteligentes e com suporte a QoS (*Quality of Service*) e *network slicing*.

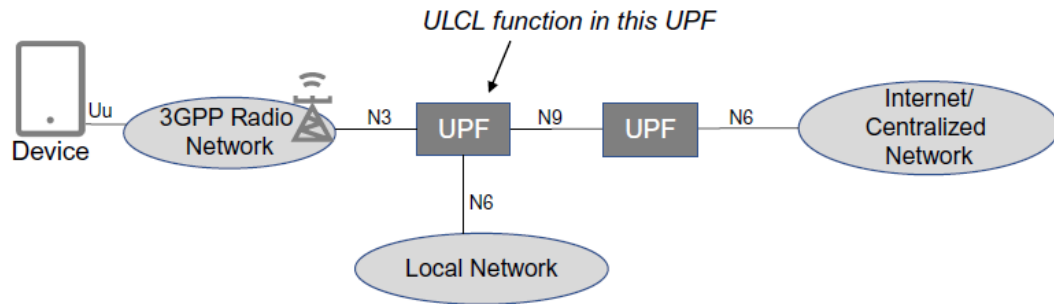
## 1.2 OBJETIVO

O estudo objetiva o desenvolvimento de uma plataforma de núcleo 5G (5G Core) como serviço, disponibilizando um ambiente acessível para configuração das funções de rede que, intuitivamente, possibilitará ao usuário a utilização de um Core 5G.

A solução é direcionada às empresas, independente do porte, que desejam customizar as funções de rede antes de direcionar o tráfego à operadora, ou seja, as instituições podem gozar de serviços como rede 5G privada e tráfego de dados gratuitos aos colaboradores. Em outras palavras, uma empresa que deseje que seus funcionários acessem sua rede local corporativa antes de direcionar os dados à operadora, poderia utilizar o serviço para estabelecer seu próprio UPF (*User Plane Function*) e então conectar ao UPF da operadora, conforme Figura 1. Logicamente, a instituição precisará dispor de uma antena 5G, que possui custo demasiadamente maior do que um roteador Wi-Fi empresarial. No entanto, essa seria uma alternativa para popularizar as antenas de alta frequência (27 GHz) e curto alcance que compõem a geração 5G, podendo contar com subsídios governamentais e patrocínios das grandes empresas de telecomunicações.

Outra aplicação da solução seria para instituições que necessitem realizar testes em um núcleo 5G, porém não dispõem de tempo, ambiente ou pessoal para a implementação de sua própria plataforma, podendo usufruir de uma ferramenta já configurada e centralizada.

Figura 1 – Direcionamento do tráfego para diferentes redes.



Fonte: [1].

### 1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma: na seção Introdução é apresentada uma breve contextualização sobre o tema, a problemática e o objetivo proposto para melhorar a popularização da tecnologia 5G. A seção Referencial Teórico contém um breve histórico das gerações de rede móvel e as teorias que sustentam a estrutura do 5G, como rádio e Core. Os procedimentos e ferramentas utilizados para atingir-se os objetivos foram descritos na seção Metodologia. Na seção Resultados, estão expostos os dados obtidos e a análise do funcionamento de cada etapa da plataforma. Finalmente, a seção Conclusão realiza uma avaliação geral sobre os resultados alcançados, discorre sobre o impacto da plataforma e propõe novas pesquisas que podem ser desenvolvidas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A pesquisa bibliográfica sobre os temas envolvidos nesse trabalho está exposta nas subseções seguintes.

### 2.1 GERAÇÕES DE REDE MÓVEL

Desde o surgimento da primeira geração de comunicação móvel, o 1G, na década de 1980, muito foi aperfeiçoado e adaptado tendo-se como base os requisitos por maior capacidade, velocidade e confiabilidade durante a troca de informações. O Quadro 1 mostra um panorama geral das características de cada geração enquanto que a Figura 2 mostra a evolução das taxas de transferência de dados.

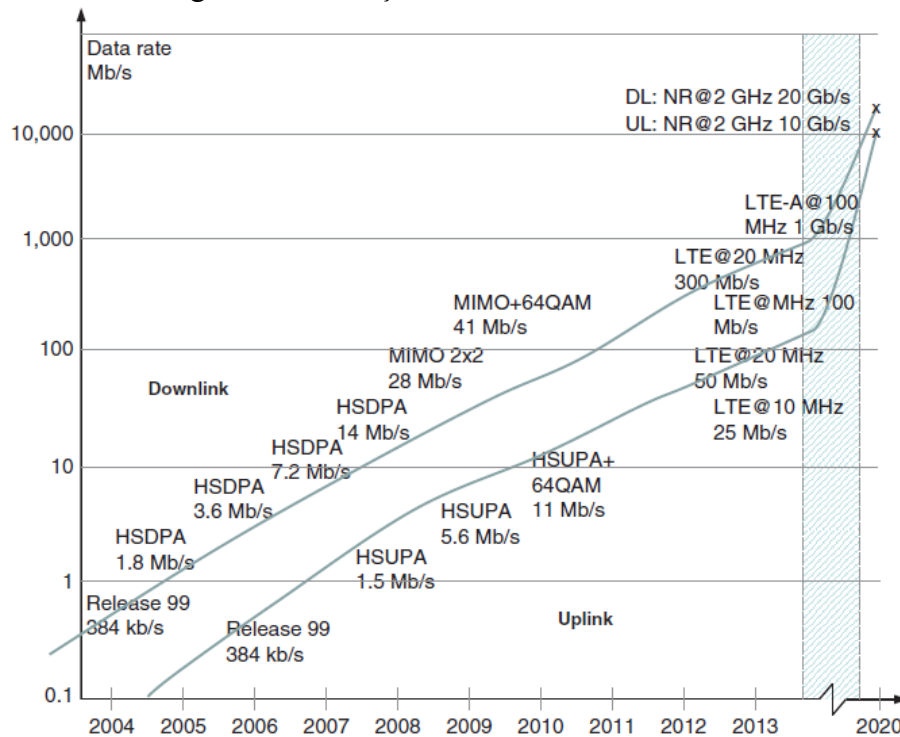
Quadro 1 – Resumo da evolução das redes de comunicação móveis.

<b>Geração</b>	<b>Década de Surgimento</b>	<b>Descrição</b>
1G	1980	Análogica, a primeira completa ou quase completa rede móvel automática que foi destinada apenas para chamadas de voz, apesar de que soluções baseadas em acessórios pudessem ser adaptadas para uso de dados. Os sistemas iniciais eram baseados em equipamentos de usuários montados em veículos que podiam, também, ser utilizados como dispositivos portáteis. O peso era tipicamente de vários quilos e havia um auricular separado. Alguns exemplos dessa fase do 1G são NMT-450, Netz-C e AMPS. No desenvolvimento futuro do 1G, também foram introduzidos dispositivos portáteis, embora os primeiros fossem grandes e pesados em comparação com os dispositivos modernos, pois não eram destinados para os bolsos. Exemplo dessa fase é o NMT-900, lançado nos países nórdicos entre 1986 e 1987.
2G	1990	O diferencial mais importante do 2G foi a funcionalidade digital, que forneceu a integração de serviços de mensagens e dados no sistema e nos dispositivos. Exemplos dessa geração são GSM e IS-95.
3G	2000	O desenvolvimento adicional de sistemas com capacidade de multimídia levou à terceira geração. O principal diferencial dessa geração é a possibilidade de usar taxas de dados consideravelmente mais altas. De acordo com o conjunto original de requisitos de desempenho da ITU, o LTE inicial ainda pertence à fase 3G.
4G	2010	A ITU-R definiu um conjunto de princípios e requisitos de desempenho para os sistemas da quarta geração. Na fase inicial da revisão de conformidade pela ITU,

	<p>havia dois sistemas que atendiam aos requisitos, ou seja, a versão avançada do LTE (LTE-A, a partir da Release 10) e WiMax (a partir do WirelessMAN-Advanced). Como os mercados de telecomunicações móveis têm crescido fortemente e a concorrência está mais forte do que nunca, também houve interpretações paralelas das capacidades 4G. Geralmente, a Release 8 LTE é interpretada como pertencente ao 4G e o HSPA+ é considerado por várias operadoras como um sistema 4G.</p>
--	--

Fonte: [2]. Traduzido pelo autor.

Figura 2 – Evolução das taxas de transmissão.



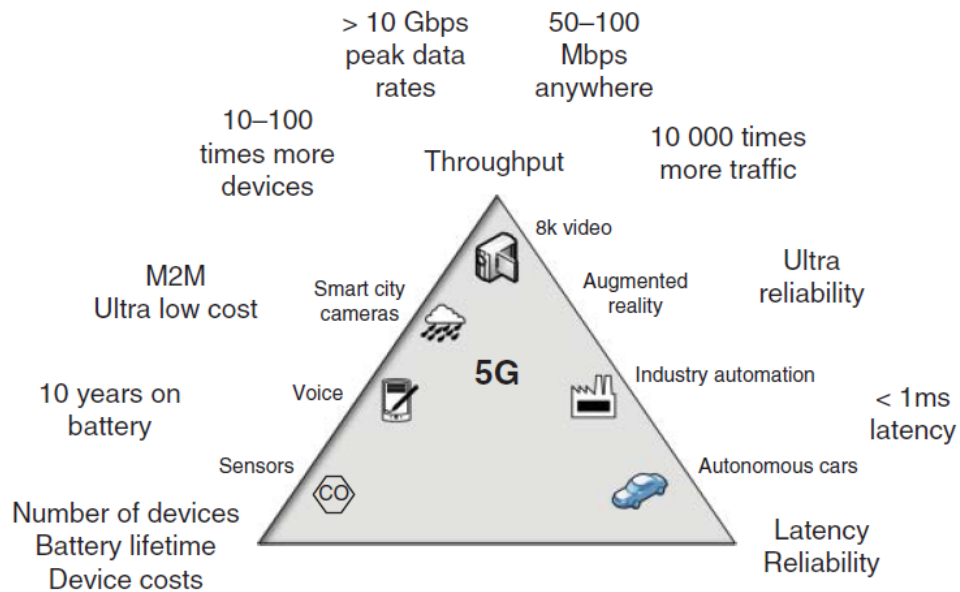
Fonte: [2].

## 2.2 SISTEMA MÓVEL DE QUINTA GERAÇÃO (5G)

O 5G, quinta geração da rede móvel de telecomunicações, começou a ser discutido em 2012 e tem suas características definidas pelas organizações ITU-R (*International Telecommunications Union Radiocommunication Sector*) e 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) [3]. A arquitetura 5G é composta pelo acesso via rádio (NG-RAN) e pelo núcleo 5G (5G Core). O usuário é representado pelo *User Equipment* (UE), dispositivo de usuário, que pode ser um *smartphone*, dispositivo de Internet das Coisas, carro autônomo, entre outros.

De forma genérica, são três as classes de uso que visam ser atendidas pelo 5G: *enhanced mobile broadband* (eMBB), *massive machine-type communication* (mMTC) e *ultra-reliable and low-latency communication* (URLLC) [3]. A Figura 3 ilustra as três classes citadas.

Figura 3 – Classes de uso do 5G.



Fonte: [4].

*Enhanced mobile broadband* é a evolução da banda larga móvel existente para suportar maior capacidade de troca de informações [3]. Visa atender áreas densamente povoadas, podendo atingir altas velocidades de envio e recebimento de dados.

*Massive machine-type communication* é a comunicação entre um grande número de dispositivos [3], como aplicações de Internet das Coisas. Uma característica comum desse tipo de comunicação é a troca de mensagens de pequeno tamanho, normalmente contendo dados como medições ou comandos para atuadores. Os dispositivos que usufruem desse serviço também necessitam de um baixo consumo de energia, uma vez que uma longa duração de bateria é essencial para a Internet das Coisas.

*Ultra-reliable and low-latency communication* é a comunicação voltada para serviços que exijam troca de dados em tempo real e com confiabilidade elevada [3], como carros autônomos, automação industrial e controle de tráfego. A latência, que deve ser menor do que 1 ms, é mais importante do que banda para essas aplicações [1].

Pensando-se em utilizar das mais recentes e otimizadas tecnologias, o 5G foi moldado levando-se em consideração recursos como automação, virtualização, *containers*, micro serviços e *Cloud Nativity* [1]. Nas subseções seguintes são expostos maiores detalhes sobre os recursos e a arquitetura 5G.

### 2.2.1 Rádio

A 3GPP definiu que a tecnologia de rádio 5G será chamada de New Radio (NR) e que contará com diversas novidades comparadas às suas antecessoras, com suporte a recursos como *massive Multiple Input Multiple Output* (mMIMO), *beamforming*, novas bandas de frequência, novas técnicas de modulação de canal e *Carrier Aggregation* (CA) [1, 4].

