



Instituto Politécnico
de Castelo Branco
Escola Superior
de Tecnologia

Testes e análise de desempenho numa estação base 5G NR Estágio/Projecto

Nelson José Paiva Andrade

N:20221260

Orientador

Paulo Marques

Coorientador

Tiago Alves

Relatório de Projecto / Estágio apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco e realizado nas instalações da empresa Allbesmart para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Licenciado em Engenharia Eletrotécnica e das Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Professor Adjunto Doutor Paulo Jorge Coelho Marques, do Instituto Politécnico de Castelo Branco e a coorientação do Chefe de Arquitetura de Software Tiago Alves, da Empresa Allbesmart.

Setembro de 2024

Composição do júri

Presidente do júri

Professor Doutor Paulo Jorge Coelho Marques

Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Castelo Branco (orientador)

Vogais

Professor Doutor Pedro Miguel Baptista Torres

Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Castelo Branco

Professor Doutor Hugo Rafael de Almeida e Marques

Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Castelo Branco

Resumo

Nos dias de hoje as redes moveis têm um papel fundamental no cotidiano e apresenta um constante crescimento da sua importância. Atualmente já se encontra a ser implementada a quinta geração de redes moveis. Esta nova geração tem como objetivo, para além de melhorar os serviços ao utilizador, conseguir ganhar presença em áreas onde a mesma é menos notória. Desta forma prevê-se que esta geração poderá mudar a forma como realizamos algumas atividades do nosso cotidiano. Já na indústria é onde se verá mais alterações, permitindo que o conceito de Indústria 4.0 se torne uma realidade.

Com isto, a implementação das redes móveis celulares baseadas no standard *Third Generation Partnership Program (3GPP) 5G New Radio (NR)* encontra-se em forte expansão. A empresa tecnológica Allbesmart LDA, *spin-off* tecnológica do Instituto Politécnico de Castelo Branco (IPCB), desenvolve e comercializa estações base 5G (gNB) baseadas em código aberto [OpenAirInterface](#) (OAI) e com uma interface web para monitorização e controlo. O produto OAIBOX (www.oaibox.com) tem sido comercializado a nível global e despertado o interesse de empresas multinacionais (AMD, NVIDIA) e centros de investigação.

Com este projecto pretendo analisar o desempenho da estação base OAIBOX em cenários reais e para diferentes configurações da rede móvel. Serão realizados um conjunto de testes laboratoriais (cobertura, capacidade, latência, estabilidade da ligação), incluindo a comparação entre valor teóricos e valores experimentais. Para isso foi usado a OAIBOX 40, que permite gerar ligações com a largura de banda de 40MHz. Para terminal de teste foi usado 2 tipos de User's equipment (UE), um iphone 14 ou um Modem da Quectel RM500Q-GL, que se liga a um PC permitindo lhe assim a realização dos testes. Um dos aspetos importantes é a usabilidade da interface web, visto que permite a utilização da OAI seja feito de uma forma mais amigável, intuitiva e visual.

Palavras chave

OAIBOX

Rede móvel

OpenAirInterface

Código aberto

5G

Abstract

Nowadays, mobile networks play a fundamental role in daily life and show constant growth and importance. Currently, the fifth generation of mobile networks is already being implemented. This new generation aims, in addition to improving user services, to establish a presence in areas where it has been less prominent. In this way, it is expected that this generation could change the way we carry out some of our daily activities. In the industry is where the most changes will be seen, helping the concept of Industry 4.0 become a reality.

With this, the implementation of mobile networks based on the Third Generation Partnership Program (3GPP) 5G New Radio (NR) standard is rapidly expanding. The technology company Allbesmart LDA, a technological spin-off from the Instituto Politécnico de Castelo Branco (IPCB), develops and markets 5G base stations (gNB) based on OpenAirInterface (OAI) open source code with a web interface for monitoring and control. The OAIBOX product (www.oaibox.com) has been marketed globally and has attracted the interest of multinational companies (AMD, NVIDIA) and research centers.

This project aims to analyze the performance of the OAIBOX base station in real-world scenarios and for different mobile network configurations. A series of laboratory tests will be conducted (coverage, capacity, latency, connection stability), including a comparison between theoretical and experimental values. For this, the OAIBOX 40 was used, allowing connections with a bandwidth of 40MHz. For the test terminal, two types of User Equipment (UE) were used: an iPhone 14 or a Quectel RM500Q-GL modem, which connects to a PC to carry out the tests. One important aspect is the usability of the web interface, as it allows the use of OAI in a more user-friendly, intuitive, and visual way.

Keywords

OAIBOX

Mobile network

OpenAirInterface

Open source

5G

Índice geral

Índice geral.....	IX
Índice de figuras	XI
Lista de tabelas.....	XIV
Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos.....	XV
1. Introdução	1
1.1. Objetivos.....	1
1.2. Allbesmart.....	2
1.3. Conceito de Redes Privadas 5G.....	2
1.4. Mercado das redes privadas 5G	5
1.5. Soluções para testes de redes 5G.....	6
2. Projecto <i>Open Source</i> 5G usado	7
2.1. Componentes Projecto <i>Open Source</i> 5G	7
2.2. <i>OAI Core Network</i>	8
2.3. <i>OAI 5G RAN</i>	10
2.3.1. Subactividades do Grupo de Projecto RAN.....	11
2.3.2. <i>Centralised Unit</i>	13
2.3.3. <i>Distributed Unit</i>	14
2.3.4. <i>Radio Unit (RU)</i>	14
2.4. Repositório do código <i>OAI</i> no <i>GitLab</i>	14
2.4.1. Estrutura e Funcionalidades do Repositório	15
2.4.2. Benefícios do Repositório <i>OAI</i> no <i>GitLab</i>	15
2.4.3. Estrutura do Repositório	16
2.4.4. Principais Funcionalidades.....	16
3. O que é a <i>OAIBOX</i>	17
3.1. Linha de produtos <i>OAIBOX</i>	17
3.2. Arquitetura de software <i>OAIBOX</i>	21
3.3. <i>Setup</i> possíveis de <i>OAIBOX</i>	21
3.3.1. <i>OAIBOX 40</i> :	22
3.3.2. <i>OAIBOX MAX</i> :.....	22
3.3.3. <i>OAIBOX OPEN RAN (CU+DU)</i>	25
3.3.4. <i>OAIBOX mmWaves</i>	28

3.4.	OAIBOX <i>Dashboard</i>	28
3.4.1.	OAIBOX <i>Dashboard</i> página de login.....	29
3.4.2.	OAIBOX <i>Dashboard tour</i>	29
3.5.	Explicação das métricas e dos indicadores-chave de desempenho dos UE	35
3.5.1.	RSSI.....	35
3.5.2.	RSRP	35
3.5.3.	RSRQ.....	36
3.5.4.	PHR	36
3.5.5.	SINR	37
3.5.6.	SNR.....	37
3.5.7.	CQI.....	38
3.5.8.	MCS	38
3.5.9.	BLER.....	38
3.5.10.	<i>Bitrate</i>	38
3.5.11.	<i>Rank Indicator</i>	39
4.	Testes realizados com a OAIBOX.....	41
4.1.	Testes para as diferentes configurações de <i>slots</i> TDD.....	43
4.2.	Testes para os diferentes tipos de modulação de sinal.....	48
4.3.	Testes com atenuação de perda de percurso	50
4.3.1.	Para diferentes bandas de frequências	50
4.3.2.	Para as diferentes modulações de sinal.....	53
5.	Conclusão.....	57
5.1.	A evolução do 5G para o 6G.....	57
5.2.	Sugestões de trabalho futuro	58
6.	Bibliografia.....	59
	Anexos: Figuras dos Testes Realizados	61

Índice de figuras

Figura 1: Evolução da Comunicação Móvel, do 1G para o 5G. (fonte [12]).....	1
Figura 2: Topologia NPN <i>Standalone</i> - Fonte: 5G - ACIA.....	3
Figura 3: Topologia NPN RAN <i>Sharing</i> - Fonte: 5G - ACIA	4
Figura 4: Topologia NPN RAN e <i>Control Panel Sharing</i> - Fonte: 5G - ACIA	4
Figura 5: Topologia NPN em <i>Public Network</i> - Fonte: 5G - ACIA.....	5
Figura 6: Implementação do 5G CN (os blocos azuis são implementados em OAI) - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual.....	8
Figura 7: Esquema das arquiteturas <i>Non-Standalone</i> (ENDC) e SA para redes 5G RAN - Fonte: Openairinterface	10
Figura 8: Arquitetura de Simulação para Interação entre Redes 5G e 4G - Fonte: Openairinterface.....	11
Figura 9: Esquema da arquitetura de rede 5G, de OAI - Fonte: Openairinterface.	12
Figura 10: Protocolos, camadas e divisões do CU.....	13
Figura 11: Protocolos, camadas e divisões do DU	14
Figura 12: OAIBOX 40- Fonte: www.oaibox.com.....	17
Figura 13: OAIBOX MAX- Fonte: www.oaibox.com	17
Figura 14: OAIBOX Open RAN (OAIBOX CU e OAIBOX DU) - Fonte: www.oaibox.com	19
Figura 15: OAIBOX mmWave - Fonte: www.oaibox.com	20
Figura 16: Arquitetura de referência do <i>software</i> da OAIBOX 40 - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual.....	21
Figura 17: <i>Setup</i> OAIBOX 40	22
Figura 18: <i>Setup</i> OAIBOX MAX com 2 portas SFP + USRP B2XX.....	22
Figura 19: <i>Setup</i> OAIBOX MAX com 2 portas SFP + USRP N3XX.....	22
Figura 20: <i>Setup</i> OAIBOX MAX com 2 portas SFP + USRP X3XX.....	23
Figura 21: <i>Setup</i> OAIBOX MAX com 2 portas SFP + USRP X410.....	23
Figura 22: <i>Setup</i> OAIBOX MAX com 4 portas SFP + USRP B2XX	23
Figura 23: <i>Setup</i> OAIBOX MAX com 4 portas SFP + USRP N3XX.....	24
Figura 24: <i>Setup</i> OAIBOX MAX com 4 portas SFP + USRP X3XX.....	24
Figura 25: <i>Setup</i> OAIBOX MAX com 4 portas SFP + USRP X410.....	24
Figura 26: <i>Setup</i> OAIBOX O-RAN + USRP B2XX	25
Figura 27: <i>Setup</i> OAIBOX O-RAN + USRP N3XX.....	25
Figura 28: <i>Setup</i> OAIBOX O-RAN + USRP X3XX	25
Figura 29: <i>Setup</i> OAIBOX O-RAN + USRP X410	26
Figura 30: <i>Setup</i> OAIBOX O-RAN + RU Benetel + Switch Falcon.....	26
Figura 31: <i>Setup</i> OAIBOX O-RAN + RU LITEON + Switch Falcon	27
Figura 32: <i>Setup</i> OAIBOX O-RAN + RU LITEON + Switch Falcon + Ligação à Internet	27
Figura 33: <i>Setup</i> OAIBOX O-RAN + USRP X410 + Switch Falcon.....	27
Figura 34: <i>Setup</i> OAIBOX O-RAN + USRP X410 + UDBox + BBox + Switch.....	28

Figura 35: Quectel + X3XX.....	28
Figura 36: Página de <i>login</i> da OAIBOX <i>Dashboard</i> - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual.....	29
Figura 37: Página inicial da OAIBOX <i>Dashboard</i> (módulos 5G CN e gNB em execução) - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual.....	29
Figura 38: OAIBOX <i>Dashboard</i> - detalhes na parte esquerda da <i>dashboard</i> - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual.....	30
Figura 39: A janela modal de gerenciamento do OAIBOX <i>Dashboard</i> iPerf - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual.....	31
Figura 40: OAIBOX <i>Dashboard</i> - detalhes na parte direita da <i>dashboard</i> - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual.....	32
Figura 41: A página dedicada ao gNB - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual.....	33
Figura 42: A página dedicada ao EU - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual.....	34
Figura 43: Configuração de antenas MIMO 2x2 com ruído aditivo - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual.....	39
Figura 44: Teste para 40 MHz, disponível no arquivo ZIP (Figura_44.png).....	42
Figura 45: Teste para 20 MHz, disponível no arquivo ZIP (Figura_45.png).....	42
Figura 46: Teste para a configuração TDD DDFUU, disponível no arquivo ZIP (Figura_46.png).....	44
Figura 47: Teste para a configuração TDD DDFUUUUUUU, disponível no arquivo ZIP (Figura_47.png).....	44
Figura 48: Teste para a configuração TDD DDDDDDFUUUU, disponível no arquivo ZIP (Figura_48.png).....	44
Figura 49: Teste para a configuração TDD DDDDDDDFUU, disponível no arquivo ZIP (Figura_49.png).....	45
Figura 50: Testes para as configurações TDD: DDFUU e DDDFU, disponível no arquivo ZIP (Figura_50.png).....	46
Figura 51: Testes para as configurações TDD: DDFUUUUUUU, DDDDDDFUUUU e DDDDDDDFUU, disponível no arquivo ZIP (Figura_51.png).....	47
Figura 52: Teste para modulação de <i>Downlink</i> e de <i>Uplink</i> em QPSK, disponível no arquivo ZIP (Figura_52.png).....	48
Figura 53: Teste para modulação de <i>Downlink</i> e de <i>Uplink</i> em 16QAM, disponível no arquivo ZIP (Figura_53.png).....	48
Figura 54: Teste para modulação de <i>Downlink</i> e de <i>Uplink</i> em 64QAM, disponível no arquivo ZIP (Figura_54.png).....	49
Figura 55: Teste para modulação de <i>Downlink</i> e de <i>Uplink</i> em 256QAM, disponível no arquivo ZIP (Figura_55.png).....	49
Figura 56: Testes para as diferentes Frequências de Banda (<i>Band</i> n77 e n78), disponível no arquivo ZIP (Figura_56.png).....	51
Figura 57: Testes para as diferentes Frequências de Banda (<i>Band</i> n77 e n78) e forte atenuação de perda de percurso, disponível no arquivo ZIP (Figura_57.png).....	52

Figura 58: Testes para as diferentes modulações de sinal (QPSK, 16QAM, 64QAM e 256QAM), disponível no arquivo ZIP (Figura_58.png)	53
Figura 59: Testes para as diferentes modulações de sinal (QPSK, 16QAM e 64QAM) e forte atenuação de perda de percurso, disponível no arquivo ZIP (Figura_59.png).	54
Figura 60: Testes para as diferentes modulações de sinal (64QAM e 256QAM) e forte atenuação de perda de percurso, disponível no arquivo ZIP (Figura_60.png)	55

Lista de tabelas

Tabela 1: Funções do 5G NG RAN	9
Tabela 2: Funções do 5G <i>Core</i>	9
Tabela 3: Pastas do repositório e sua descrição	16
Tabela 4: Especificações OAIBOX 40 e OAIBOX MAX.....	18
Tabela 5: Especificações OAIBOX Open RAN (OAIBOX CU e OAIBOX DU)	19
Tabela 6: Especificações OAIBOX mmWave	20
Tabela 7: Valores obtidos nos testes das configurações TDD	45
Tabela 8: Testes para os diferentes tipos de modulação de <i>Downlink</i> e de <i>Uplink</i>	49
Tabela 9: 3GPP <i>bands</i> pré-configuradas na OAIBOX™ <i>Dashboard</i>	50

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5GC	5G Core
ACK	Acknowledgement
AF	Application Function
AKA	Authentication and Key Agreement
AMF	Access and Mobility Management Function
API	Application Programming Interface
AUSF	Authentication Server Function
BLER	Block Error Rate
CD	Continuous Deployment
CI	Continuous Integration
CN	Core Network
COTS	Commercial Off-The-Shelf
CPRI	Common Public Radio Interface
CQI	Channel Quality Indicator
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSI	Channel State Information
CSI-RS	Channel State Information Reference Signal
CU	Central Unit
CUPS	Control and User Plane Separation
DL	Downlink
DN	Distributed Network
DRB	Data Radio Bearer
DU	Distributed Unit
eCPRI	enhanced CPRI
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
eNB	Evolved Node B
ENDC	E-UTRAN New Radio–Dual Connectivity
EPC	Evolved Packet Core
FAPI	Functional Application Platform Interface
FDD	Frequency Division Duplexing
FFT	Fast Fourier Transform

FR1	Frequency Range 1
FR2	Frequency Range 2
gNB	gNodeB
IIoT	Industrial Internet of Things
IMS	IP Multimedia Subsystem
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPCB	Instituto Politécnico de Castelo Branco
ITS	Intelligent Transport Servicer
JSON	JavaScript Object Notation
KPI	Key Performance Indicator
L-GW	Local Gateway
LDPC	Low-density Parity-Check
LoS	Line-of-Sight
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MCS	Modulation and Coding Scheme
MEC	Multi-Access Edge Computing
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
NACK	Negative Acknowledgment
NAS	Non-Access Stratum
NEF	Network Exposure Function
NF	Network Function
nFAPI	network FAPI
NFV	Network Functions Virtualization
NPN	Non-Public Network
NR	New Radio
NRF	Network Repository Function
NSA	Non-Standalone
NSSF	Network Slice Selection Function
OAI	OpenAirInterface
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSA	OpenAirInterface Software Alliance
P-GW	Packet Gateway

PCF	Policy Control Function
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDU	Protocol Data Unit
PH	Power Headroom
PHR	Power Headroom Report
PHY	Physical Layer
PMI	Precoding Matrix Indicator
PNF	Physical Network Function
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QFI	QoS flow ID
QoS	Quality of Service
RA	Realidade Aumentada
RAN	Radio Access Network
RB	Resource Block
RF	Radio Frequency
RI	Rank Indicator
RIC	RAN Intelligent Control
RLC	Radio Link Control
RRC	Radio Resource Control
RRU	Remote Radio Unit
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RU	Radio Unit
SA	Standalone
SCF	Small Cell Forum
SDAP	Service Data Adaptation Protocol
SDK	Software Development Kit
SDR	Software Defined Radio
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SISO	Single Input Single Output
SMA	Security Management Appliance
SMF	Session Management Function

SNR	Signal-to-noise ratio
SRS	Sounding Reference Signal
SS	Synchronization Signal
SSS	Secondary Synchronization Signal
SVD	Singular Value Decomposition
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time-Division Duplex
TS	Technical Specification
TTCN	Testing and Test Control Notation
UDM	Unified Data Management
UDR	Unified Data Repository
UDSF	Unstructured Data Storage Function
UE	User Equipment
UL	Uplink
ULSCH	Uplink Shared Channel
UPF	User Plane Functions
USR	Universal Software Radio Peripheral
V2X	Vehicle-to-everything
VNF	Virtualized Network Function

1. Introdução

A evolução das redes móveis ao longo das últimas décadas tem tido um grande impacto na vida das pessoas, sendo cada vez maior o mesmo. Desde a primeira geração até à atualidade, tem vindo a serem evoluídas no sentido de melhorar os serviços existentes e de responder a novas necessidades, como o crescente número de utilizadores e o avanço tecnológico que permite ter novas funcionalidades e serviços. No entanto, esses benefícios resultam num aumento do volume de informações trocadas, o que impõe a necessidade de ter ligações de melhor qualidade e com mais capacidade. A figura abaixo ilustra as várias gerações indicando a principal vantagem que trouxeram e os serviços que cada incrementou. Sendo inclusive perceptível, pela observação da mesma, o respetivo aumento de funcionalidades e serviços que resulta em um maior tráfego na rede.

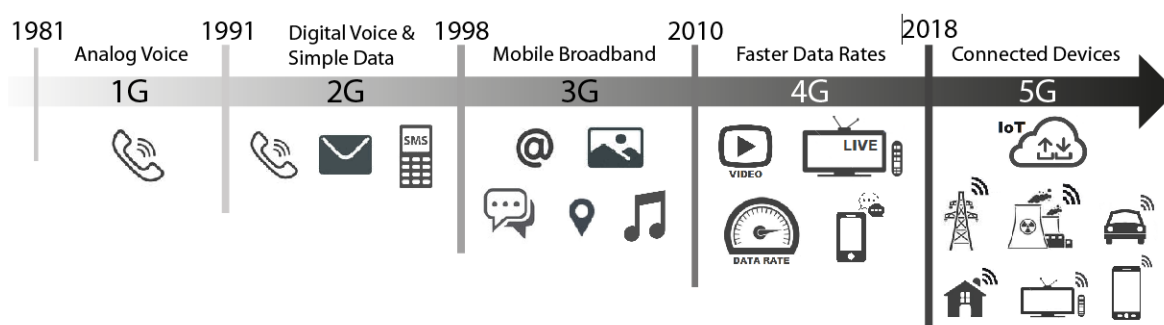


Figura 1: Evolução da Comunicação Móvel, do 1G para o 5G. (fonte [12])

A nova geração denominada de 5G possui o objetivo de melhorar ainda mais a ritmo de transmissão de dados e acima de tudo permitir suportar o número crescente de utilizadores e serviços acessíveis através de redes móveis, além de uma latência mais baixa. O 5G vai permitir que os dispositivos se liguem e comuniquem entre si em contextos, que nas gerações anteriores em alguns casos, não eram possíveis ou seguros (comunicações críticas), mas agora com a nova geração mais eficiente possibilita que vários dispositivos trabalhem juntos de forma autónoma ou com o mínimo de interferência humana. Obtendo assim mais eficiência e maior segurança.

