

Trabalho Prático 3 - Grupo 4

João Abreu, *pg55895*, Luís Vilas, *pg57888*, e Ricardo Pereira, *pg56001*

Index Terms

Free5GC, 5G CORE, UERANSIM, UE, gNB, NFV, SBA, UPF, AMF, SMF, Curl, Wget, Traceroute.

I. INTRODUÇÃO

Este relatório foi desenvolvido no âmbito do Trabalho Prático 3 da unidade curricular de Redes Fixas e Móveis do Mestrado em Engenharia Informática da Universidade do Minho. O objetivo deste trabalho é compreender, de forma prática, o funcionamento de uma rede móvel 5G através da análise e experimentação com uma implementação do core 5G open-source, nomeadamente o Free5GC.

Para simular o comportamento de dispositivos móveis e o acesso à rede de acesso rádio (RAN), foi utilizado o simulador UERANSIM, que emula tanto o UE (User Equipment) como a estação base 5G (gNodeB). A partir da simulação de ligações de dispositivos móveis (UEs) à rede, pretende-se entender o papel de cada função de rede (NF – Network Function) na gestão da mobilidade, autenticação, estabelecimento de sessões e encaminhamento de tráfego até à Internet.

Neste projeto, serão testadas duas abordagens distintas para a implementação da arquitetura 5G:

- 1) **Implementação monolítica:** todas as componentes da rede (UERANSIM, plano de controlo, UPF e DN) são executadas numa única máquina virtual (VM), permitindo validar a funcionalidade geral do sistema de forma simplificada.
- 2) **Implementação distribuída:** a rede é segmentada em duas VMs distintas:
 - uma VM dedicada ao **UERANSIM**, que simula o equipamento do utilizador (UE) e o gNodeB;
 - uma VM que executa o **plano de controlo** e o **UPF** (User Plane Function);

Esta segunda abordagem visa refletir uma topologia mais realista, tentando simular o comportamento real. Devido a problemas de interligação, não foi possível realizar a funcionalidade completa desta implementação.

II. INTRODUÇÃO À TECNOLOGIA 5G

O **5G** representa uma evolução significativa face ao **4G**, destacando-se pela introdução da **arquitetura baseada em serviços (SBA – Service-Based Architecture)**. Esta arquitetura assenta num *core* completamente novo — o **5G Core (5GC)** — concebido de forma modular, onde as funções de rede (*Network Functions* – NFs) comunicam entre si através de interfaces orientadas a serviços, utilizando protocolos modernos como HTTP/2 e JSON.

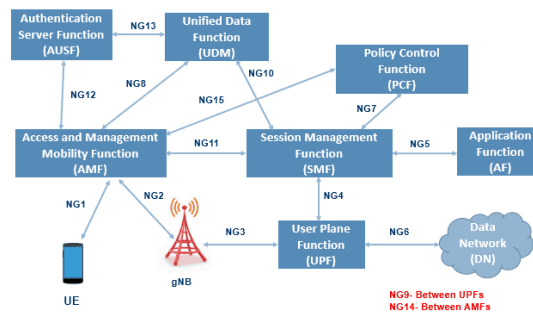


Fig. 1. Figura ilustrativa da representação da arquitectura de uma rede 5G. O UE, gNB, UPF e DN correspondem ao Data Plane, enquanto as funções AMF, AUSF, UDM, PCF, SMF e AF integram o plano de controlo

A. Componentes Principais

A arquitetura da rede 5G é composta por componentes essenciais, divididos em duas partes principais: o UERANSIM, que inclui o *gNodeB* e o *UE*, e o Núcleo 5G (*Core Network*).

UERANSIM:

- **gNodeB (gNB):** Estação base 5G que estabelece a ligação entre o equipamento do utilizador (UE) e a rede. A comunicação ocorre via a interface aérea (*Uu*), enquanto a interface **N2** é usada para o controlo (AMF) e a interface **N3** para o tráfego de dados com o núcleo (UPF).
- **Equipamento do Utilizador (UE):** São os dispositivos finais (ex.: smartphones) que se conectam ao gNodeB, estabelecendo a interface rádio com a rede 5G.

Núcleo 5G:

O núcleo 5G é dividido em dois planos funcionais principais: o **Plano de Controlo** e o **Plano de Dados**.

