

Ricardo Manuel Gomes Figueira

Licenciatura Pré-Bolonha em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

5G - AS VÁRIAS OPÇÕES DE IMPLEMENTAÇÃO PARA A QUINTA GERAÇÃO MÓVEL

Presidente:

Doutor João Pedro Abreu de Oliveira - FCT/UNL

Vogais:

Doutor Rui Miguel Henriques Dias Morgado Dinis - FCT/UNL
(Orientador)

Doutor João Francisco Lêdo Guerreiro - FCT/UNL (Arguente)

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica
Fevereiro 2022

Para a Ester, o Jorge, a Sofia, a Edite, o Jorge, a Isabel, a Helena, a Susana, o Mateus

Alguma ideia, visão ou opinião que possa encontrar neste relatório é da exclusiva responsabilidade do autor e não representa necessariamente a ideia, visão ou opinião da empresa para a qual trabalha.

Resumo

As necessidades crescentes, nos últimos anos e nas últimas décadas, por parte dos utilizadores de redes de telecomunicações móveis, de maiores velocidades de transferência de dados, bem como o crescente uso dessas redes por outros equipamentos de telemetria e de uso diverso, chamados de equipamentos de IoT e novos requisitos de latência e mobilidade, provocaram o aparecimento da quinta geração de comunicação móvel.

A introdução do 5G apresenta a possibilidade de ser feita faseadamente e pode ser introduzido dentro da rede LTE, sendo a sua expansão flexível também dentro ou fora da rede 4G, como rede independente.

As opções disponíveis para o caminho que tem como destino final uma rede 5G de acesso rádio ligada a um core também 5G, apresenta-se assim mais adaptável para os operadores que podem disponibilizar algumas capacidades da nova geração usando uma infraestrutura já instalada e com menor investimento inicial na rede, optimizando a articulação com a disponibilidade e adesão a novos equipamentos por parte dos consumidores.

Esta solução a nível das várias opções dadas pelas especificações 3GPP beneficia um desenho e utilização da rede mais eficiente, modular e escalável.

Palavras chave: 5G Evolution, 5G DSS, 5G Standalone, 5G Non Standalone, 5G Core

Abstract

The growing needs, in recent years and in recent decades, by users of mobile telecommunications networks, for higher data transfer speeds, as well as the growing use of these networks by other telemetry equipment and hardware of diverse use, called IoT and new requirements for latency and mobility, led to the emergence of the fifth generation of mobile communication.

The introduction of 5G presents the possibility of being done in stages and can be introduced within the LTE network and its flexible expansion also inside or outside the 4G network, as an independent network.

The options available for the path that has as its final destination a 5G radio access network connected to a 5G core is thus more adaptable for operators who can provide some of the new generation capabilities using an already installed infrastructure and with less initial investment in network, optimizing the articulation with the availability and adhesion to new equipment by consumers.

This solution in terms of the various options provided by the 3GPP specifications benefits a more efficient, modular and scalable network design and use.

Keywords: 5G Evolution, 5G DSS, 5G Standalone, 5G Non Standalone, 5G Core

Índice

Resumo	4
Abstract	5
Índice	6
Índice de Figuras	9
Índice de Tabelas	10
Lista de abreviaturas e siglas	11
1 - Introdução	16
2 - O 5G	18
2.1 - A importância do 5G	18
2.2 - Objectivos do 5G	20
2.3 - A arquitectura RAN 5G	22
2.4 - Características da BTS 5G	22
3 - Estratégias de implementação do 5G	24
3.1 - As diferentes opções para chegar ao 5G	25
3.2 - Compartilhamento Dinâmico de Espectro	26
3.2 - Configuração Non Standalone (NSA) New Radio	28
3.2.1 - Dual Connectivity (DC) Non Standalone	28
3.2.2 - Dual Connectivity - Plano de Utilizador	29
3.2.3 - Dual Connectivity - Plano de Controlo	29
3.2.4 - Indicador 5G	30
3.2.5 - Combinação de bandas para Multi Rádio Dual Connectivity (MR-DC)	31
3.2.6 - Architecturas de rede para o 5G	32
3.2.7 - Adição de um nó secundário gNB	35
3.3 - Protocolo RRC	36
3.4 - Sinalização RRC na configuração Non Standalone	37
3.5 - Standalone (SA) New Radio	39
4 - 5GC, migração do EPC	43
4.1 - Interface N26	44
4.2 - Multi-access Edge Computing (MEC)	45
4.3 - Convergência de redes	45

4.4 - QoS	46
4.5 - Arquitetura 5G NSA com EPC	46
4.6 - Arquitetura 5GC	47
4.7 - Handover 5GC para EPC	49
4.8 - Handover EPC para 5GC	50
5 - Migração para o 5G	51
Sumário	52
Bibliografia	54
Currículo, Descrição Detalhada	57
Informação pessoal	57
Experiência Profissional	57
Educação e Formação	59
Aptidões e Competências Pessoais	60
Aptidões e Competências Sociais e de Organização	60
Formação Adicional (últimos anos)	60
Prêmios	61
ANEXO 1: Network Slicing	62
ANEXO 2: Virtualização de Rede - Network Function Virtualization (NFV)	64
ANEXO 3: SDN - Software Defined Network	66
ANEXO 3: Protocolos no interface ar	67
Sinalização de canal rádio	68
Canais Lógicos e de Transporte	69
Protocolo MAC, Medium Access Control	70
Protocolo RLC, Radio Link Control	72
Protocolo PDCP, Packet Data Convergence Protocol	73
Protocolo SDAP, Service Data Adaptation Protocol	74
ANEXO 4: Considerações sobre o Interface Ar 5G	76
Bandas de frequências	76
Modos de transmissão	77
Matrizes de antenas para ondas milimétricas	77
Propagação de ondas milimétricas	78
Modulação	79
Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)	80
Diversidade	82
Beamforming	83
Camada Física Interface Ar 5G	85

Índice de Figuras

Figura 1 - Estrutura interna do gNB	23
Figura 2 - O uso de DSS em comparação com o espectro estático	27
Figura 3 - Configuração EN-DC	33
Figura 4 - Configuração NGEN-DC	36
Figura 5 - Configuração NE-DC	39
Figura 6 - Configuração Standalone	41
Figura 7 - Arquitectura NFV	64
Figura 8 - Camadas de protocolos do interface ar no 5G	67

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Principais especificações 3GPP para as diversas tecnologias	18
Tabela 2 - Comparativos de taxas de transferência, eficiência espectral e latência para 4G e 5G	22
Tabela 3 - Quadro resumo das diferentes estratégias de implementação do 5G	41
Tabela 4 - Canais lógicos e de transporte no 5G	70
Tabela 5 - Elementos de controlo do cabeçalho do protocolo MAC	72
Tabela 6 - modos de transmissão RLC	73

Lista de abreviaturas e siglas

2G	Segunda Geração de Redes Móveis
3G	Terceira Geração de Redes Móveis
3GPP	Third Generation Partnership Project
4G	Quarta Geração de Redes Móveis
5G	Quinta Geração de Redes Móveis
5GC	5G Core Network
5GMM	5G Mobility Management
5GSM	5G Session Management
AMF	Access and Mobility Management Function
API	Application Programming Interface
ARQ	Automatic Repeat Request
AS	Access Stratum
BCH	Broadcast Channel
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BWP	Bandwidth Part
BTS	Base Transceiver Station
BSC	Base Station Controller
CA	Carrier Aggregation
COTS	Commercial Of The Shelf
CP	Control Plane
CP	Cyclic Prefix
CriC	Critical Communications
CRS	Cell Reference Signal
CSI	Channel State Information
CSI-RS	CSI Reference Signals
DC	Dual Connectivity
DL	Down Link
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DRB	Data Radio Bearer
DRX	Discontinuous Reception
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
DUF	Direitos de Utilização de Frequências
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EGPRS	Extended General Packet Radio Service
EHF	Extremely High Frequency

EMM	Evolved Packet System Mobility Management
eMBB	enhanced Mobile Broadband
eNB	eNodeB, a BTS no 4G
EN-DC	E-UTRA NR Dual-Connectivity
EPC	Evolved Packet Core
ESM	Evolved Packet System Session Management
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
eV2X	Enhancement of Vehicle to Everything
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FR1	Frequency Range 1
FR2	Frequency Range 2
gNB	gNodeB, new generation NodeB, a BTS no 5G
GSM	Global System for Mobile Communications, Groupe Spécial Mobile
GPRS	General Packet Radio Service
GUTI	Globally Unique Temporary Identity
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HW	Hardware
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IoT	Internet of Things
ISI	Inter-Symbol Interference
KPI	Key Performance Indicator
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	LTE Advanced
PCell	Primary Cell
MAC	Medium Access Control
MCG	Master Cell Group Bearers
MEC	Multi-access Edge Computing
MeNB	Master eNB
MgNB	Master gNB
MGW	Media Gateway
MIMO	Multiple Input and Multiple Output
MME	Mobility Management Entity

mMTC	massive Machine Type Communications
MR-DC	Multi-RAT Dual Connectivity
MSC	Mobile Switching Centre
MVNO	Mobile Virtual Network Operator
NAS	Non Access Stratum
NFV	Network Function Virtualization
ng-eNB	eNB que sofreu uma actualização para poder estar integrado na rede 5G
NGMN	Next Generation Mobile Networks
NSA	Non-Standalone
MIB	Master Information Block
MN	Master Node
NG-RAN	Next Generation Radio Access Network
NGCN	Next Generation Core Network / 5G Core Network
NR	5G New Radio / Next Generation Radio
NSA	Non Standalone Architecture
OFDMA	Orthogonal frequency-division multiple access
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplex
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCell	Primary Cell
PCI	Physical Cell Identity
PCF	Policy and Charging Function
PCH	Paging Channel
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN-GW	Packet Data Network Gateway
PMI	Precoding Matrix Indicator
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology
RB	Radio Bearers
RET	Remote Electrical Tilt
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RRC	Radio Resource Control Protocol

RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal REceived Quality
SA	Standalone
SCell	Secondary Cell
SCG	Secondary Cell Group
SDAP	Service Data Application Protocol
SDL	Supplementary Downlink
SDN	Software Defined Networking
SeNB	Secondary eNB
SgNB	Secondary gNB
SGSN	Serving GPRS Support Node
SGW	Serving Gateway
SHF	Super High Frequency
SIB	System Information Block
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SMF	Session Management Function
SN	Secondary Node
SNR	Signal to Noise Ratio
SON	Self-Optimizing Networks
SRB	Signalling Radio Bearers
SSB	Single Sideband
SUL	Supplementary Uplink
SW	Software
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TTI	Transmission Time Interval
UDM	Unified Data Management
UE	User Equipment
UHF	Ultra High Frequency
UL	Up Link
UP	User Plane
UPF	User Plane Function
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
URLLC	Ultra-Reliable and Low Latency Communications
V2X	Vehicle to Everything
VNF	Virtualized Network Function
VoIP	Voice over Internet Protocol
VoLTE	Voice over LTE

VoNR	Voice over New Radio
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

1 - Introdução

No site do regulador português, dedicado ao 5G (<https://portal5g.pt/>) pode-se ler, e sobre esta nova geração de comunicações móveis: *o poder da tecnologia que mudará o futuro*. O 5G aparece associado a uma janela de oportunidades para todos, possibilitando a introdução de novos serviços com benefícios directos e indirectos para toda a comunidade.

As referências primeiras deste texto são para o Regulador porque é na regulação que normalmente se inicia a implementação de qualquer tecnologia num qualquer país, região ou território. Nas tecnologias de comunicação móvel que usam bens públicos como o espectro electromagnético que por isso não são vendidos, são concedidas licenças de exploração desses mesmos recursos.

O espectro de frequências é um bem público e limitado. O seu uso é definido por regras dadas por um regulador, a ANACOM, no caso português. Para o 5G, tal como é comum neste tipo de tecnologias, foi escolhido o leilão como modelo de atribuição de frequências para o seu uso. O procedimento de atribuição de frequências é escolhido por leilão porque permite potencialmente maior transparência e objectividade, é o que se lê no sítio do regulador. Assim, em outubro de 2020 o regulamento que define as condições de acesso ao espectro nas faixas de 700, 900, 1800, 2100, 2600 e 3600 MHz foi aprovado. Em Portugal o leilão teve duas fases. A primeira fase iniciou-se ainda em 2020, tratou-se do leilão para novos entrantes e terminou em janeiro de 2021. A segunda fase do leilão, nomeada pelo regulador como licitação principal, começou logo de seguida e destinava-se à atribuição de direitos de utilização de frequências (DUF) em várias faixas. O leilão desta segunda fase terminou a 28 de outubro de 2021. Terminada a atribuição de frequências destas duas fases e também todos os procedimentos legais consequentes para a atribuição das licenças de utilização por parte dos operadores, cabe a estes últimos poder arrancar com a comercialização das novas faixas de espectro apresentando ofertas comerciais para a comunidade.

Embora pareça que tudo está a começar, os operadores não começam a preparar as suas redes para as novas tecnologias no final do leilão, muito menos estão à espera das licenças de utilização para o fazer. A preparação para o lançamento do 5G começa muito tempo antes destes eventos muito mediáticos. Sendo marcos da regulação, têm de ser respeitados por todos os que nele participam mas a construção de novas infraestruturas requer planificação e tempo, por essa razão é fácil de acreditar que a rede 5G começa a existir muito antes do fim dos leilões e da atribuição das DUF.

O fim deste leilão não determinou toda a atribuição de frequências para o 5G que pode operar em todas as frequências do LTE (*Long Term Evolution*) e em mais bandas da FR1 (*Frequency Range 1*), uma faixa de frequências mais baixas que vai até aos 6 GHz mas também pode ser implementado em FR2 (*Frequency Range 2*), uma faixa de frequências superior aos 24 GHz. Esta FR2, para além de garantir novas frequências no espectro, possibilita também maiores larguras de banda, sendo usada normalmente em áreas de cobertura muito pequenas, com grande densidade de utilizadores. São células muito pequenas por causa das perdas sentidas na propagação de ondas milimétricas. O regulador português recentemente lançou uma consulta

pública sobre a utilização desta faixa. Alguns países europeus já usam bandas nesta faixa de frequências.

Pela experiência profissional que tive em relação ao 5G e à sua implementação tive a noção que anos antes do arranque desta tecnologia equipas de planeamento começaram a tratar e a se formar de maneira a preparar a rede para o seu lançamento. Para além dessa preparação da rede existe também exigências que passam por acompanhamento de novas especificações, *rollouts* de equipamentos nos vários fornecedores da rede e respectivos *softwares* compatíveis.

O objectivo deste relatório é expor todas as possibilidades do ponto de vista do operador tendo em conta as especificações actuais para a implementação da quinta geração de comunicações móveis. Como autor deste trabalho e não estando a trabalhar em nenhuma rede de telecomunicações portuguesa e sim para uma rede do Reino Unido, beneficiei do facto da implementação do 5G neste país ter sido feita ainda em 2019.

É também objectivo deste relatório mostrar que o 5G foi desenhado com uma integração faseada em vista, podendo ser colocado numa primeira fase em coabitação com outros nós 4G e ligado a uma rede core que não é a sua, temporariamente, permitindo aos seus utilizadores o uso da última geração não com todas as suas funcionalidades mas permitindo algumas e importantes melhorias de serviço sendo a maior largura de banda potencialmente a mais relevante.

Não poderia elaborar este relatório sem referir alguns tópicos introdutórios para uma contextualização mais precisa mas admitindo que muitos outros detalhes não foram incluídos para não desviarem do tema principal do documento e para que este não fosse um trabalho sobre o 5G em geral que não é. Na bibliografia e no texto são incluídas referências que podem ajudar a explorar mais em detalhe temas que apenas são abordados superficialmente ou muito pouco aprofundados.

2 - O 5G

2.1 - A importância do 5G

Falar da importância do 5G é falar de uma geração de telecomunicações móvel que se formou à custa da evolução e das limitações sentidas nas gerações tecnológicas passadas. Isso acontece com o 5G como aconteceu com o LTE que também representou uma mudança significativa a nível de arquitectura. Vale a pena resumir as últimas décadas nas comunicações móveis para perceber o que foram e poder comparar com o que temos actualmente.

Nas primeiras redes de telefonia móvel, as redes de primeira geração 1G que apareceram nos anos 1980, eram usadas tecnologias analógicas e no interface ar, uma estrutura FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). As gerações seguintes começaram a aparecer com intervalos de mais ou menos dez anos. O 2G nos anos 1990, 3G nos anos 2000 e o 4G nos anos 2010. Estes sistemas têm as suas especificações definidas no 3GPP (*Third Generation Partnership Project*).

2G	3G	4G	5G
Phase 1 (GSM900)	Rel 99 (UMTS)	Rel 8 (LTE)	Rel 15 (5G Non Standalone)
Phase 2 (GSM900 GSM1800)	Rel 4	Rel 9 (LTE/UMTS interoperabili dade)	Rel 16
Phase 2+	Rel 5 (HSDPA IMS)	Rel 10 (LTE-A, Carrier Aggregation)	Rel 17
Rel 96-98 (GPRS EGPRS)	Rel 6 (HSUPA)	Rel 11	
Rel 99 (GSM GPRS)	Rel 7 (HSPA+)	Rel 12 (Dual Connectivity)	
Rel 8 (GSM/EDGE, Phase 2+, 3GPP TR 41.101)		Rel 13 (LTE Advanced Pro)	

Tabela 1 - Principais especificações 3GPP para as diversas tecnologias.