1.1. Objetivos

O objetivo deste projecto/estágio é a análise do desempenho numa estação base OAIBOX em cenários reais e para diferentes configurações da rede 5G. Para isso pude usufruir das instalações, equipamento e ter um contacto de perto com a equipa da empresa Allbesmart LDA, assim sendo, e com as respetivas OAIBOX e o material necessário, este projecto/estágio tem como objetivos específicos os seguintes pontos:

- Estudo dos diferentes elementos de uma rede 5G em especial os usados nas estações bases em questão, e alguns diferentes *setups* disponíveis na empresa Allbesmart LDA.
- Realização de testes para análise do desempenho da estação base OAIBOX em cenários reais e em diferentes configurações da rede movel.

1.2. Allbesmart

A Allbesmart é uma empresa de engenharia portuguesa que fornece serviços de outsourcing de R&D em comunicações sem fio 5G e soluções de software de alto desempenho para vários setores [14]. Tendo como principais focos os seguintes:

5G para a indústria 4.0 - desenvolve aplicativos de Realidade Aumentada (RA) para casos de uso da Indústria 4.0, aproveitando a baixa latência do 5G, a extrema conectividade de banda larga e a precisão aprimorada de geolocalização.

5G para V2X - implementa redes 5G V2X (*Vehicular-to everything*) e aplicativos ITS (*Intelligent Transport Services*). A plataforma C-ITS gerência as comunicações V2X e permite a fácil configuração de casos de uso de ITS.

5G Open-Source - A Allbesmart fornece acesso 3GPP 5G NR definido por software e implementações de rede central com base na pilha de protocolo *OpenAirInterface* (OAI) de código aberto. Constroem redes 5G privadas e bancos de testes de baixo custo.

Sendo o último o foco onde este projeto se insere.

1.3. Conceito de Redes Privadas 5G

As redes privadas 5G consistem em redes moveis baseadas em 3GPP, mas destinadas ao uso exclusivo de uma empresa ou grupo específico, ao contrário das redes publicas 5G que são operadas por provedores de serviços de telecomunicação e podem ser acedidas pelo publico em geral. As redes por serem privadas possibilitam um maior controlo sobre a segurança a privacidade dos dados, permitem ainda ser personalizadas, para dessa forma atender as necessidades especificas de cada empresa ou situação, como por exemplo a configuração da largura de banda, cobertura, latência, definir a prioridade a sistemas críticos, por exemplo, entre outros, sendo ainda o facto de as empresas poderem possuir controlo total sobre a configuração, operação e manutenção da rede, torna esta solução ainda mais atrativa para casos em que exigem uma alta confiabilidade e disponibilidade.

As redes privadas, ou *Non-Public Networks* (NPNs), podem operar de duas maneiras:

- Redes isoladas – *Standalone* (SA);
- Redes implantadas em conjunto com redes públicas. - *Hybrid Private Networks*

Para o caso da **rede isolada** todos os serviços tradicionais de uma rede móvel (controle de assinantes, *user plane*, *control plane* e serviços oferecidos - voz/dados/vídeo) são de responsabilidade da empresa proprietária dessa rede. Sendo possível por meio de uma firewall estabelecer uma ligação com acordo de roaming com as operadoras.

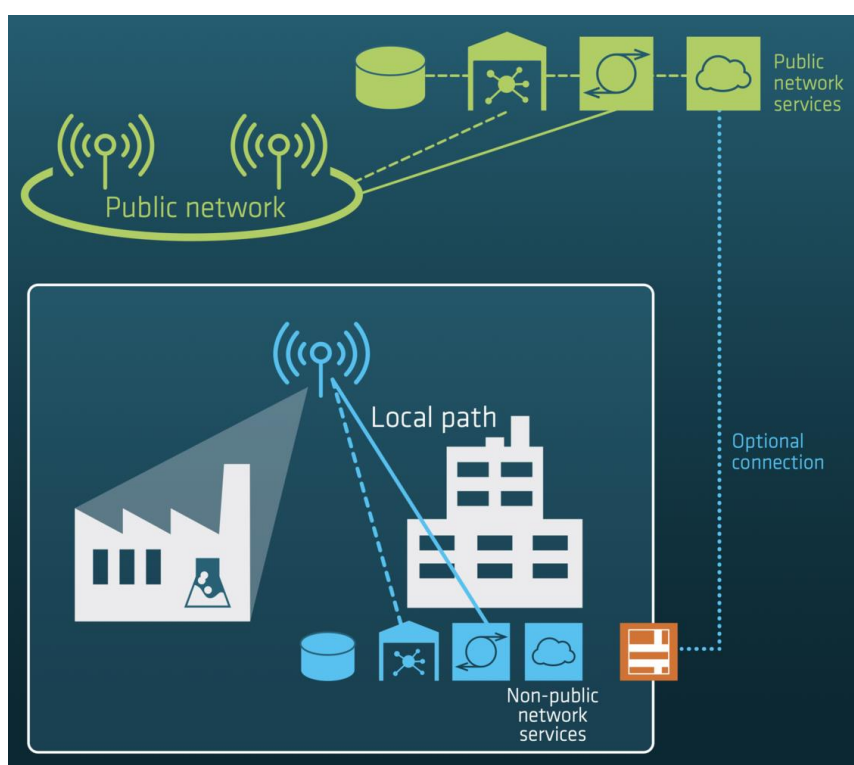


Figura 2: Topologia NPN Standalone - Fonte: 5G - ACIA

Já para os outros cenários, que são em conjunto com as operadoras, são:

Radio Access Network (RAN) compartilhada – a rede privada e a pública podem compartilhar todo o acesso rádio porem as funções de controlo e os serviços permanecem totalmente independentes. Na imagem abaixo só mostra uma estação radio base compartilhada, mas pode haver casos em que existam algumas compartilhadas e outras não, para só em determinadas áreas onde não se deseja ter acesso móvel público.

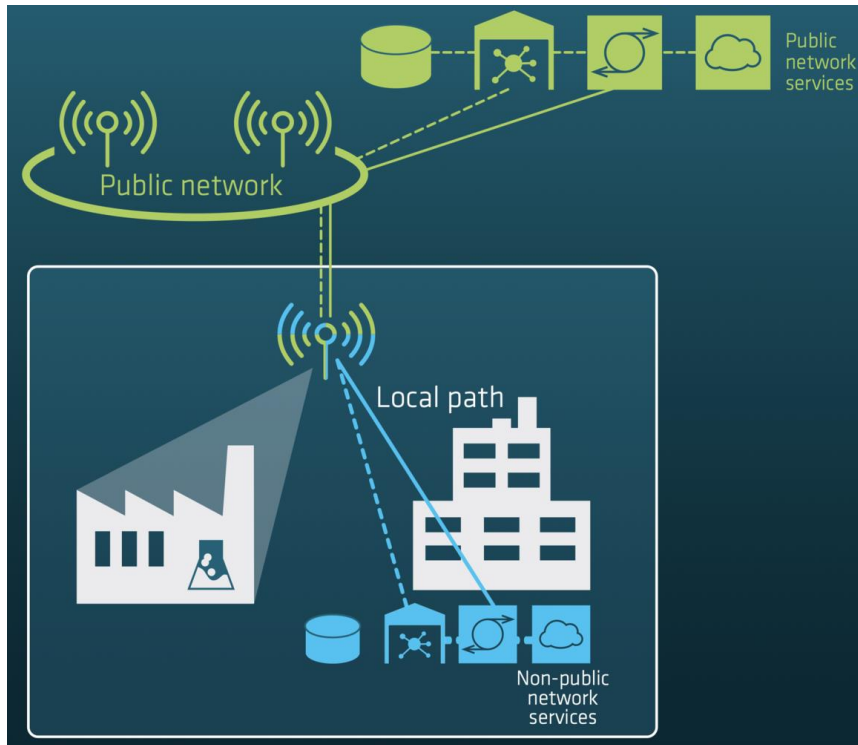


Figura 3: Topologia NPN RAN Sharing - Fonte: 5G - ACIA

Plano de Controle e RAN Compartilhados – neste cenário ainda permanece sob responsabilidade da organização o controle dos assinantes e também existe a garantia que os dados não circulam por rede publica.

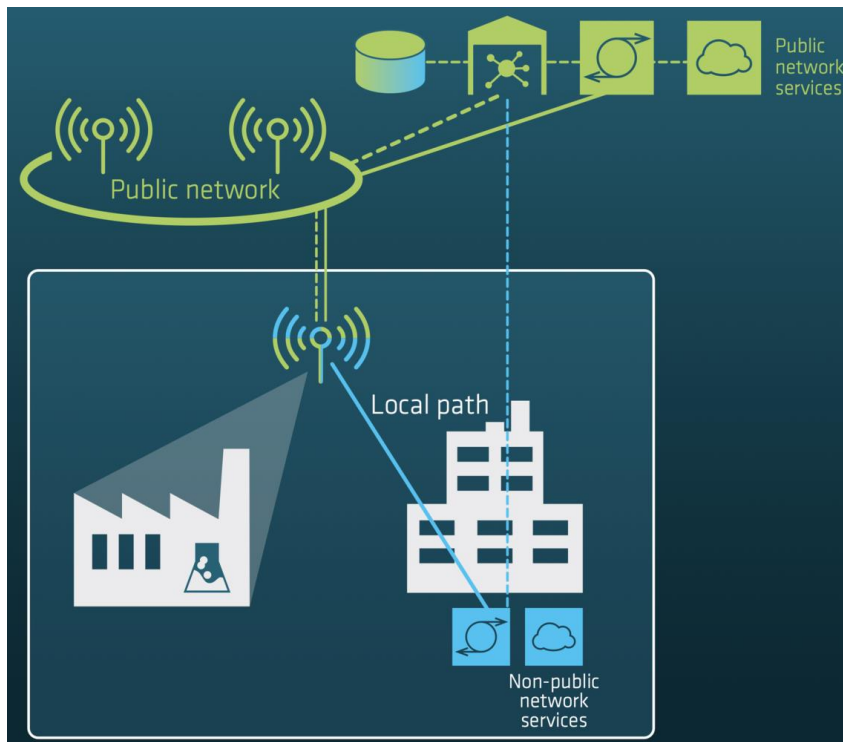


Figura 4: Topologia NPN RAN e Control Panel Sharing - Fonte: 5G - ACIA

Rede Contratada – neste cenário toda a gestão é feita pela operadora desde a rede de acesso, o plano de controlo e o utilizador, os serviços e a conectividade entre a rede da operadora e os *datacenters* da empresa. Neste caso todos os dados trafegados passam pela rede da operadora.

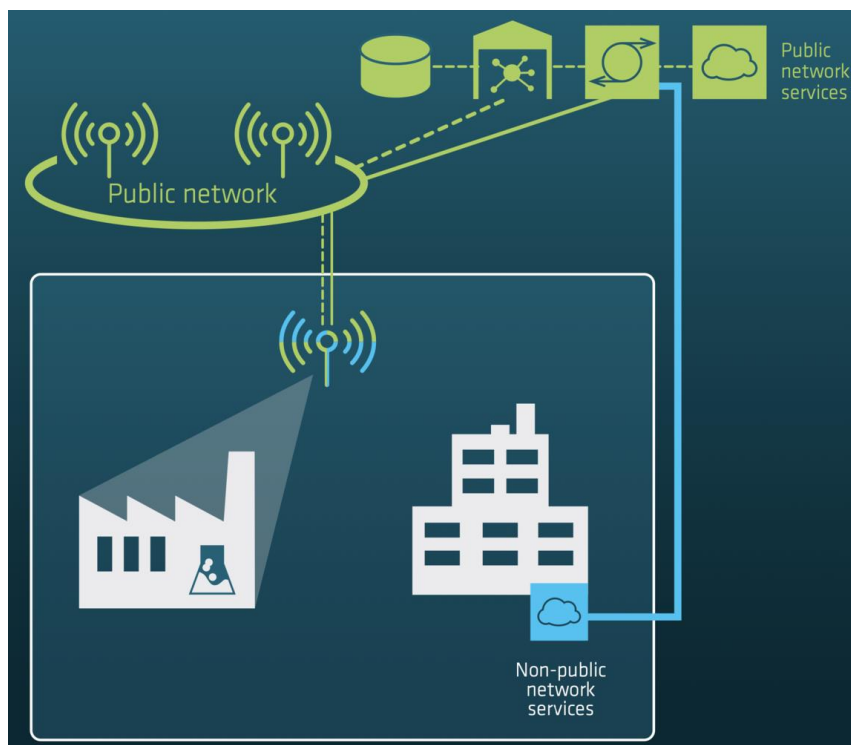


Figura 5: Topologia NPN em *Public Network* - Fonte: 5G - ACIA

1.4. Mercado das redes privadas 5G

O mercado das redes de telecomunicações 5G tem vindo a crescer rapidamente e em especial o das redes privadas 5G. o facto de estas redes dedicadas permitirem dar controlo total sobre a rede e a sua infraestrutura torna esta opção vantajosa para os mercados com ambientes mais complexos como fábricas, portos... lugares onde a segurança e a confiabilidade são cruciais.

Tendo em conta que as redes privadas 5G possuem como principais vantagens a alta velocidade de transmissão de dados com baixa latência e o grande número de dispositivos que permitem suportar de forma segura, fazem desta opção, uma opção inclusive melhor que o Wi-Fi em termos de alcance, confiabilidade e acima de tudo segurança. Assim sendo, esta opção torna-se uma das principais, em especial para a implementação de tecnologias como o *Industrial Internet of Things* (IIoT), automação em tempo real entre outras.

1.5. Soluções para testes de redes 5G

A implementação e a manutenção de redes 5G necessitam soluções avançadas de teste de forma a ser assegurada a confiabilidade, a segurança e performance. Com base nisto existem várias empresas especializadas que oferecem ferramentas que permitem abordar diferentes aspetos dos testes das redes 5G, desde a simulação de ambientes de rede a análise de desempenho.

Ao nível da simulação e emulação de redes existe por exemplo a *Keysight Technologies* que é umas das empresas de referência na área e tem soluções que permitem a emulação de redes de forma a testar dispositivos 5G em ambientes controlados antes do lançamento comercial, entre outras opções presente no seu leque de soluções.

Já ao nível de desempenho, destacam-se empresas como a *VIAMI Solutions* e a *Rohde & Schwarz* que possuem ferramentas para a validação de redes 5G, permitindo assim a medição de valores como a latência, throughput e cobertura de rede, entre outros.

2. Projecto *Open Source* 5G usado

Foi usado o projecto *OpenAirInterface* pertencente à *OpenAirInterface Software Alliance* (OSA), organização francesa sem fins lucrativos, cujo conselho é composto por representantes dos membros estratégicos da aliança, e é um *software* aberto que reúne uma comunidade de desenvolvedores do mundo todo, que trabalham juntos para desenvolver uma implementação completa e funcional das especificações 3GPP para RAN e *Core Network* (CN) em 4G e 5G. [2]

O principal objetivo do OAI é fornecer uma plataforma flexível e extensível para pesquisa e desenvolvimento em 5G, permitindo a experimentação e a implementação de novas tecnologias de rede.

2.1. Componentes Projecto *Open Source* 5G

Este projecto concentrase em fornecer uma implementação completa e funcional das tecnologias 5G segundo o 3GPP. O OAI-5G tem como objetivo fornecer uma plataforma flexível para explorar e desenvolver as capacidades avançadas do 5G. Os componentes principais incluem:

- **5G NR:**
 - ***gNodeB* (gNB):** Implementação da estação base 5G, responsável por lidar com a interface de rádio e gerir a comunicação com os UEs.
 - ***NR Protocol Stack*:** Implementação das camadas de protocolo específicas do 5G NR, incluindo a camada física (PHY), a *Medium Access Control Layer* (MAC), a *Radio Link Control Layer* (RLC) e a *Packet Data Convergence Protocol Layer* (PDCP).

- **5G Core (5GC):**
 - **Arquitetura Modular:** O 5GC é construído em uma arquitetura de serviços modular, permitindo uma configuração flexível e escalável.
 - **Network Functions (NF):** Inclui funções essenciais como o AMF (Access and Mobility Management Function), SMF (Session Management Function), UPF (User Plane Function), e outros componentes necessários para a gestão da rede central.

2.2. OAI Core Network

Este grupo tem como objetivo fornecer uma implementação CN 5G SA compatível com 3GPP com grande conjunto de recursos. O OAI 5G CN é projectado e implementado de forma flexível, que pode ser facilmente adaptado para atender às necessidades dos diversos casos de uso do 5G. Todos os recursos dos componentes OAI 5G CN são testados continuamente com *testers* profissionais, gNBs comerciais (com *Commercial Off-The-Shelf* (COTS) UE) e simuladores RAN de open source

Atualmente, o OAI 5G CN suporta procedimentos básicos para a ligação, o registo (registo de UE, cancelamento de registo e solicitação de serviço) e a gestão da sessão (estabelecimento, modificação e finalização de sessão *Protocol Data Unit* (PDU)). O OAI 5G CN também suporta alguns recursos adicionais, por exemplo, N2 Handover, HTTP/2, FQDN support, Paging, Network slicing (suportado parcialmente).

O *Core Network* é a estrutura que permite estabelecer uma ligação entre o RAN de uma determinada área geográfica e redes externas. O 5GC tem várias funções, como fornecer uma ligação para fornecer serviços aos UEs; autenticação de utilizadores; garantir que a conexão atenda aos requisitos de Qualidade de Serviço (QoS); acompanhar a mobilidade da UE para garantir um serviço contínuo.

Nesta nova geração, o 5GC adota uma arquitetura baseada em serviços, permitindo que suas funções de rede (NFs) sejam implantadas usando técnicas de Virtualização de Funções de Rede (NFV) e executadas na nuvem. O 5GC consiste em um conjunto de elementos que podem ser divididos em dois grupos, aqueles que executam funções do plano do usuário e aqueles que executam funções do plano de controle. A figura abaixo mostra os elementos do 5GC.

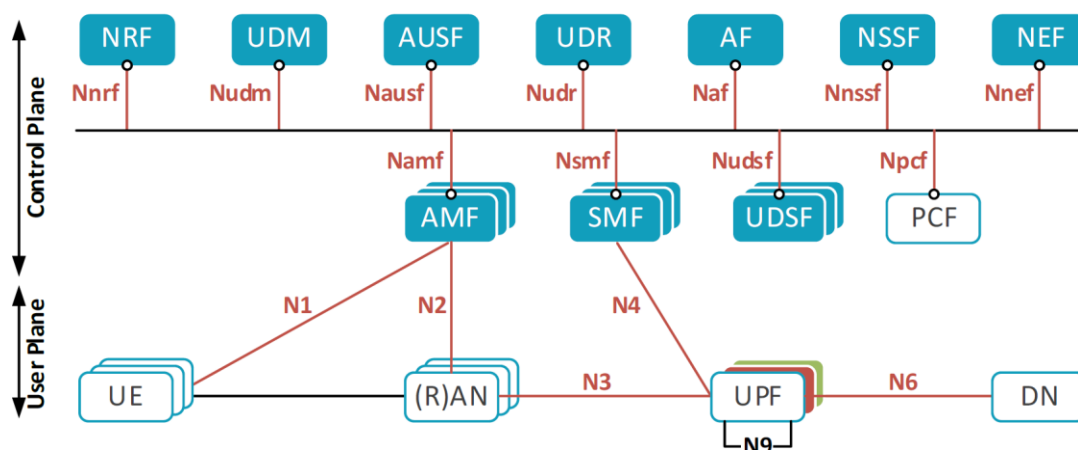


Figura 6: Implementação do 5G CN (os blocos azuis são implementados em OAI) - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual

Tabela 1: Funções do 5G NG RAN

Função	Descrição
UE	Representa um equipamento 5G capaz de se conectar à RAN 5G
RAN	Fornecer acesso via rádio entre uma rede pública/privada e UEs através de <i>links</i> de rádio
User Plane Functions (UPF)	Suporta funcionalidades semelhantes como entidades <i>Local Gateway</i> (L-GW) e <i>Packet Gateway</i> (P-GW) em <i>Long Term Evolution</i> (LTE), melhoradas para suportar virtualização de rede via <i>Control and User Plane Separation</i> (CU-PS). Fornece funções de <i>routing</i> e encaminhamento de pacotes, bem como endereço IP/ <i>prefix allocations</i> , bem como a parte crítica do Plano do Usuário da aplicação de regras de política, por exemplo, <i>Gating</i> , Redirecionamento ou <i>Traffic steering</i>
Data Network (DN)	Rede baseada em IP ou <i>non-IP</i> , fora do âmbito do 3GPP, que pode corresponder à Internet ou a uma rede de dados privada

Tabela 2: Funções do 5G Core

Função	Descrição
Access and Mobility Management Function (AMF)	O AMF é a primeira entidade ligada à UE e RAN (gNB), cujas responsabilidades incluem gestão de registos, ligações, mobilidade, autenticação e autorização de acesso. O AMF está ligado à RAN e à UE através do ponto de referência N2 e N1, respetivamente.
Session Management Function (SMF)	O SMF é responsável por muitas funções, como a gestão de cada sessão do UE e alocação de endereços IP; seleção e controlo das funções do UPF; controlar parte da aplicação da política de QoS e da notificação de dados de <i>downlink</i> (DL). O SMF é conectado ao UPF através do ponto de referência N4.
Policy Control Function (PCF)	O PCF é responsável por fornecer as regras de política aplicadas às funções do plano de controlo.
Network Exposure Function (NEF)	A NEF é crítica para o 5G, uma vez que permite expor as funções da rede a entidades externas sem lhes dar acesso ao 5G. As funções de rede típicas expostas são recursos de rede, provisionamento seguro de dados de redes externas ou tradução entre informações internas-externas.
Network Repository Function (NRF)	A NRF mantém um repositório atualizado de funções de rede disponíveis no 5G core. As funções de rede são inovações fundamentais do 5G e incluem as funções descritas anteriormente, bem como funções <i>Multi-Access Edge Computing</i> (MEC) ou D2D, por exemplo.