Na geração anterior, o 4G ou LTE (*Long Term Evolution*), já havia se feito muito progresso em melhorar a eficiência da banda móvel e do espectro, em diminuir o tempo de latência, em possibilitar um custo mais baixo para os dispositivos e em aumentar a duração da bateria [3]. Logo, tais evoluções possuem um papel fundamental para o rádio 5G.

A Tabela 1 mostra as diferenças entre as principais características do 4G e do 5G, enquanto que a Tabela 2 mostra a comparação entre as principais definições do quadro estrutural do 4G e do 5G.

Tabela 1 – Principais diferenças entre o rádio 4G e 5G.

<b>Característica</b>	<b>4G LTE</b>	<b>5G NR</b>
Codificação do canal de dados	Turbo	LDPC
Codificação do canal de controle	TBCC	Polar
Esquema de modulação para o <i>uplink</i>	SC-FDMA (Single-carrier frequency-division multiplexing)	DFT-S-ODFM; OFDM (opcional)
Esquema de modulação para o <i>downlink</i>	OFDM	OFDM
Largura de banda (MHz)	1,4; 3; 5; 10; 15; 20	5, ..., 100 (sub 6 GHz); 50, ...,400 (above 6 GHz)
Espaçamento da subportadora (kHz)	15 (unicast, Multimedia Broadcast Multicast Service [MBMS]); 7,5/1,25 (portadora MBMS dedicada)	30, 60, 120; 240 (não para dados)
Máxima agregação de portadora (CC)	32	16
Máximo de portas de antena MIMO	8 (SU-MIMO); 2 (SU-MIMO)	8 (SU-MIMO); 16 (SU-MIMO)
HARQ transmissão/retransmissão	TB	TB, Code block group

Fonte: [2]. Traduzida pelo autor.

Tabela 2 – Comparação das definições do quadro estrutural do 4G e do 5G.

<b>Estrutura do <i>frame</i></b>	<b>4G LTE</b>	<b>5G NR</b>
Duração do <i>frame</i> de rádio	10 ms	10 ms
Duração do <i>subframe</i>	1 ms	1 ms
Duração do <i>slot</i>	0,5 ms	0,5 ms
Formato do <i>slot</i>	Predefinido	Configurado de forma dinâmica e semiestatística

Fonte: [2]. Traduzida pelo autor.

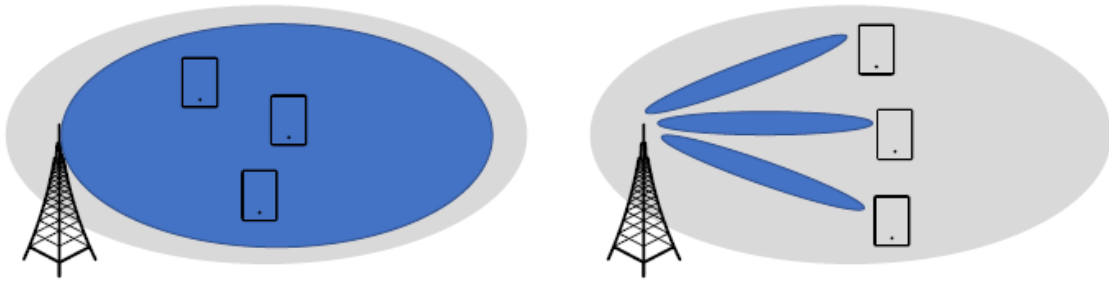
No 5G, as bandas de frequência suportadas variam de 450 MHz até 6 GHz (classificada como *Frequency Range 1*, FR1, *mid/low band* ou *sub 6 GHz bands*) e de 24,250 GHz até 52,600 GHz (classificadas como *Frequency Range 2*, FR2, *high band* ou *above 6 GHz bands*) [1, 4]. A grande inovação são as altas frequências, também chamadas de *millimeter wave* (mmWave), capazes de transferir uma grande quantidade de dados com uma latência muito baixa. No entanto, quanto maior a frequência de transmissão, menor é o alcance das ondas, ficando suscetíveis a perda de sinal causadas por objetos comuns, como portas e janelas, e até mesmo pela presença de indivíduos ou animais entre o emissor e o receptor. Com o intuito de se aumentar a eficácia da transmissão, tecnologias como *beamforming* e MIMO podem ser empregadas [1].

### 2.2.1.1 *Beamforming*

*Beamforming* é uma técnica que visa direcionar a transmissão diretamente para o receptor ou esperar a transmissão vinda da direção do emissor. Essa abordagem permite melhorar a razão sinal-interferência-mais-ruído, *signal-to-interference-plus-noise ratio* (SINR), atingindo-se maior taxa de transmissão [1]. Ainda dentro de *beamforming*, pode-se utilizar técnicas estendidas como *multibeam*, em que uma antena possui múltiplos feixes (*beams*) dinamicamente controlados que otimizam a conexão para um dispositivo específico [1]. A Figura 4 ilustra a aplicação de *single beam* e *multibeam*.



Figura 4 – *Single beam* e *multibeam*, respectivamente.



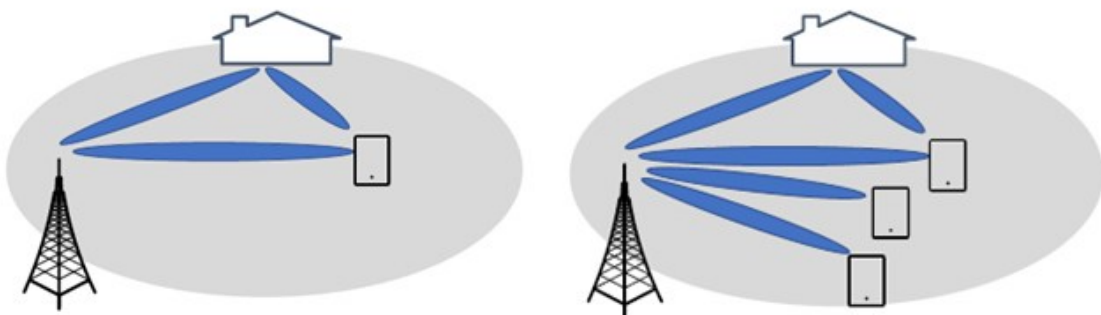
Fonte: [1].

### 2.2.1.2 Massive MIMO

MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) é uma técnica que utiliza múltiplas antenas de emissão e recepção e, conseqüentemente, múltiplos caminhos ou canais, não correlacionados, para transmissão de fluxos de dados entre emissor e receptor [1, 4]. Isso permite que o receptor possa juntar os sinais recebidos para aumentar a taxa de transmissão de dados. O termo *massive MIMO* indica que uma quantidade muito maior do que 8 antenas de transmissão e recepção serão utilizadas na estação base [4].

Quando múltiplas cópias de um fluxo de dados são enviadas por caminhos diferentes e mesma frequência para o mesmo dispositivo, está sendo realizado *Single User Multiple Input Multiple Output* (SU-MIMO) [1, 4]. No entanto, quando a comunicação é feita com múltiplos dispositivos de usuário ao mesmo tempo na mesma frequência, denomina-se *Multi User Multiple Input Multiple Output* (MU-MIMO) [1]. Nota-se que para ambas as situações se utiliza *beamforming* para atingir-se o objetivo desejado. A Figura 5 demonstra a diferença entre SU-MIMO e MU-MIMO.

Figura 5 – *Single User MIMO* e *Multi User MIMO*, respectivamente.



Fonte: [1].

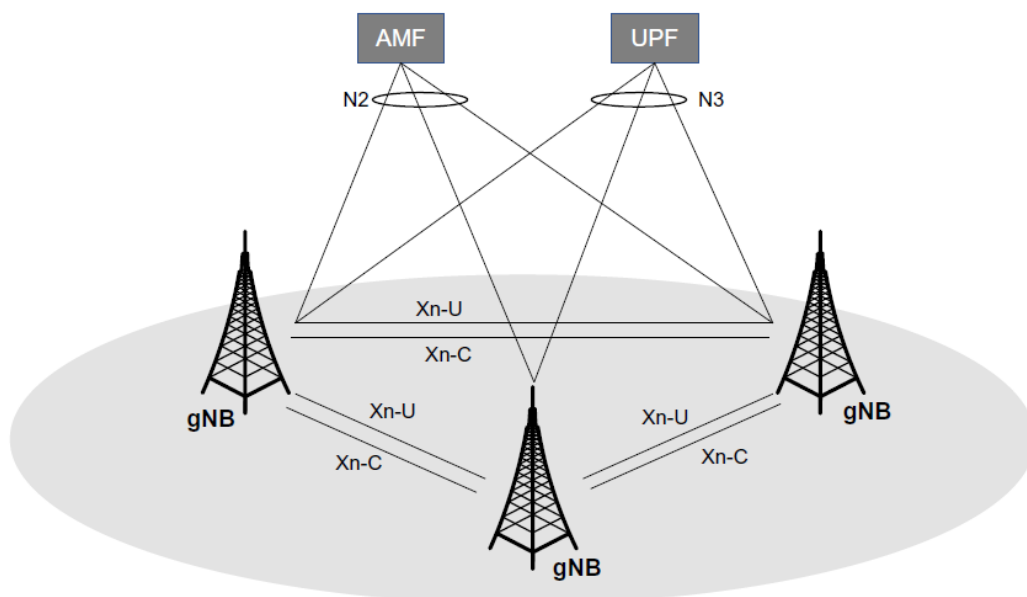
### 2.2.1.3 Arquitetura da rede de rádio

De acordo com a 3GPP, a arquitetura de rede de rádio da nova geração é composta por múltiplas estações base conectadas ao Core 5G e entre elas mesmas. A Figura 6 ilustra a arquitetura da rede de rádio 5G. O nome atribuído às estações rádio base 5G nativas é gNB [1]. Quando a estação base for LTE, o termo utilizado é ng-eNB [1]. No entanto, de forma genérica, pode-se referir a estação base 5G como *NG-Radio Access Network* (NG-RAN), independentemente de ser gNB ou ng-eNB [2].

Dentre as funcionalidades do NG-RAN, podem ser citadas: gerenciamento de recursos de rádio, gerenciamento de cabeçalho IP (*Internet Protocol*), gerenciamento do AMF (*Access and Mobility Management Function*), funcionalidade de roteamento, configuração e liberação de conexões, funcionalidade de agendamento, medições, marcações de pacotes, gerenciamento de sessões, fatiamento (*slicing*) de rede, funções de QoS, suporte de UEs em estado RRC\_INACTIVE, função de distribuição para mensagens NAS, compartilhamento de rede de acesso de rádio, *dual connectivity* e interfuncionamento entre NR e E-UTRA (interface de ar da geração LTE) [2].

O gerenciamento de recursos de rádio, *Radio Resource Management* (RRM), inclui o controle de admissão por rádio e suporte de rádio, gerenciamento de mobilidade e controle e alocação dinâmica de recursos para o UE [2].

Figura 6 – Arquitetura da rede de rádio 5G.

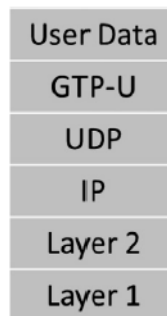


Fonte: [1].

As estações base são interconectadas pelas interfaces Xn, divididas em Xn-C (interface de sinal) e Xn-U (interface para transferência de dados) [1]. As interfaces de comunicação com os elementos do Core AMF e UPF são, respectivamente, N2 e N3 [1].

Os dados de usuários são transferidos pelas interfaces N3 e Xn-U utilizando-se a rede IP e a pilha de protocolos exposta na Figura 7 [1].

Figura 7 – Pilha de protocolos utilizada para transferência de dados de usuário.

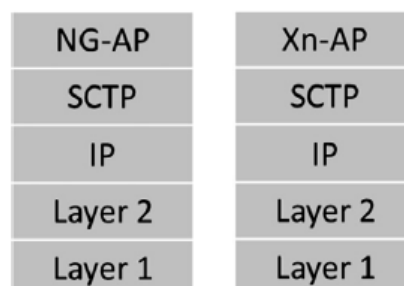


Fonte: [1].

O protocolo GTP-U (*GPRS tunneling protocol for the User Plane*), que encapsula os dados de usuário, é um protocolo confiável amplamente utilizado nas gerações anteriores e é carregado pela pilha UDP (*User Datagram Protocol*)/IP [1].

Já os dados de sinal, são transportados pelo protocolo SCTP (*Stream Control Transmission Protocol*), que foi definido pela IETF e possui entrega garantida de pacotes e segurança melhor comparado ao TCP (*Transmission Control Protocol*) [1]. A pilha completa dos protocolos utilizados para os dados de sinal pode ser visualizada na Figura 8. Os protocolos de controle NGAP (*NG Application Protocol*) e XnAP (*Xn Application Protocol*) são empregados, respectivamente, na interface N2 (entre RAN e AMF) e na interface Xn.