A segunda geração, 2G, aparece assim no início dos anos noventa do século passado, conhecida como GSM (*Global System for Mobile Communications, Groupe Spécial Mobile*), usava e usa tecnologia digital e um interface ar suportado em FDMA e TDMA (*Time Division Multiple Access*), no início só com serviço de voz, depois suportando serviço de mensagens SMS (*Short Message Service*) e serviço de dados GPRS (*General Packet Radio Service*), com velocidades típicas de 50kbps. Usando EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*) e EGPRS (*Extended General Packet Radio Service*) as taxas de transferência de dados foram aumentando sendo valores típicos 150kbps. Em laboratório e em condições muito favoráveis de propagação podem atingir os 200 kbps. Foi também com esta tecnologia que me iniciei no mundo das redes de telecomunicações móveis ao prestar suporte técnico a operadores de vários continentes. Quando iniciei a minha vida profissional na Nokia esta era uma tecnologia que prometia ser eliminada em breve mas não foi com surpresa que os anos foram passando e se manteve activa na maior parte dos países do mundo. Esta é uma tecnologia muito madura e capaz de assegurar serviços de voz e dados de baixa taxa de transferência de uma maneira muito eficaz, segura e robusta. Os produtos destas tecnologias têm décadas de serviço não sendo de surpreender que se mantenha com o desaparecimento do UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*).

A terceira geração ou 3G surge nos anos 2000. O UMTS consegue taxas de transmissão maiores do que a geração que a precedeu usando um interface ar com WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*). As taxas de transferência de dados voltam a aumentar e pode-se assumir como valores típicos máximos de 400kbps. A arquitectura de rede é muito semelhante ao 2G com estações base conhecidas como BTS (*Base Transceiver Station*), chamadas também de NodeB e controladores, chamados de RNC (*Radio Network Controller*) em vez das BSC (*Base Station Controller*) do GSM. Dentro da mesma geração, UMTS, surge o HSPA (*High Speed Packet Access*), uma tecnologia introduzida na terceira geração que aparece numa release posterior (R5), aumentando a capacidade de transferência de dados e diminuindo a latência. A ordem de grandeza dos valores alcançados com HSPA é de algumas dezenas de Mbps, podendo chegar aos 42Mbps. Estas capacidades são conseguidas com várias técnicas como modulações mais eficientes (64 QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*), MIMO (*Multiple Input and Multiple Output*) e *Dual Carrier*.

A quarta geração está associada aos anos 2010 e usa OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplex*) na interface rádio. Com o LTE dá-se um novo aumento da velocidade de transferência de dados e uma diminuição significativa da latência. Desaparecem os controladores e as BTS, conhecidas nesta tecnologia como ENodeB, estão directamente ligadas à rede core, uma rede totalmente em *packet switching*. As chamadas de voz são encaminhadas para as gerações anteriores usando CS (*Circuit-Switched*) fallback ou mantidas na mesma rede em VoIP (*Voice over Internet Protocol*). O interface ar foi posteriormente alterado para que se pudessem usar técnicas como CA (*Carrier Aggregation*), com o objectivo de aumentar a capacidade de transferência de dados fazendo com que esta fase da vida da quarta geração móvel ficasse conhecida como LTE-A (*LTE-Advanced*). Valores típicos de velocidades de transferência de dados, para LTE, são da ordem dos 100Mbps.

A quinta geração ou 5G aparece nos anos de 2020, usa OFDM tal como o LTE, novas gamas de frequências, carrier aggregation e massive MIMO para conseguir maiores capacidades de transferência de dados.

O 5G é a geração tecnológica móvel que se segue mas ao contrário do que aconteceu no passado, onde o foco das vantagens tecnológicas seria a velocidade de transferência, desta vez esse ponto aparece em conjunto com outras possibilidades: a velocidade de transferência, a latência reduzida, a possibilidade de aumentar muito o número de dispositivos ligados à rede em simultâneo (IoT, *Internet of Things*, massive IoT), maior eficiência no uso do espectro, maior eficiência energética, *network slicing*, virtualização. Estas características permitem a criação de novos negócios baseados por exemplo em realidade virtual ou aumentada, veículos que circulam de maneira autónoma ou remotamente controlados, serviços médicos à distância, streaming de vídeo 4K e 8K, entre outras possibilidades que possam explorar estas capacidades. Chegamos a um ponto onde as redes celulares desenhadas essencialmente para mobilidade passaram a ser uma alternativa viável para a substituição também das redes fixas. Não é só a nível comercial que o 5G promete mudar a vida das pessoas, a literatura especializada usa a força dessas mesmas palavras para transmitir essa mensagem.

2.2 - Objectivos do 5G

De acordo com o 3GPP (TR 22.891) os tipos de serviços fornecidos pela quinta geração móvel podem ser divididos em categorias principais:

- eMBB (*enhanced Mobile Broadband*) - acesso multimédia a vários serviços que permitem taxas elevadas de transferência de dados em mobilidade com densidade de utilizadores elevada e com grande cobertura.
- mMTC (*massive Machine Type Communications*) / mIoT (*massive Internet of Things*) - capacidade de ligação à rede de um elevado número de aparelhos com capacidades de transferência de dados baixa mas com intolerância a longas latências. Os equipamentos têm custos baixos e devem ter capacidades de duração de bateria que lhes permitam uma longa autonomia podendo esta autonomia chegar a anos.
- CrIc (*Critical Communications*) / URLLC (*Ultra Reliable Low Latency Communications*) - comunicações baseadas numa latência muito baixa com robustez de ligação e taxas de transferência elevadas.
- eV2E (*Enhancement of Vehicle to Everything*) - exigência de serviços muito semelhante ao CrIc/URLLC mas com foco na mobilidade e nas altas transferências de dados, pensado para veículos tripulados remotamente ou autónomos.
- NEO (*Network Operation*) - Inclui o conceito de *Network Slicing* com redes virtuais múltiplas em cima das mesmas infraestruturas físicas (NFV - *Network Function Virtualization*) para suportar cada um dos tipos de serviços requeridos pelos vários utilizadores ou perfis de utilização.

Estes casos podem ser mais detalhados em outras especificações TR 22.861 a TR 22.864, TS 22.261.

A introdução de um novo interface ar sem a necessidade de compatibilidade com gerações anteriores permite mais facilmente atingir o plano de requisitos traçado:

- Maiores taxas de transferência de dados com maiores larguras de banda.
- Melhorar a eficiência espectral do interface ar, isto é, melhorar a taxa de transferência de dados por unidade de largura de banda usada.
- Melhorar a eficiência energética do interface ar, taxa de energia por unidade de informação transmitida melhorada, isto significa que as BTS 5G conseguem mais altas taxas de transferência de dados sem necessariamente precisarem de consumir mais energia.
- Reduzir a latência da interface ar tendo em conta os níveis de serviço exigidos pelo CriC/URLCC e eV2E.

Para que estes pontos possam ser verificados usam-se algumas técnicas:

- OFDMA (*Orthogonal frequency-division multiple access*) com modificações.
- Uso de novas bandas de frequências ainda não usadas pelas comunicações móveis na ordem das dezenas de GHz de maneira a poder usar maiores larguras de banda.
- Uso de matrizes de antenas para poder aumentar a eficiência espectral do interface ar e também melhorar a sua eficiência energética.
- Minimizar o uso de comunicações sempre presentes entre a rede e o UE (*User Equipment*) como por exemplo sinais de referência, sinais de sincronismo, sinais de broadcast, de forma a aumentar a eficiência energética da estação.
- Redução do TTI (*Transmission Time Interval*), tempos de resposta menores entre UE e BTS.

Quando se refere valores de pico na transferência de dados significa o valor máximo teórico que o sistema pode atingir. Isto é alcançado em condições ideais de propagação em que a célula opera no seu valor máximo de largura de banda e o UE recebe o sinal de boa qualidade com um alto SNR. Por exemplo na 3GPP R8 os valores de pico para o LTE são de 300Mbps no *downlink* e 75 Mbps no *uplink*. Para o LTE-A, 3GPP R10, os valores de pico são revistos para 1200 Mbps no *downlink* e 600 Mbps no *uplink*. Para o 5G, 3GPP R15 os valores de pico são de 18 Gbps no *downlink* e 9.6 Gbps no *uplink*.

A eficiência espectral de uma célula consiste no valor do total da taxa de transferência de todos os utilizadores dividido pela sua largura de banda. Isto corresponde a um valor de transferência de dados por unidade de largura de banda. Os valores típicos obtidos por experiência de utilização justificam-se serem menores porque os utilizadores encontram-se espalhados pela área de cobertura da célula, encontrando-se na maioria das vezes com SNR menores do que aqueles que teriam se estivessem próximos das antenas. O tempo de latência é também medido em condições ideais. Os valores típicos de latência são maiores porque numa rede real existe concorrência no acesso aos recursos de rede, muitas vezes com congestão que podem ou não

requerer retransmissão ou acumulação de dados em filas de espera nos vários troços da rede RAN (*Radio Access Network*), de transmissão ou rede core.

KPI	LTE	LTE-A	5G
Taxa de transferência (de pico típica) DL/UL [Mbps]	100/50	1000/500	20000/10000
Taxa de transferência de pico na especificação 3GPP DL/UL [Mbps]	300/75	1200/600	18000/9600
Eficiência espectral	2- 4 x 0.5 bps/Hz (DL) 2- 4 x 0.5 bps/Hz (UL)	1.1-3 bps/Hz (DL) 0.7-2.25 bps/Hz (UL)	3xLTE-A
Latência	5ms	menor que LTE	4ms (eMBB) 0.5ms (URLLC)

Tabela 2 - comparativos de taxas de transferência, eficiência espectral e latência para 4G e 5G.

2.3 - A arquitectura RAN 5G

O sistema 5G foi desenhado para poder ser integrado no LTE e permitir uma instalação faseada. Os nós 5G, habitualmente conhecidos como gNB (*gNodeB*), NR ou BTS 5G estão ligados a uma rede core. Dependendo da arquitectura de rede escolhida a interface com a rede core pode ser uma versão alterada de S1 do LTE ou uma nova interface, chamada de NG.

A rede core troca dados de utilizador e mensagens de sinalização entre o UE e uma rede externa ou interna. Para o 5G dois tipos de rede core são relevantes: rede core EPC, *Evolved Packet Core*, a rede core do LTE, e a rede core 5G (5GC). Usando esta interface a rede core controla as BTSs por meio de mensagens de sinalização no plano de controlo, um interface que pode ser o S1-MME ou o NG-C. No plano de utilizador a BTS troca dados com o core pelas interfaces S1-U ou NG-U.

Para o 5G duas redes RAN, redes de acesso, são relevantes, a rede LTE e a nova NG-RAN (*Next Generation Radio Access Network*). As duas redes RAN suportam dois tipos de BTS, eNB (*eNodeB*) do LTE e as estações base (BTS) 5G, conhecidas como gNodeB.

2.4 - Características da BTS 5G

A BTS 5G é referida e mais conhecida como Next Generation NodeB, gNodeB, NR, ou ainda gNB. Pode controlar várias células. Os seus princípios de funcionamento são muito semelhantes aos princípios de funcionamento de um nó LTE ou eNodeB.

Pelo interface 5G New Radio comunica com o UE sinalização AS (*Access Stratum*) e retransmite a sinalização core NAS (*Non-Access Stratum*) enviada do 5GC para o UE directamente.

O gNB gere os recursos da RAN e está ligado ao core pelo interface S1 ou pelo interface NG e a outros gNB vizinhos pelo interface X2 ou Xn. Usando o interface S1 ou NG o core envia mensagens de sinalização pelo plano de controlo (S1-MME ou NG-C) e de dados de utilizador pelo plano de utilizador (S1-U ou NG-U). O Interface X2 ou Xn troca mensagens de sinalização e dados de utilizador com outros gNB para handovers, dual connectivity e SON (*Self-Optimizing Networks*).

De acordo com o 3GPP o gNB tem uma arquitectura interna de maneira a promover a virtualização com duas componentes principais: gNB-CU-CP e gNB-CU-UP. gNB-CU-CP corresponde ao gNB *Central Unit Control Plane*. gNB-CU-UP corresponde ao gNB *Central Unit User Plane*.

Na figura 1 as ligações a tracejado representam sinalização (plano de controlo) e a linha contínua são representadas ligações ao plano de utilizador.

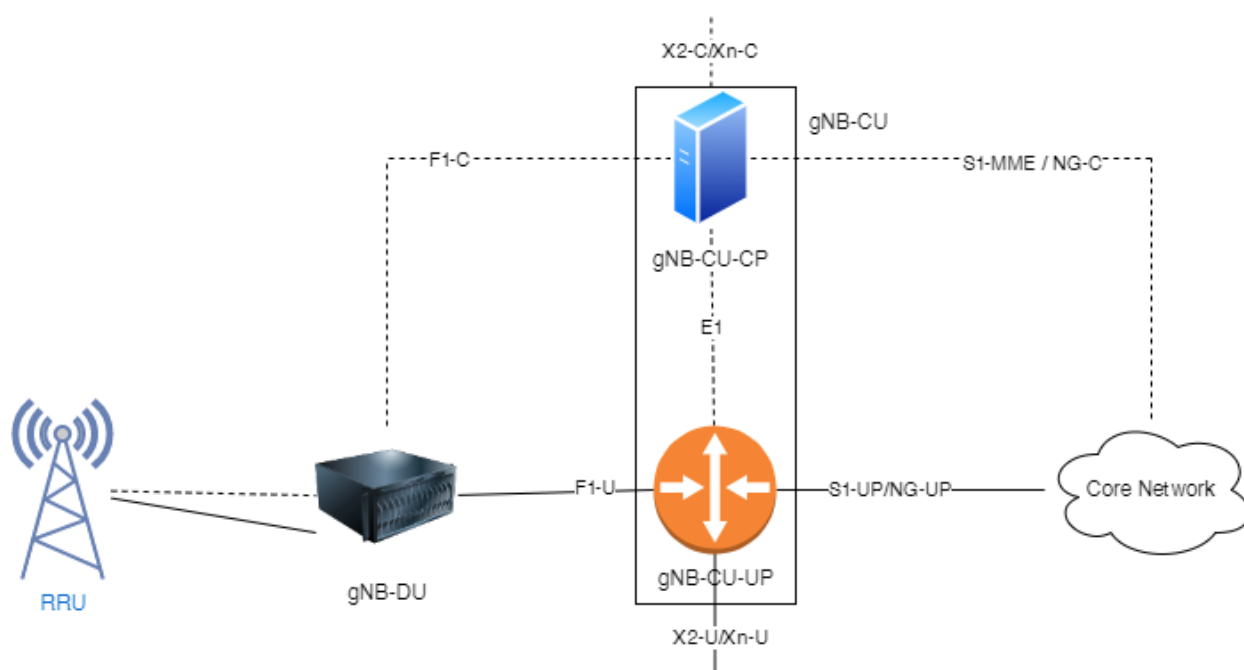


Figura 1 - Estrutura interna do gNB.

As funções do gNB-CU-CP (*Central Unit Control Plane*):

- Troca de mensagens de sinalização com o EPC pelo interface S1-MME ou com o 5GC pelo interface NG-C.
- Troca de mensagens de sinalização com outros nós gNB/eNB pelo interface X2 ou pelo interface Xn.
- Tem implementado o protocolo RRC (*Radio Resource Control Protocol*) com o UE. O RRC controla as comunicações rádio do UE através de AS e retransmite as mensagens NAS entre UE e core, faz a gestão de recursos da RAN.
- Implementa a sinalização no interface ar (PDCP, *Packet Data Convergence Protocol*) e torna mais seguras as mensagens enviadas no interface ar.

- Controla o gNB-CU-UP e gNB-DU pelos interfaces E1 e F1.

As funções do gNB-CU-UP (*Central Unit User Plane*):

- Troca de dados de utilizador com o EPC pelo interface S1-U ou com o 5GC pelo interface NG-U.
- Troca de tráfego de utilizador com outros nós gNB/eNB pelo interface X2 ou pelo interface Xn.
- Quando comunica com o 5GC tem implementado o protocolo de interface ar SDAP (*Service Data Application Protocol*) que faz o mapeamento de *data streams* do core na rede de acesso rádio RAN nos chamados DRB (*Data Radio Bearers*).
- Tem implementado o protocolo PDCP no plano de utilizador, responsável pelo encaminhamento dos DRBs nos casos de *dual connectivity* (DC) e torna mais seguras as mensagens de tráfego enviadas no interface ar.

Cada gNB-CU controla um ou mais gNB-DU (*gNB Distributed Unit*) cuja função consiste na aplicação das camadas mais baixas de protocolos do interface ar (RLC, *Radio Link Control*, MAC, *Medium Access Control*, e camada física). Cada gNB-DU controla uma ou mais células.

Como é mostrado na figura 1, a transmissão e a recepção são realizadas pelo RRU (*Radio Remote Unit*), que realiza a conversão digital analógica, a conversão para a frequência de transmissão e amplificação.

Os interfaces E1 e F1 são interfaces IP. No caso E1 há uma troca de mensagens de sinalização entre o gNB-CU-CP e o gNB-CU-UP. No caso do F1 há uma troca de mensagens de sinalização e utilizador entre o gNB-CU e o gNB-DU e garante por *flow control* que os buffers existentes neste último (gNB-DU) não saturam ou ficam completos. O protocolo entre o RRU e o gNB-DU usado é o CPRI nos casos observados pelo autor mas não está definido a nível de 3GPP.

3 - Estratégias de implementação do 5G

Existe uma pressão económica e de mercado muito grande para um lançamento rápido das redes 5G, para que o utilizador final, as empresas e toda a economia possa beneficiar das características que a quinta geração móvel carrega como por exemplo a sua latência muito baixa, altas taxas de transferência de dados e a utilização de novas bandas de frequências bem como a possibilidade de interligar todo o tipo de equipamentos à rede em muito maior número. Algumas dessas melhorias de performance podem ser alcançadas usando simplesmente o novo interface ar do 5G. Por essas razões o 5G foi desenhado para poder suportar um lançamento por fases em que se apoia nas redes LTE. A arquitectura destas redes de transição é muito semelhante a uma DC (*Dual Connectivity*) no LTE.