Unified Data Management (UDM):	O UDM é responsável por gerar credenciais 3GPP <i>Authentication and Key Agreement (AKA)</i> ; gestão de identidade de utilizadores; autorização de acesso com base em dados de assinatura.
Authentication Server Function (AUSF):	O AUSF oferece suporte à autenticação para acesso ao 3GPP e acesso <i>non-3GPP</i>
Application Function (AF):	AF interage com outras funções principais do 5G para suportar serviços 3GPP, como a influência do aplicativo sobre encaminhamento, serviços de sincronização de tempo. Servidores de aplicativos <i>ProSe</i> ou V2X ou TSN são ilustrações típicas de AF.
Network Slice Selection Function (NSSF):	O NSSF trata de gerir e seleccionar a fatia da rede apropriada que serve um UE e seleccionar o AMF mais apropriado para lidar com essa fatia.

Para o plano do utilizador, destacam-se as UPF, sendo responsável pelo encaminhamento de pacotes, servindo como ponto de interconexão com a DN.

2.3. OAI 5G RAN

A Radio Access Network 5G é uma parte essencial da arquitetura 5G, responsável por ligar UE ao core e facilitar a comunicação via espectro de rádio. Ela traz avanços significativos em relação às gerações anteriores de forma a responder as altas demandas de velocidade, conectividade e baixas latências em redes 5G sob a Licença Publica OAI V1.1.

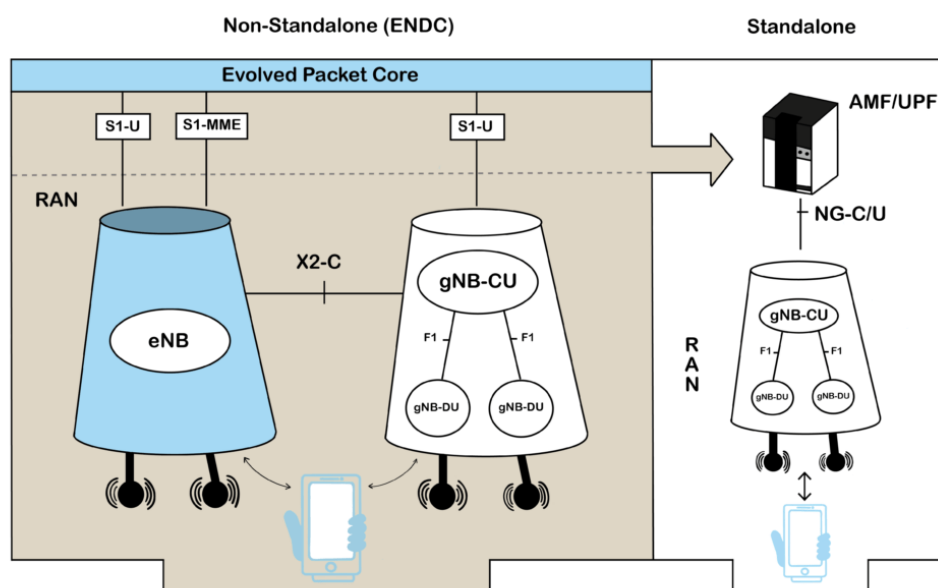


Figura 7: Esquema das arquiteturas *Non-Standalone (ENDC)* e *SA* para redes 5G RAN - Fonte: Openairinterface

A stack OAI 5G suporta o seguinte

- gNB *Non-Standalone* (NSA)
- gNB SA
- 5G NSA e SA UE

2.3.1. Subactividades do Grupo de Projecto RAN

L1- Estrutura de simulação: O *RFsimulator* substitui a placa de rádio por comunicação de *software* (*Transmission Control Protocol* (TCP)/IP) para tornar possíveis todos os testes funcionais sem uma placa de *Radio Frequency* (RF). O OAI gNB e o OAI UE comunicam como se houvesse uma interface de RF entre eles, mas sem nenhuma restrição de relógio *real-time*. O *RFsimulator* também suporta *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO).

L2- Estrutura de simulação: Usando rádios efetivos ou mesmo *RFsimulator* não permite testar um grande número de UEs. Portanto, o *L2simulator* oferece a possibilidade de conectar o UE OAI com o OAI xNB (*Evolved Node B* (eNB) em LTE e gNB em 5G) por meio da interface nFAPI (*network FAPI*) definida pelo *Small Cells Forum* (SCF). O nFAPI divide o xNB em uma entidade MAC e uma entidade PHY. No OAI, o xNB MAC se conecta por meio da interface nFAPI a um *proxy* de canal que simula o canal e permite conectar muitos UEs ao *stub* MAC. Cada UE é o UE OAI simulado que se conecta ao *proxy*.

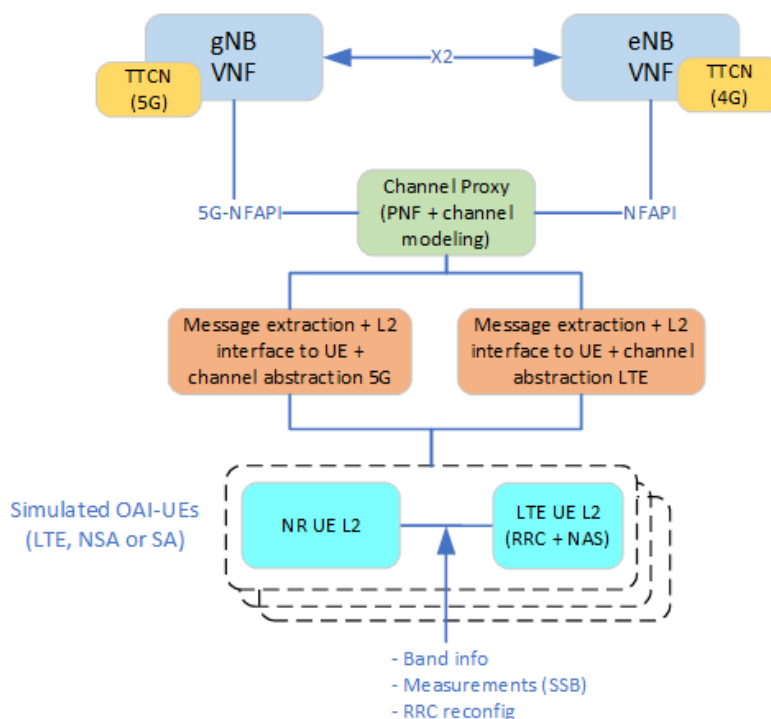


Figura 8: Arquitetura de Simulação para Interação entre Redes 5G e 4G - Fonte: Openairinterface

L1- Melhorias: A camada-1 da OAI é constantemente comparada com o desempenho estabelecido para os modelos de canal 3GPP. Atualmente, está a ser desenvolvido um recetor *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH) e o respetivo *benchmarking*. O desempenho do recetor está sendo avaliado e testado para canais MIMO para conformidade com os requisitos do padrão 3GPP para antenas de receção de 2, 4 e 8. Está também em curso teste de cobertura *Continuous Integration* (CI) para PUSCH para testar continuamente com os Canais de Referência Fixos especificados no padrão. O desenvolvimento também está focado para otimizar o desempenho do decodificador *Low-density Parity-Check* (LDPC). As apreciações da arquitetura OAI L1 também estão sendo analisadas para introduzir mais processamento *multithread*, por exemplo, nas partes do recetor interno, incluindo *Fast Fourier Transform* (FFTs) e codificadores.

Central Unit (CU)/ Distributed Unit (DU): Uma versão dividida CU/DU da implantação 5G gNB está disponível no OAI. Isso foi validado no modo 5G SA com o OAI *RFsimulator*. O modo dividido permite:

- Trocas de plano de controlo entre o CU e o DU sobre F1-C (plano de controlo) de acordo com o protocolo F1AP (TS 38.473, Rel.16), suporta registo de ponta a ponta do UE e estabelecimento de sessão *Protocol Data Unit* (PDU)
- Tráfego no plano do utilizador sobre F1-U (plano de utilizador) usa gtp-u conforme TS 29.281, Rel. 16

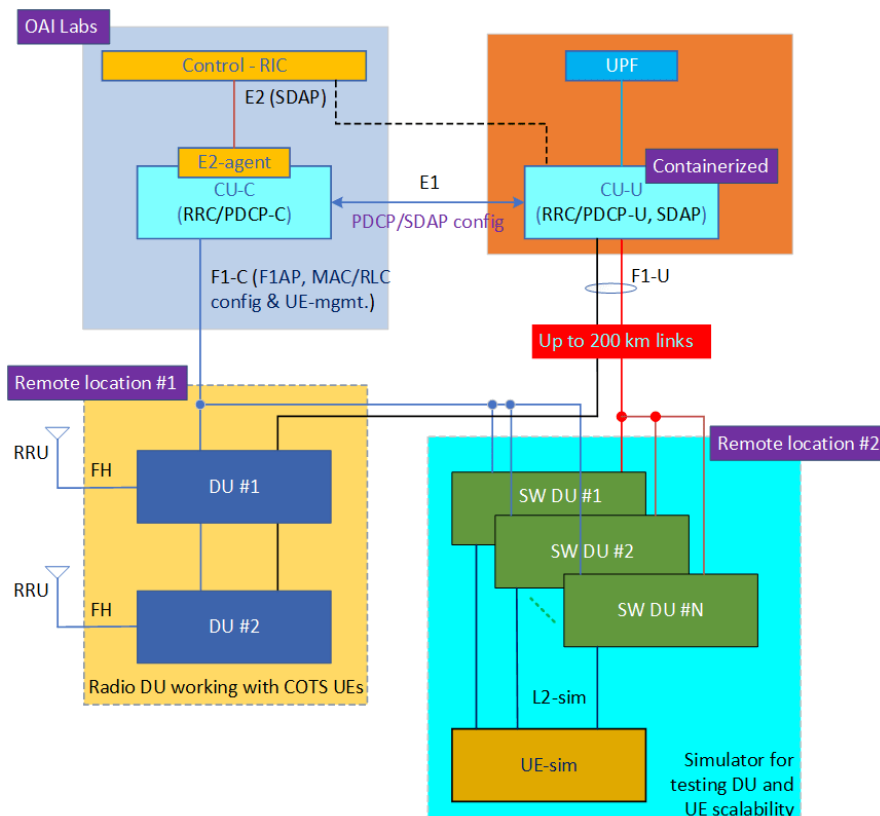


Figura 9: Esquema da arquitetura de rede 5G, de OAI - Fonte: Openairinterface

Multiantena (MIMO): A possibilidade de operações multiantena é um dos principais recursos do 5G para as altas taxas de transferência de dados, pois permite o aumento da eficiência espectral e a capacidade da rede, sendo o principal foco o *downlink*. Os procedimentos gNB (PHY e MAC) já estão em fase de teste com COTS UE para conformidade com o *standard*. A camada 2 do DL-MIMO também pode ser testado em simulações com OAI UE até 4 antenas. Já para os OAI UE, apenas os procedimentos PHY são implementados, incluindo a estimativa e a equalização do canal.

RAN Intelligent Control (RIC)

Embora não mencionado explicitamente no plano de desenvolvimento, o *RAN Intelligent Control* é um componente importante do OpenAirInterface e seus desenvolvimentos fazem parte do *OAI MOSAIC5G Project Group*.

O gNB é ainda composto por 3 elementos que são o CU, o DU e a RU.

2.3.2. Centralised Unit

O CU é responsável pelas camadas mais altas da pilha de protocolos. Na imagem abaixo encontra-se identificados os protocolos PDCP, *Service Data Adaptation Protocol (SDAP)* e o *Radio Resource Control (RRC)*, que são executados pelo CU e também a divisão entre os planos de controlo e utilizador tal como a interface utilizada para a comunicação entre eles.

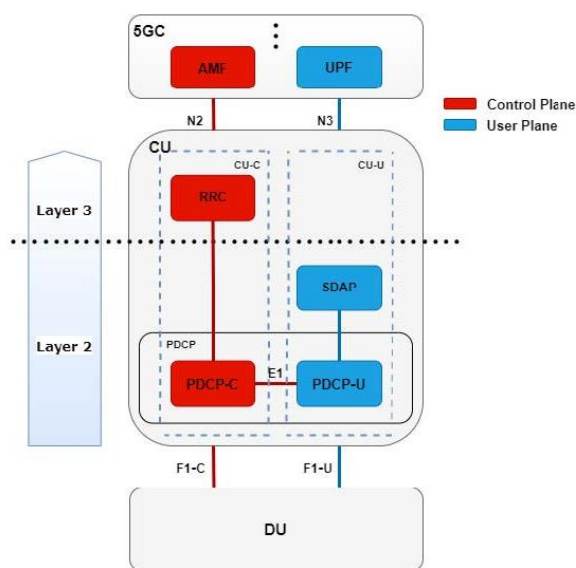


Figura 10: Protocolos, camadas e divisões do CU

RRC: pertence ao plano de controlo e as suas funções são de estabelecer ligações entre o UE e a RAN, a manutenção das conexões de forma a garantir a qualidade, a estabilidade e segurança, libertar recursos rádio quando as conexões já não são necessárias gerindo os recursos para maximizar a eficiência, controla *handovers* entre células, realizando medições de qualidade de sinal.

SDAP: pertence ao plano do utilizador, e tem como função mapear o fluxo de QoS e os canais *Data Radio Bearer (DRB)*, marcando também os pacotes de *uplink (UL)* e DL com e QoS *flow ID (QFI)*.

PDCP: faz parte dos 2 planos presentes no CU e possui a responsabilidade pela compressão do cabeçalho, assim como funções de segurança incluído cifragem e verificação, transferências e descarte de dados devido ao limite de tempo.

2.3.3. Distributed Unit

O DU é responsável pelo processamento de funções radio mais próximas do utilizador e é responsável por PHY, MAC e RLC.

PHY: é responsável por modulação e desmodulação de sinal digital em analógico, codificação e decodificação com correção de erros e pelo processamento de sinal.

MAC: esta camada trata do agendamento de recursos, otimizando o uso do espectro, e controlo de potência, de forma a minimizar a interferência e maximizar a eficiência.

RLC: o RLC faz o controlo do fluxo de forma a evitar congestionamento, fragmenta e reconstitui os pacotes maiores, e proporciona um nível adicional de confiabilidade fazendo retransmissões automáticas.

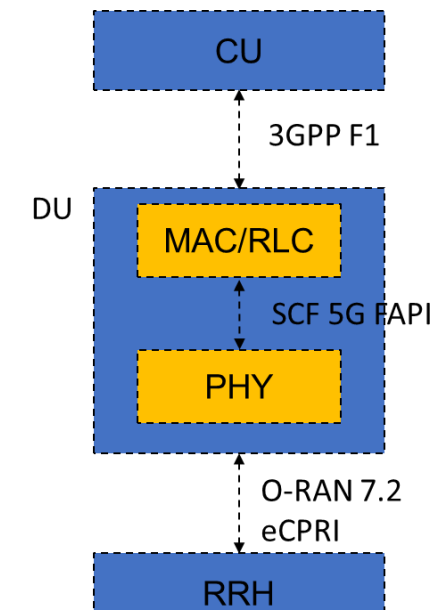


Figura 11: Protocolos, camadas e divisões do DU

2.3.4. Radio Unit (RU)

A RU é o elemento mais próximo dos UEs e a principal função é transmitir e receber sinais radio dos UEs, para tal a RU converte os sinais digitais provenientes do DU em sinais de rádio (analógicos), que são emitidos através das suas antenas. Da mesma forma quando ela recebe os sinais do UE converte em sinais digitais e envia para o DU pelo caminho inverso.

Possui ainda outras funções, tais como: ampliação de sinais de rádio, de forma a garantir a potência suficiente, filtragem, para remover interferências indesejadas, entre outras.

A comunicação entre a RU e o DU é feita através da *interface de fronthaul* e geralmente usa *Common Public Radio Interface* (CPRI) ou *enhanced CPRI* (eCPRI).

2.4. Repositório do código OAI no GitLab

O repositório OAI no *GitLab*, disponível no link <https://gitlab.eurecom.fr/oai>, é uma plataforma centralizada para o desenvolvimento e manutenção de software da RAN e CN para 4G LTE e 5G. Este repositório é essencial para pesquisadores, desenvolvedores e engenheiros que trabalham com tecnologia de redes móveis. [3]

2.4.1. Estrutura e Funcionalidades do Repositório

O repositório do OAI no *GitLab* é organizado em várias seções e subprojectos, cada um focado em diferentes aspetos da infraestrutura de rede móvel. As principais categorias incluem:

1. RAN

- Objetivo: Implementar funcionalidades de RAN para 4G LTE e 5G, incluindo *NodeB* e UE.
- Código: Disponível no sub-repositório dedicado à RAN.
- Licença: Distribuído sob a licença *OAI Public License*.

2. CN

- Objetivo: Fornecer uma implementação do Evolved Packet Core (EPC) para LTE e da 5G CN.
- Código: Armazenado em repositórios específicos, cada um focado em componentes como MME, HSS e outros.
- Licença: Utiliza a licença *Apache V2.0*.

3. CI/ CD (*Continuous Deployment*)

- Objetivo: Automatizar a integração e entrega contínua do código.
- Ferramentas: *Scripts* e configurações para suportar a construção, teste e implantação automática do *software*.

4. Documentação

- Conteúdo: Tutoriais, guias de início rápido, manuais de instalação e documentação técnica detalhada.
- Acesso: Disponível dentro do repositório e frequentemente atualizada para refletir as últimas mudanças e melhores práticas.

2.4.2. Benefícios do Repositório OAI no *GitLab*

- Colaboração Aberta: Permite a colaboração entre diferentes instituições e desenvolvedores individuais, promovendo inovação e melhoria contínua.
- Transparência e Controlo de Versão: Uso de ferramentas de controlo de versão para manter a transparência e rastreabilidade das mudanças no código.
- Documentação Abrangente: Disponibilização de recursos educacionais e técnicos para ajudar novos usuários a se familiarizarem rapidamente com a plataforma.

2.4.3. Estrutura do Repositório

O repositório é organizado em várias pastas e arquivos que incluem:

Tabela 3: Pastas do repositório e sua descrição

<i>ci-scripts</i>	<i>Scripts</i> meta usados pelo processo CI da OSA
<i>cmake_targets</i>	Serviços de <i>build</i> para compilar em diferentes plataformas
<i>Common</i>	Serviços comuns do OAI
<i>Doc</i>	Documentação atualizada e tutoriais iniciais
<i>Executables</i>	Arquivos de origem executáveis de nível superior
<i>Nfapi</i>	Código nFAPÍ com um arquivo <i>Readme</i> local fornecendo mais detalhes
<i>openair1</i>	Implementações da camada PHY do 3GPP LTE Rel-10/12
<i>openair2</i>	Implementações das camadas superiores da <i>stack</i> LTE
<i>openair3</i>	Implementações das funções da rede <i>core</i>
<i>Targets</i>	<i>Scripts</i> e arquivos específicos de plataforma para testes e execução

2.4.4. Principais Funcionalidades

- Implementação de RAN para 4G LTE e 5G.
- Suporte a *NodeB* e UE.
- Integração de *Evolved Packet Core* (EPC) para redes LTE.
- Ferramentas de construção e *scripts* de CI para facilitar a implementação.
- Documentação abrangente e tutoriais para ajudar os desenvolvedores a começar.

3. O que é a OAIBOX

A OAIBOX é uma solução de teste 5G NR SA para laboratórios de pesquisa com base na OAI, o principal pacote de *software de open source* 5G e CN. A OAIBOX é um produto que facilita o uso da OAI para teste, prototipagem e treinamento de 5G, sendo projetada para ser uma solução compacta, portátil e económica. A OAIBOX tem ainda atualmente o *record* mundial de ritmo de transmissão de SA 5G *over-the-air* usando OAI de 800 Mbps. [4]

3.1. Linha de produtos OAIBOX

A OAIBOX possui toda uma gama de produtos: OAIBOX 40, OAIBOX MAX, OAIBOX Open RAN (OAIBOX CU e OAIBOX DU) e OAIBOX mmWave.

Em baixo segue uma foto que ilustra cada produto e algumas especificações do mesmo, começando por 2 soluções monolíticas sendo a principal diferença o facto de a OAIBOX 40 possuir um USRP B200 interno ao contrário da OAIBOX MAX que necessita de um externo.