Figura 8 – Pilhas de protocolos para a transferência de dados de sinal.



Fonte: [1].

### 2.2.2 Core

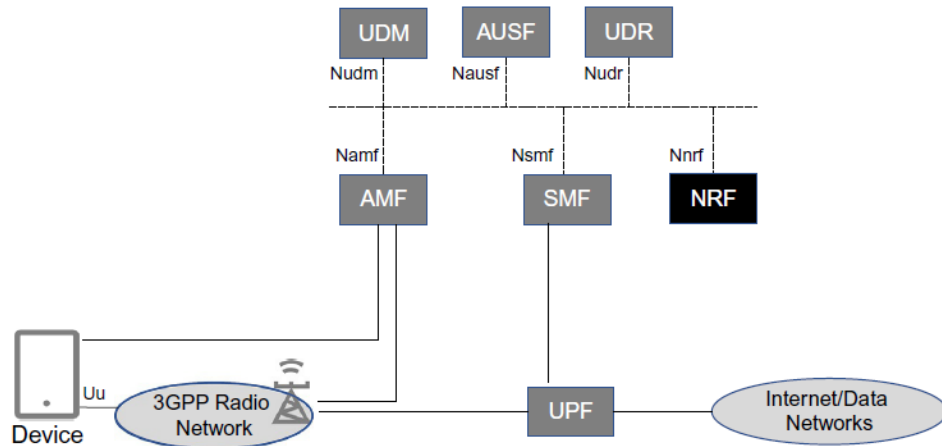
O Core é a estrutura responsável por gerenciar os recursos de rede e as conexões dos usuários, como autenticação, QoS, segurança, roteamento, encaminhamento de pacotes, mobilidade, interceptação legal e outros. Juntamente com a interface de acesso via rádio, *Radio Access Network* (RAN), compõe a rede móvel de telecomunicações.

No 5G, o Core foi concebido tendo-se como foco uma arquitetura baseada em serviços, ou seja, uma estrutura flexível em que suas funcionalidades são divididas em nós ligados a um barramento comum que interagem entre si de forma independente. Essa abordagem permite a utilização de recursos em nuvem, de orquestração e de *edge computing* para escalonar a rede e adaptá-la continuamente a variações na carga de processamento, atingindo-se, assim, maior eficiência e estabilidade.

Para comunicação entre os nodos, chamados de *Network Functions* (NFs), a 3GPP definiu uma API (*Application Programming Interface*) que funciona sobre o protocolo HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) e que segue o modelo REST (*Representational State Transfer*). O modelo REST, proposto em 2000 [5], conta com amplo suporte nas linguagens de programação e é muito empregado na Web, onde muitas empresas disponibilizam uma API em REST para interação com seus produtos.

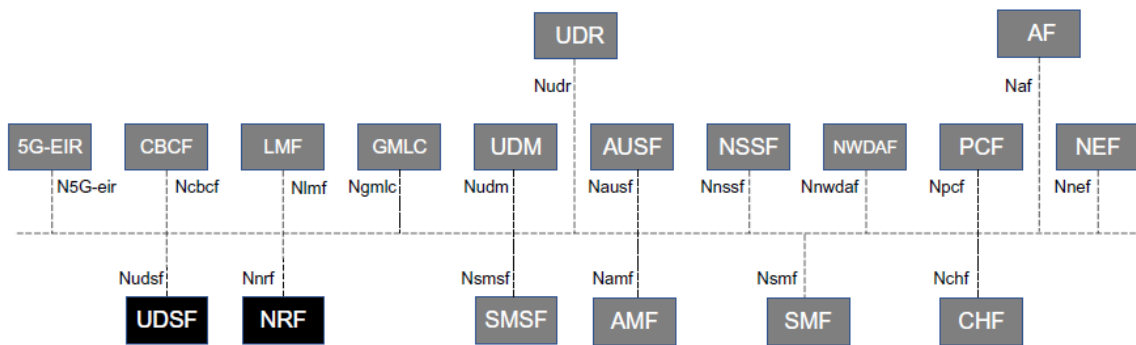
As funções de rede essenciais do Core 5G (mostradas na Figura 9) são: AMF, UDM (*Unified Data Management*), AUSF (*Authentication Server Function*), UDR (*Unified Data Repository*), SMF (*Session Management Function*), NRF (*Network Repository Function*) e UPF [1]. São elas que gerenciam a autenticação, estabelecimento de sessão, roteamento, interface com a rede de rádio, interface com o equipamento do usuário (UE), mobilidade, estabelecimento de túnel com a rede de dados ou *Data Network* (DN), entre outras funcionalidades. No entanto, há ainda funções de rede adicionais que estendem as capacidades do Core (mostradas na Figura 10), como a PCF (*Policy Control Function*), NSSF (*Network Slice Selection Function*), N3IWF (*Non-3GPP Inter Working Function*), AF (*Application Function*), NEF (*Network Exposure Function*), SMSF (*Short Message Service Function*), LMF (*Location Management Function*) e outras [1].

Figura 9 – Elementos essenciais de uma rede 5G.



Fonte: [1].

Figura 10 – Funções de rede de um Core 5G.



Fonte: [1].

O conjunto de protocolos NAS (*Non Access Stratum*), composto por 5GMM (*5GS Mobility Management*) e 5GSM (*5GS Session Management*), intermedia a conexão entre o UE e o Core. Para as mensagens de controle entre UE e AMF, destinadas ao gerenciamento do registro de dispositivos, mobilidade e segurança, o protocolo 5GMM é utilizado, enquanto que para as mensagens entre UE e SMF, como as destinadas ao gerenciamento das sessões PDUs (*Protocol Data Unit*), utiliza-se o protocolo 5GSM [1].

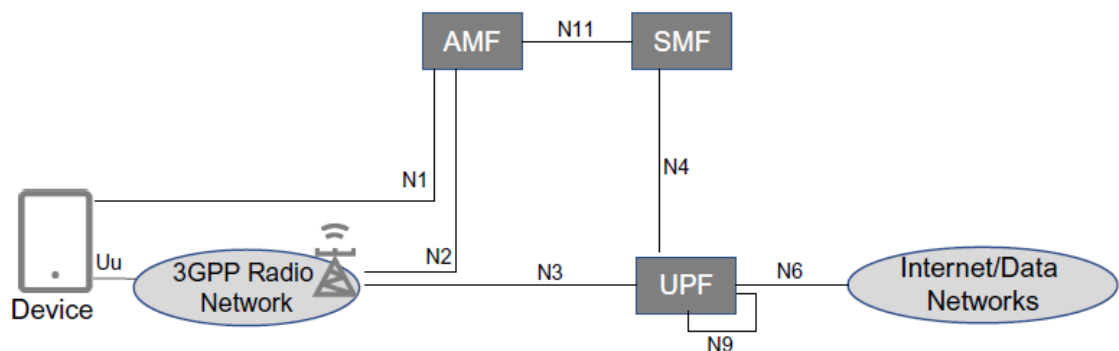
As próximas subseções descrevem as principais função de rede do Core 5G.

### 2.2.2.1 AMF

O AMF (*Access and Mobility Management Function*) é responsável por estabelecer a conexão com a RAN, através da interface N2, e com o UE, através da interface N1 [1]. O AMF

gerencia o registro, autenticação e mobilidade do UE, além de gerenciar a encriptação e integridade das mensagens NAS [4]. Também, retransmite as mensagens de gerenciamento de sessão, *Session Management (SM)*, entre UE e SMF, as mensagens SMS (*Short Message Service*) entre UE e SMSF, as mensagens dos serviços de localização entre UE e LMF e entre RAN e LMF e as mensagens de política entre UE e PCF [4]. Por fim, conta ainda com suporte para entrega de mensagens de aviso públicas, *Public Warning System (PWS)*, e interface para interceptação legal, *Lawful Interception (LI)* [4]. Ressalta-se que um determinado UE só poderá ser servido por um AMF em um instante de tempo [1]. A Figura 11 ilustra as interfaces utilizadas pelo AMF para interação com as demais funções de rede.

Figura 11 – Interfaces de rede utilizadas pelo AMF.

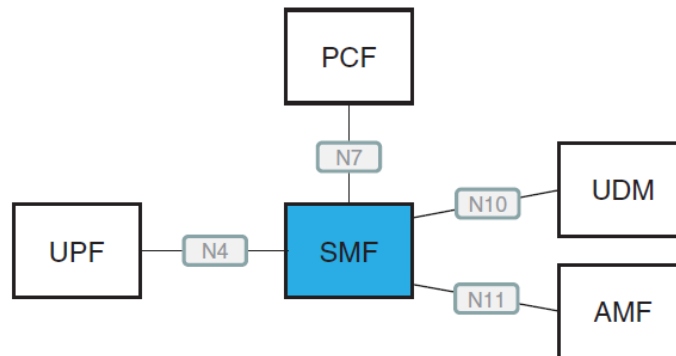


Fonte: [1].

#### 2.2.2.2 SMF

O SMF (*Session Management Function*) estabelece e gerencia a conexão entre o UE e a rede de dados (DN) [1]. Para isso, ele seleciona o UPF de acordo com os requisitos da conexão e estabelece uma sessão PDU (*Protocol Data Unit*) entre o acesso e o UPF ou entre UPFs quando necessário [4]. A interface de comunicação entre SMF e UPF é chamada de N4 [2]. O protocolo PFCP (*Packet Forwarding Control Protocol*), desenvolvido para o 4G e evoluído para o 5G, é utilizado na camada de aplicação da interface N4 e atua em cima do protocolo UDP [1]. O estabelecimento da sessão PDU, bem como de suas características, depende dos requisitos do UE, das informações dos bancos de dados do UDM/UDR e das políticas de serviço e QoS configuradas no PCF [4]. O SMF também pode alocar endereços IPs para as sessões PDUs e possui suporte para interface de interceptação legal (LI) [1, 4]. A Figura 12 ilustra as interfaces utilizadas pelo SMF para interação com as demais funções de rede.

Figura 12 – Interfaces de rede utilizadas pelo SMF.



Fonte: [2].

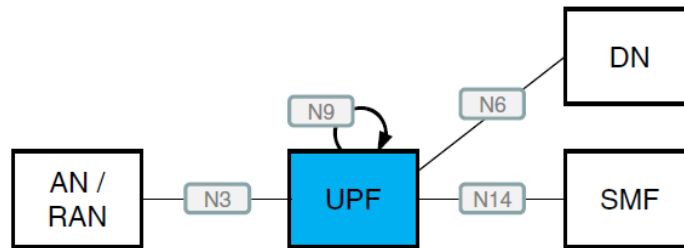
### 2.2.2.3 UPF

O UPF (*User Plane Function*) é a função de rede que gerencia o tráfego do usuário. Suas interfaces de rede estão expostas na Figura 13. Ele é escolhido e controlado pelo SMF, no que tange as políticas de serviço, e serve como ponte entre a rede de dados (DN) e o UE, roteando, processando e direcionando os pacotes de acordo com as regras do SMF [1]. Desse modo, atua como ponto de ancoragem para a sessão PDU, abstraindo os eventos de mobilidade na rede e armazenando os pacotes que não podem ser entregues ao UE em um buffer para posterior encaminhamento [1]. Pode ser disposto de forma geograficamente centralizada ou distribuída, não havendo restrições no número de UPFs servindo uma sessão PDU, conforme especificações da 3GPP [4]. Além disso, podem ser implementados em série, encaminhando-se o tráfego com base em regras de roteamento [1].

O UPF é responsável, também, por coletar dados estatísticos de tráfego, gerar relatórios, aplicar QoS de acordo com a demanda da rede e replicar o tráfego para monitoramento legal [4].