Plano de Controlo: Responsável pela gestão da mobilidade, autenticação e configuração de sessões. As funções principais incluem:

- **AMF** (Access and Mobility Management Function): Gestão de registo, autenticação e mobilidade do UE.
- **SMF** (Session Management Function): Estabelecimento e controlo das sessões PDU, coordenação com o UPF (User Plane Function).
- **AUSF** (Authentication Server Function): Função de autenticação do subscriber.
- **UDM** (Unified Data Management): Gestão centralizada dos dados do subscriber.
- **UDR** (User Data Repository): Repositório de dados do utilizador.
- **NRF** (Network Repository Function): Descoberta e registo das funções de rede.
- **PCF** (Policy Control Function): Aplicação de políticas de QoS.
- **NSSF** (Network Slice Selection Function): Seleção da fatia de rede adequada.
- **NEF** (Network Exposure Function): Exposição de serviços para interação com redes externas.

Plano de Dados: Responsável pelo encaminhamento eficiente do tráfego do utilizador. A função principal é:

- **UPF** (User Plane Function): Encaminha dados entre o gNodeB e a rede externa (ex.: Internet) via túneis GTP-U.

III. CONFIGURAÇÃO DOS SLICES

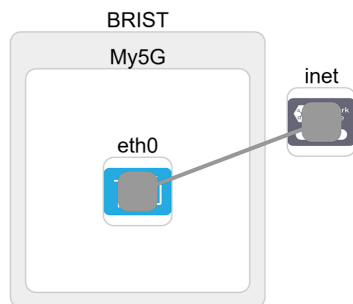


Fig. 2. Topologia monolítica constituída por apenas 1 VM. A VM contém todos os containers com as Funções e o UERANSIM

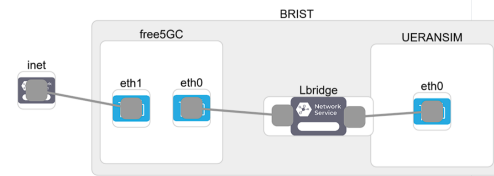


Fig. 3. Topologia Distribuída. Constituída por 2VMs interligadas pelo Lbridge. A VM free5GC tem uma segunda interface que está conectada à internet

No desenvolvimento deste trabalho prático foram construídos dois slices apresentados nas Figuras 2 e 3.

A. Versão Monolítica

A versão Monolítica, representada pela Figura 2, é constituída por apenas 1 VM (My5G) conectada com a internet através de uma conexão inet. Esta versão possuía os seguintes recursos:

- **CPU:** 16 cores
- **Memória RAM:** 32 GB
- **Armazenamento:** 200 GB de disco
- **Imagem:** Ubuntu 20
- **Interface de rede:** eth0 com suporte *SharedNIC* através do adaptador ConnectX-6
- **Serviço de rede:** FABNetv4 com endereço inet

B. Versão Distribuída

A versão Distribuída, representada pela Figura 3, é constituída por 2 VMs (free5GC e UERANSIM). A free5GC implementa as funções do core 5G, enquanto o UERANSIM simula a conexão dos dispositivos UE à rede.

VM free5GC:

- **CPU:** 16 cores
- **Memória RAM:** 32 GB
- **Armazenamento:** 200 GB de disco
- **Imagem:** Ubuntu 20
- **Interface de rede:** eth1 com suporte *SharedNIC* através do adaptador ConnectX-6
- **Interface de rede:** eth0 com suporte *Lbridge* para interligação com o eth0.
- **Serviço de rede:** FABNetv4 com endereço inet

VM UERANSIM:

- **CPU:** 4 cores
- **Memória RAM:** 16 GB
- **Armazenamento:** 100 GB de disco
- **Imagem:** Ubuntu 20
- **Interface de rede:** eth0 com suporte *Lbridge* para interligação com o eth0.

IV. CONFIGURAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO FREE5GC

A configuração do ambiente com o free5GC foi realizada utilizando o Docker Compose disponibilizado oficialmente pelo projeto.

Após a configuração dos slices, que foi descrita na secção III, podemos aceder à VM através do seguinte comando **ssh**, utilizando os ficheiros gerados no Jupyter Hub do Fabric e o endereço IP disponibilizados no portal do FABRIC:

```
ssh -i slice_key -F ssh_config ubuntu@<IP_VM>
```

- 1) **Pré-requisito 1: Instalação do Docker:** O Docker é necessário para a executar os Services do free5GC nos containers:

```
sudo apt install docker.io
```

- 2) **Pré-requisito 2: Instalação do Docker Compose (versão:2.24.5):** O Docker Compose permite realizar a orquestração dos múltiplos containers:

```
sudo curl -L "https://github.com/docker/compose/releases/download/v2.24.5/docker-compose-$(uname -s)-$(uname -m)" -o /usr/local/bin/docker-compose
sudo chmod +x /usr/local/bin/docker-compose
export PATH=$PATH:/usr/local/bin
```

- 3) **Instalação de outros Pré-requisitos adicionais** Algumas ferramentas de desenvolvimento que são ou poderão vir a ser necessárias:

```
sudo apt install git make gcc golang
```