Numa primeira fase o UE continua a comunicar com o EPC, o core da rede LTE e com o eNB, mas também comunica com o gNB. A BTS LTE assume o papel de MeNB (*Master Node eNB*), troca tráfego de utilizador mas também tráfego de sinalização com o UE. A BTS 5G, gNB, fica

com a responsabilidade de ser um SgNB (*Secondary Node gNB*) e só troca com o UE tráfego de utilizador.

Numa segunda fase o EPC é substituído pelo 5GC, o core da rede 5G. A rede E-UTRAN é substituída pela NG-RAN, a rede usa os protocolos para o 5G.

A terceira fase é uma evolução SA (*Standalone*) em que o gNB pode existir sem a existência de um eNB. A BTS 5G passa a ser MgNB e transmite quer tráfego de utilizador quer sinalização para o UE. Pode ser suportada por um SeNB que transmite apenas dados de utilizador, não transmite sinalização. Estas três configurações podem coexistir no mesmo operador, E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) pode coexistir com a NG-RAN, o EPC pode coexistir com o 5GC. Um UE está assim ligado e registado no EPC ou no 5GC mas não pode estar ligado e registado nos dois ao mesmo tempo pelo menos não em todas as arquitecturas de transição e final. Um MeNB ou um MgNB pode ser um MN. Um SeNB ou um SgNB pode ser um SN.

3.1 - As diferentes opções para chegar ao 5G

Como foi referido em cima, existem duas arquitecturas principais para o 5G: uma arquitectura Non Standalone (NSA) e uma arquitectura Standalone (SA). A arquitectura NSA tem sido a mais popular e arrisco-me a dizer que é usada por todos os operadores como primeiro passo em direcção ao 5G. É uma arquitectura onde o 4G e o 5G coexistem e complementam-se. Este primeiro passo tem como principal vantagem o acesso a taxas de transferência mais elevadas (eMBB).

Na arquitectura SA os UEs estão ligados ao 5GC pelo nó 5G sem necessidade de usar qualquer elemento da rede LTE. Nesta arquitectura já se consegue ter acesso a serviços específicos do 5G como os de muito baixa latência (uRLLC). Os terminais com capacidades máximas 4G não ficam excluídos de aceder à rede.

O 3GPP Rel-15 define várias opções de ligação entre as redes de acesso 4G e 5G (representados fisicamente por eNB e gNB respectivamente) e as redes core 4G e 5G (EPC e 5GC, respectivamente). Cada uma dessas opções apresenta as suas características e algumas já foram descartadas e nem sequer vão ser descritas neste relatório, como as opções 6 e 8.

Em termos de arquitectura temos as seguintes opções de ligação:

- Opção 1: a opção 1 consiste na configuração existente nas redes LTE, os nós eNB estão ligados ao core 4G EPC e a ligação do UE segue esta rota. Carrier Aggregation é possível entre as bandas que fazem parte do 4G.
- Opção 2: a opção 2 é conhecida como SA NR, Standalone New Radio e corresponde à versão final de uma rede 5G. Os nós 5G, os gNB estão ligados ao core 5G, o 5GC. A ligação dos UEs segue esta rota. Acesso rápido às portadoras 5G e o plano de utilizador é acedido pela unidade de banda base do 5G. Esta opção é essencial para a implementação do 5G em baixas frequências e representa o melhor rendimento para uma carrier aggregation entre bandas baixas e bandas altas no 5G.

- Opção 3: a opção 3, conhecida também como EN-DC, corresponde a uma opção de lançamento do 5G numa configuração NSA. A portadora do 5G está ancorada numa portadora 4G, a portadora 5G é uma célula secundária. Os nós 4G e 5G estão ligados ao core do LTE, o EPC. O EPC terá de sofrer algumas actualizações para conseguir garantir a funcionalidade desta arquitectura. A conectividade do UE é assegurada por ligações a estes dois nós (4G e 5G). Plano de utilizador pode ser configurado no gNB e o plano de controlo no eNB.
- Opção 4: a opção 4 é conhecida como NE-DC, é uma arquitectura NSA em que estão localizados no mesmo sítio os nós 4G e 5G, tal como na opção 3. Nesta opção o EPC é substituído pelo 5GC, o core do 5G. O gNB está ligado ao core 5GC enquanto que a ligação do eNB é também ao 5GC mas através do gNB.
- Opção 5: a opção 5 consiste na ligação de um nó 4G numa rede 5G, ao core 5GC. Esta opção é uma opção 4G apenas, tal como a opção 1.
- Opção 6: a opção 6 consiste na ligação de um nó 5G, gNB a um core EPC.
- Opção 7: a opção 7, conhecida como NGEN-DC é uma outra alternativa NSA para nós colocalizados 4G e 5G. O EPC é substituído pelo 5GC. Os dois nós colocalizados, eNB e gNB estão ligados ao 5GC. O 5G é ancorado no 4G.
- Opção 8: a opção 8 é basicamente a opção 7 com um core EPC.

Arquitecturas ligadas ao EPC são as opções 1 e 3. As arquitecturas ligadas ao 5GC são as opções 2, 4, 5 e 7. As opções 6 e 8 são as menos interessantes do ponto de vista do operador por não apresentarem grandes vantagens em termos de capacidades adicionadas e opções seguintes, não sendo mais referidas neste relatório.

3.2 - Compartilhamento Dinâmico de Espectro

Conhecido na literatura como *Dynamic Spectrum Sharing* (DSS) e no contexto de fornecedor com outros nomes como por exemplo, na Ericsson, ESS (*Ericsson Spectrum Sharing*), o compartilhamento dinâmico de espectro permite usar numa mesma banda de frequência as duas tecnologias 4G e 5G de uma maneira flexível e dinâmica, ora dando maior fatia de banda ao 4G e neste caso diminuindo a parcela do 5G, ora fazendo o oposto e dando maior largura de banda ao 5G consumindo o espectro anteriormente dado ao 4G. Esta alocação dinâmica é feita por necessidades de utilização pelos UEs e pelas suas capacidades.

O que antes requeria um processo de optimização de rede para mudança de frequência, o chamado *refarming* ou *retune*, passa a ser feito automaticamente e por necessidade imediata dos utilizadores para o mais eficiente uso do espectro disponível de acordo com as capacidades técnicas dos equipamentos de utilizador. Com esta tecnologia não é necessário ter as bandas de frequência para o 4G e 5G estáticas, evitando duplicação de um recurso escasso para o operador. Esta tecnologia também permite usar, num mesmo equipamento RAN, as duas gerações de comunicação móvel LTE e 4G. Do ponto de vista de arquitectura de rede esta configuração pode ser uma configuração NSA (*Non Standalone*) ou SA (*Standalone*).

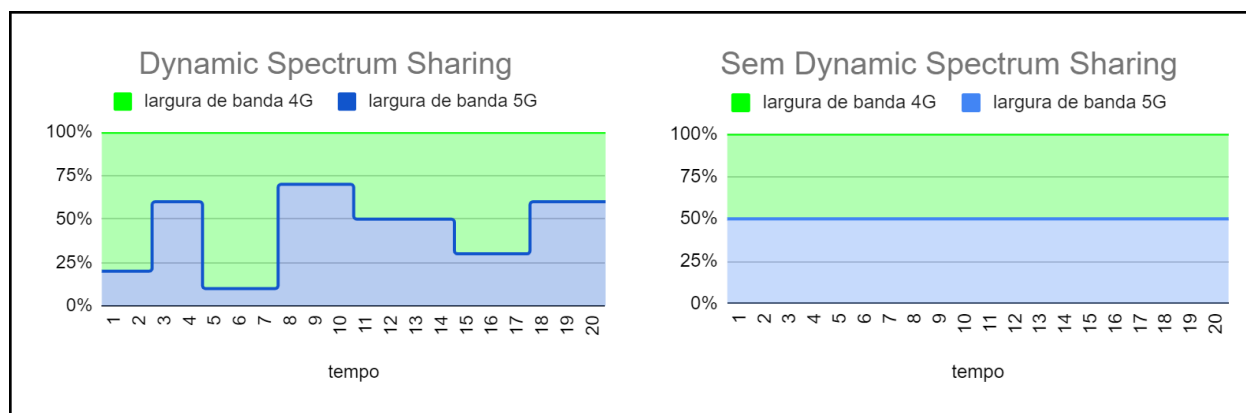


Figura 2 - O uso de DSS em comparação com o espectro estático.

O *Dynamic Spectrum Sharing* é uma possibilidade para a migração LTE para 5G faseada, podendo ser implementada com uma actualização de software no equipamento rádio usado pelas estações base 4G/5G. O DSS foi especificado pelo 3GPP nas seguintes TS: TS 38.211, TS 38.212, TS 38.214, TS 38.331 e não só, mas existem algumas funcionalidades que poderão ser proprietárias e dependentes de requisitos de operador.

Num momento inicial, quando ainda existem poucos utilizadores preparados para usar a tecnologia 5G ou equipamentos no mercado disponíveis, esta pode ser uma solução interessante para o operador de telecomunicações em áreas urbanas ou de alta concentração. Com o passar do tempo e a maior abundância de UEs preparados para usar a última geração de comunicações móveis creio que esta solução deixa de ser tão interessante do ponto de vista do operador. Não só num estado inicial o DSS permite satisfazer as necessidades e exigências de utilizadores já preparados para o 5G como também o permite fazer sem alocar recursos de direito de uso de banda dedicados que são muito caros de adquirir e que seriam subaproveitados porque seriam para uso exclusivo de uma só tecnologia.

Esta tecnologia exige que os recursos que existem para o LTE e o 5G sejam geridos de maneira coordenada já que a banda será utilizada pelas duas partes. A adaptação dá-se entre as duas tecnologias em todos os momentos. Nos momentos de pico em que o pico de um lado força o outro a diminuir o fluxo de dados e nos momentos em que toda a capacidade das células não é usada e na mesma esta coordenação entre as duas partes tem de existir pois o recurso partilhado assim o obriga.

A flexibilidade desta tecnologia em acomodar duas camadas geracionais de comunicações móveis numa mesma banda é uma grande vantagem mas esta flexibilidade no uso do espectro tem um custo que será pago numa diminuição da largura de banda real que poderá ser usada em qualquer momento. A divisão do espectro por duas tecnologias diminui assim os valores de pico que podem ser alcançados por cada uma dessas tecnologias. A perda pode ser tanto maior, em termos relativos, quanto menores forem as larguras de banda envolvidas na banda escolhida para esse compartilhamento.

Há um conjunto de factores que têm de ser satisfeitos para que um UE sem capacidades em 5G possa partilhar o acesso a uma banda conjunta 4G/5G. A adopção por parte do interface ar do

5G do OFDM e de um espaçamento de subportadoras de 15kHz, igual ao do 4G, é a base desse conjunto de factores. A possibilidade de LTE e 5G usarem ambas bandas conjuntas para UL e DL é outro factor importante para o uso de bandas partilhadas pelas duas gerações tendo como consequência o menor impacto possível na camada física do 5G. É também necessário garantir que não há qualquer impacto para os UEs que usam a parte 4G da banda conjunta, equipamentos que não têm capacidades para além do 4G. Os equipamentos que suportam ligações 5G deverão estar ligados às duas bandas, estar ligados simultaneamente à parte 4G e 5G da célula, esta é como já foi referido neste texto uma configuração NSA, non standalone ou standalone.

A experiência mostra que mesmo com a quebra de desempenho a utilização do DSS é vantajosa em termos de gestão de espectro comparando com a situação de se ter uma banda dedicada ao 4G e outra independente para o 5G. Valores de latência testados mostraram sempre degradação quando o DSS é introduzido em cada tecnologia, ou seja a latência quer do 4G quer do 5G é agravada pelo uso do DSS mas a latência da célula 5G com DSS mostrou sempre valores menores do que para o 4G. A performance apresentada na configuração DSS varia de fabricante para fabricante não podendo ser atribuída como constante em todos os tipos de fornecedor considerados.

Tive oportunidade de ver, na rede em que trabalho, que esta opção de introdução do 5G é vantajosa no início da sua implementação em zonas de forte densidade populacional e com elevado poder de compra.

3.2 - Configuração Non Standalone (NSA) New Radio

3.2.1 - Dual Connectivity (DC) Non Standalone

Quando o LTE foi lançado (3GPP R8), um UE poderia comunicar com um único eNB por uma única célula. No LTE-A (3GPP R10) foi introduzido o CA, que suporta maiores velocidades de transferência de dados comunicando o UE com várias células, em frequências diferentes. Todas estas células são controladas pelo mesmo eNB. Existe uma célula primária, PCell, e uma ou várias células secundárias, SCell. A PCell transmite dados de utilizador e sinalização. A SCell apenas dados. A PCell funciona com *uplink* (UL) e *downlink* (DL). A SCell apenas suporta DL.

A *Dual Connectivity* (DC) foi introduzida mais tarde, na 3GPP R12. Com a DC o UE comunica com dois eNB ligados entre si pela interface X2. O UE recebe dados e sinalização de um nó master, MeNB e somente dados de um nó secundário, SeNB. O MeNB pode ter uma célula macro que cobre uma área maior e tem uma capacidade de transferência de dados mais limitada e o SeNB ter células locais, de menor cobertura que transmitem volumes maiores de dados por tempo. Ao usar DC o UE pode estar a usar também CA com o MeNB, com o SeNB ou com os dois. O 5G Non Stand Alone é uma evolução do DC. O UE recebe dados e sinalização de um MeNB ao mesmo tempo que recebe dados de um SgNB com velocidades de transferência potencialmente maiores. Isto permite ao utilizador usar tecnologia 5G numa rede ainda E-UTRAN, sem ser preciso ter disponível uma rede core 5GC. Esta pode ser uma vantagem para

um operador na introdução do 5G, para os seus utilizadores terem acesso mais rápido à nova geração móvel.

3.2.2 - Dual Connectivity - Plano de Utilizador

O tráfego de dados entre o UE e a RAN circula pelos *Data Radio Bearers* (DRB). Do ponto de vista do UE e do interface para o multi rádio DC existem três tipos de DRB:

- *Master Cell Group Bearers* (MCG). Os MCG existem entre o UE e o MN. Podem ligar o UE ao MN e têm terminação no MN. Podem ligar o UE, passar pelo MN e terminar no SN, neste caso têm terminação no SN.
- *Secondary Cell Group Bearers* (SCG). Os SCG existem entre o UE e o SN. Podem ligar o UE ao SN e têm terminação no SN. Podem ligar o UE, passar pelo SN e terminar no MN, neste caso têm terminação no MN.
- *Split Bearers*. Os *Split Bearers* podem existir entre o UE e o MN ou entre o UE e SN. O processo de roteamento de pacotes acontece a nível do protocolo Packet Data Convergence Protocol (PDCP). Se a separação (o *split*) é dada no MN diz-se que tem terminação no MN. Se a separação é dada no SN diz-se que tem terminação no SN.

Como foi visto nos três pontos em cima relativamente aos tipos de DRB, do ponto de vista da RAN cada DRB pode terminar no Master Node ou no Secondary Node. Isto resulta num total de seis possíveis configurações. Estas configurações são relevantes para a terminologia usada pelo 3GPP. As opções 3, 4 e 7 apresentam *split bearers* com terminação no MN. As opções 3a, 4a e 7a suportam SCG com terminação no SN e todas as opções têm MCG com terminação no MN.

Em relação aos protocolos usados no Multi rádio Dual Connectivity há um conjunto de regras que é preciso referir. Cada nó usa a sua própria versão dos protocolos RLC, MAC e de camada física. Isto é se for um nó gNB usa a versão 5G do protocolo, se for um nó eNB usa a versão LTE. Quando a arquitectura for uma EN-DC (core EPC e rede RAN E-UTRAN), os MCG DRB terminados no nó master eNB podem usar a versão 4G ou a versão 5G do protocolo Packet Data Convergence Protocol (PDCP). Todos os outros DRB usam a versão 5G do mesmo protocolo PDCP. O protocolo SDAP só é usado quando o nó master é 5G e o core é um core 5GC.

3.2.3 - Dual Connectivity - Plano de Controlo

Na Multi Rádio Dual Connectivity existe uma única ligação de sinalização no plano de controlo e a rede core troca mensagens de sinalização com o MN, pelo mesmo plano de controlo através do interface S1 ou do interface NG. Não há sinalização entre o core e o SN. MN e SN comunicam entre si pelo interface X2 ou pelo interface Xn. O UE tem o seu plano de controlo unicamente a passar pelo MN. Esta ligação usa os protocolos EMM (*Evolved Packet System Mobility Management*) e o ESM (*Evolved Packet System Session Management*) no caso do EPC. Para o caso do 5GC são usados os protocolos 5GMM (5G Mobility Management) e o 5GSM (5G

Session Management). EMM, ESM, 5GMM e 5GSM estão integrados na camada NAS ou Non Access Stratum.

O UE tem apenas um estado RRC (RRC_IDLE e RRC_CONNECTED, do diagrama de estados RRC do 4G) se o MN for um MeNB. Se o MN for um MgNB (RRC_IDLE, RRC_INACTIVE e RRC_CONNECTED) do diagrama de estados RRC do 5G. Cada nó pode trocar sinalização RRC com o UE podendo ser o 4G RRC ou o 5G RRC respectivamente se tivermos um MN eNB ou um MN gNB. Cada nó tem também o seu instância RRC com o UE.

A ligação RRC entre UE e eNB/gNB ou MN é feita pelos SRB (*Signalling Radio Bearers*). Podem ser configurados da seguinte maneira:

- SRB 0 são mensagens usadas durante o processo de *RRC Connection Establishment* entre o UE e o MN, como MCG SRB.
- SRB 1 contém a maioria das outras mensagens RRC de sinalização entre o UE e o MN, podendo ser MCG SRB ou um split SRB. No caso de ser um split SRB as mensagens são roteadas entre o UE e o nó *master*, ou entre o UE e o nó secundário.
- SRB 2 transporta mensagens NAS (*Non Access Stratum*) entre a rede core e o UE podendo ser MCG SRB ou split SRB.