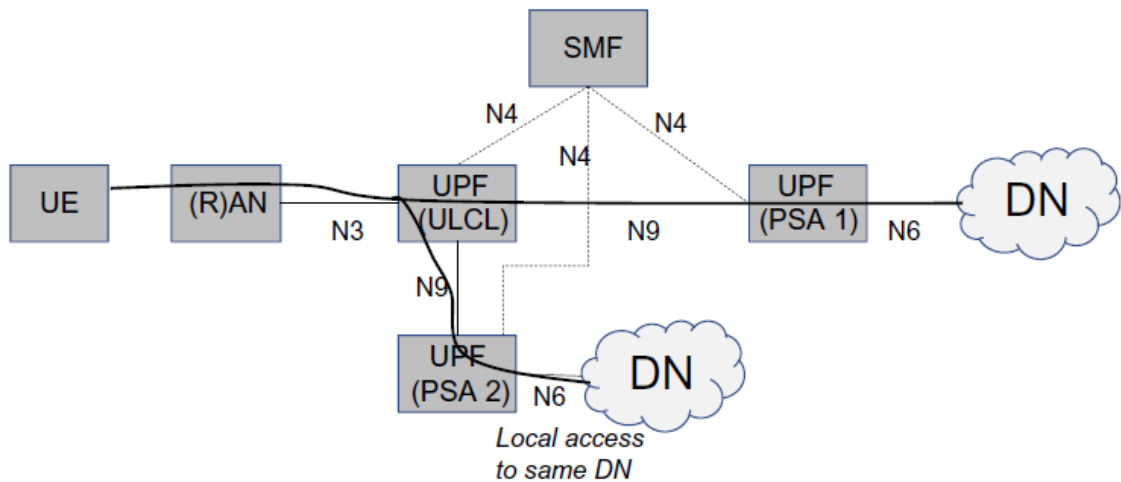
Há uma funcionalidade no UPF chamada de *Up Link Classifier* (UL CL) que permite direcionar o tráfego para diferentes UPFs baseado em regras de encaminhamento fornecidas pelo SMF. O UL CL gerencia o envio dos pacotes do UE para as diferentes redes e das redes de volta para o UE, podendo ser adicionado ou removido a qualquer momento pelo SMF [1]. A Figura 14 ilustra o funcionamento do UL CL.

Figura 13 – Interfaces de rede utilizadas pelo UPF.



Fonte: [2].

Figura 14 – Direcionamento de tráfego através de UL CL.



Fonte: [1].

#### 2.2.2.4 NRF

O NRF (*Network Repository Function*) serve como repositório das funções de rede (NFs) disponíveis para o Core. Ele armazena as características que descrevem cada NF registrado e permite que outras NFs consultem seu banco de dados para obter o endereço, na rede, dos serviços desejados [1]. A grande vantagem trazida pelo NRF é a não exigência de conhecimento prévio dos endereços e perfis dos elementos do Core que compõem a rede, podendo ser requisitados no momento em que uma determinada NF necessitar de um serviço de outra NF. Cada NF, ou entidade representando a NF, é responsável por registrar-se no NRF e atualizar seu status, porém, o NRF dispõe de um mecanismo *keep alive* que identifica elementos que não estão mais disponíveis [1]. Mudanças na estrutura do Core ou de escalabilidade são simplesmente efetuadas através de atualizações do status da NF alterada no NRF, sem necessidade de alterar-se as configurações internas das outras NFs. Dentre as



informações de perfis disponíveis no NRF, pode-se citar: tipo da NF, ID (identificação), endereço, capacidade, serviços suportados e informações de autorização [2].

#### 2.2.2.5 UDM

O UDM (*Unified Data Management*) acessa e gerencia os dados de inscrições armazenados no UDR, envia dados relevantes para as NFs que servem o UE, como AMF e SMF, autoriza acessos e serviços, autentica usuários, gerencia identificação de usuários e oferece suporte a serviços SMS [4]. De forma geral, o UDM fornece uma interface de acesso aos bancos de dados com informações da rede, permitindo que um usuário utilize múltiplos UDMs para transações diferentes [1].

#### 2.2.2.6 UDR

O UDR (*Unified Data Repository*) armazena e fornece acesso de dados de inscrições para o UDM, dados de políticas para o PCF e dados estruturados para exposição para o NEF [4].

#### 2.2.2.7 AUSF

O AUSF (*Authentication Server Function*) realiza a autenticação primária e o estabelecimento de chaves entre o UE e a rede, utilizando para isso informações do UDM [1, 4]. Suas interfaces com o AMF e o UDM podem ser visualizadas na Figura 15.

Figura 15 – Interfaces de rede utilizadas pelo AUSF.



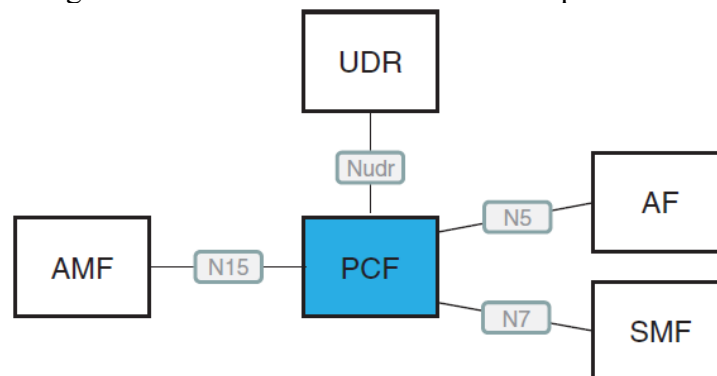
Fonte: [2].

### 2.2.2.8 PCF

O PCF (*Policy Control Function*) é responsável por armazenar e prover as políticas de serviço para as NFs [4]. Para o SMF, as políticas fornecidas são os níveis de QoS e regras de tráfego e cobrança, as relacionadas ao estabelecimento da sessão PDU e as relacionadas ao tráfego local que podem influenciar a escolha do UPF por parte do SMF [4]. Para o AMF, o PCF fornece as regras de acesso e mobilidade, como restrições de áreas de serviço e prioridades de acesso [4]. Para o UE, o PCF fornece, através do AMF, políticas relacionadas ao acesso não 3GPP, políticas de escolha de fatias na rede (*slicing*), de escolha de redes de dados (DN), entre outras [4]. As interfaces de rede do PCF estão expostas na Figura 16.

As políticas são determinadas considerando-se fatores como condição da rede, políticas da operadora local, requisitos de aplicativo e dados de assinatura do usuário.

Figura 16 – Interfaces de rede utilizadas pelo PCF.



Fonte: [2].

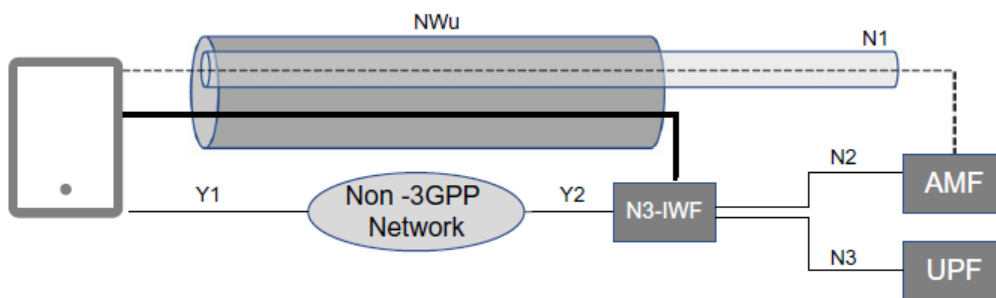
### 2.2.2.9 NSSF

O NSSF (*Network Slice Selection Function*) é o elemento que seleciona as fatias de rede para serem utilizadas pelo UE [1]. Tal procedimento é realizado com base no parâmetro de *Single Network Slice Selection Assistance Information* (S-NSSAI), que define a fatia desejada [4]. Também, o NSSF lista os AMFs que podem servir o UE, podendo consultar o NRF para isso [4].

### 2.2.2.10 N3IWF

O N3IWF (*Non-3GPP Inter Working Function*) permite a integração de redes que não são parte do acesso definido pela 3GPP, como WiFi, ao Core 5G [1]. Essa interconexão é feita através do estabelecimento de túneis IKEv2 (*Internet Key Exchange*) e IPsec (*IP Security Protocol*) entre N3IWF e UE [2]. A Figura 17 ilustra a utilização do N3IWF para conectar uma rede não 3GPP ao Core 5G.

Figura 17 – N3IWF conectando uma rede não 3GPP ao Core 5G.

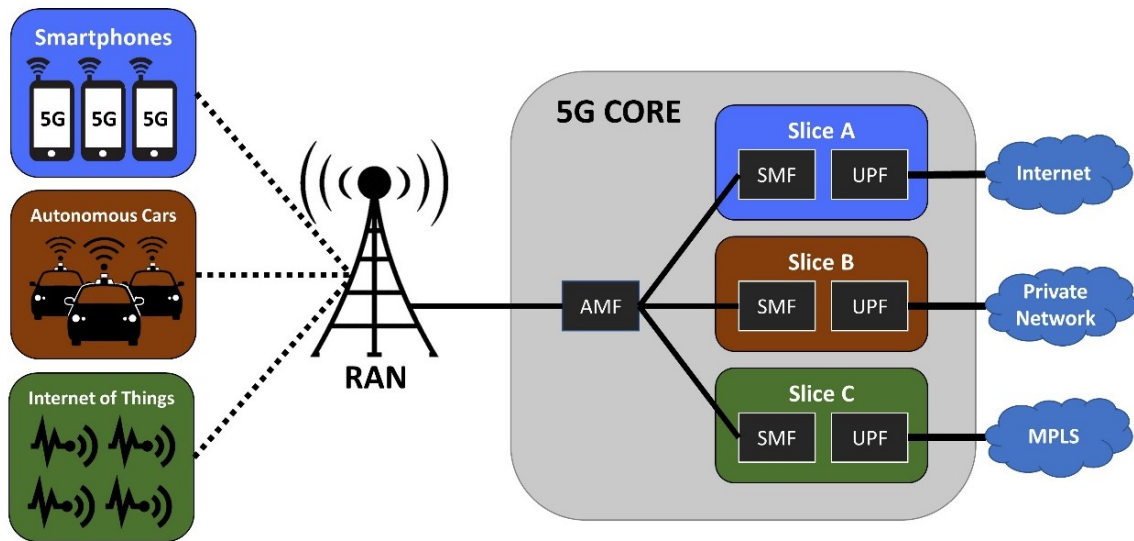


Fonte: [1].

### 2.2.3 Fatiamento de rede

Fatiamento de rede ou *network slicing* é um dos recursos mais importantes e inovadores do 5G, sendo essencial para modelos de negócio *Network as a Service* (NaaS). Ele consiste em dividir a rede física em partes (*slices*) lógicas e fornecer acesso diferenciado para cada tipo de dispositivo, ou seja, usuários que necessitem de comunicação em tempo real, como carros autônomos, poderão ocupar uma fatia/*slice* que possui maior prioridade e QoS enquanto que usuários que não dependem de latência para suas aplicações poderão ocupar outra fatia/*slice* de menor prioridade e, conseqüentemente, de menor custo. Além de prover serviços com prioridades otimizadas para os usuários, o fatiamento pode ser utilizado também para aumentar a segurança da comunicação, uma vez que pode manter as diferentes redes lógicas isoladas uma da outra. A Figura 18 demonstra o fatiamento sendo empregado para três conexões distintas: *smartphone*, carros autônomos e *Internet of Things* (IoT). Ressalta-se que para realizar os fatiamentos, tecnologias tais como *Software Defined Networking* (SDN) e virtualização são de grande utilidade.

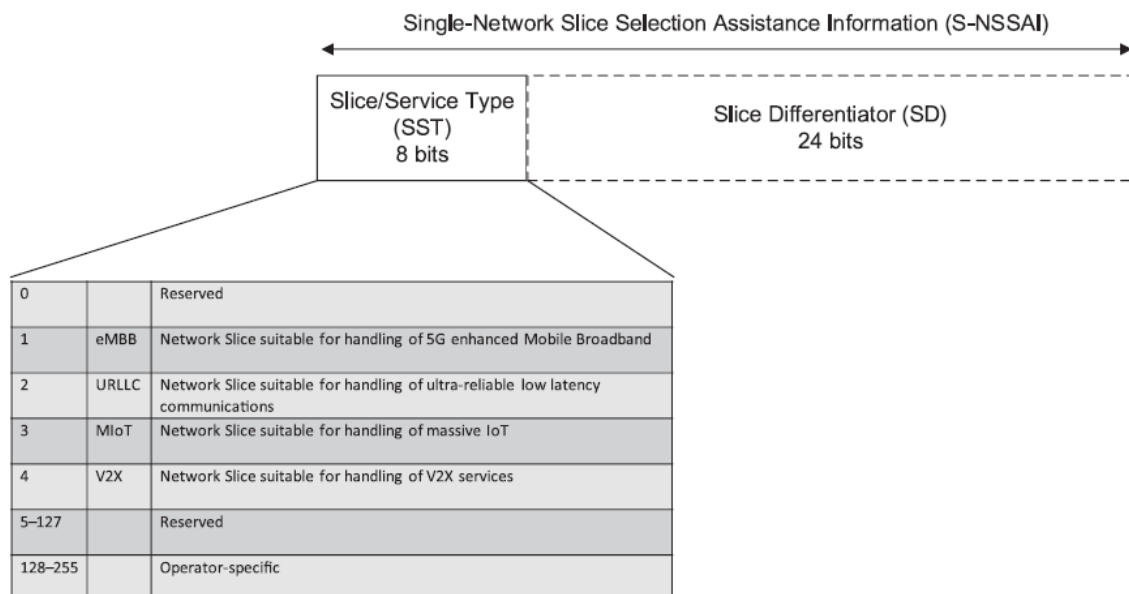
Figura 18 – Diferentes tipos de dispositivos utilizando o fatiamento de rede.