- 4) **Pré-requisito 3 : Instalação do módulo gtp5g:** O gtp5g é um módulo do *kernel* necessário para o funcionamento do *UPF (User Plane Function)* no free5GC. Este módulo implementa o protocolo *GTP-U*, utilizado para encaminhar o tráfego de dados dos utilizadores na rede 5G. Foi desenvolvido para oferecer suporte completo ao *3GPP Release 16*, com um melhor desempenho e uma maior compatibilidade em comparação com o módulo gtp padrão do Linux.

```
git clone https://github.com/free5gc/gtp5g.git
cd gtp5g
make
sudo make install
sudo modprobe gtp5g
```

- 5) **Download do código do free5GC:** Fazer o git clone do repositório oficial do free5gc:

```
git clone https://github.com/free5gc/free5gc-compose.git
cd free5gc-compose
```

- 6) **Download das imagens Docker necessárias:**

```
sudo docker-compose pull
```

- 7) **Executar o free5GC:** Iniciar o Free5GC em segundo plano:

```
sudo docker-compose up -d
```

Ao executar o comando `docker-compose up`, o ficheiro de configuração `docker-compose.yaml` é interpretado, iniciando todos os serviços definidos. Cada serviço utiliza os ficheiros presentes na pasta `config` para aplicar as suas respetivas configurações.

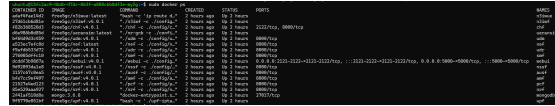


Fig. 4. Containers das NFs do Free5GC em execução após a inicialização com o comando `sudo docker compose up -d`

A. Criação de um subscriber (UE) com recurso ao WebUI

É necessário criar um cliente (UE) através do *container* associado ao WebUI. Para isso, deve ser estabelecido um túnel utilizando o seguinte comando num novo terminal:

```
ssh -i slice_key -F ssh_config -L 5000:localhost:5000 ubuntu@<IP_VM>
```

De seguida, no *browser*, aceder à url `http://localhost:5000/` e autenticar-se com as credenciais:

- **Username:** admin
- **Password:** free5gc

Na secção "*Subscribers*", criar um novo utilizador utilizando os parâmetros padrão (Tabela I, nos Anexos). O resultado final será como o apresentado na Figura 5. Este cliente será, então, guardado na base de dados mongo DB.

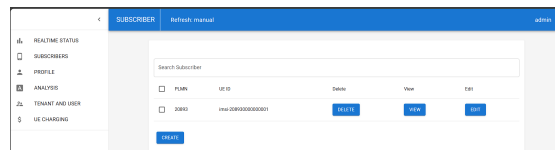


Fig. 5. Configuração no WebUI após a criação de um novo subscritor, exibindo os detalhes da sua configuração. Os logs desta configuração podem ser visualizados na Figura 35 nos anexos

B. Configuração e execução do UERANSIM

Após a criação e registo do UE e dos Containers com as Network Functions, podemos proceder à execução do UE dentro do container dedicado ao UERANSIM.

É importante salientar que, durante este processo, não foi necessária a configuração manual dos endereços IP do UE e do **gNodeB**. Estes parâmetros foram automaticamente configurados na inicialização dos containers na estrutura do `docker-compose.yaml`. O `gnbcfg.yaml` foi executado automaticamente durante a inicialização do container UERANSIM, procedendo à configuração e inicialização do **gNB** de forma transparente.

Para aceder aos Ficheiros de configuração do UE e gNB, é necessário o seguinte comando para aceder ao container UERANSIM descrito na Figura 6:

```
sudo docker exec -it ueransim /bin/bash
```

Componentes do UERANSIM

O **Binder** é uma ferramenta utilizada no UERANSIM para gerir a comunicação entre o UE e o **gNB** (estação base 5G), permitindo a simulação e o controlo de redes 5G.

```
ubuntu@15f72ac9-9b0b-470c-863f-a98cb68df3e-my5g:~$ sudo docker exec -it ueransim /bin/bash
root@d6e986b0d85d:/ueransim# ls
binder  config  nr-cli  nr-gnb  nr-ue
```

Fig. 6. Componentes do UERANSIM: Pasta com os configs gnbcfg.yaml e uecfg.yaml e os binários binder, nr-gnb e nr-ue

Binários nr-gnb e nr-ue

- **nr-gnb**: Binário que simula o **gNB**, a estação base 5G, utilizando as configurações do `gnbcfg.yaml`.
- **nr-ue**: Binário que simula o **UE**, o dispositivo do utilizador, utilizando as configurações do `uecfg.yaml`.