Figura 13: OAIBOX 40- Fonte: www.oaibox.com Figura 12: OAIBOX MAX- Fonte: www.oaibox.com

Tabela 4: Especificações OAIBOX 40 e OAIBOX MAX

	OAIBOX 40	OAIBOX MAX
Technology	5G NR SA	5G NR SA
Frequency bands	any 3GPP FR1 band up to 6GHz (defaults Bands 41, 77 and 78)	any 3GPP FR1 band up to 6GHz (defaults Bands 41, 77 and 78)
Channel bandwidth	up to 40 MHz (default bands 20 MHz and 40 MHz)	up to 100 MHz
Max. throughput	150 Mbps	800 Mbps
Standards	3GPP Rel. 15/16 (aligned with OAI roadmap)	3GPP Rel. 15/16 (aligned with OAI roadmap)
Antennae	SISO	MIMO, external SMA connector
Max. UEs	16 (OAIBOX comes with 1 UE)	16 (OAIBOX comes with 1 UE)
Max. gNB EIRP	10 dBm (10 mW)	10 dBm (10 mW)
Duplex mode	TDD with configurable slot structure (FDD is possible with customization)	TDD with configurable slot structure (FDD is possible with customization)
Range	Up to 150 m (LoS)	Up to 150m (LoS) with external directive antenna (optional)
Power consumption	<150 W	<150 W
Power supply	110 V and 220 V	110 V and 220 V
Operating temp	-10° C to 40°C	-10° C to 40°C
SDR card	NI USRP B200	External NI USRP B200 / B210 / N300 / N310 / X310 / X410
Sampling Rate	46.08 Msps on the internal USRP.	46.08 Msps on the internal USRP
Weight	7,5 Kg	7 Kg
Dimensions	185mm x 292mm x 376 mm	185mm x 292mm x 376 mm
RF Cable kit	Optional RF cables to avoid over-the-air transmission	Optional RF cables to avoid over-the-air transmission
Dashboard	Access to all features of the OAIBOX Dashboard Premium	Access to all features of the OAIBOX Dashboard Premium
UE	5G UE QUECTEL RM500Q, iPhone14Pro, Google Pixel 7	5G UE QUECTEL RM500Q, iPhone 14 Pro, Google Pixel 7

Passando para a solução Open RAN onde o CU e o DU se encontram separados:



Figura 14: OAIBOX Open RAN (OAIBOX CU e OAIBOX DU) - Fonte: www.oaibox.com

Tabela 5: Especificações OAIBOX Open RAN (OAIBOX CU e OAIBOX DU)

gNB	3GPP Release 16
O-DU	OAIBOX O-DU high-performance computer platform
O-CU	OAIBOX O-CU high-performance computer platform
Midhaul	3GPP F1/ Split 2 between OAI O-CU and OAI O-DU
Fronthaul	O-RAN Split 8 or Split 7.2 ^a
Split 8	Integrates with external NI USRP B200/ B205mini/ B210/ N300/ N310/ N320/ X310 (UBX160) / X410
Split 7.2 (eCPRI)	Category A, between OAI O-DU and COTS O-RU
O-RU bands	N77 (3550-4200 MHz), N78 (3550-3800 MHz), N48 (3550-3700 MHz),
Sync. Split 7.2	PTP switch
Bandwidth	Up to 100MHz
Simultaneous connection	32
Max DL Throughput	700 Mbps
Max UL Throughput	200 Mbps
End to end latency	<15 ms
Coverage LoS	150 m
MIMO	2 x 2 (RF Output Power per port: 250mWatt/24dBm)
Near Real-Time RIC	Open-source OAI FlexRIC SDK

Já a OAIBOX mmWave é uma solução 5G FR2 SA que permite usar um espectro de frequências mais altas (28 GHz):



Figura 15: OAIBOX mmWave - Fonte: www.oaibox.com

Tabela 6: Especificações OAIBOX mmWave

Technology	5G NR SA
Frequency bands	any 3GPP FR2 band up to 6GHz (defaults Bands 41, 77 and 78)
Bandwidth	100 MHz
Frequency Bands:	N261 (28 GHz carrier)
SCS	120 kHz
Duplex mode	TDD
TDD period	1.25 ms
slot format	DDDDDDFUUU
UEs	Quectel COTS UE based on the RM530F
Max DL Throughput	300 Mbps
Max UL Throughput	100 Mbps

3.2. Arquitetura de software OAIBOX

A OAIBOX na sua maioria fornece uma implementação monolítica de OAI gNB correspondente a um único programa gNB (CU+DU) num único *host* que executa toda a *stack* 5G NR RAN e o 5G CN.

A arquitetura de referência do software da OAIBOX 40 é apresentada na Figura 16. O sistema de teste 5G *end-to-end* combina *software* da Quectel, NI, OAI e Allbesmart. O OAIBOX MAX possui uma arquitetura semelhante com uma interface adicional entre o OAI L1 e o NI *Universal Software Radio Peripheral* (USRP) através de uma placa *Ethernet* de 10 Gbit que acompanha a solução. [1]

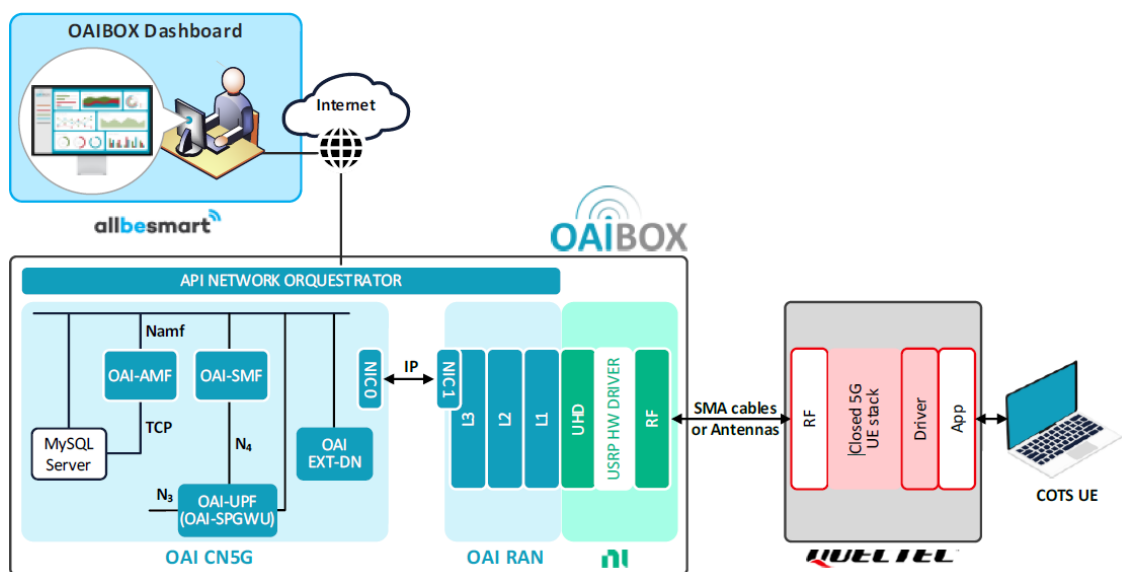


Figura 16: Arquitetura de referência do *software* da OAIBOX 40 - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual

3.3. Setup possíveis de OAIBOX

Abaixo segue um conjunto de ilustrações de possíveis *setups* com as várias OAIBOX disponíveis de forma a facilitar a compreensão das ligações necessárias, usando transmissão *over-the-air* com o UE a 2 metros (distância ideal).

3.3.1. OAIBOX 40:

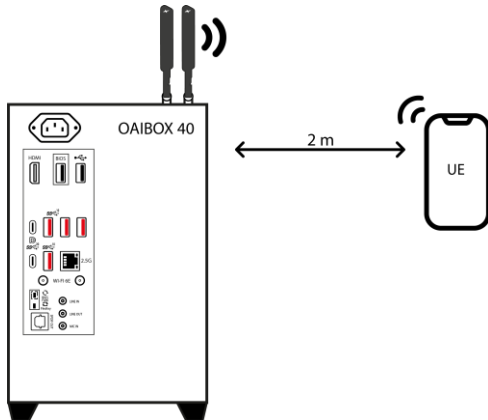


Figura 17: Setup OAIBOX 40

3.3.2. OAIBOX MAX:

Com 2 portas SFP:

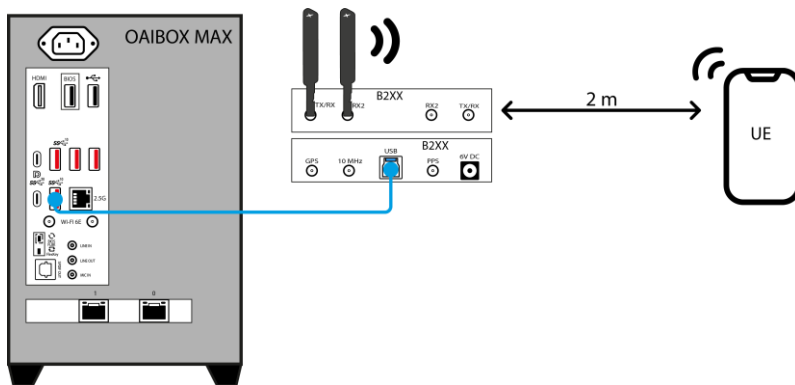


Figura 18: Setup OAIBOX MAX com 2 portas SFP + USRP B2XX

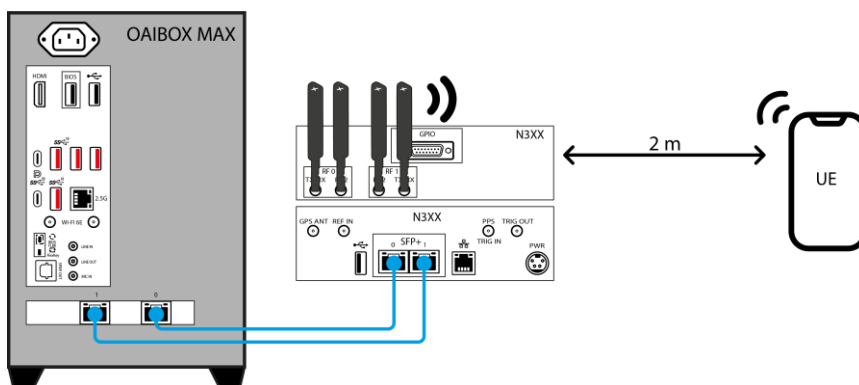


Figura 19: Setup OAIBOX MAX com 2 portas SFP + USRP N3XX

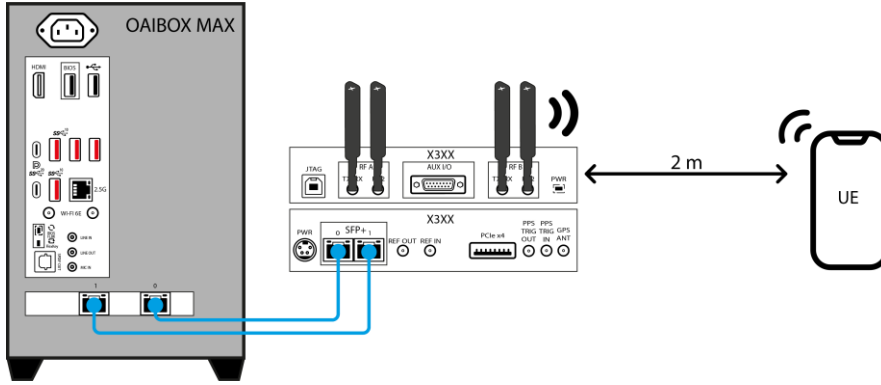


Figura 20: Setup OAIBOX MAX com 2 portas SFP + USRP X3XX

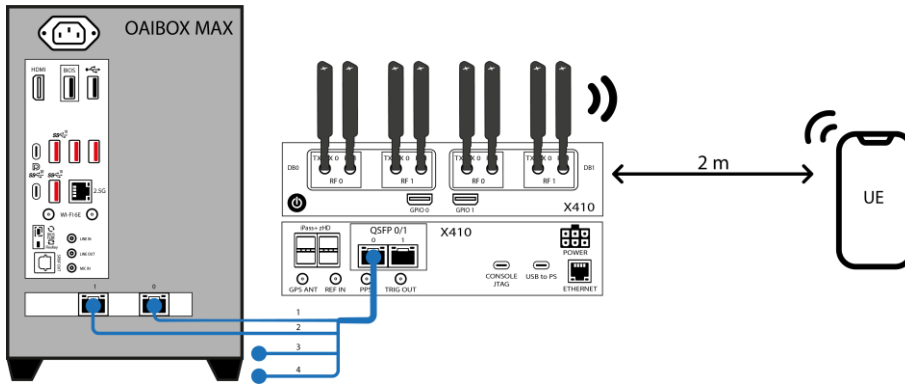


Figura 21: Setup OAIBOX MAX com 2 portas SFP + USRP X410

Com 4 portas SFP:

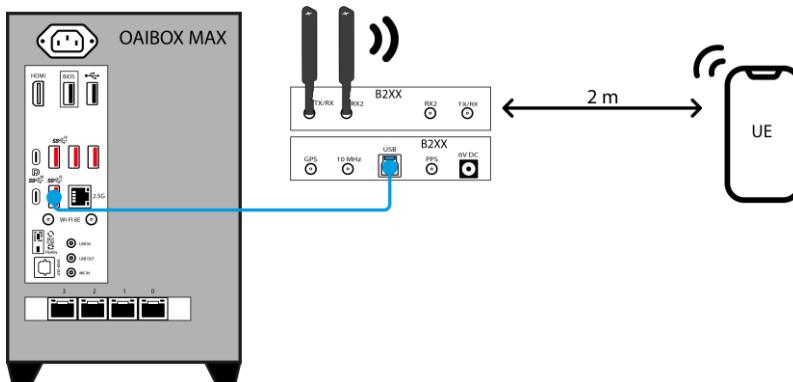


Figura 22: Setup OAIBOX MAX com 4 portas SFP + USRP B2XX

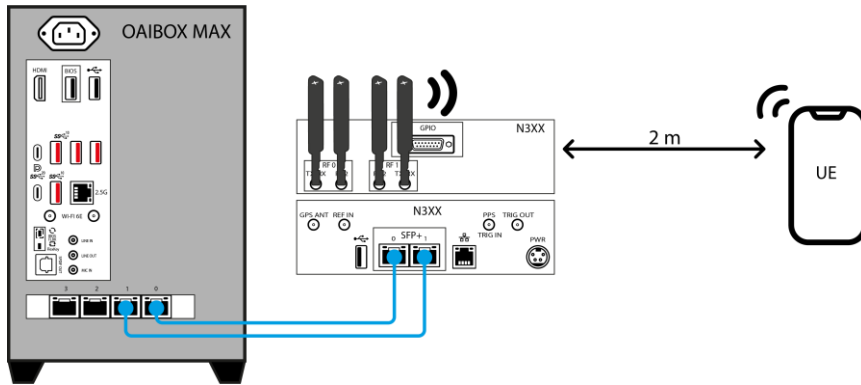


Figura 23: Setup OAIBOX MAX com 4 portas SFP + USRP N3XX

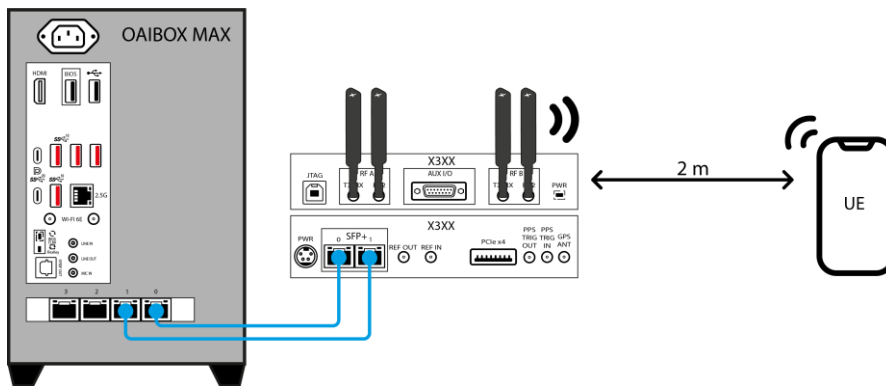


Figura 24: Setup OAIBOX MAX com 4 portas SFP + USRP X3XX

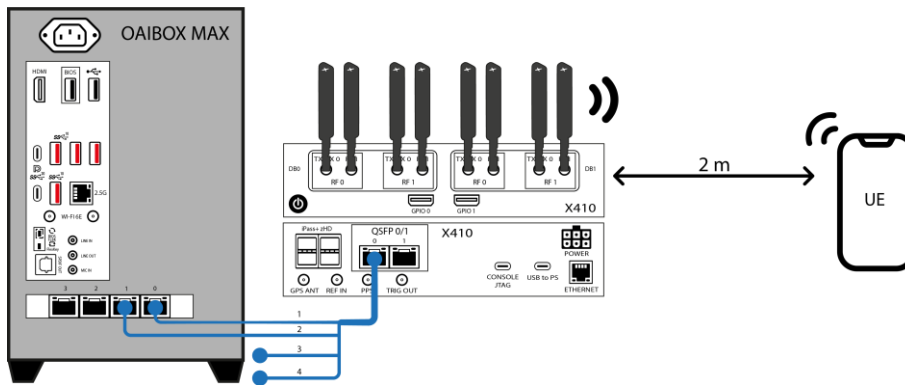


Figura 25: Setup OAIBOX MAX com 4 portas SFP + USRP X410

3.3.3. OAIBOX OPEN RAN (CU+DU)

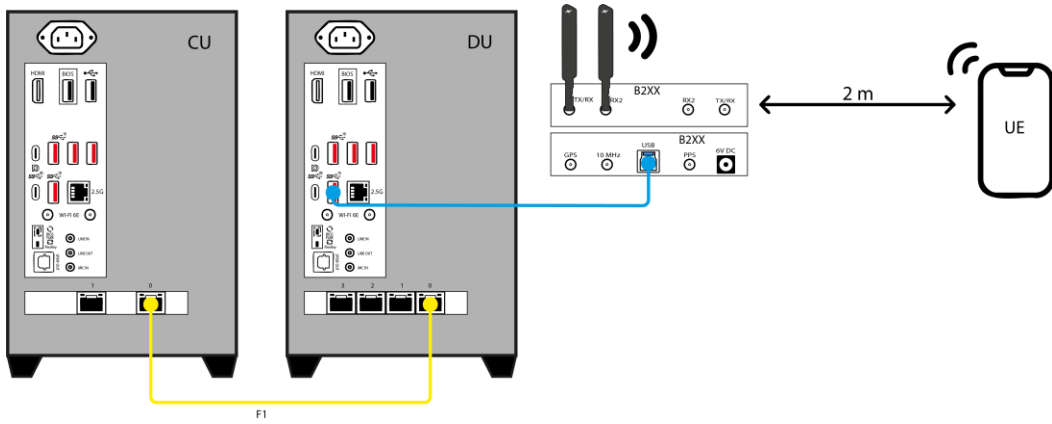


Figura 26: Setup OAIBOX O-RAN + USRP B2XX

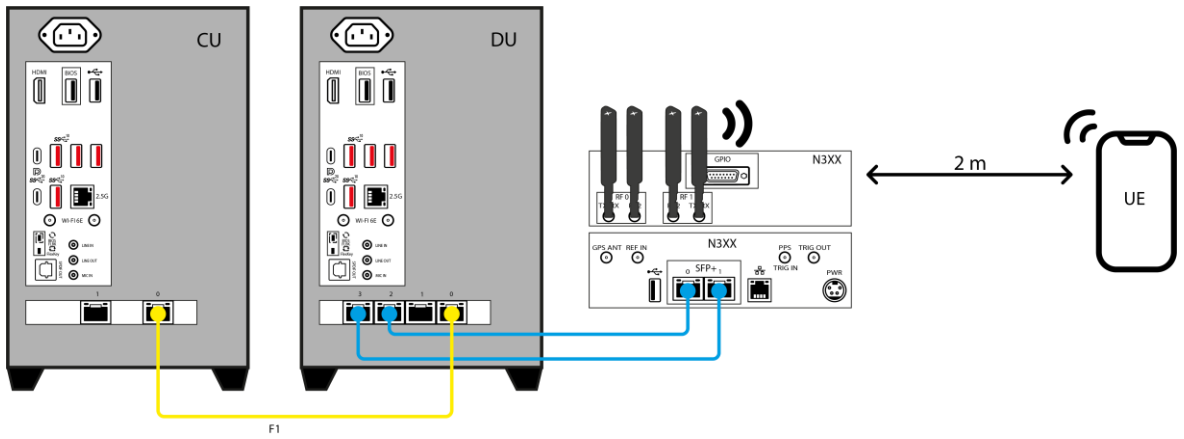


Figura 27: Setup OAIBOX O-RAN + USRP N3XX

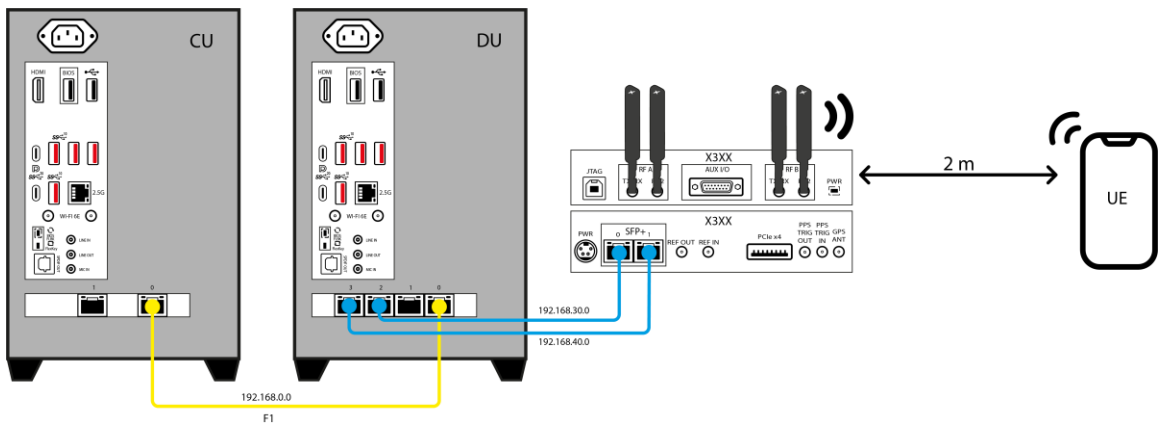


Figura 28: Setup OAIBOX O-RAN + USRP X3XX

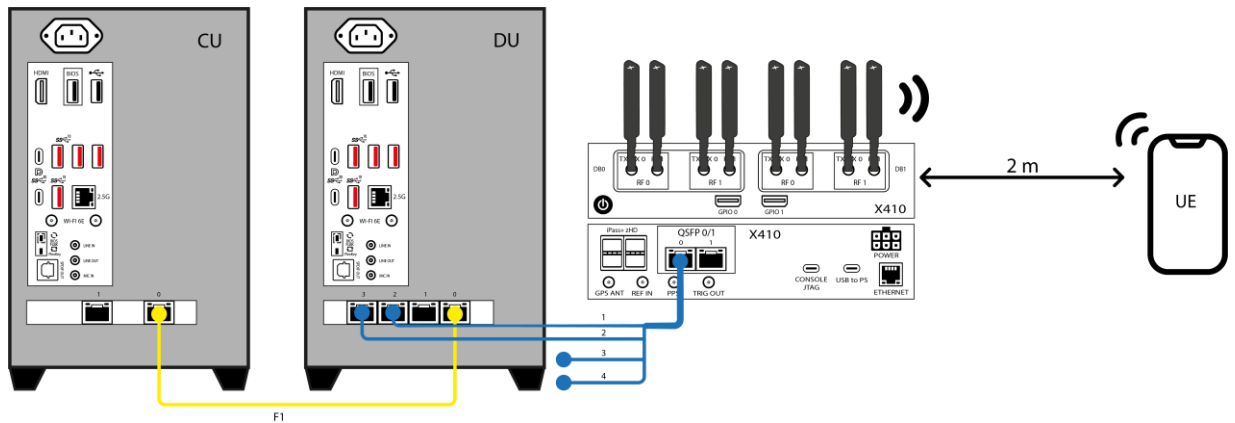


Figura 29: Setup OAIBOX O-RAN + USRP X410

Com um switch:

O switch usado nas ilustrações é um Falcon visto haver a necessidade que o mesmo suporte o PTP, porque a comunicação CU/DU precisa de estar sincronizada.