Fonte: do autor.

Para identificar cada fatia, atribui-se a elas um valor chamado de S-NSSAI que, por sua vez, é dividido em SST (*Slice/Service Type*), que indica o tipo do serviço ou fatia, e SD (*Slice Differentiator*), parâmetro opcional que indica as diferentes fatias de um mesmo tipo (mesmo SST) [1]. A figura 19 mostra a regra de atribuição do S-NSSAI às fatias.

Figura 19 – Formato do S-NSSAI.



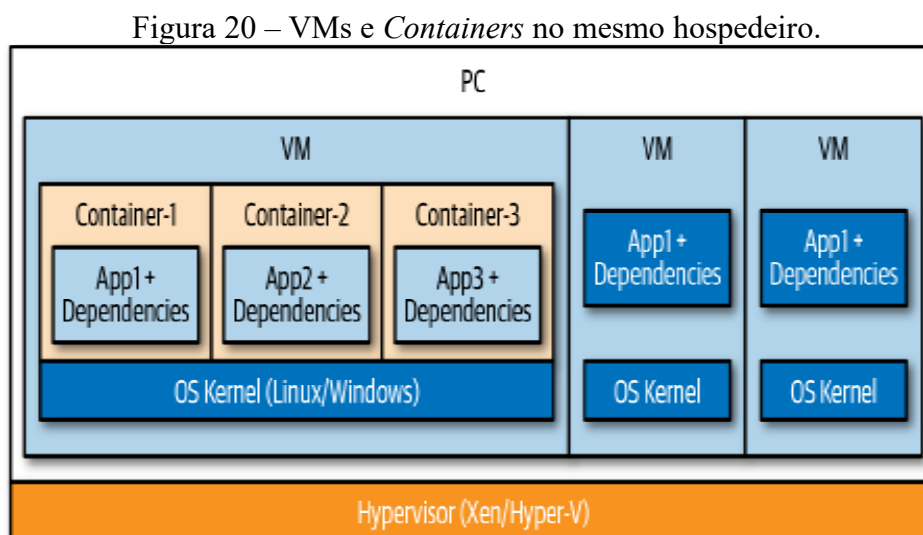
Fonte: [1].

Um dispositivo pode requisitar múltipla fatias e utilizá-las simultaneamente. Para isso, com base no S-NSSAI, a rede irá selecionar um AMF que poderá servir determinado dispositivo inicialmente [1]. A função de rede NSSF poderá ser utilizada para a escolha definitiva do AMF ou, caso não se utilize NSSF, o próprio AMF poderá fazer tal escolha [1].

### 2.3 CONTAINERS

Com o advento da virtualização a nível de sistema, muito se facilitou para o gerenciamento de servidores e aplicações. No entanto, com o passar do tempo, a tecnologia em nuvem evoluiu e um novo modo de isolamento se popularizou: a virtualização a nível de sistema operacional (SO) conhecida como *container*.

O foco do *container* é economizar recursos do sistema operacional e melhorar o desempenho das aplicações, ou seja, aproveita-se o *Kernel* e as bibliotecas do SO hospedeiro para obter-se somente um sistema enxuto com uma aplicação. Isso possibilita rápida instalação e integração de pacotes de *software* e diminui o gasto computacional envolvido. Desse modo, uma máquina pode hospedar um grande número de *containers* e gerenciá-los da maneira que bem entender. A Figura 20 mostra um computador rodando múltiplas máquinas virtuais (VM) e, em uma delas, várias aplicações em *containers* que compartilham o mesmo *Kernel*.



Fonte: [6].

Os *containers* são ideais para o desenvolvimento de aplicações *Cloud Native* e micro serviços. O gerenciamento de um conjunto de *containers* para uma aplicação é chamado de

orquestração (*orchestration*) [6]. A orquestração é constituída por: monitoramento do estado do *container*, reiniciando-o quando necessário; provisionamento e implantação de *containers* nos *cluster nodes* (nós de um conjunto de máquinas); gerenciamento dos recursos do *container*, movendo-os para outros *cluster nodes* quando necessário; escalonamento de *containers* em um *cluster*; mapeamento de rede; balanceamento de carga entre *containers* [6].

Uma plataforma muito popular para implantação de *containers* é a Docker, cujo papel na disseminação e popularização da técnica foi significativo. Já para realizar-se a orquestração, a plataforma Kubernetes é utilizada em grande parte dos casos.

### 3 METODOLOGIA

Para se realizar os serviços de Core, escolheu-se o pacote de aplicativos free5GC que implementa as principais funções de rede de um Core 5G e possui código aberto com licença Apache 2.0. Tal aplicativo é mantido pela *National Chiao Tung University*, de Taiwan, e sua primeira versão foi lançada em janeiro de 2019 [7]. O free5GC é a única opção de código aberto mantida ativamente com suporte a várias NFs e que possui também compatibilidade com um gerenciador de fatiamento (*slicing*) de rede chamado de free5gmano [8].

As funções de rede implementadas pelo free5GC são as seguintes: AMF, AUSF, N3IWF, NRF, NSSF, PCF, SMF, UDM, UDR e UPF. Além disso, há uma interface Web que permite cadastrar os dispositivos de usuário no Core e visualizar informações da conexão como IP, estado, IMEI (*International Mobile Equipment Identity*), entre outras. O pacote utiliza o protocolo HTTP2 para implementar a arquitetura REST e conta com criptografia TLS (*Transport Layer Security*) v1.2 para assegurar a privacidade dos dados trocados entre as NFs, porém optou-se por desabilitá-la para facilitar a análise do tráfego.

O aplicativo Docker foi utilizado para a implementação do Core em *containers*, uma vez que é a ferramenta mais popular para esse tipo de virtualização. Como são várias as funções de rede que precisam ser inseridas em *containers*, um aplicativo da família Docker chamado de Compose foi empregado. O Docker Compose permite o gerenciamento de múltiplos *containers* de forma centralizada, possibilitando que se configure o conjunto de *containers* através de uma única configuração e que se controle os estados de todos os *containers* com um único comando.

A imagem para os *containers* que irão executar as funções de rede foi criada a partir da compilação do pacote free5GC e dos módulos necessários. De modo a tornar a imagem mais enxuta, criou-se um ambiente de compilação e então copiou-se os binários resultantes para uma imagem Ubuntu 18.04 que foi utilizada como base para os *containers*. Ressalta-se que para o correto funcionamento do UPF, um módulo de *Kernel* chamado gtp5g precisou ser previamente instalado na máquina hospedeira. A máquina hospedeira é uma máquina virtual com sistema Ubuntu 18.04, 4 GB de memória RAM (*Random Access Memory*) e 2 núcleos de processamento.

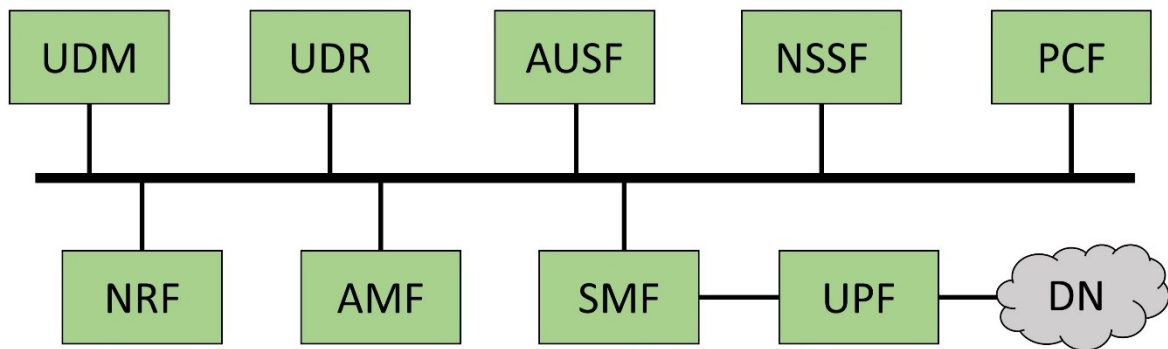
Os *containers* contendo as funções de rede não são persistentes, ou seja, sempre que parados ou reiniciados, seus arquivos voltam ao estado da imagem base. Logo, para que se pudesse salvar de forma permanente os dados armazenados e as configurações modificadas, um volume acessível pelo hospedeiro e pelo *container* foi criado. Além de persistir os dados do

*container*, o volume também evita que seja necessário gerar uma nova imagem sempre que a configuração de alguma função de rede for alterada, pois o usuário pode simplesmente atualizar o arquivo no volume e reiniciar a aplicação no *container*.

Cada *container* recebeu um IP local privado para facilitar a comunicação das funções de rede. Para o UPF, foi necessário atribuir permissão de administrador de rede para que as rotas fossem corretamente criadas durante o estabelecimento de uma conexão.

Optou-se por realizar um *design* básico do Core 5G sem a necessidade dos recursos providos pelo N3IWF. Essa NF, que serve como interface para redes não 3GPP, como Wi-Fi, não será utilizado pois o escopo desses experimentos limita-se a rede 5G somente. A Figura 21 ilustra o Core 5G implementado.

Figura 21 – Modelo de Core implementado para o experimento.



Fonte: do autor.

Realizou-se o cadastro das informações identificadoras do dispositivo de usuário no Core por meio da interface Web. As informações cadastradas foram: PLMN (*Public Land Mobile Network*), SUPI (*Subscription Permanent Identifier*)/IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*), método de autenticação, chave K, tipo de código de operadora e código de operadora.

Para simular o registro e tráfego de dados de um dispositivo de usuário no Core, adaptou-se alguns algoritmos de testes fornecidos pelo pacote free5GC com o intuito de prover melhor ambiente de coleta e análise de dados. Tal algoritmo realiza o registro de um UE simulado no Core 5G, através de um acesso via rádio também simulado, e então executa um procedimento de *ping* para verificar se o túnel foi corretamente estabelecido entre o dispositivo e o UPF. Após o *ping* o UE terá seu registro excluído da rede. É esperado que o acesso via rádio



simulado se comunique efetivamente com o Core e permita a criação da interface N1 que liga o dispositivo de usuário (UE) diretamente ao AMF.

Para que o registro do UE seja concluído, o AMF deverá interagir com as demais funções de rede (NFs), requisitando informações do NRF quando necessário, e o SMF deverá verificar a identidade do dispositivo e atribuir uma sessão PDU para a conexão, alocando o IP da sub-rede configurada. Ao final, espera-se que o túnel entre o dispositivo de usuário e o UPF seja estabelecido com êxito e que o primeiro tenha acesso a rede de dados (DN) desejada (sub-rede 60.60.0.0/24). Uma interface de *loopback* foi configurada no *container* do UPF com IP 60.0.0.101 e servirá para o teste de *ping*.

O monitoramento do tráfego de pacotes entre as funções de rede, o acesso via rádio e o dispositivo de usuário foi realizado através do *software* Wireshark, que captura todos os pacotes de uma interface de rede escolhida e permite visualizar informações como IP de origem, IP de destino, porta, tamanho, protocolo, tempo, entre outras. Nesse experimento, escolheu-se para monitoramento a interface de rede criada pelo *software* Docker Compose que gerenciava os endereços IPs das funções de rede (NFs). Um filtro contendo os protocolos desejados foi aplicado para que a visualização dos pacotes fosse mais direta, sendo inserido da seguinte forma no programa: *pfcp||icmp||gtp||sctp||http2.header*. No caso do protocolo HTTP2, apenas os *headers* das mensagens serão exibidos para simplificar o filtro. Também, optou-se por configurar *hostnames* para os IPs das funções de rede de modo a facilitar a identificação na análise dos pacotes.