Há também mensagens RRC entre o UE e o SN ou nó secundário que podem existir no contexto de um interface X2 ou Xn encapsuladas no RRC do nó MN. Opcionalmente o SgNB pode trocar mensagens com o UE por SRB 3 que é configurado como um SCG bearer, uma ligação de sinalização RRC directamente entre o UE e o SgNB.

Relativamente aos protocolos e fazendo uma análise semelhante ao que foi feita para o plano de utilizador. Cada nó usa a sua própria versão dos protocolos RLC, MAC e de camada física. Isto é se for um nó gNB usa a versão 5G do protocolo, se for um nó eNB usa a versão LTE. Quando usada uma arquitectura EN-DC, que é uma arquitectura onde o nó master é um eNB e o nó secundário é um gNB, o nó secundário gNB pode opcionalmente trocar mensagens de sinalização RRC directamente com o UE através de SRB 3 em alternativa a essas mensagens serem embebidas nas mensagens SRB 1 na sinalização RRC enviada ao MN, neste caso o eNB. Quando usando EN-DC, o nó *master* eNB estabelece inicialmente um SRB 1 usando a versão 4G do protocolo PDCP. No seguimento, o eNB pode configurar SRB1 e SRB2 usando a versão 4G ou 5G do protocolo PDCP. Os split SRBs usam sempre a versão 5G do PDCP.

3.2.4 - Indicador 5G

O uso de uma configuração 5G pressupõe que UE e rede tenham capacidades na quinta geração móvel. O UE precisa de saber também se a rede tem possibilidades a nível do 5G.

Nas configurações NSA, EN-DC por exemplo, a célula 5G na configuração DC e de acordo com as especificações 3GPP tem uma maneira de ser identificada pelo terminal móvel. Como o UE liga-se na célula âncora 4G tem de existir algum indicador que sinalize que uma portadora 5G está disponível via célula 4G. Este mecanismo existe e é dado por um único bit com o nome de *upperLayerIndication* que é transmitido no System Information Block Type 2 (SIB2) pela célula

4G. Este indicador assinala ao UE que entrou numa área de cobertura que oferece capacidades 5G, ou seja células NR estão disponíveis para sua utilização.

A identificação deste bit pelos UEs localizados na célula 4G é feita pelos equipamentos com capacidades 5G, os equipamentos sem esta capacidade ignoram esta informação. Os equipamentos terminais com capacidades 5G podem, ao ler este bit, activar o ícone 5G no ecrã do telefone móvel. Esta solução permite aos UEs activar o indicador 5G sem fazer qualquer tipo de medições em 5G permitindo poupar no consumo de energia. A activação deste indicador pode ser feita ao nível de célula. Este indicador pode estar activo inclusivamente em células 4G que não têm cobertura 5G sendo estas configurações de evitar na rede. É importante concluir também que este indicador só deverá estar activo numa célula que tenha cobertura completa por uma célula 5G não interessando ficar activo numa célula que ultrapassa a cobertura da portadora 5G equivalendo esta circunstância à indicação de cobertura 5G sem haver célula 5G disponível.

3.2.5 - Combinação de bandas para Multi Rádio Dual Connectivity (MR-DC)

O 5G foi desenhado possibilitando a opção de uma integração faseada. Existem várias alternativas para a sua integração por etapas disponíveis nas especificações 3GPP que permitem o uso de estações base LTE e gNB ligadas ao core do LTE (EPC) ou 5GC. Uma das primeiras especificações a ser definida é uma variante do *Multi-Rat Dual Connectivity* (MR-DC), conhecida na literatura como *E-UTRA NR Dual Connectivity* (EN-DC). Esta configuração usa o EPC, a rede core do 4G, a rede E-UTRAN, um MeNB nó master LTE e o SgNB um nó secundário NR.

As especificações 3GPP definem várias combinações compatíveis com a arquitectura EN-DC (TS 38.101-3: 5.2.2.2). O nó master nesta arquitectura, MeNB, pode fazer *carrier aggregation* com uma, duas, três ou quatro bandas de frequências LTE. Estas possibilidades ficam definidas pela própria capacidade do UE que está categorizada em classes. São as classes de largura de banda do UE.

As classes de largura de banda do UE definem o número máximo de portadoras que o UE consegue suportar numa configuração de *carrier aggregation*. As classes de largura de banda de *carrier aggregation* estão tabeladas para FR1 e FR2. Os valores tabelados também incluem valores máximos de largura de banda na combinação das várias portadoras ou bandas de frequência.

Neste contexto de classes tabeladas o UE anuncia à rede as classes de largura de banda que lhe são compatíveis para cada banda de frequência.

A interface rádio no 5G pode ser usada em duas faixas de frequências conhecidas como FR1 e FR2. A frequency range 1 (FR1) situa-se entre os 450 MHz e os 6000 MHz. O FR1 inclui as frequências já usadas pelo LTE. A frequency range 2 (FR2) vai dos 24GHz aos 52GHz. O 3GPP definiu estas duas faixas, FR1 e FR2, porque os requisitos e condições de testes são diferentes em cada uma delas. Dentro dessas faixas existem as bandas de frequências usadas que no caso da FR1 e como já referido em anteriormente, incluem bandas já usadas pelo LTE mas são acrescentadas novas bandas usadas unicamente pelo 5G.

As bandas de frequências dentro das FR são também categorizadas como bandas para serem usadas com FDD, TDD, SDL ou SUL. Células FDD usam dois blocos de frequências: um para *uplink* e outro bloco para *downlink*. As células TDD usam apenas um bloco de frequências para *uplink* e *downlink*, gerindo os tempos de transmissão e recepção. As células SDL, *supplementary downlink*, são células usadas unicamente para *downlink* tendo apenas uma frequência definida, a frequência de *downlink*. Da mesma maneira as frequências SUL são frequências usadas só para *uplink*.

3.2.6 - Architecturas de rede para o 5G

Na R14 o 3GPP introduziu um conjunto de opções para o lançamento da rede 5G. Estas opções baseiam-se na *dual connectivity* (DC), em LTE. São propostas várias opções de arquitectura de rede. Todas as opções propostas foram brevemente descritas neste mesmo relatório numa secção anterior, permitem uma implementação faseada do 5G.

A opção conhecida como opção 1 é simplesmente a arquitectura de rede LTE (3GPP R8 a 3GPP R11), em que é usada a rede core EPC, a rede core do LTE, a E-UTRAN e um MeNB. A possibilidade de termos DC com outro nó eNB faz parte desta opção.

Outra das opções, conhecida como opção 3/3a/3x, passa pelo uso da rede LTE possibilitando o uso do EPC, a rede core de LTE, a E-UTRAN, eNB e gNB. A opção 3 pode ser um dos primeiros passos em direcção ao 5G. Esta opção é conhecida como EN-DC (E-UTRA NR Dual Connectivity). Nesta configuração o eNB e o gNB comunicam pela interface X2. O nó 5G, gNB, está co-localizado com o nó eNB. Ao promoverem esta configuração estão os operadores a usar tecnologia 5G em cima de uma rede LTE, uma rede de geração anterior sem terem de instalar uma rede core nova, sem implementar grandes alterações nas infraestruturas já adquiridas, partilhadas ou alugadas a outros.

A EN-DC é uma arquitectura NSA (Non Standalone) que possibilita um rápido lançamento do serviço 5G com um investimento inicial menor e rentabilizando a actual rede LTE instalada. A arquitectura NSA embora introduza o 5G mais rapidamente e exija um esforço financeiro mais baixo é tecnologicamente mais limitada não permitindo ao utilizador final usufruir de todos os benefícios do 5G como serviços suportados por URLCC ou network slicing.

As três configurações dentro da opção 3 (3/3a/3x) distinguem-se pelas diferentes rotas usadas pelo tráfego de dados dentro da RAN. Na configuração EN-DC a comunicação com a rede core EPC dá-se pelo interface S1 do LTE alterado e as BTS comunicam também entre si por um interface X2 também ele alterado do LTE. O nó secundário gNB está integrado numa rede E-UTRAN e não numa rede NG-UTRAN, também é nomeado como en-gNB na literatura porque é compatível com os interfaces LTE S1 e X2, ou seja, compatível com a arquitectura EN-DC. Nesta opção a grande vantagem é a possibilidade de usar as altas taxas de transferência possibilitadas pela rede 5G. O UE precisa também de estar capacitado para poder usar a configuração EN-DC e essa capacidade tem de ser anunciada à rede, caso exista, numa mensagem de ueCapabilityInformation descrita no 3GPP TS 36.331, depois de lhe ser pedida tal informação.

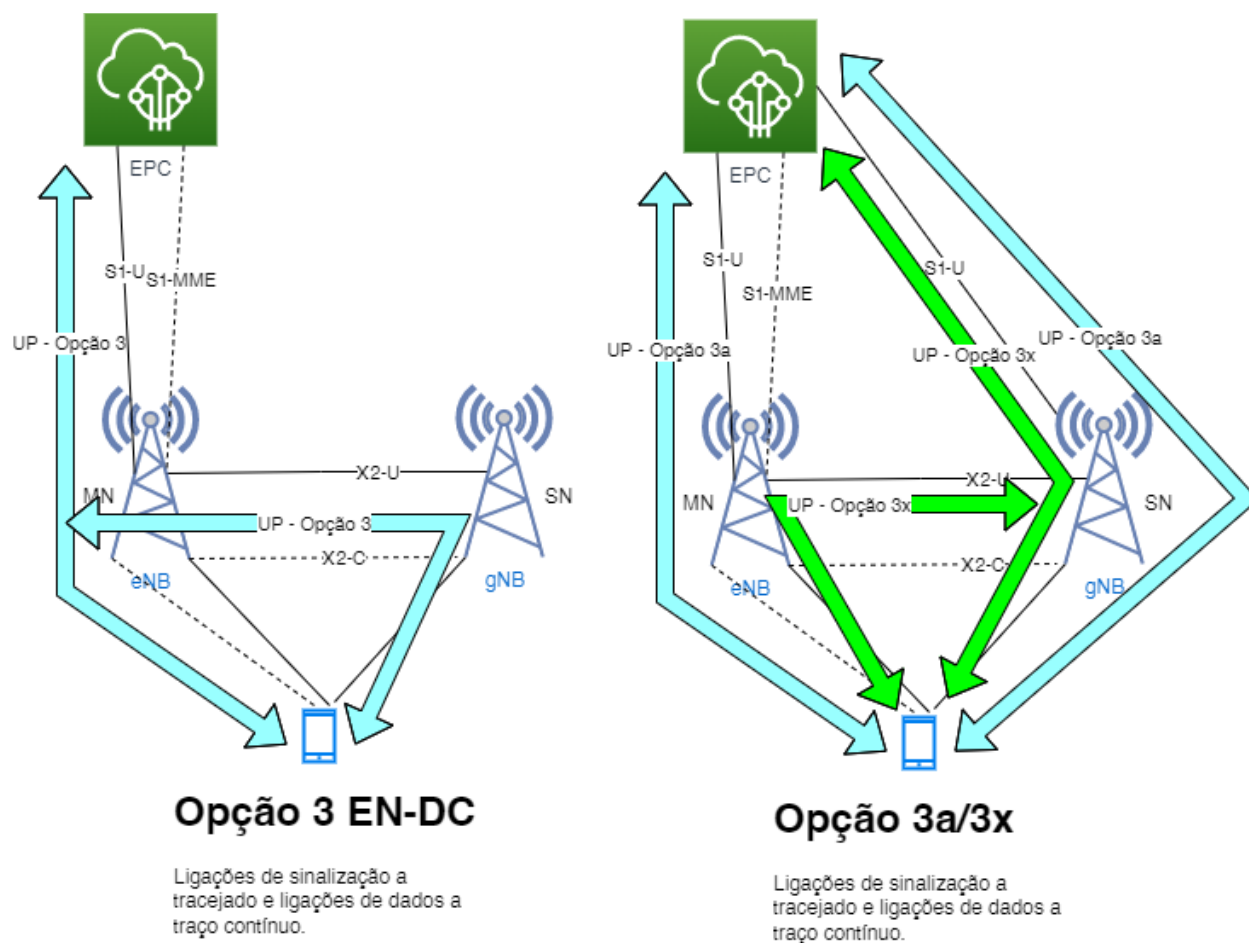


Figura 3 - Configuração EN-DC.

Numa segunda fase o EPC é substituído pelo 5GC, a rede core do 5G. A E-UTRAN é substituída pela NG-RAN em que a ligação ao core é pelo interface NG e as BTS comunicam entre si pelo interface Xn. As BTS podem ser gNB ou eNB. Ao implementarem esta opção os operadores continuam a manter uma parte significativa da sua rede sem alterações e permitem benefícios adicionais como Network Function Virtualization (NFV), Software Defined Network (SDN) e o Network Slicing, benefícios só possíveis de alcançar com uma rede preparada para o 5G.

Nesta fase em que o 5GC é instalado na rede, vários fabricantes propõem o uso do core único, isto é, um core com capacidades nas tecnologias de geração anteriores e actuais, um core que suporta os serviços e funcionalidades de GSM, UMTS, LTE, 5G e NB-IoT. Os mesmos fabricantes que propõem esta solução sugerem também a integração da rede fixa neste core único, no sentido da convergência dos serviços disponíveis. A possibilidade de um core único possibilita também uma maior eficiência e facilidade na optimização da rede core com maior flexibilidade na integração faseada do 5G. Um sistema de core único é também um sistema *cloud native*, um sistema que corre aplicações e funções descentralizadas sendo mais facilmente escalável. Este sistema que concentra as funcionalidades de core de todas as tecnologias coloca de parte sistemas antigos e dedicados a tecnologias que já estão em desenvolvimento.

Podem existir dependências importantes na introdução do 5GC dos outros elementos de rede: dependências a nível de HW de equipamentos da rede de acesso, dependências a nível de SW nos mesmos elementos, dependências ao nível de toda a rota de transmissão quer ao nível da configuração quer ao nível da capacidade de rede e dependências ao nível da rede core.

Na arquitectura NSA, por exemplo na opção 3, o UE está ligado simultaneamente a uma portadora 4G e a uma portadora 5G. Sendo a portadora primária a portadora LTE e a portadora secundária a portadora 5G. A portadora 4G pode ser uma célula usada principalmente para sinalização, para garantia de cobertura. A célula 4G usa uma banda mais baixa e o 5G uma banda mais alta. O UE usa nesta configuração a banda de 4G como uma âncora. Bandas mais altas são normalmente menos congestionadas mas em contrapartida oferecem áreas de cobertura mais baixas em geral e são piores para cobrir o interior de edifícios.

Quando o UE se coloca numa melhor cobertura de 5G pode mudar o seu plano de utilizador para essa célula podendo obter daí melhores taxas de transferência de dados. Quando o UE se move para uma área de cobertura de outra célula 5G em condições melhores de serviço, o nó âncora pode-se manter na célula inicial 4G. Quando o UE se move para uma zona de cobertura fora da zona de cobertura do 5G o serviço volta a ser assegurado pela célula LTE.

A melhor estratégia de cobertura 4G/5G passa por garantir a melhor performance de rede com os equipamentos disponíveis. A cobertura 5G pode ser assim maximizada quando a área de cobertura do 4G e 5G são muito semelhantes.

Na opção 7 (7/7a/7x) a rede core 5G é usada numa rede NG-RAN em que o nó Master Node (MN) é MeNB e o SN é o SgNB. Tal como na opção 3 as várias possibilidades (7/7a/7x) distinguem-se pelos diferentes percursos do tráfego na rede de acesso rádio. Nas especificações e também na literatura especializada esta arquitectura de rede é conhecida por NGEN-DC (NG-RAN, E-UTRA, NR Dual Connectivity). O MeNB é um ng-eNB, um nó eNB compatível com os interfaces NG e Xn, um nó compatível com a NG-RAN e com a NG-ENDC. Com esta alteração de arquitectura os operadores passam a poder oferecer capacidades da rede 5G para além das altas transferências de dados como NFV, Network Slicing e SDN.

Na terceira fase a BTS 5G passa a ser o MN, o nó master. Nesta opção é usado o 5GC, a rede NG-RAN e o gNB sozinho ou com DC com outro gNB. Com esta opção os operadores passam a ter uma rede 5G totalmente instalada.

Na opção 4 (4/4a) a rede core 5G é usada em conjunto com a NG-RAN, o MN é um MgNB e o SN é um SgNB. Tal como na opção 3 e na opção 7 as duas possibilidades apresentadas para a opção 4 são diferenciadas pelas rotas que o tráfego usa na RAN. Nas especificações e na literatura esta opção é também conhecida como NE-DC, NR EUTRA Dual Connectivity.

As opções 4 e 2 permitem aos operadores terem mais alguns benefícios pelo MN ser um nó gNB, MgNB, por exemplo, terem uma rede 5G com um MgNB, e um 5GC, ou um protocolo RRC optimizado para MTC, equipamentos com taxas de transferência de dados muito pequenas. A utilização desta opção pressupõe mais uma vez que o UE tem capacidades para usar estas arquitecturas. Esta opção pode ou não envolver DC. Um cenário típico poderia ser uma macro cell pertencente a um MN gNB ou MgNB a frequências mais baixas possibilitando uma cobertura numa área grande e um SN, uma célula mais pequena em termos de área de

cobertura, ou uma microcélula transmitindo a frequências mais altas e com maiores taxas de transferência de dados.

Estas diferentes opções de arquitectura de rede podem coexistir no mesmo operador. A E-UTRAN pode coexistir com a NG-RAN, a EPC pode coexistir com a 5GC. As especificações 3GPP preveem a mobilidade entre MeNB e MgNB, possibilitam também a mobilidade entre EPC e 5GC.