Estes binários são utilizados para simular a comunicação entre o **UE** e o **gNB** na rede 5G, e por conseguinte a internet (DN). Na Pasta config estão localizados os ficheiros de configuração do UE e do gNB, que são necessários para as suas conexões à rede 5G.

Ficheiros de configuração

gnbcfg.yaml

```
mcc: "208" # Mobile Country Code value
mnc: "93" # Mobile Network Code value (2 or 3 digits)
nci: "0x000000010" # NR Cell Identity (36-bit)
idLength: 32 # NR gNB ID length in bits [22...32]
tac: 1 # Tracking Area Code
linkIp: 127.0.0.1 # gNB's local IP address for Radio Link Simulation
ngapIp: gnb.free5gc.org # gNB's local IP address for N2 Interface
gtpIp: gnb.free5gc.org # gNB's local IP address for N3 Interface
# List of AMF address information
amfConfigs:
  - address: amf.free5gc.org
    port: 38412
# List of supported S-NSSAIs by this gNB
slices:
  - sst: 0x1
    sd: 0x010203
  - sst: 0x1
    sd: 0x112233
# Indicates whether or not SCTP stream number errors should be ignored.
ignoreStreamIds: true
```

No ficheiro `gnbcfg.yaml`, são definidos vários parâmetros essenciais para a comunicação do **gNB** com os restantes componentes da rede 5G. O parâmetro `linkIp` especifica o endereço IP local do gNB utilizado para simulação da ligação com o **UE**. O parâmetro `ngapIp` define o endereço IP do gNB utilizado para a interface N2, que estabelece a comunicação com o **AMF** para o registo e autenticação (Na versão distribuída teria que ser o IP da VM do free5GC).

Já o parâmetro `gtpIp` define o endereço IP utilizado para a interface N3, destinada ao plano de utilizador, permitindo a transmissão dos dados entre o gNB e o **UPF** com o protocolo GTP-U (GPRS Tunneling Protocol - User Plane). Por fim, a secção `amfConfigs` define uma lista de configurações onde o gNB pode encontrar o(s) AMF(s), especificando o endereço e a porta de comunicação (normalmente 38412) através de SCTP. Mais detalhes sobre cada parâmetro podem ser consultados na Tabela II dos Anexos.

uecfg.yaml

```
# IMSI number of the UE. IMSI = [MCC|MNC|MSISDN] (In total 15 digits)
supi: "imsi-208930000000001"
# Mobile Country Code value of HPLMN
mcc: "208"
# Mobile Network Code value of HPLMN (2 or 3 digits)
mnc: "93"
# Permanent subscription key
```

```

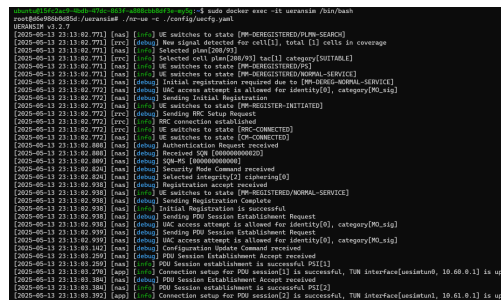
key: "8baf473f2f8fd09487cccbd7097c6862"
# Operator code (OP or OPC) of the UE
op: "8e27b6af0e692e750f32667a3b14605d"
# This value specifies the OP type and it can be either 'OP' or 'OPC'
opType: "OPC"
# Authentication Management Field (AMF) value
amf: "8000"
# IMEI number of the device. It is used if no SUPI is provided
imei: "356938035643803"
# IMEISV number of the device. It is used if no SUPI and IMEI is provided
imeiSv: "4370816125816151"
# List of gNB IP addresses for Radio Link Simulation
gnbSearchList:
- 127.0.0.1
- gnb.free5gc.org

```

Já o ficheiro `uecfg.yaml` define os parâmetros essenciais de identificação e autenticação do **UE** para o registo na rede 5G. O parâmetro `supi` corresponde ao identificador único do utilizador, derivado do IMSI (formado por MCC, MNC e MSISDN). Os campos `mcc` e `mnc` identificam a rede do operador. O campo `key` contém a chave de subscrição permanente, enquanto `op` e `opType` especificam o código do operador e o seu tipo (neste caso, OPC). O parâmetro `amf` representa um valor associado à gestão da autenticação. Os campos `imei` e `imeiSv` identificam o dispositivo em caso de ausência do SUPI. Por fim, `gnbSearchList` indica os endereços IP dos **gNodeBs** a contactar para simular a ligação rádio. Estas configurações tem que ser compatíveis com o subscriber guardado na base de dados do MongoDB. Mais detalhes sobre cada parâmetro podem ser consultados na Tabela III dos Anexos.