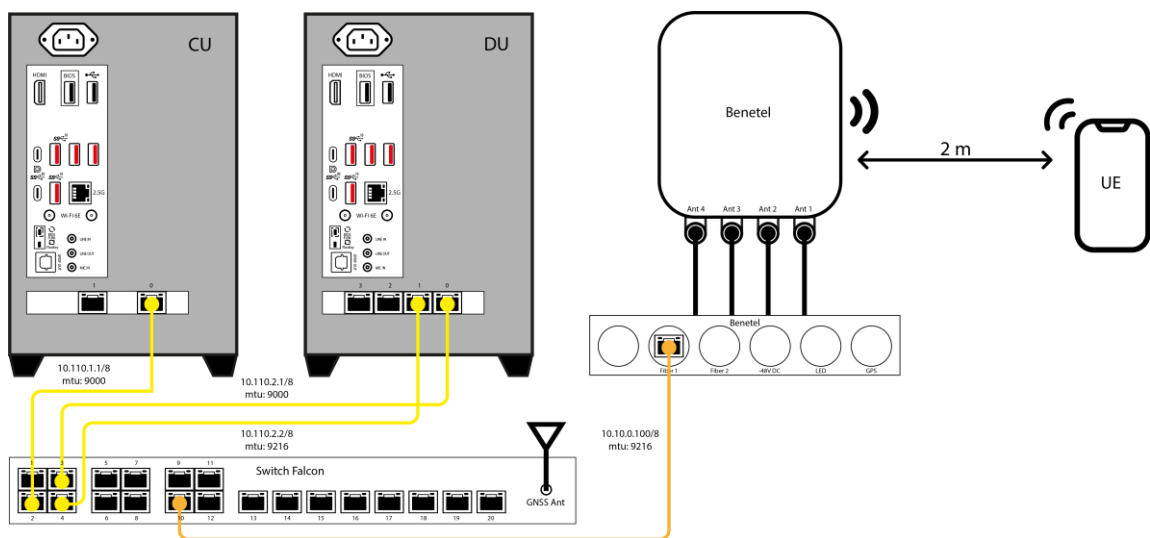


Figura 30: Setup OAIBOX O-RAN + RU Benetel + Switch Falcon

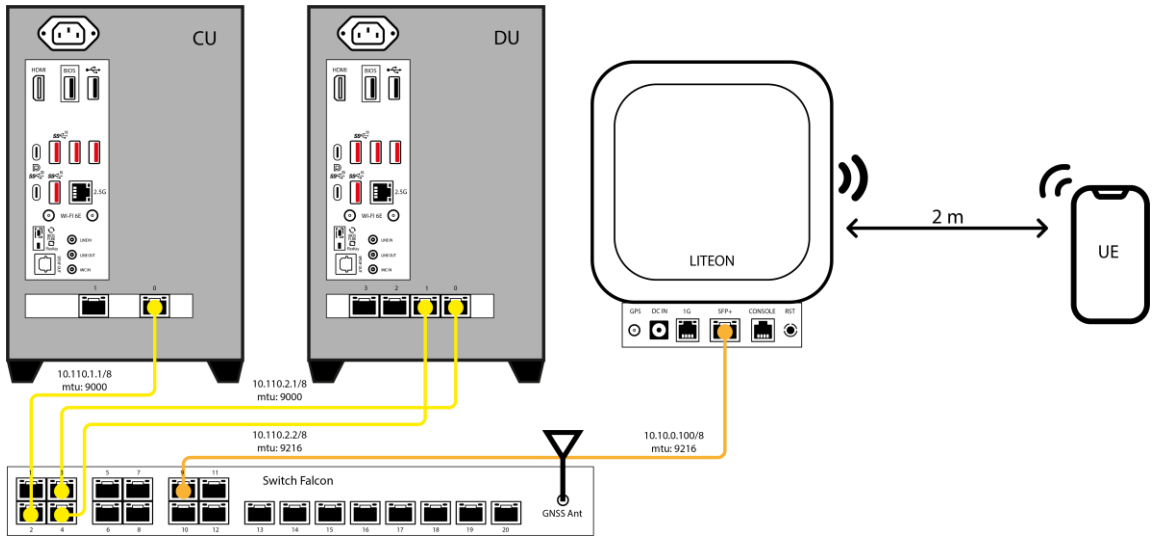


Figura 31: Setup OAIBOX O-RAN + RU LITEON + Switch Falcon

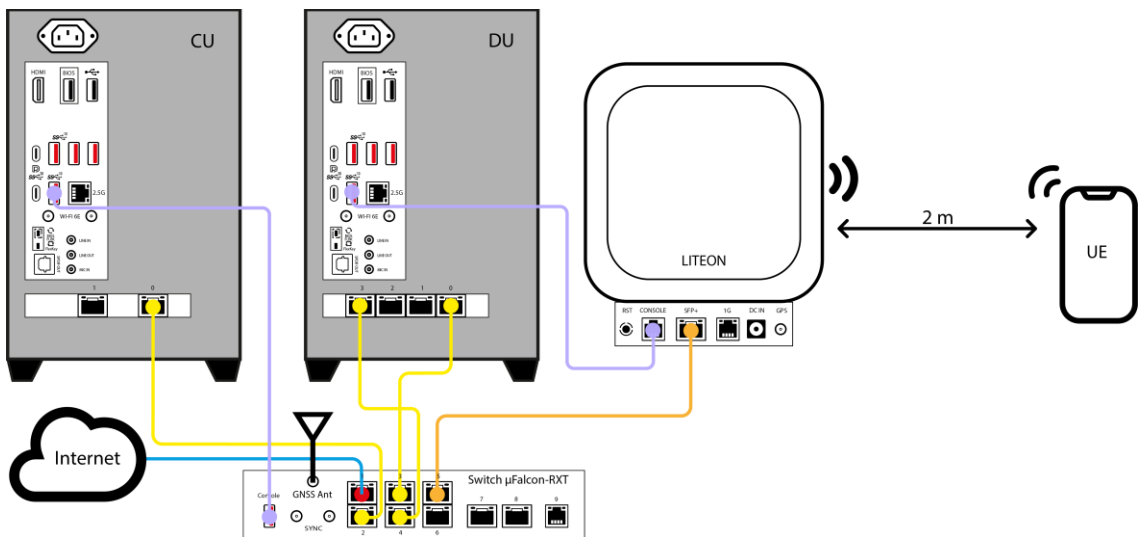


Figura 32: Setup OAIBOX O-RAN + RU LITEON + Switch Falcon + Ligação à Internet

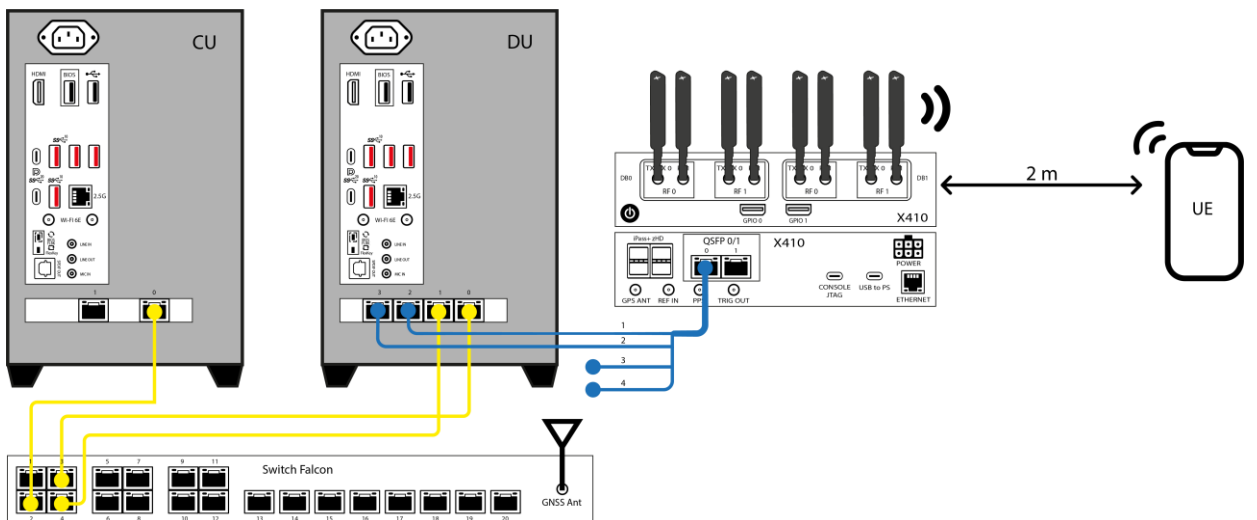


Figura 33: Setup OAIBOX O-RAN + USRP X410 + Switch Falcon

3.3.4. OAIBOX mmWaves

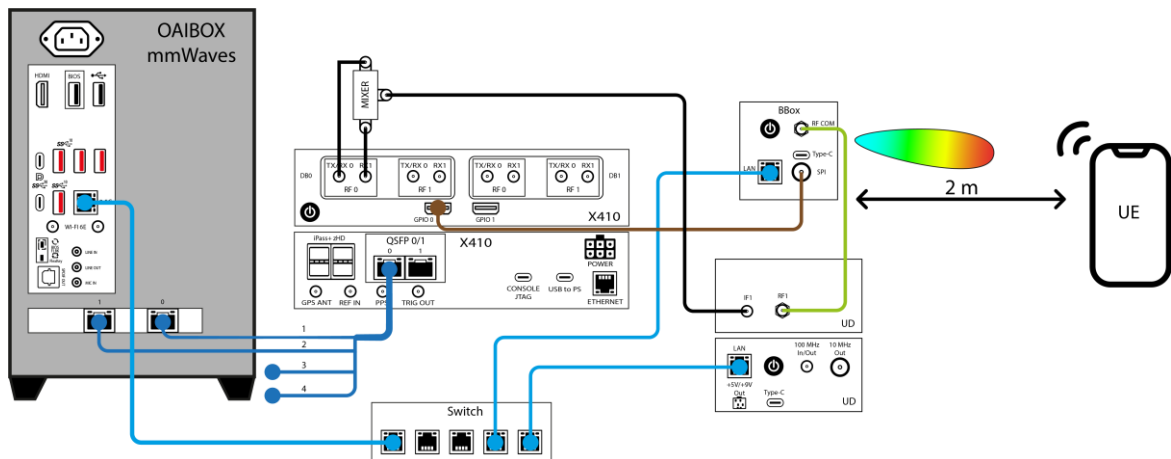


Figura 34: Setup OAIBOX O-RAN + USRP X410 + UDBox + BBox + Switch

É ainda possível, ao invés de se ligar pela ligação RF *Over-the-air*, ser feita a ligação por cabo, como mostra no exemplo abaixo para uma ligação MIMO 4x4 usando um USRP X3XX e um QUECTEL RM500Q-GL.

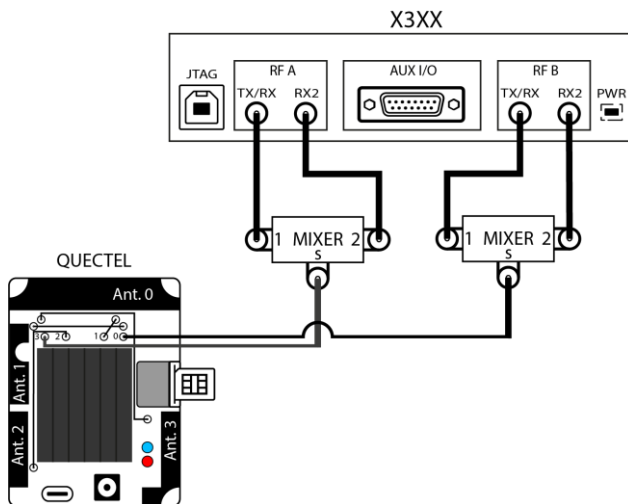


Figura 35: Quectel + X3XX

3.4. OAIBOX Dashboard

A *Dashboard* da OAIBOX é uma plataforma web que pode ser usada para visualizar e configurar a OAIBOX. Ela possui vários recursos com o intuito de facilitar a monitoração em tempo real das métricas da RAN e do OAI CN, inclui ainda scripts de configuração 5G pré-definidas e fáceis de usar. Tudo isto encontrasse acessível por meio de menus intuitivos e fáceis de usar, para agilizar as experimentações praticas do uso do 5G

3.4.1. OAIBOX Dashboard página de login

A OAIBOX Dashboard pode ser acessada através do *link*:

<https://dashboard.oaibox.com/>

Feito o processo de inscrição com um domínio de e-mail institucional, os utilizadores são inscritos automaticamente em qualquer OAIBOX adquirida pela respetiva instituição, podendo também ter acesso à OAIBOX via atribuição manual. Os utilizadores registados só poderão iniciar sessão após a verificação do e-mail. [1]



Figura 36: Página de login da OAIBOX Dashboard - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual

3.4.2. OAIBOX Dashboard tour

A OAIBOX Dashboard facilita a análise de resultados de testes de ponta a ponta, que podem ser medidos em relação aos gráficos de KPIs (*Key Performance Indicators*) em tempo real que estão sendo mostrados. Todos os dados coletados podem ser armazenados e exportados para formatos comuns para posterior análise e discussão.

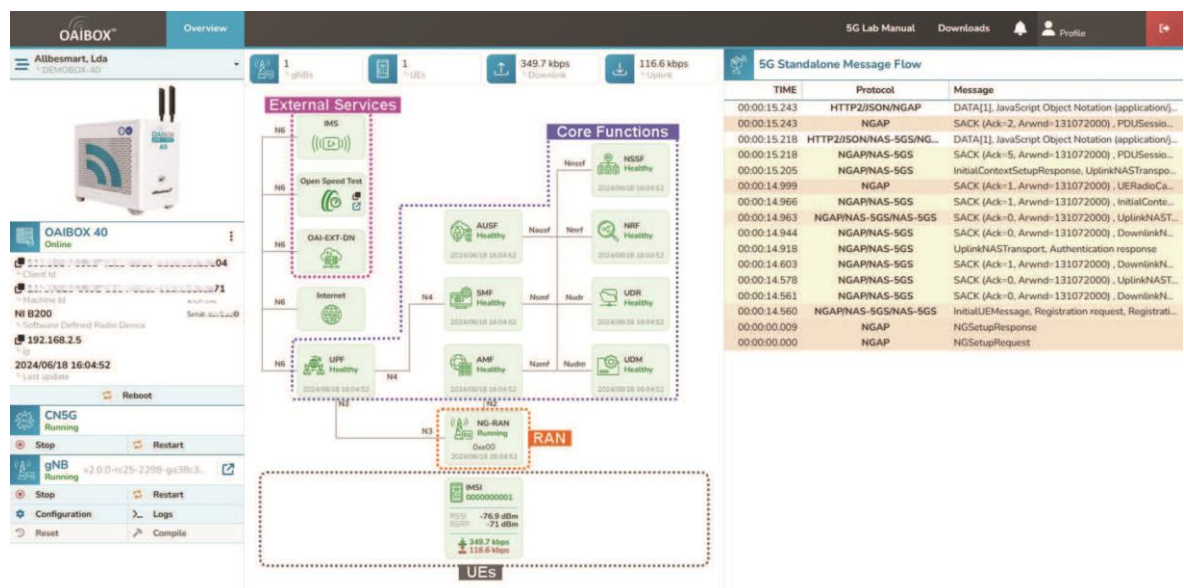


Figura 37: Página inicial da OAIBOX Dashboard (módulos 5G CN e gNB em execução) - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual

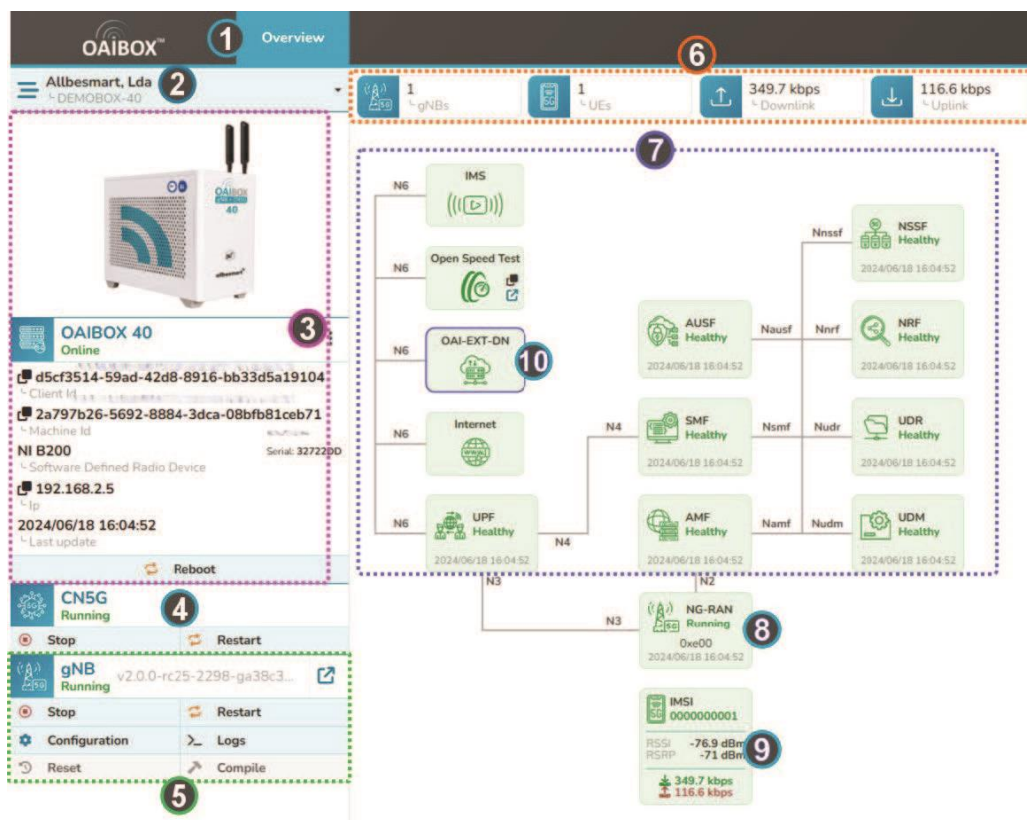


Figura 38: OAIBOX Dashboard- detalhes na parte esquerda da dashboard - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual

As áreas identificadas são explicadas abaixo:

① Menu de Navegação, fornecendo a localização atual do utilizador no Painel OAIBOX. Ele também permite que o utilizador salte rapidamente para um ponto de navegação específico ou trace o caminho de volta à sua página original.

② Seletor OAIBOX, permitindo que o usuário selecione qual OAIBOX monitorar/controlar (caso existam vários).

Uma imagem que identifica o tipo de produto OAIBOX: OAIBOX 40, OAIBOX MAX...

③ Uma seção de informações OAIBOX. Ela fornece uma imagem do produto informações sobre o ID do cliente (exclusivo para cada cliente), ID da máquina (exclusivo para cada OAIBOX), o *Software Defined Radio* (SDR) usado, o endereço IP atribuído localmente, o *timestamp* mais recente quando o OAIBOX entrou em contato com a *Application Programming Interface* (API) OAIBOX central e um botão de ação para reiniciar o OAIBOX.

④ A seção CN5G fornece informações sobre o status da Rede Principal 5G (Vermelho: Parado; Laranja: Arranque; Verde: Ligado; Azul: Atualização). Há um botão de ação para iniciar o CN5G, que é substituído por um botão "Restart" e um botão "Stop" quando a rede principal estiver em execução.