3.2.7 - Adição de um nó secundário gNB

Numa arquitectura de rede em que está desenhada a opção 3 inicialmente o UE é servido por um nó eNB e está no estado RRC_CONNECTED. Usando uma mensagem de sinalização *RRC Connection Reconfiguration* o eNB reconfigura o UE para medidas inter-RAT de células 5G vizinhas. Esta acção pode disparar o evento B1 (evento *IRAT neighbour above threshold*), ou seja, uma célula vizinha NR ou 5G está a um nível acima de um valor de referência. Em resposta o UE envia informação de medidas da célula vizinha para o eNB. Essa mensagem do UE para o eNB contém a informação de PCI ou physical cell identity. O eNB transfere um ou mais *radio bearers* para o nó 5G. Neste momento o eNB assume o papel de master eNB. O MN contacta o nó 5G, passa-lhe os requisitos do *radio bearer* e faz o pedido para que o gNB reserve recursos para esses bearers. Envia também para o nó 5G as capacidades do UE, informação anteriormente recolhida pelo nó LTE.

Na resposta o gNB assume o papel de nó secundário ou SN e reserva os recursos que entretanto foram pedidos. Na sua resposta ao eNB o gNB inclui na sinalização RRC, mensagem de *5G RRC Reconfiguration* que indica ao UE como efectuar a configuração para comunicar com o grupo de células secundárias SCG. O gNB encaminha a mensagem com destino ao UE introduzindo-a numa mensagem *4G RRC Connection Reconfiguration*. O UE reconfigura e envia a resposta para o gNB via eNB que recebe primeiramente a mensagem na ligação de sinalização e a reenvia para o gNB. Ao mesmo tempo o UE pode contactar o gNB para a obtenção do valor inicial do *timing advance*. Alguns procedimentos de sinalização podem não envolver o nó master, o MN. Estes incluem a adição, alteração ou remoção de uma SCell nos casos em que a chave de segurança não muda e o MN não está envolvido numa *PDCCP data recovery*. No início da comunicação o UE é servido por um eNB, MN, e um gNB, SN. Usando uma mensagem *5G RRC Reconfiguration* o gNB dá indicação ao UE para iniciar medições de células vizinhas em 5G. Isso pode provocar vários eventos no UE como por exemplo o evento A2, o serviço, para uma dada célula, está pior que uma determinada referência, ou um A6, o serviço, para uma dada célula, está melhor que uma determinada referência. Em resposta o gNB reconfigura o UE de maneira a que possa adicionar, remover ou alterar as definições de célula.

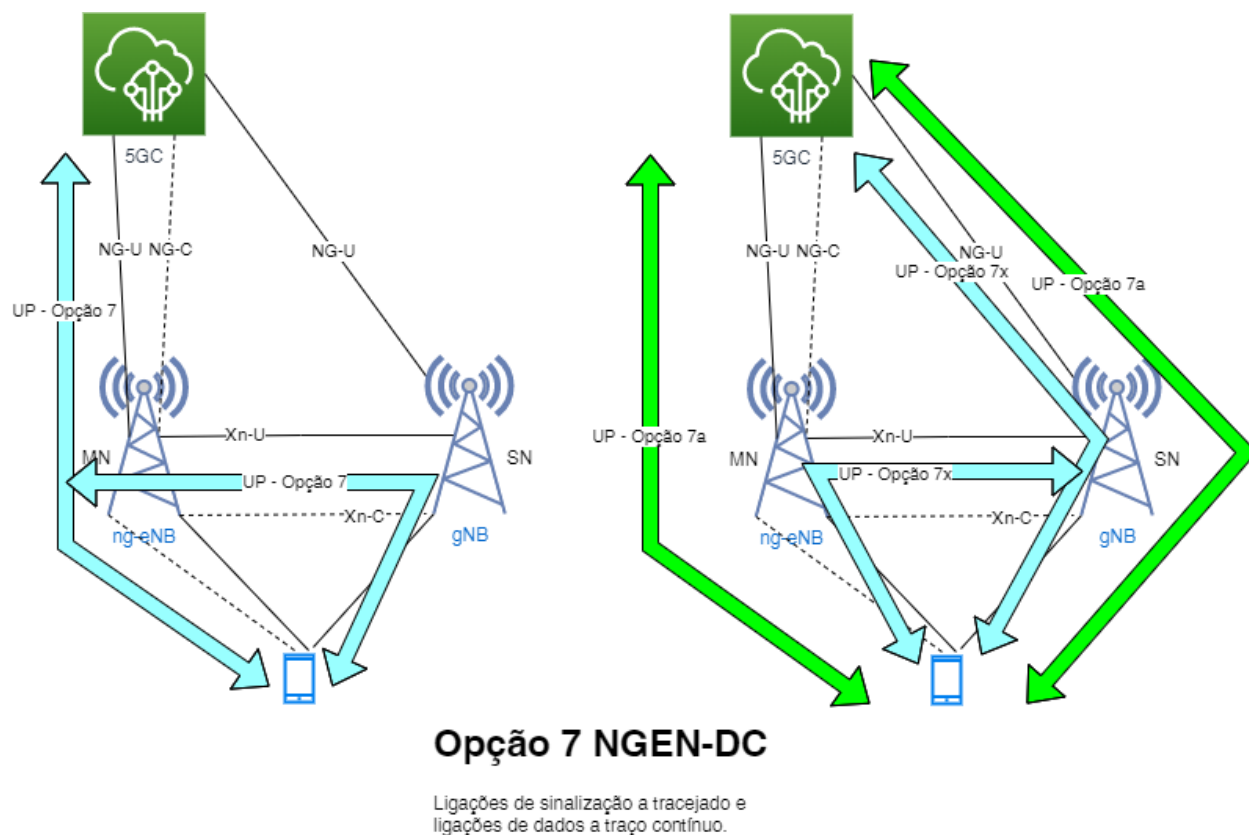


Figura 4 - Configuração NGEN-DC.

A sinalização pode, como já foi descrito neste texto, ser enviada de duas maneiras, pode acontecer directamente entre UE e gNB para isso SRB3 tem de estar configurada ou então a comunicação pode ser encapsulada nas mensagens de sinalização enviadas em RRC para o eNB sendo depois encaminhadas por mensagens de sinalização no interface X2 ou Xn.

3.3 - Protocolo RRC

Por intermédio do protocolo de sinalização RRC, Radio Resource Control, a BTS 5G configura as comunicações rádio do UE. O protocolo RRC, na camada de protocolos, fica situado na zona de acesso rádio ou *access stratum*.

Algumas das principais características do RRC passam por:

- Transmissão de informação de sistema pela célula para o UE ter acesso à configuração da mesma.
- Transmissão de informação de paging para os UE em estado idle.
- Gestão da informação e de gestão lógica entre o UE e a NG-RAN.
- Configuração dos canais rádio (*radio bearers*) quer a nível de dados e de sinalização.
- Configuração de segurança de acesso entre o UE e a rede NG-RAN.

- Configuração de *carrier aggregation* e de *dual connectivity* para o UE.
- Geração de estatísticas rádio.
- Configuração de handovers.
- Transporte de mensagens de e para o core.

O protocolo em 5G é muito semelhante ao LTE, embora existam algumas diferenças. Por exemplo, as comunicações com um MN (Master Node) eNB usa o protocolo antigo para o LTE. O UE recebe de um SN (Secondary Node) gNB sinalização RRC para configuração das comunicações rádio. O RRC para 5G aparece com o MN gNB.

3.4 - Sinalização RRC na configuração Non Standalone

Numa configuração Non Standalone (NSA) em que o gNB é o nó secundário ou SN (EN-DC e NGEN-DC) o RRC do lado do nó 5G, do gNB, é relativamente menos pesado sendo que um conjunto mais pequeno de funcionalidades é requerido.

Algumas funcionalidades RRC:

- transmissão do Master Information Block (MIB)
- reconfiguração RRC para alterar a ligação entre o nó secundário e o UE
- configuração de radio bearers e informação de rede
- informação de vizinhas pelo UE com destino ao gNB secundário.

As outras funcionalidades do RRC são feitas pelo nó 4G, pelo RRC 4G, entre o UE e o MN ou MeNB. Estas outras funcionalidades incluem o broadcast de informação de sistema ou system information broadcast, paging, administração de estado RRC (RRC_IDLE, RRC_CONNECTED), medição de nós vizinhos, transportes de mensagens de sinalização NAS entre outras responsabilidades a nível de configuração rádio (setup, release, ligação entre MeNB e SgNB).

Os system information, difundidos periodicamente pelo gNB, consistem em vários blocos. O *Master Information Block* (MIB) contém a informação necessária para o UE aceder ao *non standalone* gNB. Essa informação é difundida nos canais BCH e no PBCH. O system information block 1 contém informação adicional para ligação ao standalone gNB e é difundida nos canais DL-SCH e no PDSCH em acordo com os parâmetros apresentados no MIB. Os restantes system information dividem-se em vários cardinais, são transmitidos nos canais DL-SCH e PDSCH e entregues quer por transmissão periódica, por activação dedicada ou por pedido a nível do UE. A configuração Non Standalone (EN-DC, NGEN-DC) apenas usa a informação MIB. O parâmetro de barramento indica que a célula só actua como SCell e não como PCell. O UE adquire informação de sinalização do MeNB. O UE não necessita de obter informação da SCell, o nó secundário gNB não precisa de estar com o nó master (MeNB). Os outros SIBs são requeridos na arquitectura standalone (NE-DC, arquitectura 5G).

A reconfiguração RRC é uma mensagem de sinalização que modifica a ligação RRC entre o gNB e o UE. Este procedimento implica o estabelecimento, modificação ou libertação da ligação de sinalização e dos RB, isto também implica reconfiguração do PDCP e do RLC para cada RB. A

reconfiguração RRC inclui a adição, modificação e finalização de um grupo de SCell ou de SCell, isto implica modificações a nível de protocolo MAC e protocolo de camada física do grupo de células ou das células individuais. A reconfiguração RRC provoca nova configuração, modificação ou finalização de medições estatísticas rádio de nós vizinhos. Numa configuração NSA o SgNB pode sinalizar esta mensagem de duas maneiras. Envia directamente para o UE se a SRB3 estiver configurado ou o SgNB passa para o MeNB colocando essa mensagem dentro da sinalização X2 ou Xn, interface entre os nós primário e secundário. O MeNB, nesta segunda opção, inclui esta mensagem numa 4G RRCConnection Reconfiguration no SRB1. O pedido de reconfiguração é bem sucedido com a resposta RRCReconfigurationCompleted pelo UE. Com a mensagem de reconfiguração, o gNB reconfigura também as medidas estatísticas recolhidas pelo UE. Para cada frequência ou portadora são incluídos vários parâmetros, nomeadamente:

- NRARFCN, a frequência rádio usada pelo nó.
- A configuração dos blocos SS/PBCH e CSI, são sinais de referência para a frequência usada. A informação inclui o espaçamento entre subcarriers os tempos de transmissão e a frequência de transmissão, isto ajuda o UE a medir as células sem ter de esperar pelo ciclo completo de aquisição.
- Uma lista de células a serem ignoradas.
- Uma lista de células a serem consideradas.

Informação de configuração de medidas é definida de maneira a que o UE saiba quando proceder às mesmas. Por exemplo, uma PCell ou SCell fica pior que um determinado valor pré determinado isto pode desencadear a eliminação da célula da lista de células medidas. Outro exemplo, uma célula vizinha pode começar a ter valores melhores que a PCell ou SCell e isto pode provocar uma mudança de PCell ou SCell na mesma frequência ou em frequências diferentes com a mesma prioridade.

Do procedimento de relatório de medidas enviado do UE para o gNB pode resultar a adição, remoção ou alteração das células de SCG ou mesmo de células secundárias, pelo procedimento reconfiguração RRC (*RRC reconfiguration*). A informação enviada pelo UE passa por vários parâmetros tais como o RSRP, RSRQ, SINR, para cada uma das PCell e SCell. Como já foi referido anteriormente, numa configuração NSA, o UE pode entregar esta informação ao SgNB de duas maneiras, ou através do SRB3 se estiver configurado, ou via MeNB usando o 4G RRC na sinalização do interface X2 ou Xn.

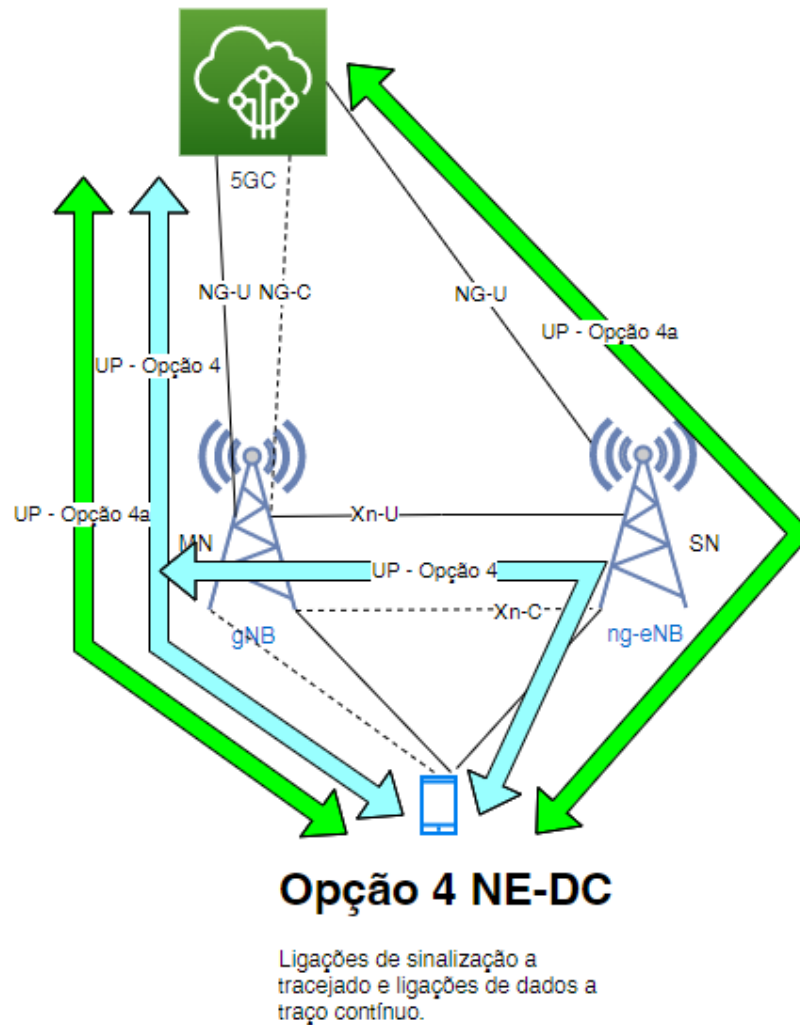


Figura 5 - Configuração NE-DC.

3.5 - Standalone (SA) New Radio

A configuração 5G Standalone (SA) e o core 5G (5GC) são novas gerações tecnológicas que vêm trazer grandes evoluções às tecnologias de comunicação móveis existentes e ao core LTE actualmente em uso. A sua introdução tem como objectivo melhorar a performance e o rendimento das actuais redes ao trazer novas capacidades potenciando o aparecimento de novos serviços e uma melhor experiência de utilizador.

A introdução do 5G SA como uma nova camada coexistindo com a actual rede LTE e com outras tecnologias mais antigas representa também um esforço das especificações para uma integração faseada em que é aproveitado ao máximo a rede já instalada.

Na configuração Standalone o UE liga-se ao gNB directamente sendo o nó 5G responsável pela sinalização e pelo tráfego de dados. O gNB assume o papel de MgNB ou MN. Através de

mensagens de sinalização RRC, a BTS 5G comunica com e controla o UE. O 5GC é usado substituindo o EPC, a rede core do LTE. Esta configuração é totalmente uma configuração 5G não usando quaisquer redes ou elementos de gerações anteriores, é conhecida como opção 2 nas especificações.

Nesta configuração a DC é também possível com um segundo gNB que passa a ser o SgNB ou com um segundo eNB sendo neste caso o SN o SeNB. Existem diferentes opções para passagem do plano de utilizador pela RAN (opção 4/4a). Esta opção é também conhecida como NE-DC (NR - E-UTRA Dual Connectivity) e não é considerada uma opção SA. Ao disponibilizar as opções 2, 4 ou 4a, os operadores passam a ter a vantagem de usar um master node 5G usando o RRC para o 5G. O RRC para o 5G usa, por exemplo, um novo estado otimizado para MTC com taxas de transferência de dados baixas. Nesta arquitectura (SA) o operador está já numa rede totalmente 5G e pode ter só nós gNB, apresentando todos os serviços possíveis numa rede de quinta geração como o eMBB, mMTC, URLLC e o network slicing.

A DC como já foi falado pode ser usada. Um cenário típico seria, por exemplo, usar uma macrocell MgNB, cobrindo uma grande área em termos de sinalização numa faixa de frequências baixa. Um SN sendo um SgNB poderia usar faixas de frequências mais altas e cobrir uma área menor mas com taxas de transferência de dados superiores. Estas diferenças de arquitectura podem coexistir no mesmo operador também como já foi referido neste relatório. O ng-eNB é um nó LTE que sofreu um processo de actualização para poder estar ligado ao 5GC e a outros nós gNB existentes na rede através do interface Xn. O tráfego de dados pode ser dividido no gNB (opção 4) ou pode ser dividido no CN (opção 4a).

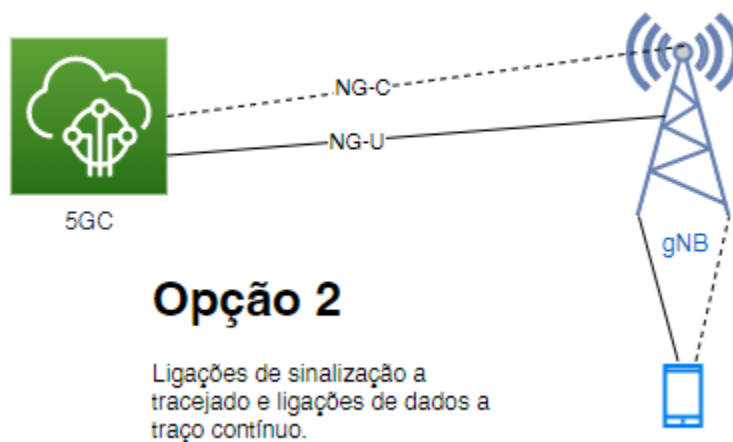


Figura 6 - Configuração Standalone.