Com os restantes passos já concluídos, resta apenas executar o binário do **UE**, utilizando o seguinte comando para iniciar o processo:

```
./nr-ue -c ./config/uecfg.yaml
```



```

root@uecontainer:/usr/local/bin# ./nr-ue -c ./config/uecfg.yaml
5G-UE v3.2.0
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] UE switches to state [PM-REGISTERED/PM-REGISTERED]
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] New signal detected for cell(1), total (1) cells in coverage
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] Selected plmn(000000)
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] Selected cell plmn(000000) tac(1) category(SUITABLE)
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] UE switches to state [PM-REGISTERED/PM-REGISTERED]
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] UE switches to state [PM-REGISTERED/NORMAL-SERVICE]
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] Initial registration request received for [PM-REGISTERED-NORMAL-SERVICE]
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] RRC attach attempt is allowed for Identity(0), category(PM-REG)
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] Sending Initial Registration
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] UE switches to state [PM-REGISTER-INITIATED]
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] Sending RRC Setup Request
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] RRC connection established
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] UE switches to state [RRC-CONNECTED]
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] UE switches to state [RRC-CONNECTED]
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] Registration Request received
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] Received SQN (0000000000000000)
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] SQN # (0000000000000000)
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] Security Mode Command received
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] Selected integrity(2) ciphering(0)
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] Registration accept received
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] UE switches to state [PM-REGISTERED/NORMAL-SERVICE]
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] Sending Registration Complete
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] Sending PDU Session Establishment Request
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] RRC attach attempt is allowed for Identity(0), category(PM-REG)
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] Sending PDU Session Establishment Request
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] RRC attach attempt is allowed for Identity(0), category(PM-REG)
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] Configuration Update Command received
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] PDU Session Establishment Accept received
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] PDU Session establishment is successful, PDI(1)
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] Connection setup for PDU session(1) is successful, TUN interface(constant, 10.60.0.1) is up
[2025-05-11 21:13:02.771] [info] [UE] Connection setup for PDU session(2) is successful, TUN interface(constant, 10.61.0.1) is up

```

Fig. 7. Fluxo de Inicialização do UE e Logs Correspondentes. O processo de inicialização do cliente é realizado ao executar o comando `./nr-ue -c ./config/uecfg.yaml`, onde são executadas as interações e autenticações necessárias para a configuração e comunicação do UE com a rede 5G. O fluxo detalhado dos processos é ilustrado na Figura 8.

C. Análise dos Logs e Processo de inicialização de uma rede 5G

Com a inicialização dos containers e do cliente UE no ambiente Free5GC, é desencadeado um fluxo de mensagens entre as diversas Network Functions que compõem o núcleo 5G, que foram explicadas na secção II. Este fluxo, detalhado na Figura 8, descreve as etapas fundamentais para o registo de um UE, o estabelecimento de uma sessão PDU e o encaminhamento de dados no plano de dados.

Inicialmente, o UE, simulado pelo UERANSIM, realiza o registo na rede através do AMF, que coordena a autenticação com outras NFs, como o UDM e o AUSF. Seguidamente, o UE requisita uma sessão PDU, a qual é gerida pelo SMF em conjunto com o UPF, sendo então configurados túneis GTP-U para o tráfego de dados. Por fim, os pacotes IP gerados pelo UE são encaminhados pelo UPF para a Internet (DN), com as respostas a retornarem pelo mesmo percurso.

Os registos correspondentes a cada etapa deste fluxo, captados por NFs como o AMF, SMF, UPF e CHF, estão representados nas Figuras 9 a 17. Este processo ilustra a modularidade da arquitectura 5G, onde cada NF desempenha uma função específica e interage de forma orquestrada por meio de interfaces baseadas em serviços (SBI).

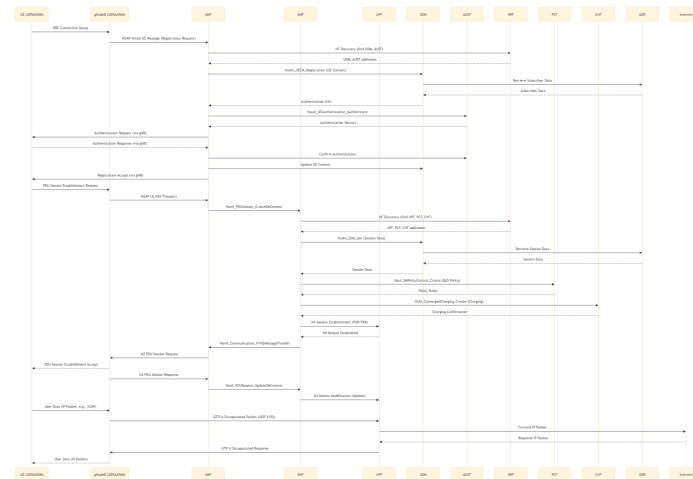


Fig. 8. Fluxo completo de mensagens para o estabelecimento de uma sessão PDU a partir da inicialização do cliente (UE), incluindo o registo na rede 5G, a criação dos túneis GTP-U via UPF, e o subsequente encaminhamento de pacotes IP para a Internet.