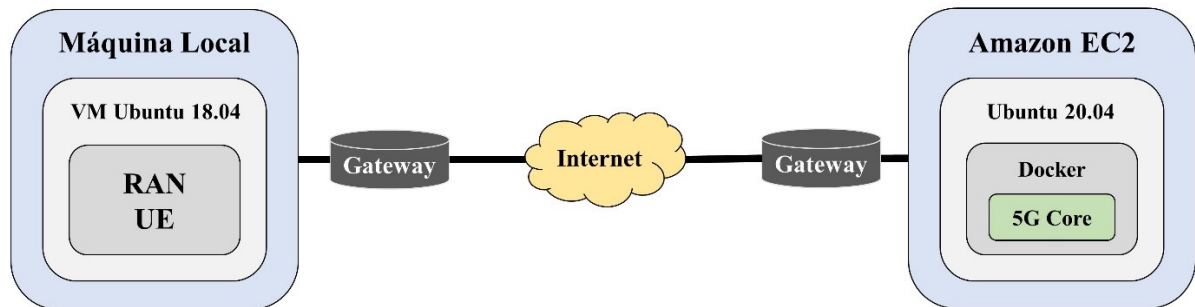
Finalmente, após os testes locais, as configurações e a imagem base para os *containers* foram transferidas para a plataforma de computação em nuvem da empresa Amazon, chamada de EC2 (*Elastic Compute Cloud*). A instância alocada para o experimento foi a t3a.small, que possui 2 GB de RAM e 2 núcleos de processamento virtuais. Diferentemente da máquina utilizada nos testes locais, o sistema escolhido foi o Ubuntu 20.04, pois possui atualizações mais recentes e customizações específicas que o tornam mais eficiente nesse ambiente. Na nuvem, é possível disponibilizar globalmente o acesso ao Core, podendo ser acessado por qualquer estação de acesso via rádio e dispositivo de usuário na Internet, desde que tenham sido previamente habilitados nas configurações.

Para comprovar-se a eficácia da plataforma em nuvem, conectou-se o RAN e UE simulados (instalados na máquina virtual local) no Core 5G remoto, realizando-se os mesmos procedimentos dos testes anteriores e coletando-se o tráfego dos pacotes. Ressalta-se que as portas 2152 e 38412, utilizadas pelos protocolos de transporte UDP e SCTP, respectivamente,

foram abertas na nuvem, enquanto que na rede local foi habilitado o direcionamento da porta 2152 (UDP) apenas. O protocolo de encapsulamento GTPU-U se beneficia da porta 2152 e da pilha UDP/IP para estabelecimento do túnel e transporte de dados do usuário.

Novamente, espera-se que o RAN e UE simulados possam interagir com as funções de rede e que o *ping* entre o UE (instalado localmente) e a rede de dados (DN) remota seja concluído com êxito. A Figura 22 mostra como a implementação em nuvem foi testada.

Figura 22– Arquitetura dos testes de comunicação em nuvem.

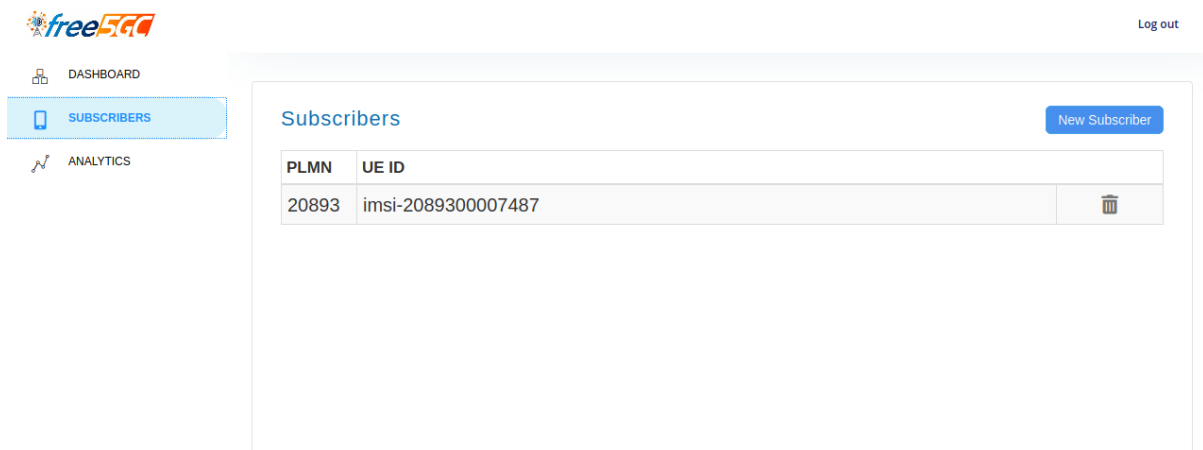


Fonte: do autor.

## 4 RESULTADOS

Após a configuração do pacote free5GC no *software* Docker Compose, realizou-se alguns testes para verificar a funcionalidade da plataforma implementada a partir da execução de comandos como *docker-compose up* e *docker-compose down*. Conforme o esperado, a ferramenta foi capaz de iniciar e encerrar todos os *containers* de forma centralizada, não apresentando nenhuma falha nos arquivos de *log* das funções de rede (NFs) e permitindo o acesso à interface Web pelo endereço *http://<ip\_local>:5000/*. A Figura 23 mostra a página Web de configurações do Core 5G implementado.

Figura 23 - Página Web de configurações do Core 5G.



Fonte: do autor.

Durante o procedimento de início dos *containers*, capturou-se o tráfego entre as funções de rede. O Quadro 2 mostra os pacotes filtrados.

Nota-se que, de acordo com o Quadro 2, todas as funções de rede, com exceção do UPF, se registraram no NRF assim que iniciaram, disponibilizando os seus serviços para a função que deles precisar. O UPF, por sua vez, foi cadastrado no SMF através do protocolo PFCP (pacotes 234 e 235). Por fim, é possível notar ainda que o PCF realiza consultas ao NRF para obter o endereço do AMF (pacote 625) e o endereço do UDR (pacote 694) e utiliza o endereço retornado pertencente ao AMF para realizar um registro de serviço (pacote 669).

Quadro 2 – Pacotes capturados durante procedimento de início da plataforma.

ID	Origem	Destino	Protocolo	Tamanho	Informações
85	UDM	NRF	HTTP2	206	HEADERS[3]: PUT /nnrf-nfm/v1/nf-instances/66c0732d-97bd-4efb-b56c-708f81b307c6
151	NRF	UDM	HTTP2	191	HEADERS[3]: 201 Created
168	SMF	NRF	HTTP2	206	HEADERS[3]: PUT /nnrf-nfm/v1/nf-instances/002de59f-6eaa-41f4-9ee8-8f63b9da5deb
224	NRF	SMF	HTTP2	190	HEADERS[3]: 201 Created
234	SMF	UPF	PFCP	72	PFCP Association Setup Request
235	UPF	SMF	PFCP	91	PFCP Association Setup Response
250	AUSF	NRF	HTTP2	206	HEADERS[3]: PUT /nnrf-nfm/v1/nf-instances/690591d6-cd6d-48db-877d-b3964938850a
307	NRF	AUSF	HTTP2	191	HEADERS[3]: 201 Created
320	NSSF	NRF	HTTP2	212	HEADERS[3]: PUT /nnrf-nfm/v1/nf-instances/548a8400-0fbf-49ab-bc14-541077b8f59a
381	NRF	NSSF	HTTP2	190	HEADERS[3]: 201 Created
398	UDR	NRF	HTTP2	206	HEADERS[3]: PUT /nnrf-nfm/v1/nf-instances/1d8e60ff-8ed4-4632-b585-ddae6b7ca6d6
441	NRF	UDR	HTTP2	191	HEADERS[3]: 201 Created
459	AMF	NRF	HTTP2	205	HEADERS[3]: PUT /nnrf-nfm/v1/nf-instances/8890def1-1e92-4289-9eb4-00c56ef3f790
533	NRF	AMF	HTTP2	190	HEADERS[3]: 201 Created
572	PCF	NRF	HTTP2	205	HEADERS[3]: PUT /nnrf-nfm/v1/nf-instances/1e0ae5a8-a437-4309-bf05-6491ddeb7ce9
621	NRF	PCF	HTTP2	190	HEADERS[3]: 201 Created
625	PCF	NRF	HTTP2	134	HEADERS[5]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=PCF&target-nf-type=AMF
640	NRF	PCF	HTTP2	78	HEADERS[5]: 200 OK
669	PCF	AMF	HTTP2	163	HEADERS[3]: POST /namf-comm/v1/subscriptions
681	AMF	PCF	HTTP2	165	HEADERS[3]: 201 Created
694	PCF	NRF	HTTP2	206	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=PCF&service-names=nudr-dr&target-nf-type=UDR
708	NRF	PCF	HTTP2	124	HEADERS[3]: 200 OK

Fonte: do autor.

O Quadro 3 exibe os pacotes capturados ao simular o registro do dispositivo de usuário no Core 5G. Ressalta-se que o UE não aparece diretamente nas colunas de origem e destino, pois o acesso (RAN) é a parte que intermedia a conexão entre o Core e o dispositivo de usuário.

De acordo com o Quadro 3, pode-se visualizar que até o pacote 32 estão sendo realizados os procedimentos de configuração da comunicação entre RAN e AMF. A partir do

pacote 33, é iniciado o registro propriamente dito. Até o final do procedimento de registro, as funções de rede do Core 5G interagem entre si para realizar a autenticação (início e término nos pacotes 39 e 359, respectivamente), registro e obtenção dos dados de inscrição no UDM (início e término nos pacotes 365 e 997, respectivamente), atualização das políticas do PCF (início e término nos pacotes 1020 e 1204, respectivamente) e, finalmente, a conclusão do registro (a partir do pacote 1212 até o pacote 1217).

Quadro 3 – Procedimento de registro.

ID	Origem	Destino	Protocolo	Tamanho	Informações
23	RAN	AMF	SCTP	82	INIT
24	AMF	RAN	SCTP	306	INIT_ACK
25	RAN	AMF	SCTP	278	COOKIE_ECHO
26	AMF	RAN	SCTP	50	COOKIE_ACK
27	RAN	AMF	NGAP	122	NGSetupRequest
28	AMF	RAN	SCTP	62	SACK
31	AMF	RAN	NGAP	118	NGSetupResponse
32	RAN	AMF	SCTP	62	SACK
33	RAN	AMF	NGAP/NAS-5GS	142	InitialUEMessage, Registration request
39	AMF	NRF	HTTP2	190	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=AMF&target-nf-type=AUSF
57	NRF	AMF	HTTP2	124	HEADERS[3]: 200 OK
71	AMF	RAN	SCTP	62	SACK
83	AMF	AUSF	HTTP2	193	HEADERS[3]: POST /nausf-auth/v1/ue-authentications
102	AUSF	NRF	HTTP2	208	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=AUSF&service-names=nudm-ueau&target-nf-type=UDM
126	NRF	AUSF	HTTP2	124	HEADERS[3]: 200 OK
163	AUSF	UDM	HTTP2	202	HEADERS[3]: POST /nudm-ueau/v1/suci-0-208-93-0-0-0-00007487/security-information/generate-auth-data
188	UDM	NRF	HTTP2	190	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=UDM&target-nf-type=UDR
200	NRF	UDM	HTTP2	124	HEADERS[3]: 200 OK
238	UDM	UDR	HTTP2	206	HEADERS[3]: GET /nudr-dr/v1/subscription-data/imsi-2089300007487/authentication-data/authentication-subscription
261	UDR	UDM	HTTP2	129	HEADERS[3]: 200 OK
265	UDM	AUSF	HTTP2	129	HEADERS[3]: 200 OK
269	AUSF	AMF	HTTP2	190	HEADERS[3]: 201 Created
275	AMF	RAN	NGAP/NAS-5GS	130	DownlinkNASTransport, Authentication request
276	RAN	AMF	NGAP/NAS-5GS	142	UplinkNASTransport, Authentication response
286	AMF	AUSF	HTTP2	206	HEADERS[3]: PUT /nausf-auth/v1/ue-authentications/suci-0-208-93-0-0-0-00007487/5g-aka-confirmation
305	AUSF	UDM	HTTP2	183	HEADERS[3]: POST /nudm-ueau/v1/suci-0-208-93-0-0-0-00007487/auth-events
317	UDM	UDR	HTTP2	225	HEADERS[3]: PUT /nudr-dr/v1/subscription-data/suci-0-208-93-0-0-0-00007487/authentication-data/authentication-status
342	UDR	UDM	HTTP2	124	HEADERS[3]: 204 No Content
344	UDM	AUSF	HTTP2	130	HEADERS[3]: 201 Created