	Connfiguração Non Stand Alone			Configuração Stand Alone
	Opção 3	Opção 4	Opção 7	Opção 2
Tipo de associação de nós DC	EN-DC	NE-DC	NGEN-DC	NR-DC
Core Network	EPC	5GC	5GC	5GC
Rapidez de implementação	a mais rápida	mais lenta que a opção 3	mais lenta que a opção 3	a mais lenta
Nó âncora	LTE	NR	LTE	NR
Serviço 5G suportado	eMBB	gNB: eMBB, URLLC, mMTC, Network Slicing	gNB: eMBB, URLLC, mMTC, Network Slicing	eMBB, URLLC, mMTC, Network Slicing
Serviço de voz suportado	VoLTE	VoLTE/VoNR	VoLTE/VoNR	VoNR

Tabela 3 - Quadro resumo das diferentes estratégias de implementação do 5G.

A introdução do 5G SA introduz melhorias significativas na performance de rede resumidas no quadro da tabela 3. Novos serviços podem ser implementados usando todas as capacidades desenhadas para a quinta geração de comunicações móveis. A latência é significativamente melhorada e há também uma redução dos tempos de passagem entre células vizinhas e uma maior eficiência energética dos terminais móveis.

Para ser usada, a configuração 5G SA necessita de UEs com determinadas capacidades, terminais que vão enchendo as montras dos vendedores mas que poderão levar mais ou menos tempo a serem massificados. Estes terminais deverão suportar também as tecnologias de geração anterior e ter capacidades em 2G/3G/4G/5G NSA/5GSA.

Para termos 5G SA necessitamos de cobrir os seguintes pontos:

- Terminais 5G compatíveis com as bandas de operador e com as capacidades de combinação de células necessárias para obter as melhores performances. Os novos terminais devem ser capazes de usar as novas frequências usadas no 5G, por exemplo, as frequências nas bandas 3.5 GHz. Devem ser capazes de implementar o carrier aggregation entre as novas frequências e as usadas anteriormente. Devem ser capazes de aceitar as configurações NSA/SA bem como garantir as funcionalidades já existentes com as gerações de comunicação móveis anteriores: GSM, UMTS e LTE possibilitando uma suave interoperabilidade com estas redes.
- HW de rede de acesso compatível com a nova geração móvel. Desde há alguns anos que os fabricantes disponibilizam já HW que pode ser utilizado com várias gerações móveis isoladas ou em conjunto bastando para isso uma actualização de SW. São várias as nomenclaturas que os fornecedores de HW usam para sinalizar estas capacidades sendo muitas vezes usada a palavra multirádio.

- SW de rede de acesso compatível com a nova geração móvel a correr nos equipamentos identificados no ponto anterior. O SW disponibilizado pode ser dedicado ou abranger funcionalidades em várias tecnologias sendo comum encontrar várias versões de SW distintas para funcionamento em DSS ou em 5G SA, por exemplo.
- 5GC, muitos fabricantes colocam a possibilidade de se ter um core único de maneira a que todas as tecnologias possam aceder às funções de rede que necessitam. Estamos a falar das redes 2G/3G/4G, NB-IoT e 5G. Neste core unificado ou core único as funções de rede são disponibilizadas como microsserviços.

É preciso analisar se faz sentido considerar o 5G SA em todas as situações no início da instalação da nova geração móvel ou apenas numa fase posterior. Num cenário onde os terminais ainda não estão totalmente capazes de aproveitar todas as capacidades do 5G colocar o 5G SA pode não dar ao utilizador a melhor das experiências. É preciso comparar se a experiência de utilizador seria melhor no 5G SA, 5G NSA ou 4G, nas diferentes áreas de cobertura nacional ou regional. A avaliação da experiência dos UE pode justificar uma atenção da equipa de optimização para, através de parametrização de rede, se conseguir encaminhar cada terminal para a célula ou tecnologia que lhe permita ter uma melhor performance e a melhor experiência possível. Os fabricantes de equipamentos de rede de acesso rádio têm dado cada vez mais atenção para a construção de funcionalidades que a nível de SW permitam essa filtragem e encaminhamento. As funcionalidades mais comuns ainda são baseadas nas necessidades de largura de banda mas no futuro cada vez mais possibilidades devem ser disponibilizadas para encaixar o utilizador na melhor configuração possível para beneficiar dos serviços da maneira mais eficaz.

A passagem para uma configuração 5G SA coloca o operador numa configuração de rede com ganhos significativos a nível de performance. Esses ganhos significativos de performance podem surgir do aproveitamento das novas faixas de frequências nos 3.5 GHz, da combinação do uso de carrier aggregation para essas frequências e do uso de Dynamic Spectrum Sharing (DSS). A própria introdução do DSS, como foi visto na secção dedicada a esse tema, não é uma introdução que permite ter só ganhos tendo-se observado em laboratório e em rede *live* a limitação de larguras de banda úteis que deverão ser vistas como um custo desta configuração mais flexível.

4 - 5GC, migração do EPC

Novas oportunidades na área dos jogos em rede, realidade virtual e realidade aumentada, controlo remoto de veículos como drones, vídeos de alta resolução, IoT, requerem grandes taxas de transferência de dados, alguns destes serviços exigem latências baixas e QoS (*Quality of Service*) mais evoluídos (ao nível do serviço).

O aparecimento de novas necessidades não elimina todas as outras necessidades já existentes e actualmente servidas pelas tecnologias de geração anterior.

A rede core 5G, 5GC, é o novo core que saiu das especificações 3GPP que procura otimizar as áreas de plano de controlo e plano de utilizador estando preparado para a virtualização das funcionalidades de rede (NFV).

Alguns dos benefícios mais esperados da introdução do 5GC são:

- MEC, *multi-access edge computing*, deslocamento do processamento para mais próximo de onde ele é pedido resultando daí menores latências.
- network slicing.
- maior convergência com as redes wi-fi, GSM, UMTS, LTE e fixo.
- melhorias ao nível do QoS.
- maior separação das funcionalidades EPS resultando daí mais flexibilidade, segurança e automação.

As especificações do 5G foram planeadas para que a instalação do 5G pudesse ser faseada e numa fase inicial pudesse ser suportada pela geração anterior, a rede móvel de quarta geração. O operador pode escolher assim começar pela introdução faseada de certas funcionalidades do 5G numa parte da rede de maneira que várias arquitecturas com elementos de 5G coexistam numa mesma rede. O 5GC pode inicialmente ser ligado a alguns nós eNBs mas não a todos. Isto permite que também a nível de UEs haja uma maior flexibilidade de opções na rede para que equipamentos com várias características possam coexistir na mesma rede. Esta migração suave ou esta possibilidade de migração suave permitida pelas especificações requer uma coexistência entre EPC e 5GC que só pode existir com o acesso a uma base de dados comum de subscritores ou clientes podendo ser o UDM, no caso do 5G, ou do HSS, no caso do LTE.

Existem vários caminhos para o acesso à rede 5G e respectivo registo. Num cenário em que o UE se encontra numa rede ainda E-UTRAN com um nó secundário SgNB, opções 1 ou 3, o acesso à rede dá-se pelo eNB em que o registo é efectuado no EPC através do interface S1. Este é o mesmo procedimento de acesso e registo na rede LTE mas existe agora a possibilidade de explorar a *dual connectivity* com um gNB. Num segundo cenário o UE efectua o seu acesso na NG-RAN e registo no 5GC. São as opções 5 e 7 (NGEN-DC). O acesso é feito através de uma BTS eNB o registo é feito no 5GC pelo interface NG. O eNB anuncia a possibilidade de registo 5GC. O UE anuncia as suas capacidades 5G pelo protocolo de sinalização RRC. Há ainda um terceiro cenário em que o UE efectua o seu acesso à rede e o seu registo pelas opções 2 e 4

(NE-DC), usando as capacidades da rede NG-RAN e do acesso ao MgNB o UE efectua o seu registo pelo interface NG. Nestes cenários a arquitectura não prevê handovers entre EPC e 5GC. A interacção entre o 5GC e o EPC pode ter duas abordagens, o core unificado ou único e a interacção pelo interface N26.

4.1 - Interface N26

O 5GC pode estar ligado ao EPC num desenho de core unificado ou único ou pela existência de um interface entre eles. Até aqui a possibilidade de estar registado no EPC e no 5GC ao mesmo tempo ou a possibilidade de fazer handover de um core para o outro também não foi referida.

Existe uma arquitectura que prevê a existência de handovers entre 5GC e EPC. Esses handovers podem também permitir a continuidade de endereço IP e continuidade de sessão. A arquitectura possibilita para isso a integração no 5GC de funcionalidades do domínio EPC, por exemplo, HSS, PCRF, PDN-GW, integradas como UDM, PCF, SMF e UPF, respectivamente. O MME e o AMF estão separados, mas existe um ponto de contacto entre eles chamado N26.

O interface N26 possibilita uma comunicação entre AMF e MME o que permite a execução de handovers e realocações.

Quando usando este tipo de arquitectura a rede suporta dois tipos de passagem entre EPC e 5GC. Existe a relação entre os dois cores (EPC e 5GC) sem N26 em que o UE consegue manter o seu endereço IP mas não existe a garantia de continuidade de sessão já que pacotes de dados podem ser perdidos durante esta passagem. Com a existência do N26 a sinalização possibilita uma maior sofisticação no handover entre EPC e 5GC.

Com N26 o UE pode manter o seu endereço de IP e pode também haver continuidade de sessão não havendo perdas de pacotes durante este processo. O UE pode operar em dois modos de registo, o modo single e o modo dual. No modo single o UE está ou no EM-REGISTERED do 5G ou no EMM-REGISTERED do LTE mas não pode estar nos dois estados ao mesmo tempo. O UE tem uma identidade temporária única derivada do mapeamento entre o GUTI do LTE e o GUTI do 5G. A possibilidade do modo single é obrigatória para os UE com capacidade de ligação ao EPC e 5GC. No modo dual o UE tem registos independentes para o EPC e para o 5G. O UE pode estar no estado EM-REGISTERED do 5G ou no EMM-REGISTERED do LTE ou pode estar nos dois estados. O UE pode ter duas entidades temporárias ao mesmo tempo, GUTI e 5G-GUTI. O modo dual é opcional para o UE. O modo dual não permite handovers entre EPC e 5GC com N26.

Não existindo interface N26 pode ser usado o dual-registration mode em que o utilizador está registado no EPC e no 5GC mas esta alternativa não é recomendada.

4.2 - Multi-access Edge Computing (MEC)

O MEC possibilita a localização das aplicações mais perto do utilizador. Com a separação entre plano de controlo e plano de utilizador é possível a colocação do plano de utilizador mais perto da localização da aplicação cliente ou do utilizador final do serviço pedido. Esta possibilidade reduz a latência e melhora o QoS dos serviços.

Com o MEC o tráfego de utilizador pode ser terminado nos chamados *local breakout centers* ou *edge locations* não precisando de ser encaminhado para localizações centralizadas resultando desta mudança serviços mais rápidos.

Um exemplo, uma aplicação de um jogo remoto não precisa de estar centralizada num servidor e pode ser replicada num servidor local, mais perto do utilizador final.

4.3 - Convergência de redes

Actualmente nos operadores de redes de telecomunicações, as redes core das redes fixas e das redes móveis encontram-se separadas. As novas soluções propostas pelos fabricantes apresentam a rede core unificada onde podem ser ligadas as redes fixas e as redes sem fios. A utilização de aplicações comuns bem como de funcionalidades comuns facilita esta implementação.

As funcionalidades do core unificado incluem:

- Autenticação
- Gestão de sessão
- Gestão de utilizador
- Gestão de plano de dados

As vantagens no core unificado:

- Negócio
 - Noção de serviço único, deixa de haver distinção entre serviço móvel e serviço fixo.
- Técnicas
 - Utilizador único identificado ao longo de toda a rede.
 - Todos os serviços de acesso ligados a um único core.
- Operacionais
 - Uma rede apenas mais fácil de gerir e manter.

4.4 - QoS

Com a existência de um QoS ao nível da aplicação o operador consegue maior flexibilidade e granularidade na especificidade dos serviços e aplicações oferecidas. Com o core 5G o operador pode entregar um QoS mais personalizado, o que constitui uma evolução face ao LTE.

Com o core 5G, o QoS passa a ser mais associado ao fluxo IP o que contrasta com o que acontecia no 4G, onde o QoS estava associado aos bearers. Existem tabelas baseadas nas recomendações 3GPP para o QoS do 5G onde são determinados valores de parâmetros como *Packet Delay Budget*, *Packet Error Rate*, *Default Maximum Data Burst Volume* e *Default Averaging Window*.

4.5 - Arquitectura 5G NSA com EPC

A arquitectura 5G NSA com EPC é uma arquitectura 3GPP que permite o uso do EPC para o 5G numa configuração NSA na parte de rede de acesso.

A compatibilidade do 5GC com as opções 3GPP disponibilizadas para a integração do 5G tem de ser verificada junto dos fornecedores de equipamento e testadas mediante as necessidades do operador para uso das configurações que pretende utilizar na própria rede.

O 3GPP mudou a maneira como os protocolos estão estruturados para a comunicação entre as funcionalidades de rede no 5GC. Foi escolhido o HTTP/2 (IETF RFC 7540) como protocolo da camada de aplicação. Na 3GPP Rel 15 o TCP (IETF RFC 793) foi escolhido como protocolo na camada de transporte, mas pode ser alterado na Rel 16 pelo QUIC (não é um acrónimo ou uma sigla, é mesmo o nome do protocolo).

A configuração em rede de acesso NSA possibilita a ligação de várias tecnologias rádio como o LTE e NR na mesma rede core (EPC) utilizando a infraestrutura já existente no operador. A arquitectura NSA usa a *dual connectivity* onde o UE está a usar os recursos rádio disponibilizados por pelo menos dois nós de acesso, um nó master eNB e um nó secundário gNB, a também conhecida opção 3.

Nesta configuração 5G NSA, a rede de acesso usa os elementos conhecidos do core LTE, o EPC, PCRF (*Policy and Charging Rules Function*) e HSS (*Home Subscriber Server*). Para se poder usar esta configuração é provável que, dependendo dos fabricantes de HW envolvidos, se tenha de actualizar o HW. O SW precisará também de ser revisto e actualizado no EPC, HSS e PCRF. Neste processo de actualização do EPC podemos falar de um EPC 5G como o novo EPC preparado para a configuração 5G NSA.

As vantagens do EPC 5G:

- Negócio
 - Possibilidade de oferecer um serviço 5G mais rapidamente.
- Técnicas

- Sem mudanças significativas ao nível dos protocolos de comunicação (NAS e Diameter).
- Inexistência de novas interfaces entre a rede core e a rede de acesso rádio.
- Operacionais
 - Arquitectura sem alterações significativas, não existem grandes necessidades de formação.

4.6 - Arquitectura 5GC

O desenho do 5GC é orientado aos serviços. Como já foi referido na secção dedicada ao MEC as aplicações de jogos e outras aproximadas pelo *Network Slicing* requerem uma arquitectura não só que possibilite facilmente a introdução de novos serviços, como que assegure uma latência reduzida na rede.

As interfaces num sistema de telecomunicações móveis foram sempre definidas por pontos de referência.

Com a introdução do 5GC novas funcionalidades de rede foram introduzidas e outras funcionalidades foram evoluídas.

Uma arquitectura orientada aos serviços tem como consequência uma nova maneira de comunicar entre funcionalidades de rede que complementa o modelo de comunicação ponto a ponto. Esta orientação a serviços exige um conjunto determinado de funcionalidades, cada uma delas bem definida. Com a orientação a serviços as funcionalidades de rede podem ser usadas como serviços ou como modelo de comunicação ponto a ponto.

O 5GC tem algumas funcionalidades de rede principais. As funcionalidades de rede do 5GC e as respectivas descrições:

- AMF: *Access and Mobility Management Function* no 5GC é equivalente ao MME do LTE e do EPC. Algumas das funções do AMF incluem a terminação do plano de controlo na rede de acesso rádio, gestão de registos, gestão de ligação, gestão de mobilidade, autorização de acesso. Controla as comunicações com o UE por meio de mensagens de sinalização NAS.
- SMF: *Session Management Function* no 5GC tem funções semelhantes ao SGW-C e ao PGW-C. Algumas das funções do SMF incluem a gestão de sessão como o estabelecimento de sessão, modificação de sessão e finalização de sessão. Gestão de IPs do UE, selecção e controlo de função de plano de utilizador (UPF, *user plane function*), funções de roaming, QoS. Comunica também com o UE por mensagens de sinalização NAS via AMF.
- UPF: User Plane Function tem funções semelhantes ao SGW-U e PGW-U no LTE/EPC. A UPF gere a ligação à rede de dados, faz roteamento de tráfego entre a rede de acesso 5G

e a rede de dados pretendida, faz gestão de QoS. O UPF é o ponto de contacto com uma rede de dados externa. Realiza várias funções de plano de utilizador como DPI (*deep packet inspection*), armazenamento em fila de espera (*packet buffering*) e assume o papel de âncora num evento de intra ou inter mobilidade RAT.