⑤ A seção gNB exibe o status fora do gNB (Vermelho: Parado; Laranja: Arranque; Verde: Ligado; Azul: Compilando/Atualizando) dependendo da ação atual que está

sendo executada. A versão atual do código OAIBOX gNB também é exibida. Existem vários botões de ação disponíveis que permitem:

- Alterar a configuração de arranque do gNB;
- Ver os Logs sempre que o gNB estiver em execução, compilando ou atualizando;
- Redefinir a configuração para a configuração padrão para a versão gNB selecionada;
- Compilar quando o código é alterado pelo utilizador;
- Um botão “*Start*” para executar o gNB. Enquanto o gNB está em execução, o botão “*Start*” é substituído por um botão Stop e um botão “*Restart*”. Além disso, o botão abre a página dedicada do gNB.

⑥ Visão geral do status do OAIBOX. Inclui o número de gNBs ligados ao CN 5G, o número de UEs anexados a cada gNB, as taxas de transferência de *downlink* e *uplink* agregadas em tempo real.

A seção OAIBOX contém o *status* da OAIBOX (Vermelho: *Offline*; Verde: *Online*) e um botão de ação para reiniciar a OAIBOX.

⑦ O estado da rede de cada função principal (AUSF, NRF, UDM, UDR, AMF, SMF e UPF) e o estado do NG-RAN (o nome gNB é apresentado). Informações sobre a conexão com a Internet e *IP Multimedia Subsystem* (IMS) também são exibidas. Cada bloco é codificado por cores para Vermelho: *Offline*; Laranja: Arranque; Verde: *Online*.

⑧ O estado do NG-RAN, codificado por cores de acordo com o indicado no ponto anterior.

⑨ O número de UEs anexadas ao gNB e um resumo de seus KPIs.

⑩ A OAIBOX está equipada com uma ferramenta iPerf integrada e pré-configurada, que pode ser gerenciada via OAIBOX *Dashboard*. Para aceder às funcionalidades, os usuários podem clicar neste botão, que abrirá uma janela modal exibindo configurações do iPerf e gerenciamento de estado de teste.



Figura 39: A janela modal de gerenciamento da OAIBOX *Dashboard* iPerf - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual

- Para a realização de um teste de *Uplink*, os usuários devem iniciar o teste clicando no botão "Start" e, em seguida, copiar os comandos fornecidos para um terminal no UE. Nesse cenário, a OAIBOX funcionará como um servidor iPerf, enquanto a UE funcionará como um cliente iPerf.
- Para realizar um teste de *Downlink*, os utilizadores OAIBOX podem iniciar o teste clicando em "Start". A velocidade de transferência desejada em Mbps e endereço IP de destino pode ser personalizado. Uma vez iniciado o serviço, a janela modal do IPerf será atualizada para fornecer ao utilizador a linha de comando de emparelhamento a ser usada na UE. Nesta configuração, a OAIBOX atuará como um cliente iPerf (remetente), enquanto o UE funcionará como um servidor iPerf (recetor)

No lado direito, podemos ver os seguintes elementos visuais:

TIME	Protocol	Message
00:00:14.214	HTTP2/JSON/NGAP	DATA[1], JavaScript Object Notation (application/json)
00:00:14.213	NGAP	SACK (Ack=0, Arwnd=106496) , PDUSessionResourceSetupResponse
00:00:14.189	NGAP/NAS-5GS	SACK (Ack=0, Arwnd=106496) , PDUSessionResourceSetupRequest...
00:00:14.189	HTTP2/JSON/NAS-5GS/NG...	DATA[1], JavaScript Object Notation (application/json), PDU session e...
00:00:14.177	NGAP/NAS-5GS	UplinkNASTransport, UL NAS transport, PDU session establishment r...
00:00:01.016	NGAP/NAS-5GS	InitialContextSetupResponse, UplinkNASTransport, Registration com...
00:00:00.813	NGAP	SACK (Ack=1, Arwnd=106496) , UERadioCapability/InfoIndication
00:00:00.769	NGAP/NAS-5GS	SACK (Ack=0, Arwnd=106496) , InitialContextSetupRequest, Registr...
00:00:00.767	NGAP/NAS-5GS/NAS-5GS	SACK (Ack=0, Arwnd=106496) , UplinkNASTransport, Security mode...
00:00:00.751	NGAP/NAS-5GS	SACK (Ack=1658340939, Arwnd=106496) , DownlinkNASTransport...
00:00:00.727	NGAP/NAS-5GS	UplinkNASTransport, Authentication response
00:00:00.359	NGAP/NAS-5GS	SACK (Ack=2, Arwnd=106496) , DownlinkNASTransport, Authentica...
00:00:00.322	NGAP/NAS-5GS	UplinkNASTransport, Authentication failure (Synch failure)
00:00:00.110	NGAP/NAS-5GS	SACK (Ack=1, Arwnd=106496) , DownlinkNASTransport, Authentica...
00:00:00.087	NGAP/NAS-5GS	SACK (Ack=0, Arwnd=106496) , UplinkNASTransport, Identity respo...
00:00:00.000	NGAP/NAS-5GS/NAS-5GS	InitialUEMessage, Registration request, Registration request
00:00:00.000	NGAP/NAS-5GS	SACK (Ack=0, Arwnd=106496) , DownlinkNASTransport, Identity re...

Figura 40: OAIBOX Dashboard- detalhes na parte direita da dashboard - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual

- Um *direct link* para fazer o download da versão mais recente do Manual do Laboratório OAIBOX 5G.
- Um *direct link* para o repositório de download OAIBOX. Inclui recursos como o Manual do Laboratório 5G (sempre atualizado), *software* de *driver* Quectel, entre outros.
- A área de alertas/notificações do sistema, fornecendo *feedback* do sistema ao utilizador
- A identificação da conta de utilizador atualmente conectada no Painel OAIBOX. Você pode personalizar seu perfil, como alterar o endereço de e-mail, o nome e o sobrenome do utilizador associado a essa conta e ativar a autenticação de dois fatores.

15 O botão de *logout* da OAIBOX Dashboard.

16 A seção Fluxo de mensagens autônomo 5G. A OAIBOX Dashboard pode usar o Wireshark para realizar inspeção rápida de pacotes na rede 5G. Para maior eficiência, ele exibe apenas o *timestamp*, o protocolo e um breve resumo do conteúdo da mensagem. A inspeção mais profunda de pacotes pode ser feita separadamente com o Wireshark, pois ele já está incluído e configurado na OAIBOX, para 5G SA.



Figura 41: A página dedicada ao gNB - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual

Cada nova área identificada é explicada abaixo:

1 Menu de Navegação, indicando que o usuário está visualizando dados relacionados ao gNB no momento.

2 O *status online* do gNB (Vermelho: *Offline*; Laranja: A iniciar; Verde: *Online*), informações resumidas sobre a velocidade de transferência (UL e DL) e número de UEs anexados. O OAIBOX precisa ter acesso à Internet para alcançar o *status gNB Online*.

3 Botão que permite o *download* de dados de telemetria do 5G gNB para análise adicional. Os dados de telemetria incluem KPIs gNB. Esses dados podem ser usados para obter *insights* adicionais sobre o desempenho do gNB, solucionar problemas, otimizar a eficiência da rede, entre outros. Os dados de telemetria são fornecidos no formato JSON (*JavaScript Object Notation*).

4 Os parâmetros de configuração atuais para o gNB. Atualmente, eles são a Banda de Frequência 3GPP, a largura de banda do canal, a configuração do *slot TDD* (*Time-Division Duplex*), a configuração MIMO (antenas lógicas e físicas) e a ordem de modulação (DL e UL).

5 Botão que abre os logs em execução do OpenAirInterface gNB, exportados da OAIBOX. Os logs podem ser visualizados e analisados diretamente na OAIBOX Dashboard. Os logs do gNB fornecem informações adicionais sobre o status do USRP, gNB, UEs anexados e são mais relevantes ao solucionar problemas de conexão.

6 Os detalhes sobre a configuração atual do gNB – não editável.

7 Um gráfico em tempo real mostrando a evolução histórica (últimos 10 minutos) das taxas de transferência de *downlink* e *uplink* agregados do gNB.

8 Informações resumidas sobre as UEs atualmente conectadas ao gNB. É apresentada uma caixa dedicada para cada UE anexada.

Informações adicionais sobre cada UE anexada podem ser acedidas clicando em 7. As informações fornecidas são apresentadas na Figura abaixo. Cada área identificada é explicada mais abaixo.



Figura 42: A página dedicada ao EU - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual

- ❶ Menu de navegação relativo à página que está a ser apresentada.
- ❷ Informações resumidas sobre todos os KPIs monitorados para esta UE. Cada KPI.
- ❸ Os gráficos em tempo real para todos os KPIs que estão sendo monitorados. Os gráficos em tempo real adaptam-se de acordo com as regras definidas nos filtros.
- ❹ Uma evolução histórica das taxas de transferência agregadas de *downlink* e *uplink* desta UE – este gráfico é atualizado em tempo real.
- ❺ A visão combinada dos KPIs da PHY (para DL e UL). Cada KPI individual pode ser ativado ou desativado. Esse recurso facilita a análise de correlação entre KPIs.

3.5. Explicação das métricas e dos indicadores-chave de desempenho dos UE

Um Indicador Chave de Desempenho é um valor quantificável que demonstra a eficácia com que uma rede está a servir o utilizador. Por exemplo, os KPIs são usados para requisitos de definição do sistema, verificação do bom funcionamento das redes instaladas e comparação de desempenho fornecido por fornecedores ou tecnologias específicas. Nesta subsecção, apresentamos os KPIs exibidos pela *OAIBOX Dashboard*.

3.5.1. RSSI

O *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) mede a média linear da potência total recebida (em Watt) observada apenas por símbolo *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) configurado e na largura de banda de medição, sobre N_{RB} *resource blocks* (RB). Inclui a potência de células de serviço e não serviço de co-canal, interferência de canal adjacente, ruído térmico, etc. O RSSI é dado por:

$$\text{RSSI} = \frac{1}{N_{\text{symb}}} \sum_{l=1}^{N_{\text{symb}}} \sum_{r=1}^{N_{RB}} \sum_{k=1}^{N_{SC}^{RB}} |S_{l,r,k}|^2, \quad (1)$$

onde N_{symb} é o número de símbolos OFDM usados na medição, $N_{SC}^{RB} = 12$ é o número de subportadoras por resource block, e $s_{l,r,k}$ é a potência do sinal recebido no símbolo l th OFDM, r th *resource block* e k th subportadora.

$$\text{RSSI}_{dBm} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{RSSI}[W]}{10^{-3}} \right), \quad (2)$$

3.5.2. RSRP

O *Reference Signal Received Power* (RSRP) mede a potência média linear (em watt) dos *resource elements* que transportam sinais de referência específicos da célula dentro da largura de banda da frequência de medição considerada. Este valor é geralmente apresentado em dBm, e é dado por:

$$\text{RSRP}_{dBm} = \text{RSSI}_{dBm} - 10 \log_{10}(N_{sc}^{RB} N_{RB}). \quad (3)$$

O SS-RSRP representa o RSRP baseado no *Secondary Synchronisation Signal*, enquanto o CSI-RSSI corresponde a medições baseadas em símbolos OFDM contendo ocasiões Channel State Information Reference Signal (CSI-RS) configuradas. $N_{sc}^{RB} = 12$ é o número de subtransportadoras por *resource block*. Uma UE pode fornecer medições SS-RSRP ou CSI-RSRP na Camada 1, por exemplo, ao enviar *Channel State Information* (CSI), e medições SS-RSRP na Camada 3 ao enviar um Relatório de Medição RRC para o gNB.

3.5.3. RSRQ

O Reference Signal Received Quality (RSRQ) é usado em redes 5G NR para determinar a qualidade do canal de rádio com base em *Synchronization Signals* (SSs). O RSRQ, ao contrário do RSRP (*wanted signal strength*), também inclui o nível de interferência devido à inclusão do RSSI no cálculo. Esse parâmetro também é usado para seleção e transferência de células, se o RSRP não for suficiente. Isso acontece principalmente perto da borda celular de uma célula de serviço.

3.5.4. PHR

Em redes 5G, o *Power Headroom Report* (PHR) refere-se a um mecanismo que permite ao gNB avaliar a margem de energia disponível de um UE. Os PHR são importantes para o gerenciamento eficiente de energia e alocação de recursos na rede. *Power Headroom* (PH) é a diferença entre a capacidade máxima de potência de transmissão da UE e a potência real necessária para que a UE mantenha sua conexão com a estação base, atendendo aos requisitos de qualidade de serviço. Ele representa a reserva de energia que a UE tem disponível para transmitir sinais de potência mais alta, se necessário. Existem 3 tipos de PH:

- **Tipo 1:** Diferença entre a potência máxima de transmissão UE nominal e a potência estimada para transmissão *Uplink Shared Channel* (ULSCH) por célula de serviço ativada;
- **Tipo 2:** Diferença entre a potência máxima de transmissão UE nominal e a potência estimada para a transmissão ULSCCH e *Physical Uplink Control Channel* (PUCCH) em *SpCell* da outra entidade MAC;
- **Tipo 3:** Diferença entre a potência de transmissão máxima nominal UE e a potência estimada para a transmissão *Sounding Reference Signal* (SRS) por célula de serviço ativada.

Por exemplo, o cálculo do PH para o tipo 1 com base na transmissão *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH) de referência, quando a UE transmite o PUSCH na ocasião de

transmissão i , no UL-BWP b ativo, no portador f , na célula de serviço c , na perda de trajetória medida pela UE utilizando o sinal de referência com o índice q_d , na configuração do conjunto de parâmetros com o índice j e no estado de ajustamento do controlo de potência com o índice l , é dada por:

$$PH_{type1,b,f,c}(i, j, q_d, l) = \tilde{P}_{CMAX,f,c}(i) - \{P_{OPUSCH,b,f,c}(j) + \alpha_{b,f,c}(j) \times PL_{b,f,c}(q_c) + f_{b,f,c}(i, l)\}, \quad (4)$$

em que $\tilde{P}_{CMAX,f,c}(i)$ é a potência máxima de transmissão UE, $P_{OPUSCH,b,f,c}(j)$ é a potência nominal de transmissão UE, $\alpha_{b,f,c}(j)$ é o multiplicador de controlo de potência fracionária, $PL_{b,f,c}(q_c)$ é a medição da perda de trajetória e $f_{b,f,c}(i, l)$ é o componente de controlo de potência em circuito fechado.

3.5.5. SINR

Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR) é uma medição de qualidade que representa a relação entre a potência do sinal desejado e a interferência mais a potência do ruído, ou seja,

$$SINR = \frac{S}{N+I}, \quad (5)$$

onde I é o poder de interferência de outros sinais medidos. Para SS-SINR, a potência de sinal desejada e a interferência mais potência de ruído são medidas a partir de elementos de recursos usados pelo *Secondary Synchronization Signal* (SSS).

3.5.6. SNR

Signal-to-noise ratio (SNR) é uma medida que compara o nível de um sinal desejado com o nível de ruído de energia. É definido como a relação entre a potência desejada e a potência sonora, ou seja,

$$SNR = \frac{S}{N}, \quad (6)$$

onde S é a potência dos sinais desejados medidos, e N é o ruído de potência. Considerando os conectores de antena UE como ponto de referência, o SNR também pode ser definido como

$$SNR = \frac{\sum_{j=1}^{N_{rx}} E_s^{(j)}}{\sum_{j=1}^{N_{rx}} N_{oc}^{(j)}} \quad (7)$$

onde N_{rx} é o número de conectores de antena recetora, $E_s^{(j)}$ é o nível de sinal desejado transmitido, e $N_{oc}^{(j)}$ é a densidade espectral de potência de uma fonte de ruído branco com potência média por elemento de recurso normalizada para o espaçamento da subportadora. Para esta definição, assume-se que os elementos de recurso não são

pré-codificados, ou não têm qualquer ganho que possa ser associado à operação de pré-codificação.

3.5.7. CQI

O *Channel Quality Indicator* (CQI) os valores permitem que uma UE quantifique e reporte (usando o PUCCH ou o PUSCH) suas condições de canal de rádio *downlink* dentro de uma Parte de Largura de Banda específica. Os valores de CQI são sinalizados usando um intervalo de 0 a 15, onde os valores altos de CQI indicam que a UE é capaz de receber modulação de alta ordem com uma alta taxa de codificação.

3.5.8. MCS

O *Modulation and Coding Scheme* (MCS) corresponde a uma linha dentro da tabela de pesquisa MCS relevante e é alocada por um algoritmo pertencente ao gNB. O MCS é sinalizado para a UE no PDCCH (formato DCI 1_0 ou 1_1). Em geral, um maior índice MCS corresponde a maiores tamanhos de blocos de transporte e, conseqüentemente, a mais bits de informação sobre a interface aérea.

3.5.9. BLER

O *Block Error Rate* (BLER) é definido como o número de blocos de código recebidos errados, $N_{TB, err}$, dividindo pelo número total de blocos, N_{TB} , ou seja,

$$BLER = \frac{N_{TB, err}}{N_{TB}} \quad (8)$$

O bloco de código é considerado errado se o seu código CRC anexado não corresponder ao calculado pelo recetor. Ao realizar a medição do recetor, para cada bloco de carga útil de dados recebido, a UE enviará uma confirmação (ACK) para blocos decodificados com êxito e enviará uma confirmação negativa (NACK) para blocos com falha no *Cyclic Redundancy Check* (CRC). *Throughput*, é uma métrica para medir os bits de dados reais recebidos com sucesso em uma determinada duração, que pode ser descrita matematicamente como:

$$Throughput = (1 - BLER) \textit{bitrate} \quad (9)$$

Assim, à medida que o BLER diminui, a taxa de transferência aumenta.

3.5.10. Bitrate

O *bitrate* é o número total de bits transferidos por segundo. O número total de bits é a soma do número de bits de cada bloco de transporte, b_i , $i \in \{1, \dots, N_{TB}\}$, transferidos em um determinado período ΔT , ou seja,

$$\textit{bitrate} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{TB}} b_i}{\Delta T} \quad (10)$$

3.5.11. Rank Indicator

Em sistemas de comunicação 5G MIMO, o *Rank Indicator* (RI) é um parâmetro de feedback que é enviado pela UE ao gNB para indicar o número de fluxos espaciais independentes que podem ser suportados pelo canal de rádio. A classificação da matriz de canais MIMO é um parâmetro importante que determina o número de fluxos espaciais que podem ser transmitidos pelo canal. No 5G, o RI é usado em conjunto com outros parâmetros de realimentação, como o CQI e o *Precoding Matrix Indicator* (PMI), para permitir que o transmissor realize a pré-codificação, que é uma técnica de processamento de sinal que permite ao transmissor otimizar a transmissão de dados pelo canal MIMO. A pré-codificação ajuda a mitigar a interferência e melhorar o desempenho geral do sistema.

O valor do RI é determinado com base na *Singular Value Decomposition* (SVD) da matriz de canais MIMO. O RI máximo é o número de antenas de cada lado se o número de antenas Tx e Rx for o mesmo. Se o número de Tx e Rx são diferentes, aquele com menos antena é o mesmo que o RI máximo alcançável. Por exemplo, no caso do MIMO 2x2, ilustrado na Figura 1-24, o valor de RI pode ser 1 ou 2. Quando o valor é 2 significa que praticamente não há correlação entre as antenas e o melhor desempenho é alcançado. Se o valor for 1, isso implica que o sinal das duas antenas Tx é percebido pela UE como sendo como um único sinal vindo de uma única antena, o que significa o pior desempenho.

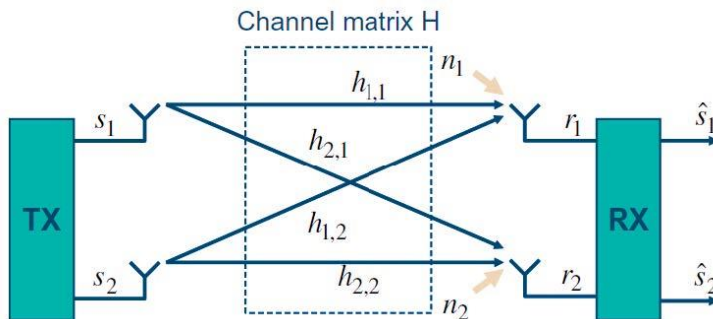


Figura 43: Configuração de antenas MIMO 2x2 com ruído aditivo - Fonte: OAIBOX 5G Lab Manual

Com base na Figura 1-24, o sinal recebido pode ser expresso como:

$$\bar{r} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} = H \cdot \bar{s} + \bar{n} \quad (11)$$

onde H é a matriz de canais MIMO 2x2.

4. Testes realizados com a OAIBOX

Foram realizados vários testes com as OAIBOX os que se seguem foram realizados com a OAIBOX 40, feitos no seguimento do manual, para estes testes foi montado o *setup* semelhante ao ilustrado na figura 15, mas ao invés de ser usado um *smartphone* como o que é ilustrado foi usado um modulo Quectel RM500Q-GL ligado ao *laptop*. Visto a OAIBOX usada ser a 40 só existe um único tipo de configuração nas *Logical e Physical Antennas* (Tx 1 e Rx 1).

As figuras presentes neste capítulo podem ser encontradas no arquivo ZIP anexado, intitulado “Anexos_Relatorio_NelsonAndrade.zip”, que acompanha este relatório. Devido à necessidade de preservar a qualidade original das figuras.

Para estas configurações foi calculado o valor máximo teórico que é esperado tanto para o *download* como para o *upload* pelos cálculos abaixo.