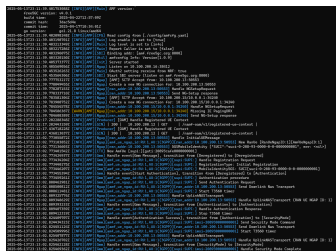


Fig. 9. AMF (1) — Recepção e processamento da mensagem de registo inicial do UE.

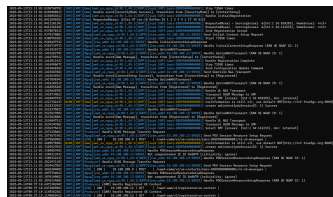


Fig. 10. AMF (2) — Início da autenticação do UE e transição para procedimentos de segurança.



Fig. 11. NRF — Fornece informação de descoberta dos serviços.



Fig. 12. UDM — Responsável pela gestão dos dados de subscrição.



Fig. 13. UDR — Base de dados que armazena os perfis dos utilizadores (UEs).



Fig. 14. AUSF — Executa o processo de autenticação do utilizador (UE).



Fig. 15. SMF — Gere a sessão e atribui endereços IP ao UE.

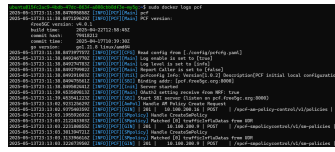


Fig. 16. PCF — Aplica políticas e controle de QoS ao utilizador.

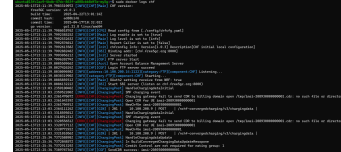


Fig. 17. CHF — Garante a contabilidade tarifária das sessões dos UEs.



Fig. 18. UPF — Encaminha os pacotes de dados entre o UE e a rede externa.

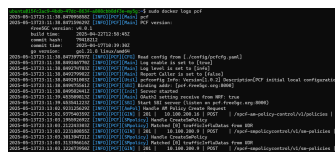


Fig. 19. PCF — Reforça políticas durante o estabelecimento da sessão.

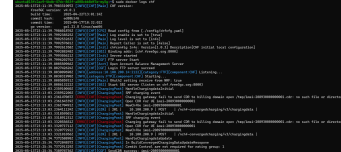


Fig. 20. CHF — Relata o consumo para efeitos de cobrança.

D. Testes

Antes de iniciar os testes propriamente ditos, foram realizados *pings* básicos entre os vários containers, com o objetivo de verificar a conectividade entre os diferentes componentes internos da rede. Esta verificação foi bem-sucedida, confirmando que todos os elementos estavam interligados corretamente.

Para realizar testes de conectividade e análise de tráfego entre o *UE* e o exterior da rede 5G simulada, foi necessário instalar algumas ferramentas básicas de rede no *container* do *UERANSIM*, nomeadamente o *tcpdump*, *wget*, *curl* e *traceroute*. Estas ferramentas permitem verificar a chegada de pacotes, realizar requisições HTTP e diagnosticar a rota até destinos remotos, respetivamente.

Instalação de ferramentas de rede no UERANSIM:

```
# Instalar o tcpdump para capturar pacotes
sudo docker exec ueransim apt-get install -y tcpdump
```

```
# Instalar o wget para testar acessos HTTP
sudo docker exec ueransim apt-get install -y wget
```

```
# Instalar o curl como alternativa ao wget
sudo docker exec ueransim apt-get install -y curl
```

```
# Instalar o traceroute para diagnosticar caminhos de rede
sudo docker exec ueransim apt-get install -y traceroute
```

Foi também necessário configurar regras de NAT (*MASQUERADE*) com o *iptables*, no *container* *upf*, para permitir que os pacotes IP oriundos do *UE* sejam encaminhados para o exterior da rede (Internet) pelo *UPF*. Estas regras garantem que os pacotes provenientes das sub-redes atribuídas aos *UEs* (10.60.0.0/24 e 10.61.0.0/24) possam ser corretamente mascarados com o IP do *UPF* ao sair para a Internet (DN).