- PCF: *Policy Control Function* é equivalente ao PCRF no LTE/EPC. Aplica regras sobre outras funcionalidades de rede, acede a informação do subscritor para aplicação de regras. Determina objetivos de QoS. Retira a informação de uma base de dados integrada ou de uma base de dados externa chamada de UDR (*Unified Data Repository*).
- NRF: *Network Repository Function* no 5GC. Responde a pedidos de funcionalidades de rede sobre outras funcionalidades de rede. Mantém perfis das funcionalidades de rede sobre os serviços que prestam. É muito semelhante ao DNS (*Domain Name Server*) interno na rede LTE.
- NSSF: *Network Slice Selection Function*. Mantém sessões de *Network Slice* como por exemplo o AMF que servirá um determinado UE, ou seja, escolhe a camada de network slice que servirá o UE. Relaciona-se com o NRF por exemplo para obter a lista de AMFs disponíveis para um determinado UE. Escolhe o AMF que possibilite manter uma determinada *network slice*. É uma função nova e específica do 5G não tendo paralelo em gerações anteriores.
- NEF: *Network Exposure Function*. Recebe informações de outras funcionalidades de rede pelos seus próprios interfaces de serviço e expõe essa informação, por exemplo para uma rede externa de dados, de uma maneira segura.
- UDM: *Unified Data Management* no 5GC é equivalente ao HSS no LTE/EPC. O UDM identifica o utilizador, é a fonte de informação sobre cada subscritor de rede, aplica restrições em roaming, guarda informação do AMF em uso, faz a gestão da subscrição. Tira a informação de uma base de dados integrada ou de uma base de dados separada que é conhecida como UDR (*Unified Data Repository*). Apresenta um *front end* para disponibilização de informação ao AUSF e AMF.
- AUSF: *Authentication Server Function* no 5GC, semelhante ao AuC no LTE/EPC. Realiza a autenticação de subscritores na rede.
- CHF: *Charging Function* no 5GC. Oferece serviços de *charging* a outras funcionalidades de rede. Faz o serviço de charging online e offline. É informado qual o slice que está em uso pelo UE e baseado nesta informação aplica a informação de *charging*.
- SEPP: *Security Edge Protection Proxy* no 5GC. Tem funções semelhantes ao DEA em gerações anteriores. Tem funções de confidencialidade e integridade dos dados de sinalização trocados entre diferentes operadores. Pode ser usado como *firewall* de sinalização. Realiza a encriptação da sinalização. Em cenários onde a PLMN local ou a PLMN visitada, cenários de *roaming* estão no 5GC e a outra no EPC o plano de controlo precisa de ser convertido de HTTP/2 para *Diameter* ou vice-versa e aqui entra o SEPP assegurando uma interoperabilidade entre as duas redes.

A separação do PDN-GW plano de controlo e plano de utilizador no 5G em SMF e UPF vai ao encontro dos princípios do SDN, de uma rede Software Defined Network. Não existe uma

relação de um para um entre UPF e SMF. Um SMF pode controlar vários UPF. Um UPF pode ser partilhado por múltiplos SMF. Isto ajuda a tornar independentes e escaláveis os dois planos de utilizador e de controlo. Um pacote de dados pode passar por vários UPFs ao atravessar a rede. Há várias maneiras de ligar um aparelho terminal a uma rede 5G ao NG-RAN 5GC, sendo que todas essas maneiras têm vantagens e desvantagens.

Numa arquitectura NSA em que a opção 3 é disponibilizada o nó eNB é usado pelo UE como âncora para a ligação e o gNB aparece como um nó secundário (usa a DC), ligados ao core EPC. Na opção 3 o plano de utilizador termina no eNB, na opção 3x o plano de utilizador termina no gNB. Em ambas (3 e 3x) a sinalização SRB termina no nó LTE, no eNB. Os benefícios passam pela facilidade de integração e uso da infraestrutura de rede do LTE evitando desta maneira fortes dependências de actualizações. Há uma dependência na *dual connectivity* o que pode causar algumas restrições e complexidade para alguns UEs.

Na opção 2 uma opção standalone não há qualquer dependência com a rede LTE ou com o EPC para as ligações, a ligação é feita ao 5GC. Esta opção 2 requer uma actualização tanto na rede de acesso como na rede core para que seja operacional. Uma revisão do roaming é também necessária.

Nas opções 4/4x e 7/7x são muito semelhantes no seu desenho NSA e ligadas ao 5GC. A diferença é que na opção 4/4x o gNB é a âncora para a ligação e na opção 7/7x o eNB é a âncora. A diferença entre estas opções nas suas subopções é a terminação do plano de utilizador no nó primário ou no nó secundário.

Na opção 5 o nó eNB liga directamente ao 5GC, esta opção permite a migração de todo o tráfego EPC para o 5GC. A opção 5 evita as complexas relações e procedimentos 5GC-EPC e evita as opções limitadas permitidas pelo EPC.

Quando introduzido na rede o 5GC, o objectivo é disponibilizá-lo ao maior número de utilizadores de maneira que as vantagens deste elemento cheguem ao maior número possível de UEs.

4.7 - Handover 5GC para EPC

O procedimento de handover de um UE, de um nó 5G, gNB, para um nó LTE, eNB, em que o gNB está ligado ao 5GC e o eNB ao EPC pode ser resumido no conjunto seguinte de passos:

1. O nó 5G, gNB, tem a iniciativa de arrancar o processo de handover, ou seja, de passagem do controlo de uma célula para outra. O AMF origem recebe informações de contexto do PGW-C + SMF.
2. O MME destino recebe informação de contexto do UE do AMF origem. De seguida notifica a RAN e escolhe um SGW para configuração das ligações PDN.
3. O AMF envia informação de ligação para o PGW-C+SMF.
4. O UE realiza a passagem (handover) do AMF origem para o MME destino.

5. O MME notifica o SGW sobre o eNB e as suas configurações de *downlink*. O SGW notifica o PGW sobre as configurações de *downlink* to eNB.

4.8 - Handover EPC para 5GC

O procedimento de handover de um UE, de um nó LTE, eNB, para um nó 5G, gNB, em que o nó eNB está ligado ao EPC e o gNB ao 5GC pode ser resumido no conjunto seguinte de passos:

1. O nó 4G, eNB, tem a iniciativa de arrancar o processo de handover enviando essa intenção ao MME.
2. O AMF recebe informação de contexto do UE pelo MME. AMF estabelece contacto com UE e actualiza o SRB.
3. MME envia informação de nova configuração para o PGW.
4. UE faz o handover do MME origem para o AMF destino.
5. O AMF notifica o SMF/UPF sobre a configuração do gNB.

5 - Migração para o 5G

O processo de migração para 5G SA de qualquer das configurações apresentadas como por exemplo a opção 3 (todas as suas variantes), opção 4 (todas as suas variantes), opção 7 (todas as suas variantes), substituição de um nó 4G por um nó 5G ou simples adição de um novo nó na rede envolve muitas equipas no operador. Desde o início, a equipa de engenharia tem de identificar as necessidades que possam existir na rede de novas BTS para novas zonas de cobertura, de modernização de estações base já em serviço ou de novos nós para reforço do serviço que pode ser feito para um horizonte temporal pequeno, para um longo prazo ou de carácter definitivo, ou talvez usando melhores palavras, sem data de termo definido.

Terminado este estudo e decidida a alteração devem ser reunidas todas as equipas necessárias para a adição do nó 5G SA. Isto passa pela rede core 5GC que terá de configurar as novas células nos seus equipamentos, passa pela rede de transmissão que terá de garantir que todas as rotas IP e VLANs estão configuradas nos equipamentos de maneira a que o plano de controlo e plano de utilizador possam ser construídos de ponta a ponta e garantir um fluxo de dados. Passa também pelas equipas de terreno que garantem que todo o equipamento físico local está instalado e devidamente ligado aos rádios, circuitos RF, sistema de antenas, RET, definição de alarmes externos. O processo de migração propriamente dito se todos estes pontos estiverem cobertos demorará alguns segundos a correr e implica fazer as alterações necessárias no eNB para o transformar num gNB ou numa unidade de banda base descaracterizada num nó 5G.

Sumário

Como foi possível analisar ao longo deste relatório, o caminho para o 5G é um caminho completamente diferente daquilo que foi o caminho de implementação e instalação das outras tecnologias e gerações móveis passadas. Olhando para as tecnologias de comunicação móvel anteriores podemos perceber as diferenças. A rede 3G quando foi projectada e instalada pelos operadores, representava uma camada adicional paralela em que a coexistência das duas redes GSM e UMTS foi mantida mas de uma maneira independente, ou seja, a rede poderia manter o UE só em 2G ou só em 3G sem haver passagens de uma rede para a outra por relações de vizinhança. Houve mesmo operadores que entraram no mercado pela primeira vez com uma rede totalmente 3G sem suporte nem infraestrutura de GSM (como foi o caso, por exemplo, do operador inglês Three UK).

Quando o LTE foi lançado, uma das grandes diferenças em relação às gerações passadas foi a eliminação dos controladores chamados de BSC no 2G e de RNC no 3G. Os nós 4G passaram a estar directamente ligados à rede core, eliminando assim mais um factor de complexidade e de alta latência.

Com a chegada do 5G pela primeira vez a integração passa a ser possível numa rede já existente. O 5G possibilita não só uma rápida integração, se o operador assim o desejar, como integrações mais faseadas, possibilitando uma transição optimizada e gradual de acordo com as necessidades do utilizador que pode não estar interessado em obter desde o primeiro dia equipamentos de última geração por pretender rentabilizar os equipamentos que já possui, por questões de escala ou por outra razão qualquer. Também por necessidades ou estratégia do operador essas várias opções para a integração do 5G são interessantes pela flexibilidade que possibilitam.

Não existe um caminho óptimo para se chegar a uma rede 5G, existem várias opções para atingir essa meta, mas só com uma rede totalmente 5G se conseguem os benefícios específicos desta nova tecnologia como seja a baixa latência para serviços URLLC ou para V2X ou o network slicing. Tudo isto tem de ser estudado e definido pelo operador que tem direitos de utilização de um recurso escasso como é o espectro de frequências que lhe está atribuído, que tem também interesses económicos na rentabilidade dos equipamentos já instalados em uso, nas tecnologias instaladas e no estímulo que tem de dar aos seus clientes para a utilização das mais modernas infraestruturas e oferta das melhores possibilidades, a nível de novos serviços. Tudo isto num território de cobertura que não é homogéneo quer em termos de concentração de utilizadores como de realidades de poder de compra e muitas vezes essa cobertura ou obrigatoriedade de cobertura passa por saltos geográficos como são os exemplos de ilhas e outras partes não contíguas do território. A própria rede de operador é composta por equipamentos de vários fornecedores com características de configuração e manutenção diferentes, mesmo dentro do mesmo fornecedor com gerações de equipamentos distintos que não têm as mesmas capacidades de fornecimento de serviços de rede. Desafios que são muitos para a implementação de qualquer rede de telecomunicações mas que aparecem mais flexibilizados na quinta geração de comunicações móveis.

Embora haja muitas novidades na introdução da quinta geração móvel, há aspectos a considerar que são semelhantes às gerações anteriores e que não podem ser descurados. Objectivos de performance devem ser traçados de maneira a que sejam considerados valores mensuráveis de KPIs, como por exemplo, valores médios por utilizador de download e upload, valores médios por célula também de transferências nos dois sentidos. Os valores de pico são importantes de alcançar para efeitos de marketing e de anúncio de novos serviços ou produtos. Valores médios ajudam a definir capacidades de células e quantidades de utilizadores servidos.

Este relatório não pretendeu assim fornecer uma descrição de um caminho único resultante da experiência do seu autor num operador de telecomunicações nestas implementações específicas até porque esse caminho único não existe. Existem opções que podem ser equacionadas e que a experiência prática pode validar ou invalidar resultados previstos fazendo com que as estratégias tenham de ser equacionadas de novo, repensadas de novo, de maneira a que novos percursos e novas opções ou o peso dessas opções na rede tenham de ser redefinidas. Não arrisco a fazer previsões sobre o ritmo de implementação da rede 5G em nenhum país ou território. O passado e o fim precipitado anunciado do 2G ou do 3G em vários locais do mundo ainda no final da primeira década de 2000 (no caso do GSM) demonstrou que o operador é quem define a sua rede mas as preferências dos seus utilizadores são também elas importantes no rumo e ritmo em que os processos de migração geracional tecnológica se verificam.

Bibliografia

Enescu, Mihai (2020). *5G New Radio, a beam-based air interface*. 1st Edition, John Wiley & Sons Ltd. West Sussex, PO19 8SQ, UK.

‘Network Slicing for 5G Networks & Services’, 5G Americas, 2016

‘Network Functions Virtualisation: An Introduction, Benefits, Enablers, Challenges & Call for Action’, ETSI, 2012;

‘Bringing Network Function Virtualization to LTE’, 4G Americas, 2014

IETF (Internet Engineering Task Force) RFC 7426, ‘Software-Defined Networking (SDN): Layers and Architecture Terminology’

Ofcom, ‘Update on 5G spectrum in the UK’, 8 February 2017;

Ofcom, ‘Award of the 2.3 and 3.4 GHz spectrum bands: Competition issues and auction regulations’, 11 July 2017;

Federal Communications Commission, ‘Use of Spectrum Bands Above 24 GHz For Mobile Radio Services’, 14 July 2016.

ITU-R M.2376, ‘Technical feasibility of IMT in bands above 6 GHz’,

3GPP TS 22.186 - Service requirements for enhanced V2X scenarios

3GPP TR 22.261 - Service requirements for the 5G system

3GPP TR 22.861 - Massive Internet of Things

3GPP TR 22.862 - Feasibility study on new services and markets technology enablers for critical communications; Stage 1

3GPP TR 22.863 - Feasibility study on new services and markets technology enablers for enhanced mobile broadband; Stage 1

3GPP TR 22.864 - Feasibility study on new services and markets technology enablers for network operation; Stage 1

3GPP TR 22.886 - Study on enhancement of 3GPP support for 5G V2X services

3GPP TR 22.891 - Study on new services and markets technology enablers

3GPP TS 23.501 - System architecture for the 5G System (5GS)

3GPP TR 25.913 - Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)

3GPP TS 36.331 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification

3GPP TR 36.913 - Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced)

3GPP TS 37.340 - NR; Multi-connectivity; Overall description; Stage-2

3GPP TS 38.401 - Radio access architecture and interface”

3GPP TS 38.101-3: 5.2.2.2 NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone

3GPP TS 38.211 - NR; Physical channels and modulation

3GPP TS 38.212 - NR; Multiplexing and channel coding

3GPP TS 38.214 - NR; Physical layer procedures for data

3GPP TS 38.300 - NR and NG-RAN Overall description

3GPP TS 38.321 - NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification

3GPP TS 38.322 - NR; Radio Link Control (RLC) protocol specification

3GPP TS 38.331 - NR - Radio Resource Control, Protocol specification

3GPP TR 38.801 - Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces

3GPP TR 38.913 - Study on scenarios and requirements for next generation access technologies

Currículo, Descrição Detalhada

Informação pessoal

Nome: Ricardo Manuel Gomes Figueira

Morada: Rua André Gouveia n18, 9º Direito A, 1750-027 Lisboa

Correio Electrónico: figueira@gmail.com

Nacionalidade: Português

Data de nascimento: 3 de agosto de 1979

Sexo: Masculino.

Experiência Profissional

Comecei a minha vida profissional em 2005 e trabalho em Telecomunicações desde 2008. Numa primeira etapa num fornecedor de equipamentos de redes de telecomunicações para rede de acesso rádio, com a especialidade nas redes de acesso rádio de GSM de um fornecedor de equipamento e suporte técnico de rede a operadores da Nokia. Essas funções levaram-me ao conhecimento de toda a arquitectura de rede de acesso rádio de uma rede de telecomunicações de segunda geração e o conhecimento das várias interfaces entre esses elementos e elementos de core 2G. Foi possível perceber os diferentes módulos de uma BSC e de uma BTS. Foi possível desenvolver esse conhecimento numa abordagem de suporte técnico a clientes operadores. Tive também a oportunidade de fazer apresentações de produtos de acesso rádio, as várias opções de configuração e capacidades aos clientes Nokia TMN e Telefónica Espanha.

Numa segunda etapa num operador de redes de telecomunicações em contacto com mais do que a segunda geração de redes móveis e tendo a oportunidade de trabalhar em projectos em que as redes UMTS, LTE e 5G também estão presentes. No operador e na parte das operações existe uma visão global sobre toda a performance rede de acesso que deixa de estar separada por fornecedor de equipamento e passa a ser medida por KPIs que se encaixam da melhor maneira possível em cada fabricante. É-me dada também toda a possibilidade de gerir projectos de *rollout* de *software* e de funcionalidades por toda a rede da Vodafone no Reino Unido. Esta segunda etapa também pode ser dividida em dois percursos, um percurso ainda como especialista em equipamentos Nokia e depois como especialista em equipamentos Ericsson e com conhecimentos em Mavenir no projecto Open RAN. É neste segundo percurso que se dá a formação em 5G e a possibilidade de participar na implementação do 5G na rede Vodafone Reino Unido. É também da participação neste projecto de 5G que nasce o presente trabalho que procura reflectir as opções encontradas e implementadas do 5G na rede Vodafone. Opções que estarão disponíveis para todos os operadores e que são dadas por especificações 3GPP e permitem estrategicamente uma implementação faseada e modular não só da rede 5G mas também das capacidades 5G que podem ser já sentidas com uma infraestrutura LTE.

Data jul 2016 - presente

Função: Suporte Técnico das redes móveis de acesso rádio GSM, UMTS, LTE e 5G de Segunda Linha do fornecedor Ericsson, Alcatel e Mavenir para a rede da Vodafone do Reino Unido.

Principais responsabilidades: elaboração de procedimentos de implementação de serviços e instalação de novos equipamentos na rede de acesso rádio, prevenção de falhas ao nível da segunda linha garantindo níveis de serviço bem determinados. Tenho também responsabilidade na criação de documentação de actualização de software de nós de rede adaptadas aos produtos de rede de acesso rádio e configurações da Vodafone para as tecnologias LTE e 5G. Nessa área de produção de documentação técnica para implementação de projectos, orientada às operações e adaptada à rede RAN existente no operador Vodafone Reino Unido. Desenvolvimento e manutenção de contactos com diversas equipas da área de tecnologia e fornecedores no sentido de dar seguimento à investigação de falhas e degradações de rede de acesso rádio. Produção de documentação técnica de suporte a migração de nós multi vendor. Integração de sites 5G na rede e produção de documentação detalhada adaptada à rede Vodafone para o seguimento das equipas de instalação. Acompanhamento de testes em laboratório de novas funcionalidades LTE e NR bem como de novos equipamentos de hardware para distribuição por toda a rede de telecomunicações na Vodafone.