Number of Subcarriers per Resource Block = 12

Physical Data Shared Channel = 11

Total Data Resource Elements = $12 \times 11 = 132$

Considerando que se a modelação 256QAM (Modulação de ordem 8) e *code rate* de 0.925, obtemos

Spectral efficiency = $8 \times 0.925 = 7.4063$ bits/s/Hz

Data carried em 1 RB por 1 *slot* = $132 \times 7.4063 = 978$ bits em 0.5ms

Para 40 MHz:

Número de RB = $40\text{MHz}/360\text{KHz} = 111$ RBs (106 usados)

Para 20 MHz:

Número de RB = $20\text{MHz}/360\text{KHz} = 55$ RBs (50 usados)

Número total de *Slots* em 1s = $1\text{s}/0.5\text{ms} = 2000$ *slots*

Considerando uma configuração TDD com uma proporção 3-1-1.

Downlink Slots = 1200 *slots* e *Uplink Slots* = 400 *slots*

Considerando o número de *layers* MIMO = 1

Para 40 MHz:

Max DL bit rate = $(978 \text{ bits} \times 106 \text{ RBs} \times 1200 \text{ slots} \times 1 \text{ layers})/10^6 = 124$ Mbps

Max UL bit rate = $(978 \text{ bits} \times 106 \text{ RBs} \times 400 \text{ slots} \times 1 \text{ layers})/10^6 = 41$ Mbps

Para 20 MHz:

$Max\ DL\ bit\ rate = (978\ bits \times 50\ RBs \times 1200\ slots \times 1\ layers) / 10^6 = 58\ Mbps$

$Max\ UL\ bit\ rate = (978\ bits \times 50\ RBs \times 400\ slots \times 1\ layers) / 10^6 = 19\ Mbps$

Assim sendo, foi começado por fazer os testes nas duas larguras de banda disponíveis (40 MHz e 20 MHz) com as restantes configurações iguais e nas mesmas circunstâncias.

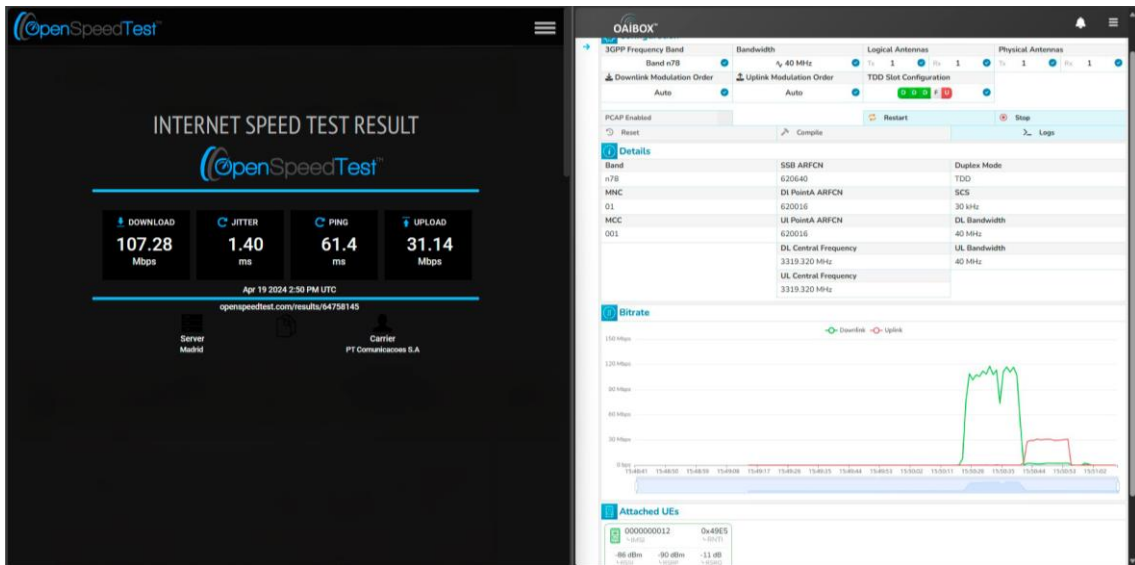


Figura 44: Teste para 40 MHz, disponível no arquivo ZIP (Figura_44.png)

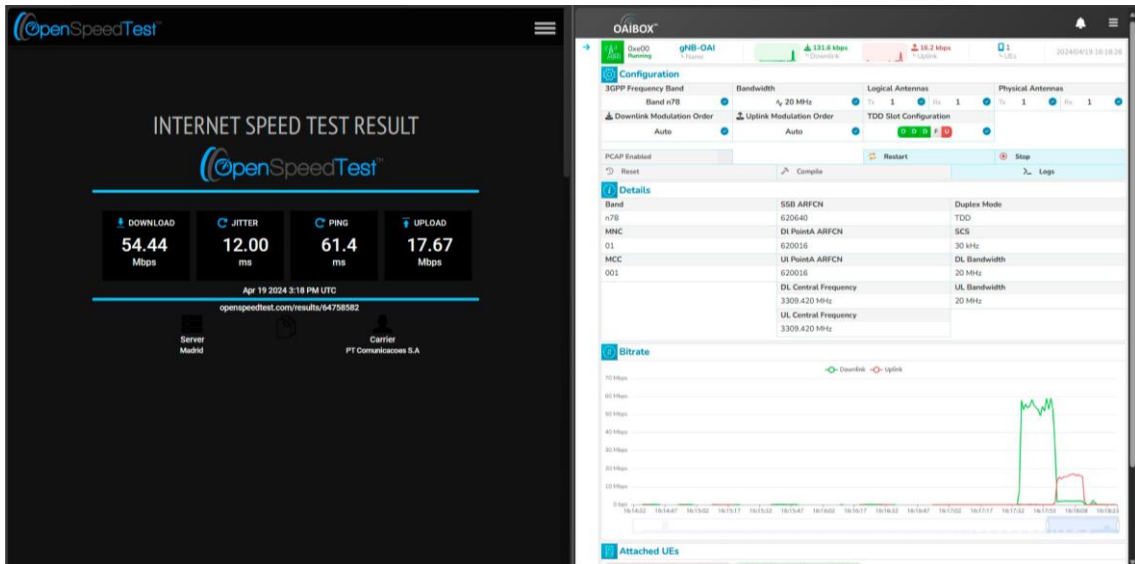


Figura 45: Teste para 20 MHz, disponível no arquivo ZIP (Figura_45.png)

Pela observação dos dados obtidos podemos ver que os valores obtidos experiencialmente se encontram muito próximos dos máximos esperados com os valores a serem quase o dobro para 40MHz em comparação com os valores para 20MHz sendo que para 20MHz os respetivos valores encontram-se mais próximos do máximo calculado.

4.1. Testes para as diferentes configurações de *slots* TDD

Foi em seguida calculado os valores esperados e testado para a largura de banda de 40 MHz e as restantes configurações de *slots* TDD, igualmente nas mesmas condições.

Considerando uma configuração TDD com uma proporção 2-1-2.

Downlink Slots = 800 *slots* e *Uplink Slots* = 800 *slots*

Max DL bit rate = $(978 \text{ bits} \times 106 \text{ RBs} \times 800 \text{ slots} \times 1 \text{ layers})/10^6 = 83 \text{ Mbps}$

Max UL bit rate = $(978 \text{ bits} \times 106 \text{ RBs} \times 800 \text{ slots} \times 1 \text{ layers})/10^6 = 83 \text{ Mbps}$

Considerando uma configuração TDD com uma proporção 2-1-7.

Downlink Slots = 400 *slots* e *Uplink Slots* = 1400 *slots*

Max DL bit rate = $(978 \text{ bits} \times 106 \text{ RBs} \times 400 \text{ slots} \times 1 \text{ layers})/10^6 = 41 \text{ Mbps}$

Max UL bit rate = $(978 \text{ bits} \times 106 \text{ RBs} \times 1400 \text{ slots} \times 1 \text{ layers})/10^6 = 145 \text{ Mbps}$

Considerando uma configuração TDD com uma proporção 5-1-4.

Downlink Slots = 1000 *slots* e *Uplink Slots* = 800 *slots*

Max DL bit rate = $(978 \text{ bits} \times 106 \text{ RBs} \times 1000 \text{ slots} \times 1 \text{ layers})/10^6 = 103 \text{ Mbps}$

Max UL bit rate = $(978 \text{ bits} \times 106 \text{ RBs} \times 800 \text{ slots} \times 1 \text{ layers})/10^6 = 83 \text{ Mbps}$

Considerando uma configuração TDD com uma proporção 7-1-2.

Downlink Slots = 1400 *slots* e *Uplink Slots* = 400 *slots*

Max DL bit rate = $(978 \text{ bits} \times 106 \text{ RBs} \times 1400 \text{ slots} \times 1 \text{ layers})/10^6 = 145 \text{ Mbps}$

Max UL bit rate = $(978 \text{ bits} \times 106 \text{ RBs} \times 400 \text{ slots} \times 1 \text{ layers})/10^6 = 41 \text{ Mbps}$

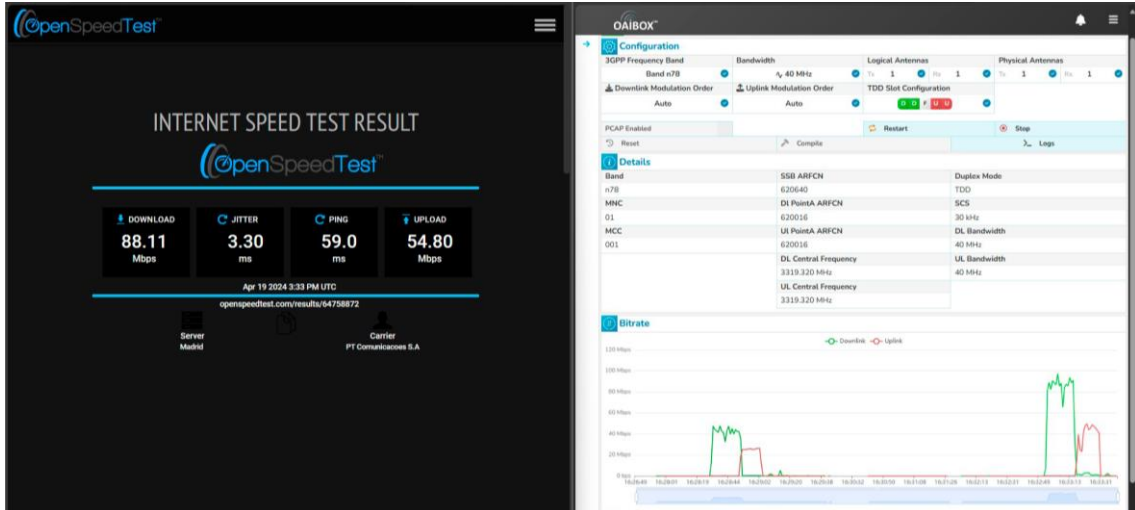


Figura 46: Teste para a configuração TDD DDFUU, disponível no arquivo ZIP (Figura_46.png)

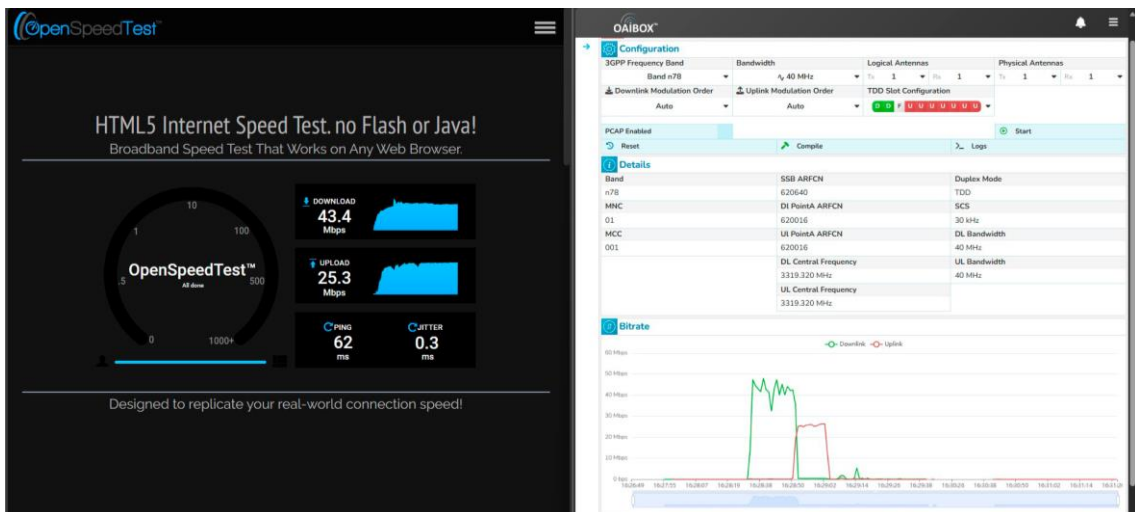


Figura 47: Teste para a configuração TDD DDFUUUUUUU, disponível no arquivo ZIP (Figura_47.png)

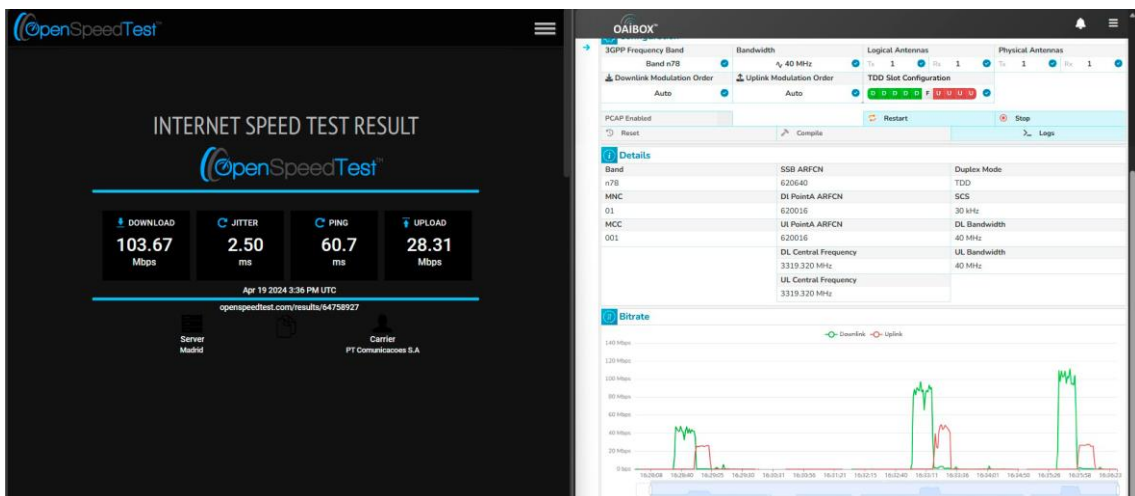


Figura 48: Teste para a configuração TDD DDDDDFUUUU, disponível no arquivo ZIP (Figura_48.png)

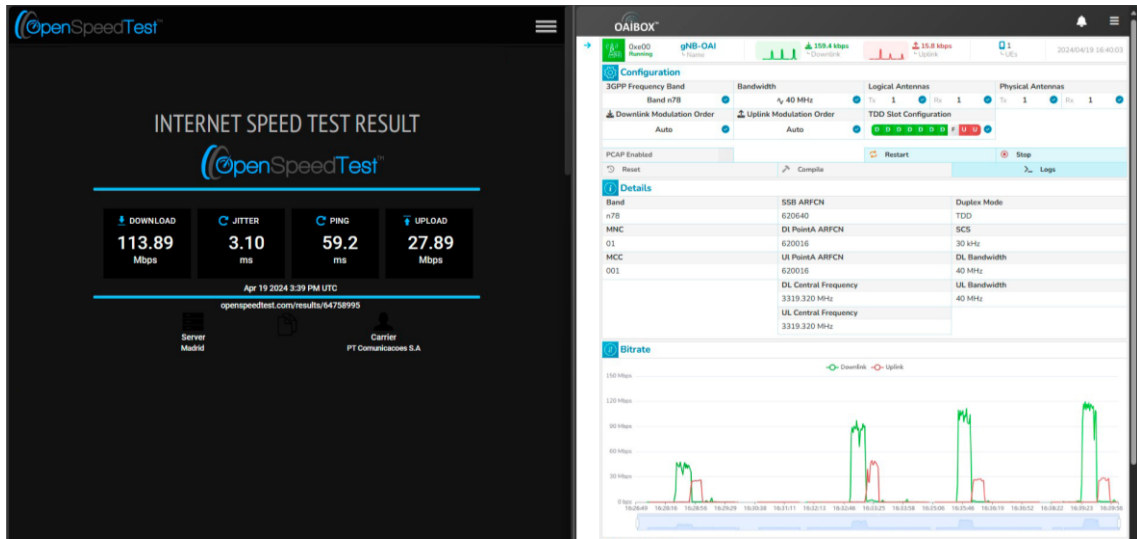


Figura 49: Teste para a configuração TDD DDDDDDFUU, disponível no arquivo ZIP (Figura_49.png)

Tabela 7: Valores obtidos nos testes das configurações TDD

3GPP Frequency Band	Bandwidth [MHz]	TDD Slot Configuration	Download [Mbps]	Upload [Mbps]	Ping [ms]	Download teórico [Mbps]	Upload teórico [Mbps]
Band n78	40	DDDFU	107,28	31,14	61,4	124	41
Band n78	40	DDFUU	88,11	54,80	59,0	83	83
Band n78	40	DDFUUUUUU	43,40	25,30	62,0	41	145
Band n78	40	DDDDDFUUUU	103,67	28,31	60,7	103	83
Band n78	40	DDDDDDDFUU	113,89	27,89	59,2	145	41

Pela observação dos resultados obtidos podemos observar que os valores de *Download* obtidos estão perto dos valores máximos calculados nas 5 configurações usadas. Já para os valores de *Upload* o mesmo não se verifica, ficando sempre aquém dos esperados e o problema ainda é agravado para as configurações de 5 ms onde os valores não chegam a passar dos 30 MHz e o esperado é sempre superior (em especial para a configuração de slots TDD DDFUUUUUU onde o esperado era 145 Mbps e não passou dos 25,30 Mbps)

A posteriori foi registado mais testes para as diferentes configurações de *slots* TDD com o objetivo de estudar as restantes métricas disponíveis na OAIBOX Dashboard, e os resultados obtidos foram:



Figura 50: Testes para as configurações TDD: DDFU e DDDFU, disponível no arquivo ZIP (Figura_50.png)



Figura 51: Testes para as configurações TDD: DDFUUUUUUU, DDDDDFUUUU e DDDDDDFUUU, disponível no arquivo ZIP (Figura_51.png)

Pela observação dos gráficos nas imagens podemos observar que as métricas mantem mais ou menos os mesmos valores para os 5 cenários, exceto a *bitrate* onde os valores de *Downlink* variam conforme o esperado e em relação ao *Uplink* mantem-se os problemas já referidos, mas pela análise destes gráficos podemos concluir que esse problema do *uplink* não se deve a falhas ou interferência na transmissão.

4.2. Testes para os diferentes tipos de modulação de sinal

Neste campo foram feitos os testes desta vez para as diferentes opções possíveis de a modulação de sinal (QPSK, 16QAM, 64QAM e 256QAM) tanto no *Uplink* como no *Downlink*, com o UE a uma distância reduzida de forma à atenuação por perda no percurso poder ser desprezada.