[illegible]

Fig. 25. Neste Log é possível observar que os pacotes ICMP enviados pelo Ping passaram pelo IP do túnel ueransim0 (10.60.0.1) para o 8.8.8.8 (google.com) e vice-versa

[illegible]

Fig. 27. Fluxo de uma requisição HTTP com o curl: handshake TCP (SYN, SYN-ACK, ACK), requisição e resposta HTTP entre UE (10.60.0.1) e www.google.com (142.251.167.99), com encapsulamento GTP-U pelo gNodeB e encaminhamento pelo UPF via UERANSIM (nr-binder).

Logs das NFs : Durante a realização dos testes, foi validado se as Network Functions (NFs) estavam a responder adequadamente aos pedidos emitidos pelo UE. Esta verificação permitiu confirmar a correta integração e comunicação entre os componentes do core 5G. Para além disso, de forma a garantir que o encaminhamento do tráfego estava a ser realizado corretamente através da porta do túnel atribuída no UPF, foram inspecionadas as regras configuradas nas IPTables com exibido na Figura 29.

```

# sudo check even w/out iptables -t nat
Warning: iptables-legacy tables present, use iptables-legacy to see them
Chain FORWARD (policy ACCEPT 0 packets, 0 bytes)
  pkts bytes target     prot opt in     out     source               destination

Chain INPUT (policy ACCEPT 0 packets, 0 bytes)
  pkts bytes target     prot opt in     out     source               destination

Chain OUTPUT (policy ACCEPT 0 packets, 0 bytes)
  pkts bytes target     prot opt in     out     source               destination

Chain POSTROUTING (policy ACCEPT 0 packets, 0 bytes)
  pkts bytes target     prot opt in     out     source               destination
1: I880 MASQUERADE all -- *      *        16.0.0.0/24         0.0.0.0/8

```

Fig. 29. A interface 10.60.0.0 registrou a passagem de 148 pacotes após vários testes, confirmando que o tráfego do UE foi encaminhado corretamente através do UPE.

[illegible]

Fig. 26. Neste Log é possível observar que os pacotes enviados pelo Traceroute passou do IP do túnel ueransim0 (10.60.0.1) para o 8.8.8.8 (google.com)

[illegible]

Fig. 28. Requisição HTTP GET com wget: handshake TCP, requisição e resposta segmentada (pacotes de 1348 bytes) entre UE (10.60.0.1) e www.google.com.

```

2019-05-14T00:00:17.113.2951396602 [INFO] [Change] no request need to be changed
2019-05-14T00:00:17.113.2877676962 [INFO] [CPU] [200] 10.105.100.12 [2] GET /read-only/?ip=ip-session-info&uid=54207476-2756-a04b-400a-16f6b4818494
2019-05-14T00:00:17.113.7606816512 [INFO] [CPU] [200] 10.105.100.12 [2] GET /read-only/?ip=ip-session-info&uid=79847070-7776-a04b-400a-16f6b4818494
2019-05-14T00:00:17.113.2550616612 [INFO] [CPU] [200] no request need to be changed
2019-05-14T00:00:17.113.2550616612 [INFO] [CPU] [200] no request need to be changed
2019-05-14T00:00:17.113.2550616612 [INFO] [CPU] [200] no request need to be changed
2019-05-14T00:00:17.113.2550616612 [INFO] [CPU] [200] no request need to be changed
2019-05-14T00:00:17.113.3485567912 [INFO] [Change] no request need to be changed
2019-05-14T00:00:17.113.3485567912 [INFO] [CPU] [200] 10.105.100.12 [2] GET /read-only/?ip=ip-session-info&uid=79847070-7776-a04b-400a-16f6b4818494
2019-05-14T00:00:17.113.3485567912 [INFO] [CPU] [200] 10.105.100.12 [2] GET /read-only/?ip=ip-session-info&uid=54207476-2756-a04b-400a-16f6b4818494

```

Fig. 30. Log do SMF a criar uma sessão PDU para o UE (IP 10.60.0.1), utilizada nos testes HTTP e traceroute. Mostra a interação entre AMF, SMF e UPF para estabelecer a conectividade.