352	AUSF	AMF	HTTP2	128	HEADERS[3]: 200 OK
358	AMF	RAN	NGAP/NAS-5GS	130	DownlinkNASTransport
359	RAN	AMF	NGAP/NAS-5GS	178	UplinkNASTransport
365	AMF	NRF	HTTP2	206	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=AMF&supi=imsi-2089300007487&target-nf-type=UDM
392	AMF	RAN	SCTP	62	SACK
393	NRF	AMF	HTTP2	124	HEADERS[3]: 200 OK
428	AMF	UDM	HTTP2	177	HEADERS[3]: GET /nudm-sdm/v1/imsi-2089300007487/nssai?plmn-id=20893
439	UDM	UDR	HTTP2	210	HEADERS[3]: GET /nudr-dr/v1/subscription-data/imsi-2089300007487/20893/provisioned-data/am-data?supported-features=
456	UDR	UDM	HTTP2	129	HEADERS[3]: 200 OK
462	UDM	AMF	HTTP2	129	HEADERS[3]: 200 OK
471	AMF	NRF	HTTP2	206	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=AMF&supi=imsi-2089300007487&target-nf-type=UDM
508	NRF	AMF	HTTP2	124	HEADERS[3]: 200 OK
554	AMF	UDM	HTTP2	192	HEADERS[3]: PUT /nudm-uecm/v1/imsi-2089300007487/registrations/amf-3gpp-access
564	UDM	NRF	HTTP2	190	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=UDM&target-nf-type=UDR
596	NRF	UDM	HTTP2	124	HEADERS[3]: 200 OK
634	UDM	UDR	HTTP2	209	HEADERS[3]: PUT /nudr-dr/v1/subscription-data/imsi-2089300007487/context-data/amf-3gpp-access
652	UDR	UDM	HTTP2	124	HEADERS[3]: 204 No Content
654	UDM	AMF	HTTP2	188	HEADERS[3]: 201 Created
685	AMF	UDM	HTTP2	179	HEADERS[3]: GET /nudm-sdm/v1/imsi-2089300007487/am-data?plmn-id=20893
692	UDM	UDR	HTTP2	210	HEADERS[3]: GET /nudr-dr/v1/subscription-data/imsi-2089300007487/20893/provisioned-data/am-data?supported-features=
710	UDR	UDM	HTTP2	129	HEADERS[3]: 200 OK
714	UDM	AMF	HTTP2	129	HEADERS[3]: 200 OK
762	AMF	UDM	HTTP2	184	HEADERS[3]: GET /nudm-sdm/v1/imsi-2089300007487/smf-select-data?plmn-id=20893
769	UDM	NRF	HTTP2	190	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=UDM&target-nf-type=UDR
789	NRF	UDM	HTTP2	124	HEADERS[3]: 200 OK
812	UDM	UDR	HTTP2	226	HEADERS[3]: GET /nudr-dr/v1/subscription-data/imsi-2089300007487/20893/provisioned-data/smf-selection-subscription-data?supported-features=
824	UDR	UDM	HTTP2	128	HEADERS[3]: 200 OK
828	UDM	AMF	HTTP2	128	HEADERS[3]: 200 OK
841	AMF	UDM	HTTP2	178	HEADERS[3]: GET /nudm-sdm/v1/imsi-2089300007487/ue-context-in-smf-data
856	UDM	NRF	HTTP2	190	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=UDM&target-nf-type=UDR
874	NRF	UDM	HTTP2	124	HEADERS[3]: 200 OK
900	UDM	UDR	HTTP2	210	HEADERS[3]: GET /nudr-dr/v1/subscription-data/imsi-2089300007487/context-data/smf-registrations?supported-features=
910	UDR	UDM	HTTP2	127	HEADERS[3]: 200 OK
916	UDM	AMF	HTTP2	127	HEADERS[3]: 200 OK
929	AMF	UDM	HTTP2	179	HEADERS[3]: POST /nudm-sdm/v1/imsi-2089300007487/sdm-subscriptions
944	UDM	NRF	HTTP2	190	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=UDM&target-nf-type=UDR
958	NRF	UDM	HTTP2	124	HEADERS[3]: 200 OK
981	UDM	UDR	HTTP2	199	HEADERS[3]: POST /nudr-dr/v1/subscription-data/imsi-2089300007487/context-data/sdm-subscriptions

993	UDR	UDM	HTTP2	201	HEADERS[3]: 201 Created
997	UDM	AMF	HTTP2	131	HEADERS[3]: 201 Created
1020	AMF	NRF	HTTP2	206	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=AMF&supi=imsi-2089300007487&target-nf-type=PCF
1055	NRF	AMF	HTTP2	124	HEADERS[3]: 200 OK
1105	AMF	PCF	HTTP2	170	HEADERS[3]: POST /npcf-am-policy-control/v1/policies
1122	PCF	NRF	HTTP2	190	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=PCF&target-nf-type=UDR
1151	NRF	PCF	HTTP2	124	HEADERS[3]: 200 OK
1191	PCF	UDR	HTTP2	178	HEADERS[3]: GET /nudr-dr/v1/policy-data/ues/imsi-2089300007487/am-data
1200	UDR	PCF	HTTP2	128	HEADERS[3]: 200 OK
1204	PCF	AMF	HTTP2	184	HEADERS[3]: 201 Created
1212	AMF	RAN	NGAP/NAS-5GS	234	InitialContextSetupRequest
1213	RAN	AMF	NGAP	98	InitialContextSetupResponse
1215	AMF	RAN	SCTP	62	SACK
1216	RAN	AMF	NGAP/NAS-5GS	118	UplinkNASTransport
1217	AMF	RAN	SCTP	62	SACK

Fonte: do autor.

Com o dispositivo de usuário registrado no Core 5G, foi possível obter a sessão PDU para estabelecimento do túnel GTP-U entre UE e UPF e realizar um *ping* para aferição do funcionamento da conexão. O Quadro 4 exibe o tráfego capturado durante tais ações.

Analisando-se o Quadro 4, percebe-se que, logo após o dispositivo de usuário iniciar o processo de obtenção da sessão PDU (pacote 1218), o AMF consulta o NSSF (pacote 1283) para verificar qual NRF tem condições de servir o S-NSSAI desejado. Apesar de estarem apenas expostos os *headers* das mensagens HTTP2, analisou-se separadamente o retorno enviado pelo NSSF ao AMF, que contém o seguinte texto: `{"nsiInformation":{"nrfId":"http://NRF:29510/nnrf-nfm/v1/nf-instances","nsiId":"22"}}`.

Como esperado, o NSSF retornou o endereço do NRF configurado para servir as funções de rede desse experimento.

A partir do pacote 1306, o AMF solicita ao SMF a criação de uma nova sessão PDU; o SMF interage com o UDM, PCF e UPF para obter as configurações e o IP que serão atribuídos à sessão; o AMF retorna as informações da sessão PDU para o acesso (RAN), que configura a sessão junto ao dispositivo de usuário e retorna para o AMF as informações do ponto final do túnel GTP-U (pacotes 1685 e 1688, respectivamente), estabelecendo o caminho de dados *up-link*; por fim, o AMF envia as informações oriundas do acesso (RAN) para o SMF (pacote 1694), que estabelece, junto ao UPF, o ponto final do túnel GTP-U para o *down-link* (pacotes 1702 e 1709).

O pacote 1750 mostra a tentativa de *ping*, através do túnel GTP-U, entre o UE (IP 60.0.0.1) e uma interface de *loopback* no UPF (60.0.0.101). A tentativa foi bem sucedida e a resposta pode ser visualizada no pacote 1751, comprovando a eficácia do sistema.

Quadro 4 – Procedimento de obtenção da sessão PDU e teste de *ping*.

ID	Origem	Destino	Protocolo	Tamanho	Informações
1218	RAN	AMF	NGAP/NA S-5GS	156	UplinkNASTransport
1239	AMF	NRF	HTTP2	190	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=AMF&target-nf-type=NSSF
1259	NRF	AMF	HTTP2	124	HEADERS[3]: 200 OK
1283	AMF	NSSF	HTTP2	320	HEADERS[3]: GET /nssf-nssselection/v1/network-slice-information?nf-id=31108abd-e19f-4779-b320-80a6043c9b00&nf-type=AMF&slice-info-request-for-pdu-session={"sNssai":{"sst":1,"sd":"010203"},"roamingIndication":"NON_ROAMING"}
1294	NSSF	AMF	HTTP2	128	HEADERS[3]: 200 OK
1300	AMF	RAN	SCTP	62	SACK
1306	AMF	NRF	HTTP2	312	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?dnn=internet&requester-nf-type=AMF&service-names=nsmf-pdusession&snssai={"sst":1,"sd":"010203"}&target-nf-type=SMF&target-plmn-list={"mcc":"208","mnc":"93"}
1326	NRF	AMF	HTTP2	124	HEADERS[3]: 200 OK
1361	AMF	SMF	HTTP2	221	HEADERS[3]: POST /nsmf-pdusession/v1/sm-contexts
1380	SMF	NRF	HTTP2	190	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=SMF&target-nf-type=UDM
1404	NRF	SMF	HTTP2	124	HEADERS[3]: 200 OK
1443	SMF	UDM	HTTP2	229	HEADERS[3]: GET /nudm-sdm/v1/imsi-2089300007487/sm-data?dnn=internet&plmn-id=20893&single-nssai={"sst":1,"sd":"010203"}
1450	UDM	UDR	HTTP2	237	HEADERS[3]: GET /nudr-dr/v1/subscription-data/imsi-2089300007487/20893/provisioned-data/sm-data?single-nssai={"sst":1,"sd":"010203"}
1466	UDR	UDM	HTTP2	129	HEADERS[3]: 200 OK
1470	UDM	SMF	HTTP2	129	HEADERS[3]: 200 OK
1483	SMF	NRF	HTTP2	190	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=SMF&target-nf-type=PCF
1529	NRF	SMF	HTTP2	124	HEADERS[3]: 200 OK
1568	SMF	PCF	HTTP2	171	HEADERS[3]: POST /npcf-smpolicycontrol/v1/sm-policies
1591	PCF	UDR	HTTP2	225	HEADERS[3]: GET /nudr-dr/v1/policy-data/ues/imsi-2089300007487/sm-data?dnn=internet&snssai={"sst":1,"sd":"010203"}
1607	UDR	PCF	HTTP2	128	HEADERS[3]: 200 OK
1613	PCF	SMF	HTTP2	186	HEADERS[3]: 201 Created
1617	SMF	UPF	PFCP	247	PFCP Session Establishment Request
1619	SMF	AMF	HTTP2	209	HEADERS[3]: 201 Created
1632	SMF	NRF	HTTP2	231	HEADERS[3]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-nf-type=SMF&target-nf-instance-id=31108abd-e19f-4779-b320-80a6043c9b00&target-nf-type=AMF
1646	NRF	SMF	HTTP2	129	HEADERS[3]: 200 OK
1652	UPF	SMF	PFCP	105	PFCP Session Establishment Response
1658	SMF	AMF	HTTP2	240	HEADERS[3]: POST /namf-comm/v1/ue-contexts/imsi-2089300007487/n1-n2-messages
1681	AMF	SMF	HTTP2	128	HEADERS[3]: 200 OK



1685	AMF	RAN	NGAP/NA S-5GS	174	PDUSessionResourceSetupRequest
1688	RAN	AMF	NGAP	118	PDUSessionResourceSetupResponse
1694	AMF	SMF	HTTP2	261	HEADERS[3]: POST /nsmf-pdusession/v1/sm-contexts/urn:uuid:6e4f3dfe-ac46-4a87-9494-7d77d51b6c72/modify
1702	SMF	UPF	PFCP	176	PFCP Session Modification Request
1709	UPF	SMF	PFCP	63	PFCP Session Modification Response
1710	SMF	AMF	HTTP2	172	HEADERS[3]: 200 OK
1722	AMF	RAN	SCTP	62	SACK
1750	60.60.0.1	60.60.0.101	GTP <ICMP>	130	Echo (ping) request id=0x306a, seq=1/256, ttl=64 (reply in 1751)
1751	60.60.0.101	60.60.0.1	GTP <ICMP>	98	Echo (ping) reply id=0x306a, seq=1/256, ttl=64 (request in 1750)

Fonte: do autor.

As mensagens de exclusão de registro do UE no Core estão expostas no Quadro 5. O dispositivo de usuário solicita ao AMF sua retirada da rede (pacote 1797); o AMF requer ao SMF a liberação da sessão PDU (pacote 1804); o SMF informa o UPF de que a sessão foi liberada (pacote 1816); o AMF libera as políticas de acesso e mobilidade associadas ao PCF (pacote 1831); o AMF retorna para o UE o aceite da exclusão de registro (pacote 1839); o AMF solicita que o acesso (RAN) libere a interface N2 com o UE (pacote 1840); o RAN responde com a confirmação da liberação (pacote 1841). Os três últimos pacotes do Quadro 5 mostram o encerramento da conexão entre RAN e AMF.

Quadro 5 – Procedimento de exclusão de registro.