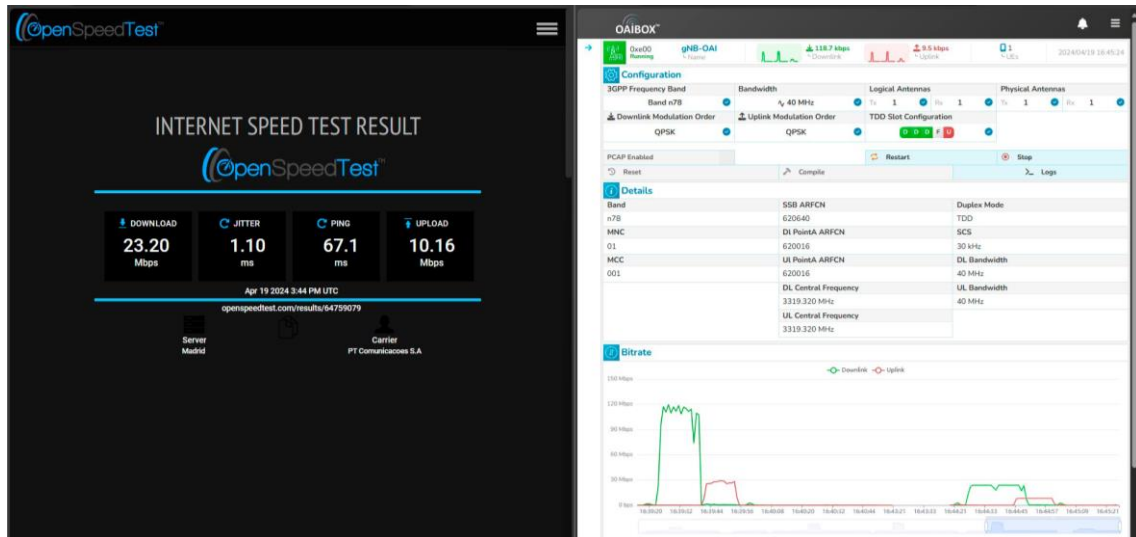


Figura 52: Teste para modulação de *Downlink* e de *Uplink* em QPSK, disponível no arquivo ZIP (Figura_52.png)

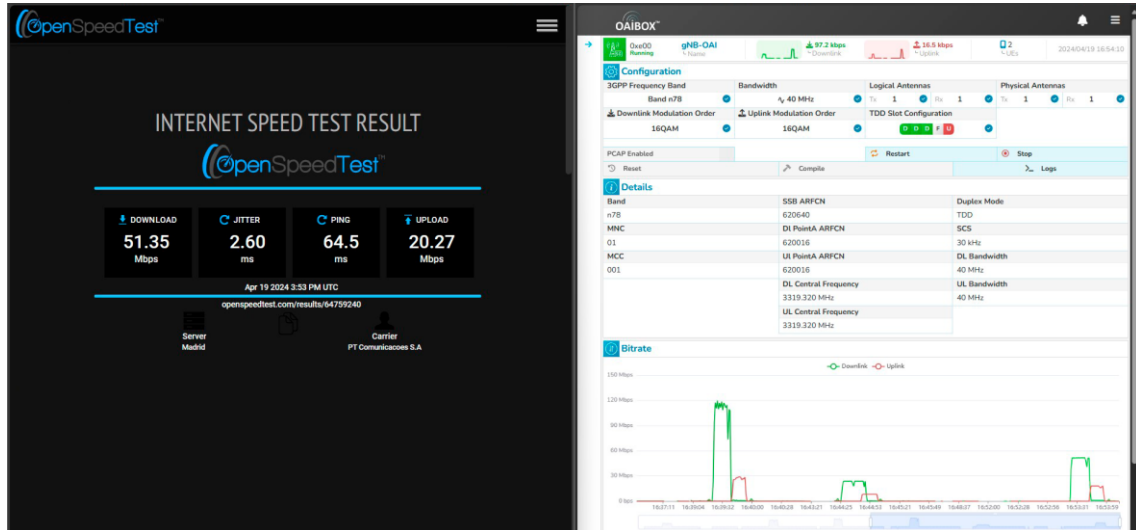


Figura 53: Teste para modulação de *Downlink* e de *Uplink* em 16QAM, disponível no arquivo ZIP (Figura_53.png)

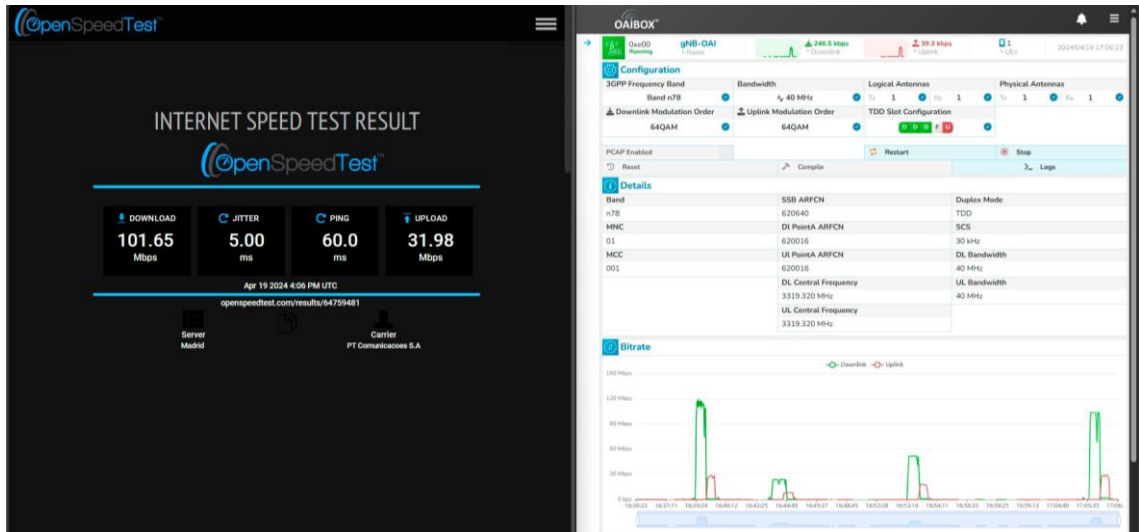


Figura 54: Teste para modulação de *Downlink* e de *Uplink* em 64QAM, disponível no arquivo ZIP (Figura_54.png)

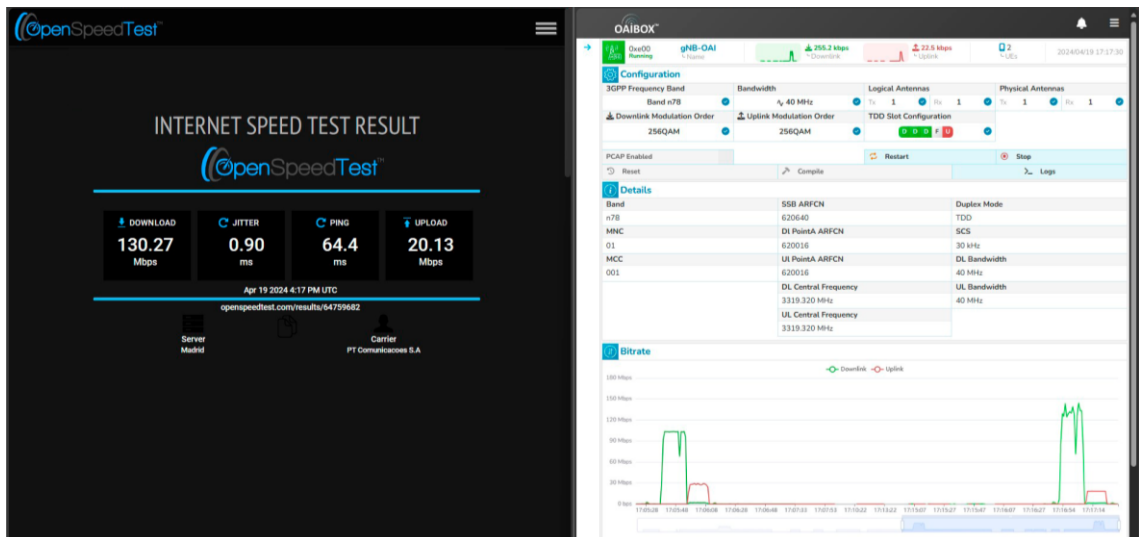


Figura 55: Teste para modulação de *Downlink* e de *Uplink* em 256QAM, disponível no arquivo ZIP (Figura_55.png)

Tabela 8: Testes para os diferentes tipos de modulação de *Downlink* e de *Uplink*

3GPP Frequency Band	Bandwidth [MHz]	TDD Slot Configuration	Downlink Modulation Order	Uplink Modulation Order	Download [Mbps]	Upload [Mbps]	Ping [ms]
Band n78	40	DDDFU	Auto	Auto	107,28	31,14	61,4
Band n78	40	DDDFU	QPSK	QPSK	23,20	10,16	67,1
Band n78	40	DDDFU	16QAM	16QAM	51,35	20,27	64,5
Band n78	40	DDDFU	64QAM	64QAM	101,65	31,98	60,0
Band n78	40	DDDFU	256QAM	256QAM	130,27	20,13	64,4

Os métodos QPSK, 16QAM, 64QAM e 256QAM são tipos de modulação que diferem principalmente pela quantidade de bits que cada símbolo de modulação pode representar. No caso a QPSK possui 2 bits, a 16QAM, 4 bits, a 64QAM, 6 bits e a 256QAM, 8 bits, isto a nível prático vai se traduzir em que a modulação QPSK possui a menor taxa de transmissão de dados e a modulação 256QAM possui a maior, mas o tipo de modulação afeta também na imunidade ao ruído e neste campo a modulação QPSK é a que possui maior resistência, já por sua vez a 256QAM é a que possui maior suscetibilidade.

Pela observação dos resultados podemos observar que realmente ao nível do *download* houve um aumento da taxa de transmissão de dados quando de passou da modulação QPSK até à 256QAM, ao nível do *upload* verificou-se uma situação semelhante, mas na modulação 256QAM houve uma redução do valor obtido possivelmente devido a interferências.

4.3. Testes com atenuação de perda de percurso

4.3.1. Para diferentes bandas de frequências

Para estes testes as configurações usadas foram: largura de banda 40 MHz, a configuração de *slots* TDD foi **DDDFU** e as modulações de sinal em Automático.

Só foi registado para as bandas de frequência n77 e n78, primeiro num cenário onde o UE se encontrava próximo da OAIBOX onde a atenuação das perdas de percurso são reduzidas e depois num cenário onde o UE se encontra longe de forma à atenuação das perdas de percurso é relevante.

Tabela 9: 3GPP *bands* pré-configuradas na OAIBOX™ *Dashboard*.

3GPP Band	Duplex mode	f (MHz)	Band common name	5G ARFCN
n41	TDD	2496-2690	BRS (subset of Band n90)	518910
n77	TDD	3300-4200	C-Band	660672
n78	TDD	3300-3800	C-Band (subset of Band n77)	641280



Figura 56: Testes para as diferentes Frequências de Banda (Band n77 e n78), disponível no arquivo ZIP (Figura_56.png)



Figura 57: Testes para as diferentes Frequências de Banda (*Band n77 e n78*) e forte atenuação de perda de percurso, disponível no arquivo ZIP (Figura_57.png)

Com base nos gráficos destas duas figuras podemos observar que as 2 bandas de frequência na situação da figura 56 (sem forte atenuação) possuem um desempenho semelhante, mas quando olhamos para os gráficos da figura 57 (com forte atenuação) conseguimos perceber já entre elas algumas diferenças, pois apesar de a *Band n78* ter apresentado um *Bitrate* maior também foi a que teve um maior número de pacotes errados. Mas como o previsto podemos observar pelo gráfico do RSRQ que para este cenário a *Band n77* possui valores superiores comparado com a *Band n78* para o mesmo cenário.

4.3.2. Para as diferentes modulações de sinal

Para estes testes as configurações usadas foram: banda de frequência 3GPP n77, largura de banda 40 MHz e a configuração de slots TDD foi **DDDFU**.

Foi registado para as modulações de sinal QPSK, 16QAM, 64QAM e 256QAM, primeiro num cenário onde o UE se encontrava próximo da OAIBOX onde a atenuação das perdas de percurso são reduzidas e depois num cenário onde o UE se encontra longe de forma à atenuação das perdas de percurso é relevante.



Figura 58: Testes para as diferentes modulações de sinal (QPSK, 16QAM, 64QAM e 256QAM), disponível no arquivo ZIP (Figura_58.png)



Figura 59: Testes para as diferentes modulações de sinal (QPSK, 16QAM e 64QAM) e forte atenuação de perda de percurso, disponível no arquivo ZIP (Figura_59.png)



Figura 60: Testes para as diferentes modulações de sinal (64QAM e 256QAM) e forte atenuação de perda de percurso, disponível no arquivo ZIP (Figura_60.png)

Pela análise dos gráficos das 3 figuras anteriores podemos observar na figura 58 uns valores semelhantes aos observados no capítulo 4.2. visto serem testes semelhantes, mas nesta figura conseguimos observar os outros gráficos os quais comprovam que quando fazemos alterar a modulação de sinal da QPSK até à 256QAM existe sim um aumento do *bitrate* mas também se nota um aumento no numero de pacotes perdidos, em especial na modulação de sinal 256QAM.

Já nas seguintes figuras onde já temos uma forte atenuação (figuras 59 e 60) devido às perdas de percurso verificamos que já na configuração 64QAM possuímos perdas de pacotes significativas as quais são agravadas quando passamos para a configuração 256QAM e ainda uma maior dificuldade de manter a ligação.

5. Conclusão

Este estágio/projecto teve como objetivos fazer um estudo mais aprofundado sobre as redes 5G, com especial atenção para o 5G *Open Source*, além do contacto direto com uma empresa que atua nessa mesma área.

Numa primeira instância foi feito um estudo sobre as arquiteturas de uma rede 5G e o estudo também sobre um dos principais mercados de interesse para as redes 5G *Open Source* privadas.

Visto o projecto de referência ser o projecto da *OpenAirInterface* pertencente à *OpenAirInterface Software Alliance*, foi então analisado os ramos presentes, tais como o OAI CN, OAI 5G RAN e os seus repositórios. Para o gNB, foi feito um estudo para cada uma das arquiteturas das unidades (CU, DU e RU) e como a *stack* de protocolos foi dividida por cada uma dessas unidades.

Posteriormente foi feita uma introdução ao projecto da OAIBOX e das potencialidades. Com isto pude implementar os vários *setups* possíveis com os vários produtos da gama OAIBOX, e com isto testar os mesmos, apesar de os testes aqui registados serem sido todos executados com a OAIBOX 40.

Para finalizar foi analisado os resultados dos testes obtidos e tirado as conclusões com base na análise dos mesmos e do que era previamente esperado. Com base nesses mesmo teste os resultados obtidos na sua maioria foram de encontro ao esperado excepcionando os valores relacionados ao *uplink*, onde se nota ainda mais essa discrepância no uso de *slots* de 5ms. Esses erros ainda carecem de solução, mas de momento o principal foco de desenvolvimento consiste nos valores de *downlink*.

5.1. A evolução do 5G para o 6G

Apesar de o 5G ainda não estar totalmente universalizada, o 6G já se encontra em desenvolvimento. Acerca do 6G antecipa-se que possuirá como principais característica o uso de *Inteligência Artificial* e *Machine Learning*, o uso de frequências mais altas que o 5G o que permitira uma maior e mais rápida capacidade de transferência de dados e uma largura de banda ainda mais larga, o que permitira suportar um maior fluxo de dados em simultâneo. [21]

Ao nível de valores fala-se que poderá conseguir velocidades de 100 Gbps com possíveis picos de até 1000 Gbps (1 Tbps), valores já bastante superiores os apresentados pelo 5G. Já ao nível da latência especulasse que seja reduzida para 0,1 milissegundos, cerca de 10 vezes menos que a atual oferecida pela rede 5G. O 6G apresenta desde já como uma das principais desvantagens os seus custos associados, como por exemplo, o número de antenas necessário e o consumo de energia associado. Com isto o desenvolvimento da mesma encontrasse mais focado para o nível empresarial e as velocidades de transmissão referidas dão mais força ao

desenvolvimento da tão falada Indústria 4.0, o uso de hologramas e existe também outras possibilidades como das *Internet of Things* (IoTs), da condução assistida e das cidades inteligentes que poderão ser beneficiadas.

Por conseguinte a rede 6G ainda se encontra longe de estar disponível para uso público. Sendo que os especialistas preveem que até 2027 o 3GPP, colaboração entre sete organizações de desenvolvimento de padrões de telecomunicações em todo o mundo, deve definir as métricas para o seu funcionamento.

5.2. Sugestões de trabalho futuro

Como sugestões de trabalho que poderia ser realizado no futuro, penso que seria interessante o a execução e o registo com outras OAIBOX disponíveis e dos diferentes *setups*, testes com múltiplos utilizadores, visto que nos realizados foi sempre usado um único utilizador, e de testes *outdoor*.

6. Bibliografia

- [1] “OAIBOX: The ultimate open source 5G platform for academic and industrial research”, *OAIBOX: The Ultimate Open Source 5G Platform for Academic and Industrial Research*, 24-mai-2023. [Online]. Disponível em: <https://oaibox.com/5g-lab-manual/>. [Acesso em: 19-jan-2024 e 22-Jul-2024].
- [2] “OpenAirInterface – 5G software alliance for democratising wireless innovation”, *Openairinterface.org*. [Online]. Disponível em: <https://openairinterface.org/>.
- [3] “Openairinterface5G”, *GitLab*. [Online]. Disponível em: <https://gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g/>.
- [4] “OAIBOX: The ultimate open source 5G platform for academic and industrial research”, *OAIBOX: The Ultimate Open Source 5G Platform for Academic and Industrial Research*, 24-abr-2023. [Online]. Disponível em: <https://www.oaibox.com/>.
- [5] M. J. Coffferri, “8 principais indústrias para 5G privado”, *Linkedin.com*, 14-dez-2023. [Online]. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/8-principais-ind%C3%BAstrias-para-5g-privado-matheus-joaquim-cofferri-om7hf/>.
- [6] M. Christian, “Mercado, casos de uso e desafios na implantação de Redes Privadas 4G e 5G”, *Linkedin.com*, 26-fev-2024. [Online]. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/mercado-casos-de-uso-e-desafios-na-implanta%C3%A7%C3%A3o-redes-privadas-maki-mybpf/>.
- [7] M. Periquito, “Como construir uma rede 5G privada?”, *Linkedin.com*, 10-fev-2022. [Online]. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/como-construir-uma-rede-5g-privada-mauro-periquito/>.
- [8] 5g-acia, “5G Non-Public Networks for Industrial Scenarios”, *5g-acia*, set-2021. [Online]. Disponível em: <https://5g-acia.org/whitepapers/5g-non-public-networks-for-industrial-scenarios/>
- [9] N. T. Tejada, “En el mundo hay más de 1.200 redes privadas 5G o LTE; un negocio que multiplicará sus ingresos en un 23,3% hasta 2027”, *Telesemana.com*, 04-dez-2023. [Online]. Disponível em: <https://www.telesemana.com/blog/2023/12/04/en-el-mundo-hay-mas-de-1200-redes-privadas-5g-o-lte-un-negocio-que-multiplicara-sus-ingresos-en-un-233-hasta-2027/>.
- [10] N. T. Tejada, “Orange y Ericsson avanzan en el desarrollo de redes privadas 5G en España para impulsar la transformación digital”, *Telesemana.com*, 22-dez-2023. [Online]. Disponível em:

<https://www.telesemana.com/blog/2023/12/22/orange-y-ericsson-avanzan-en-el-desarrollo-de-redes-privadas-5g-en-espana-para-impulsar-la-transformacion-digital/>.

- [11] J. A. Hernández, “5G al máximo: las redes privadas empresariales con esta tecnología”, *Think Big*, 07-jul-2024. [Online]. Disponível em: <https://empresas.blogthinkbig.com/5g-al-maximo-las-redes-privadas-empresariales-con-esta-tecnologia/>.
- [12] R. M. R. Pereira, “Configuration, deployment and test of 5G networks”, Universidade de aveiro, 3810-193 Aveiro, 16-dez-2022.
- [13] Keysight, *Keysight.com*. [Online]. Disponível em: <https://www.keysight.com/us/en/solutions/network-test.html>.
- [14] “Wireless connectivity”, *ALLBESMART is specialized in wireless connectivity and Internet of Things*. [Online]. Disponível em: <https://www.allbesmart.pt/>.
- [15] Rohde e Schwarz International, “Testes de redes 5G”, *Rohde-schwarz.com*. [Online]. Disponível em: https://www.rohde-schwarz.com/br/solucoes/test-and-measurement/mobile-network-testing/5g-network-testing/testes-de-rede-5g_234340.html.
- [16] “O que é o teste 5G?”, *VIAMI Solutions Inc*. [Online]. Disponível em: <https://www.viavisolutions.com/pt-br/recursos/centro-de-aprendizagem/o-que-e-o-teste-5g>.
- [17] “Open RAN”, *firecell.io*. [Online]. Disponível em: <https://firecell.io/learn/open-ran/>.
- [18] L. M. P. Larsen, A. Checko, e H. L. Christiansen, “A survey of the functional splits proposed for 5G mobile crosshaul networks”, *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 21, nº 1, p. 146–172, Firstquarter 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8479363>
- [19] OpenAirInterface Software Alliance, “OpenAirInterface 5G RAN status and roadmap”. [Online]. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=1FaoQAiwS8>.
- [20] “Open RAN”, *3gpp.org*. [Online]. Disponível em: <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/open-ran>.
- [21] B. González, “6G: O que sabemos sobre esta nova tecnologia”, *Gigas.com*, 18-abr-2024. Disponível em: <https://blog.gigas.com/pt/6g-o-que-sabemos-sobre-esta-nova-tecnologia>.

Anexos: Figuras dos Testes Realizados

As figuras referentes aos testes realizados estão disponíveis no arquivo ZIP intitulado "Anexos_Relatorio_NelsonAndrade.zip". Este arquivo contém todas as imagens na qualidade original para preservar a qualidade visual necessária para a análise.

Figura 44: Teste para 40 MHz	Figura_44.png
Figura 45: Teste para 20 MHz	Figura_45.png
Figura 46: Teste para a configuração TDD DDFUU	Figura_46.png
Figura 47: Teste para a configuração TDD DDFUUUUUUU	Figura_47.png
Figura 48: Teste para a configuração TDD DDDDDDFUUUU	Figura_48.png
Figura 49: Teste para a configuração TDD DDDDDDDDFUU	Figura_49.png
Figura 50: Testes para as configurações TDD: DDFUU e DDDFU	Figura_50.png
Figura 51: Testes para as configurações TDD: DDFUUUUUUU, DDDDDDFUUUU e DDDDDDDDFUU	Figura_51.png
Figura 52: Teste para modulação de Downlink e de Uplink em QPSK	Figura_52.png
Figura 53: Teste para modulação de Downlink e de Uplink em 16QAM	Figura_53.png
Figura 54: Teste para modulação de Downlink e de Uplink em 64QAM	Figura_54.png
Figura 55: Teste para modulação de Downlink e de Uplink em 256QAM	Figura_55.png
Figura 56: Testes para as diferentes Frequências de Banda (Band n77 e n78)	Figura_56.png
Figura 57: Testes para as diferentes Frequências de Banda (Band n77 e n78) e forte atenuação de perda de percurso	Figura_57.png
Figura 58: Testes para as diferentes modulações de sinal (QPSK, 16QAM, 64QAM e 256QAM)	Figura_58.png
Figura 59: Testes para as diferentes modulações de sinal (QPSK, 16QAM e 64QAM) e forte atenuação de perda de percurso	Figura_59.png
Figura 60: Testes para as diferentes modulações de sinal (64QAM e 256QAM) e forte atenuação de perda de percurso	Figura_60.png