VII. ANEXOS

A. Tabela com a configuração padrão de um Cliente (UE)

TABLE I: Configuração padrão do Subscriber

Subscriber Identity	
PLMN ID	20893
SUPI (IMSI)	208930000000001
GPSI (MSISDN)	(not set)
Authentication Method	5G_AKA
Authentication Management Field (AMF)	8000
K	8baf473f2f8fd09487cccbd7097c6862
Operator Code Type	OPc
Operator Code Value	8e27b6af0e692e750f32667a3b14605d
SQN	000000000023
Subscribed UE AMBR	
Uplink	1 Gbps
Downlink	2 Gbps
24.5cmS-NSSAI 1	SST: 1, SD: 010203 Uplink AMBR: 1000 Mbps, Downlink AMBR: 1000 Mbps, Default 5QI: 9, Static IPv4: Not Set
34.5cmFlow Rules (S-NSSAI 1)	IP Filter: 1.1.1.1/32, Precedence: 128, 5QI: 8 Uplink GBR: 108 Mbps, Downlink GBR: 108 Mbps Uplink MBR: 208 Mbps, Downlink MBR: 208 Mbps
24.5cmCharging Config (S-NSSAI 1)	Method: Offline, Unit Cost: 1
24.5cmS-NSSAI 2	SST: 1, SD: 112233 Uplink AMBR: 1000 Mbps, Downlink AMBR: 1000 Mbps, Default 5QI: 8, Static IPv4: Not Set
34.5cmFlow Rules (S-NSSAI 2)	IP Filter: 1.1.1.1/32, Precedence: 127, 5QI: 7 Uplink GBR: 207 Mbps, Downlink GBR: 207 Mbps Uplink MBR: 407 Mbps, Downlink MBR: 407 Mbps
24.5cmCharging Config (S-NSSAI 2)	Method: Online, Quota (1): 5000, Quota (2): 100000 Unit Cost: 1

B. Tabelas com a descrição detalhadas dos parâmetros *gnbcfg.yaml* e *uecfg.yaml*

Parâmetro	Descrição
mcc	Código do País Móvel (Mobile Country Code). Identifica a rede nacional. Ex: "208" (França).
mnc	Código da Rede Móvel (Mobile Network Code). Identifica a operadora dentro do país. Ex: "93".
nci	Identidade da Célula NR (New Radio Cell Identity), identificador único para uma célula 5G. Ex: "0x000000010".
idLength	Comprimento do ID do gNB (gNodeB) em bits, indicando a capacidade do sistema. Ex: "32".
tac	Código da Área de Rastreamento (Tracking Area Code), utilizado para identificar áreas geográficas na rede. Ex: "1".
linkIp	Endereço IP local do gNB para simulação do link de rádio. Ex: "127.0.0.1".
ngapIp	Endereço IP do gNB para a interface N2 (comunicação com o AMF).
gtpIp	Endereço IP do gNB para a interface N3 (comunicação com o UPF).
amfConfigs	Lista de endereços e portas do AMF para a comunicação.
slices	Lista de network slices suportadas pelo gNB, permitindo personalização de serviços. Ex: "sst: 0x1, sd: 0x010203".
ignoreStreamIds	Define se os erros de número de stream SCTP devem ser ignorados. Ex: "true".

TABLE II
EXPLICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO NO *GNBCFG.YAML*

Parâmetro	Descrição
supi	Identificador único do UE, derivado do IMSI (International Mobile Subscriber Identity). Ex: "imsi-208930000000001".
key	Chave permanente de assinatura, utilizada para autenticação do UE na rede. Ex: "8baf473f2f8fd09487ccbd7097c6862".
op	Código do operador (OP ou OPC) do UE. Ex: "8e27b6af0e692e750f32667a3b14605d".
opType	Tipo de operação do operador, podendo ser "OP" ou "OPC".
amf	Valor do campo AMF, utilizado na autenticação e controle de mobilidade. Ex: "8000".
imei	Número IMEI (International Mobile Equipment Identity) do dispositivo, usado se o SUPI não for fornecido. Ex: "356938035643803".
imeiSv	Número IMEISV (IMEI Software Version), usado se nem SUPI nem IMEI forem fornecidos. Ex: "4370816125816151".
gnbSearchList	Lista de endereços IP do gNB para a simulação. Ex: "127.0.0.1, gnb.free5gc.org".

TABLE III
EXPLICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO NO *UECFG.YAML*

C. Logs de Network Functions



Fig. 33. N3IWF — Função que permite a interligação do UE à rede 5G através de redes não confiáveis, como Wi-Fi, encaminhando os dados para a AMF.

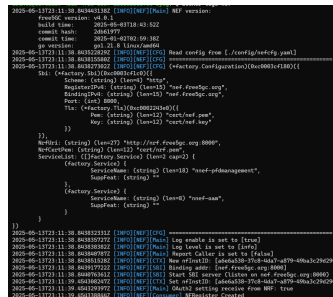


Fig. 34. NEF — Permite a exposição e o controle de políticas da rede 5G por aplicações externas.

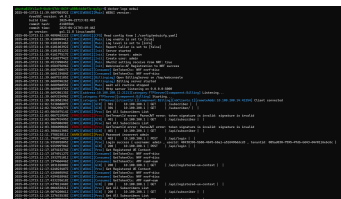


Fig. 35. Disponibiliza uma interface gráfica que oferece diversas funcionalidades, como criar/eliminar/visualizar um subscriber, entre outras