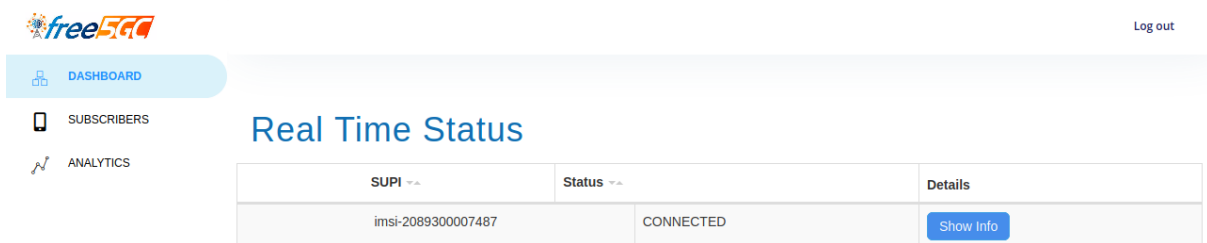
ID	Origem	Destino	Protocolo	Tamanho	Informações
1797	RAN	AMF	NGAP/NA S-5GS	130	UplinkNASTransport
1798	AMF	RAN	SCTP	62	SACK
1804	AMF	SMF	HTTP2	211	HEADERS[3]: POST /nsmf-pdusession/v1/sm-contexts/urn:uuid:6e4f3dfe-ac46-4a87-9494-7d77d51b6c72/release
1816	SMF	UPF	PFCP	58	PFCP Session Deletion Request
1817	UPF	SMF	PFCP	63	PFCP Session Deletion Response
1818	SMF	AMF	HTTP2	100	HEADERS[3]: 204 No Content
1831	AMF	PCF	HTTP2	193	HEADERS[3]: DELETE /npcf-am-policy-control/v1/policies/imsi-2089300007487-1
1833	PCF	AMF	HTTP2	124	HEADERS[3]: 204 No Content
1839	AMF	RAN	NGAP/NA S-5GS	90	DownlinkNASTransport, Deregistration accept (UE originating)
1840	AMF	RAN	NGAP	98	UEContextReleaseCommand
1841	RAN	AMF	NGAP	118	UEContextReleaseComplete
1842	RAN	AMF	SCTP	54	SHUTDOWN
1843	AMF	RAN	SCTP	50	SHUTDOWN_ACK
1844	RAN	AMF	SCTP	50	SHUTDOWN_COMPLETE

Fonte: do autor.

Frisa-se que nos Quadros 3 e 4, em que havia necessidade de interação entre funções de rede que não conheciam os endereços dos outros elementos na rede, uma consulta prévia foi realizada ao NRF para obtenção do IP de destino desejado.

Ao registrar-se o dispositivo de usuário na rede e solicitar-se uma sessão PDU, pôde-se visualizar as informações do UE na interface Web. A Figura 24 mostra a lista de UEs registrados bem como o seu estado na rede, enquanto que as Figuras 25 e 26 mostram os detalhes relativos à conexão no AMF e SMF, respectivamente.

Figura 24 – Lista de UEs registrados na rede exibida pela interface Web.



SUPI ↕	Status ↕	Details
imsi-2089300007487	CONNECTED	Show Info

Fonte: do autor.

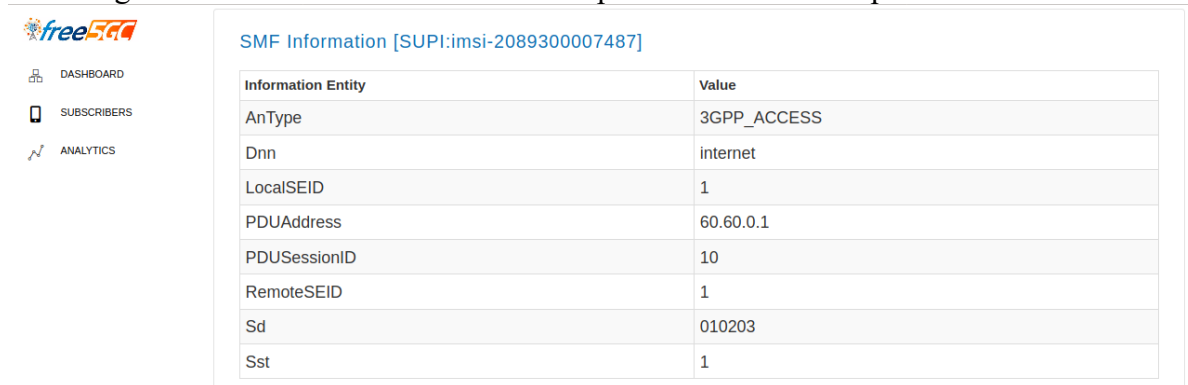
Figura 25 – Detalhes do UE retornados pelo AMF e exibidos pela interface Web.



Information Entity	Value
AccessType	3GPP_ACCESS
CmState	CONNECTED
Guti	20893cafe0000000001
Mcc	208
Mnc	93
Supi	imsi-2089300007487
Tac	000001
Dnn	internet
PduSessionId	10
Sd	010203
SmContextRef	urn:uuid:1edb1e58-fe37-4c1a-9aec-3c8c2e11bc25
Sst	1

Fonte: do autor.

Figura 26 – Detalhes do UE retornados pelo SMF e exibidos pela interface Web.



Information Entity	Value
AnType	3GPP_ACCESS
Dnn	internet
LocalSEID	1
PDUAddress	60.60.0.1
PDUSessionID	10
RemoteSEID	1
Sd	010203
Sst	1

Fonte: do autor.

Os mesmos testes foram realizados com o Core 5G instalado em um ambiente em nuvem e o RAN e UE instalados na máquina local, conforme descrito na seção Metodologia. Os resultados foram análogos aos dos testes locais e os pacotes capturados na máquina local, onde estavam o RAN e UE simulados, estão expostos no Quadro 6. Destaca-se que as páginas da interface Web foram acessadas por meio da Internet e, assim como nas Figuras 24, 25 e 26, foi possível observar o *status* do dispositivo de usuário no Core.

No Quadro 6, o IP 13.58.43.230 representa o IP público da nuvem onde o Core encontra-se instalado, enquanto que RAN é o *hostname* da máquina local. Os pacotes 42 e 43 mostram a requisição e a resposta, respectivamente, do procedimento de *ping*.

Quadro 6 – Tráfego de registro, estabelecimento de PDU, *ping* e de exclusão de registro.

ID	Origem	Destino	Protocolo	Tamanho	Informações
14	RAN	13.58.43.230	SCTP	82	INIT
15	13.58.43.230	RAN	SCTP	306	INIT_ACK
16	RAN	13.58.43.230	SCTP	278	COOKIE_ECHO
17	13.58.43.230	RAN	SCTP	60	COOKIE_ACK
18	RAN	13.58.43.230	NGAP	122	NGSetupRequest
19	13.58.43.230	RAN	SCTP	62	SACK
20	13.58.43.230	RAN	NGAP	118	NGSetupResponse
21	RAN	13.58.43.230	SCTP	62	SACK
22	RAN	13.58.43.230	NGAP/NAS-5GS	142	InitialUEMessage, Registration request
23	13.58.43.230	RAN	SCTP	62	SACK
24	13.58.43.230	RAN	NGAP/NAS-5GS	130	DownlinkNASTransport, Authentication request
25	RAN	13.58.43.230	NGAP/NAS-5GS	142	UplinkNASTransport, Authentication response
26	13.58.43.230	RAN	SCTP	62	SACK
27	13.58.43.230	RAN	NGAP/NAS-5GS	114	DownlinkNASTransport
28	RAN	13.58.43.230	NGAP/NAS-5GS	178	UplinkNASTransport

29	13.58.43.230	RAN	SCTP	62	SACK
32	13.58.43.230	RAN	NGAP/NAS-5GS	234	InitialContextSetupRequest
33	RAN	13.58.43.230	NGAP	98	InitialContextSetupResponse
34	13.58.43.230	RAN	SCTP	62	SACK
35	RAN	13.58.43.230	NGAP/NAS-5GS	118	UplinkNASTransport
36	13.58.43.230	RAN	SCTP	62	SACK
37	RAN	13.58.43.230	NGAP/NAS-5GS	146	UplinkNASTransport
38	13.58.43.230	RAN	SCTP	62	SACK
39	13.58.43.230	RAN	NGAP/NAS-5GS	174	PDUSessionResourceSetupRequest
40	RAN	13.58.43.230	NGAP	118	PDUSessionResourceSetupResponse
41	13.58.43.230	RAN	SCTP	62	SACK
42	60.60.0.1	60.60.0.101	GTP <ICMP>	130	Echo (ping) request id=0x306a, seq=1/256, ttl=64 (reply in 43)
43	60.60.0.101	60.60.0.1	GTP <ICMP>	98	Echo (ping) reply id=0x306a, seq=1/256, ttl=64 (request in 42)
44	RAN	13.58.43.230	NGAP/NAS-5GS	130	UplinkNASTransport
45	13.58.43.230	RAN	SCTP	62	SACK
46	13.58.43.230	RAN	NGAP/NAS-5GS	90	DownlinkNASTransport, Deregistration accept (UE originating)
47	13.58.43.230	RAN	NGAP	98	UEContextReleaseCommand
48	RAN	13.58.43.230	SCTP	62	SACK
49	RAN	13.58.43.230	NGAP	118	UEContextReleaseComplete
50	RAN	13.58.43.230	SCTP	54	SHUTDOWN
51	13.58.43.230	RAN	SCTP	60	SHUTDOWN_ACK
52	RAN	13.58.43.230	SCTP	50	SHUTDOWN_COMPLETE

Fonte: do autor.

## 5 CONCLUSÃO

Em vista dos resultados obtidos, conclui-se que os objetivos foram atingidos com êxito, culminando em uma solução flexível, escalável, eficaz e preparada para implementação em uma infraestrutura em nuvem.

Na última parte do experimento (testes em nuvem) foi possível, ainda, disponibilizar a plataforma desenvolvida universalmente, tornando os serviços de Core acessíveis para qualquer indivíduo, com Internet, que tenha interesse em usufruí-los.

O gerenciamento centralizado de *containers* demonstra que é possível fazer a integração de funções de rede em apenas alguns segundos, independentemente dos demais componentes da rede, comprovando a eficácia da arquitetura de núcleo 5G baseada em micro serviços.

A partir dessa proposta, aumenta-se o acesso aos serviços de Core 5G, possibilitando que indivíduos, empresas e outras instituições possam usufruir desses recursos de forma simples, econômica e rápida comparada às soluções existentes. O novo paradigma, explorado por esse trabalho, visa acelerar a transformação do modelo de negócios vigente para um estruturado em serviços de rede e plataforma como serviço, que englobam redes virtuais privadas, QoS, segurança, alocação dinâmica de banda e baixa latência.

Futuras pesquisas podem ser realizadas objetivando a melhoria da interface Web do pacote free5GC (incluindo suporte a configuração das NFs remotamente), a criação de um simulador avançado de RAN e UE, a integração da função de rede N3IWF para conexão de redes não 3GPP ao Core 5G, a integração do orquestrador free5gmano ao Core para gerenciamento de fatias de rede, testes com o recurso de UL CL para redirecionamento do tráfego, instalação de funções de rede em diferentes máquinas para testes de comunicação, testes de latência entre o acesso e o Core, testes com diferentes níveis de QoS, testes de mobilidade, testes de *paging* e testes na camada de aplicação.

## REFERÊNCIAS

- 1 ROMMER, S. et al. **5G Core Networks: Powering Digitalization**. [S.l.]: Academic Press, 2019.
- 2 PENTTINEN, J. **5G Explained: Security and Deployment of Advanced Mobile Communications**. 1. ed. Hoboken, NJ, EUA: Wiley, 2019.
- 3 DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. **5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology**. 2. ed. [S.l.]: Academic Press, 2020.
- 4 CHANDRAMOULI, D.; LIEBHART, R.; PIRSKANEN, J. **5G for the Connected World**. [S.l.]: Wiley, 2019.
- 5 FIELDING, R. **Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures**. 2000. Dissertação (Doutorado) – University of California, Irvine. Disponível em: <[https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/fielding\\_dissertation.pdf](https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/fielding_dissertation.pdf)>. Acesso em: 7 jul. 2020.
- 6 SCHOLL, B.; SWANSON, T.; JAUSOVEC, P. **Cloud Native: Using Containers, Functions, and Data to Build Next-Generation Applications**. 1. ed. Sebastopol, CA, EUA: O'Reilly Media, 2019.
- 7 NATIONAL CHIAO TUNG UNIVERSITY. **free5GC: open-source 5GC**. Página Inicial. Disponível em: <<https://www.free5gc.org>>. Acesso em: 7 jul. 2020.
- 8 NATIONAL TAICHUNG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. **Free5Gmano**. Repositório. Disponível em: <<https://github.com/free5gmano/free5gmano>>. Acesso em: 7 jul. 2020.