Empregador e morada: Vodafone Portugal, Avenida D. João II, Lote 1.04.1, Parque das Nações, 1998-017 Lisboa

Data jan 2013 - jul 2016

Função: Suporte Técnico das redes móveis GSM, UMTS, LTE de Segunda Linha Nokia/Huawei
Principais responsabilidades: definição de procedimentos, formas de actuação, definição de interfaces e resolução de falhas nas redes 2G, 3G e LTE, assegurando a realização dos protocolos para as acções necessárias para a rápida resolução das mesmas e com impacto mínimo nos utilizadores do sistema na rede RAN existente no operador Vodafone Reino Unido. Identificação de erros de configuração que inviabilizam a correcta recuperação de um equipamento quando submetido a uma falha de energia ou a um reinício ou falha provocado espontaneamente, por utilizador. Produção de documentação técnica adaptada à rede de operador Vodafone Reino Unido para a migração de interface abis pcm para abis sobre IP. Produção de documentação técnica adaptada à rede de operador Vodafone Reino Unido para a migração de interface A para A sobre IP. Produção de documentação técnica de operador para instalação de *major* e *minor releases* de *software* nas BSCs do fabricante de equipamentos de telecomunicações Nokia.

Empregador e morada: Vodafone Portugal, Avenida D. João II, Lote 1.04.1, Parque das Nações, 1998-017 Lisboa

Data abr 2008 - jan 2013

Função: Suporte Técnico de Tier 2

Principais responsabilidades: suporte de produtos de rede de telecomunicações de acesso rádio dos produtos Nokia 2G, equipamentos de rede de acesso à segunda geração de rede celular, também conhecida como GSM. Implementação de documentação técnica para actualização de SW de BSCs (*Base Station Controllers*) e de BTSs (*Base Stations*) de toda a rede de cliente tendo como base a documentação genérica de produto, adaptando os procedimentos às configurações de hardware e de interface usadas pelo cliente.

Auditoria a Base Station Controllers (BSC) para verificação da sua correcta configuração no sentido de aumentar a eficiência na operacionalidade das mesmas como verificação de categorização de alarmes (Operações) e utilização e dimensionamento de interfaces e capacidade de processamento de sinalização (Engenharia). Apresentação de produto ao cliente. Teste de funcionalidades e testes de aceitação junto do cliente. Produção de documentação para migração de Abis sobre E1 para Abis sobre IP. Participação em projectos locais de suporte de instalação de produto e suporte técnico como na antiga TMN, agora MEO, Vodafone UK, O2 UK, Claro Brasil, TIM Brasil, CVM (Cabo Verde), SFR (França). Suporte remoto a redes de parte da Ásia como do Afeganistão e Paquistão, Médio Oriente e Europa.

Empregador e morada: Nokia Solutions and Networks Portugal, Rua Irmãos Siemens, 1-1A 2720-093 Amadora

Data jan 2007 - abr 2008

Função: Programação de Software

Principais responsabilidades: Desenvolvimento de software para banca e seguros em ambientes web e de aplicação externa em .NET usando as linguagens Visual Basic e C#. Comunicação com o cliente para receber registos de falhas das aplicações e ou módulos desenvolvidos bem como recolher propostas de sugestões para melhoria da aplicação. Testes de aceitação com o cliente.

Empregador e morada: Accenture, Amoreiras, Torre 1, Av. Eng. Duarte Pacheco 16 piso, 1070-101 Lisboa

Data jan 2006 - ago 2006

Função: Search Quality Evaluator

Principais responsabilidades: Classificação de sites em termos de qualidade de navegação e identificação de padrões de práticas abusivas para encontrar estratégias de posicionamento artificialmente melhoradas em algoritmos de procura.

Empregador e morada: Google , Google Building Gordon House, Barrow St, Dublin 4, Ireland

Educação e Formação

2005 Licenciatura Pré-Bolonha em Engenharia Electrotécnica e de Computadores - Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Ramo de Telecomunicações.

Curso Intensivo em Criptografia - Programa de Intercâmbio Sócrates - Novembro de 2003.

Aptidões e Competências Pessoais

Primeira língua: português.

Outras línguas: inglês e espanhol.

Aptidões e Competências Sociais e de Organização

Espírito de equipa, gosto em trabalhar em grupo ou individualmente sendo de fácil adaptação dependendo das estratégias encontradas para resolver grandes projectos ou trabalhos de componente individual.

Capacidade de gestão de projectos.

Formação Adicional (últimos anos)

2021 - Backend Developer Program - Software Engineering - Formação Remota em sala virtual - Vodafone

2020 - Understanding Hybrid Agile Project Management - Formação Web - Pluralsight

2020 - Learning the Truth About Agile Versus Waterfall - Formação Web - Pluralsight

2020 - 5G Air Interface - Virtual Classroom - Wray Castle

2020 - Understanding Hybrid Agile Project Management

2020 - Linux Administration with sed and awk - Formação Web - Pluralsight

2020 - Learning the Truth about Agile versus Waterfall - Formação Web - Pluralsight

2020 - Cryptography and PKI for CompTia Security+ - Formação Web - Pluralsight

2019 - Ericsson 5G Overview - Virtual Classroom - Ericsson

2019 - AIR AAS Operation, Configuration and Troubleshooting - novos módulos de rádio para o 5G - Virtual Classroom - Ericsson

2019 - 5G RAN New Radio - System Techniques - Virtual Classroom - Ericsson

2019 - 5G Engineering - Virtual Classroom - Wray Castle

2019 - 5G Network Planning - Formação Web - Qualcomm

2019 - 5G Network Slicing - Formação Web - Vodafone

2019 - Agile: Valores e Princípios - Formação Web - Vodafone

2018 - 5G Use Cases - Formação Web - Vodafone

2018 - Introduction to 5G - Commercial and Technical Modules - Formação Web - Vodafone

2018 - Wireless Network Penetration Testing - Formação Web - Vodafone

2018 - Understanding Machine Learning - Formação Web - Vodafone

2018 - Small Cells Overview and Configuration - Formação Web - Vodafone

2018 - Regulamento Geral de Protecção de Dados - Formação Web - Vodafone

2018 - Network Penetration Testing Using Python - Formação Web - Pluralsight

2018 - LTE for IoT - Formação Web - Vodafone

2018 - LTE EPC: LTE Overview - Formação Web - Vodafone

2018 - IPv6 Introduction to the Protocol - Formação Web - Pluralsight
2018 - FTTX and Passive Optical Networks - Formação Web - Vodafone
2018 - Data Analytics Lifecycle - Formação Web - Vodafone
2018 - Core Network - Formação Web - Vodafone
2018 - Transformação Digital - MOOC Técnico Lisboa
2018 - Simulação e Controlo de Drones - MOOC Técnico Lisboa
2018 - Learning Data Science: Understanding the Basics - LinkedIn Learning
2018 - An introduction to M2M - Formação Web - Vodafone
2018 - LTE vs 5G New Radio - Formação Web - Vodafone
2017 - NB-IoT Explained - Formação Web - Vodafone
2017 - Vodafone Agile IT - Understanding the Proposition - Formação Web - Vodafone
2017 - Vodafone Agile IT - Understanding the Background - Formação Web - Vodafone
2017 - Vodafone Agile IT - Assessment - Formação Web - Vodafone
2017 - Emerging Threats in IoT - Formação Web - Vodafone
2017 - Overview of Cloud Computing - Formação Web - Vodafone
2017 - Linux Command Line Interface (CLI) Fundamentals - Formação Web - Pluralsight
2017 - Introduction to Low Power Wide Area (LPWA) Networks - Formação Web - Vodafone
2017 - Cybersecurity Threats: Ransomware - Formação Web - Pluralsight
2017 - Cloud Storage - Formação Web - Vodafone
2017 - Cloud Security - Formação Web - Vodafone
2017 - Cloud Evolution - Formação Web - Vodafone
2017 - Cisco CCNA Wireless: Wireless Lan Fundamentals - Formação Web - Vodafone
2017 - Big Data Science and Data Analytics - Formação Web - Vodafone
2017 - Big Data: The Big Picture - Formação Web - Pluralsight
2017 - Advanced Malware Analytics: Combating Exploit Kits - Formação Web - Pluralsight

Prémios

Prémio por desempenho e dedicação no Projecto Telefonica 2G em 2011 desenvolvido em Espanha - Nokia Portugal.

Prémio por desempenho em 2021 - Vodafone Portugal

ANEXO 1: *Network Slicing*

Network Slicing é a capacidade da rede em se dividir em camadas com níveis de serviço específico e diferente para cada uma dessas mesmas camadas. Enhanced Mobile Broadband (eMBB), Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC), massive Machine-Type Communications (mMTC), Vehicle to Everything (V2X) são tipos de serviços que podem ser oferecidos sem estarem agrupados no mesmo pacote como acontecia com as gerações móveis anteriores.

Cada utilizador que usa esses serviços com essas características usa-o como se estivesse numa rede isolada com a garantia de cumprimento dos níveis de serviço que os definem, estando no entanto a usar elementos na mesma rede física. Pode-se assim, a nível de operador, ter uma camada dedicada para eMBB, outra camada para serviços de baixa latência como URLLC, uma camada para um operador virtual também conhecido como MVNO.

Um utilizador regista-se numa ou mais camadas de maneira a satisfazer as suas exigências de serviço. A infraestrutura que suporta essas camadas é o seu ponto comum estando cada uma das camadas ou slices isolada.

Congestão numa slice não deve provocar congestão nas outras slices ou camadas. Em termos de segurança a fronteira também deverá existir, por exemplo: um ataque numa das camadas não deverá ter consequências nas outras camadas de rede.

Toda a rede usa o mesmo conceito de network slicing, core 5G (5GC) e rede de acesso rádio (RAN). Na rede core cada camada ou slice é construída a partir de conjuntos de VNFs com capacidades específicas. Cada VNF pode ser usada em várias slices ou apenas numa só.

Na RAN cada camada pode ter requisitos diferentes para gestão de estados, *admission control* ou *scheduling*.

O *Network Slicing* não é um conceito totalmente novo nem pode ser descrito como uma capacidade exclusiva das redes 5G. A capacidade de entregar níveis de serviço diferentes para utilizadores diferentes já existia nas gerações móveis anteriores. O que acontece com a articulação entre NFV e SDN é uma arquitectura virtual de rede mais flexível e mais facilmente adaptável e configurável, podendo ser adicionadas novas camadas de rede que ainda não tenham sido pensadas.

Os requisitos para o Network Slicing encontram-se indicados nas especificações 3GPP em oito pontos:

- O operador pode criar nova camada ou gerir as já existentes e cada uma dessas camadas pode ter requisitos de serviço diferentes.
- O operador deve poder gerir cada uma das camadas de maneira independente sendo que um problema causado numa das camadas não deve passar para outras.
- O 3GPP deve garantir as exigências específicas de cada camada.
- Em termos de segurança, as camadas devem ser isoladas, não representando um ataque numa delas ameaça para as restantes.
- O operador deve permitir a criação e gestão de camadas por terceiros, como por exemplo um MVNO, estabelecendo limites para a sua configuração através de APIs.

- O 3GPP deve promover que as camadas sejam de configuração flexível em termos de capacidade sem representar degradação para as outras slices.
- O 3GPP deve definir que as camadas possam ser alteradas e reconfiguradas com impacto mínimo em outras camadas ou nos serviços pendurados nas camadas alteradas ou criadas. As camadas removidas não devem também causar impactos em outras já em funcionamento.
- O 3GPP deve permitir o suporte de gestão em toda a rede para cada camada.

ANEXO 2: Virtualização de Rede - *Network Function Virtualization (NFV)*

Na arquitectura das redes tradicionais o *hardware* existente é um *hardware* dedicado e especializado a determinadas funções, bem localizado nos mapas de rede, pensado para poder suportar alguns serviços que possam vir a ser introduzidos no futuro. Este *hardware* especializado é tipicamente caro, requer requisitos técnicos e logísticos para ser instalado, substituído e mantido, tem um ciclo de vida definido. Isso representa ou pode representar uma grande barreira para novos fornecedores de equipamento ou de *software*, limitações e requisitos apertados na sua instalação ou substituição e dificuldades a nível de utilização com novas funcionalidades ou possibilidades tecnológicas emergentes.

Com o NFV o que se pretende é que as funções de rede possam ser feitas ou implementadas numa gama maior de equipamento ou tornar livre de equipamento específico essas mesmas funções, tornar mais flexível o *software* necessário para executar essas funções, permitir instalações e actualizações remotas e tornar essas operações mais simples. As funções de rede são implementadas a nível de *software* a correr em *hardware commercial off the shelf (COTS)*.

O NFV introduz várias vantagens para os operadores: o custo do *hardware* e do *software* diminui, o número de fornecedores que pode entrar no mercado é encorajado a aumentar aumentando também a concorrência e a possibilidade de escolha final de uma solução, passa a ser mais fácil fazer actualizações de rede ou adicionar novas funcionalidades ou capacidades a essa rede sendo esse passo dado com uma simples actualização de *software*.

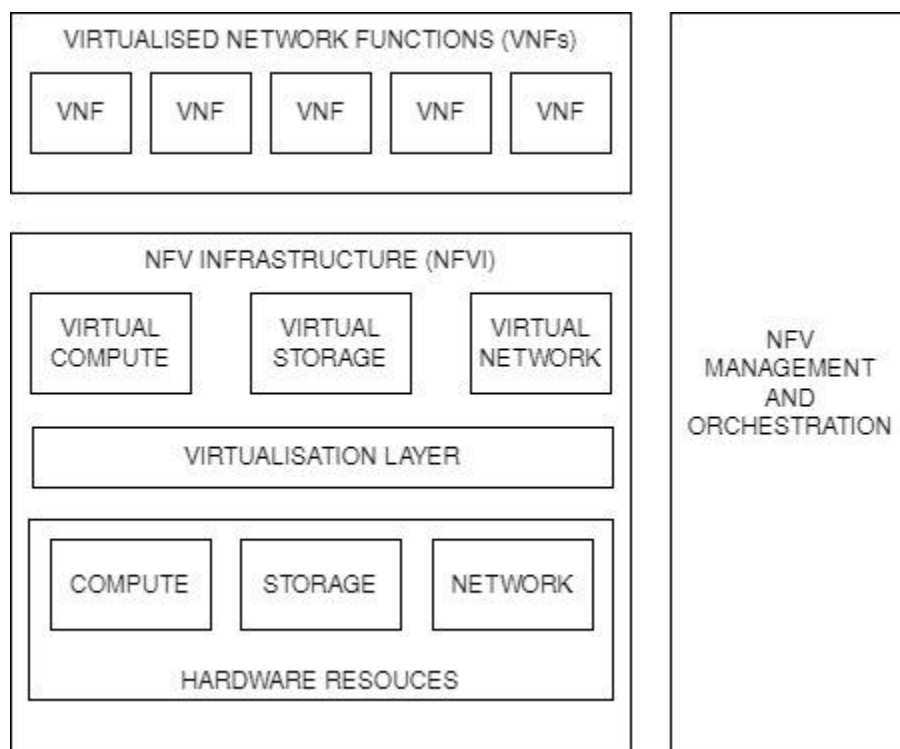


Figura 7 - Arquitectura NFV.

O ETSI estabeleceu uma arquitectura para o NFV. A imagem foi retirada do documento *Bringing Network Function Virtualization to LTE*, referido na bibliografia deste relatório. Cada VNF é uma implementação em *software* de uma funcionalidade de rede capaz de ser executada na camada física ou de *hardware* que a corre. No 4G esta possibilidade já era possível com elementos como o MME ou o SGW podendo ser implementados como VNF. Esta é a camada de módulos de *software* VNFs.

Toda a estrutura física ou de *hardware* é identificada nessa imagem como Infraestrutura NFV. Nesta estrutura estão incluídos todos os recursos de *hardware* como capacidade de processamento ou computação, armazenamento e capacidades de rede. Estes recursos são abstratos e separados mais uma vez por uma sub-camada de virtualização. Os blocos VNF de *software* comunicam com blocos virtuais de *hardware* responsáveis pelo processamento, armazenamento e recursos de rede. Há um desacoplamento entre a parte física do *hardware*.

O bloco NFV Management and Orchestration faz a gestão da parte dos recursos físicos e de *hardware* bem como a gestão de como os diferentes blocos físicos virtuais e de *software* comunicam e interagem entre si. É este bloco de gestão que cria novas instâncias de um determinado VNF, altera os recursos disponíveis para cada VNF e regista e armazena a performance de todo o sistema.

ANEXO 3: SDN - *Software Defined Network*

O *Software Defined Network* (SDN) está focado mais na arquitectura de rede e nas diferentes ligações existentes entre os elementos como tecnologia. O que se procura é separar completamente os módulos que têm como funções de rede as funções de controlo de utilizador e os módulos que têm como funções de rede as funções de tráfego de utilizador. A tecnologia procura colocar as funcionalidades de rede acessíveis através de interfaces abertas, de maneira a que fiquem desacoplados do tipo de *hardware* em que funcionam. Possibilita aos operadores colocar as camadas de controlo e de utilizador em localizações diferentes, por exemplo existe a possibilidade de colocar a camada de controlo numa localização e a camada de utilizador ou de dados mais próxima possível de onde esses dados são consumidos ou gerados.

O 3GPP tem seguido nessa direcção e não é recente, na separação das funcionalidades da camada de controlo e da camada de dados ou utilizador. Por exemplo na 3GPP R4, o MSC, *Mobile Switching Centre*, foi separado em Servidor MSC e MGW, *Media Gateway*. Com o aparecimento do LTE na 3GPP R8, o SGSN, *Serving GPRS Support Node*, há uma separação entre MME e SGW.

ANEXO 3: Protocolos no interface ar

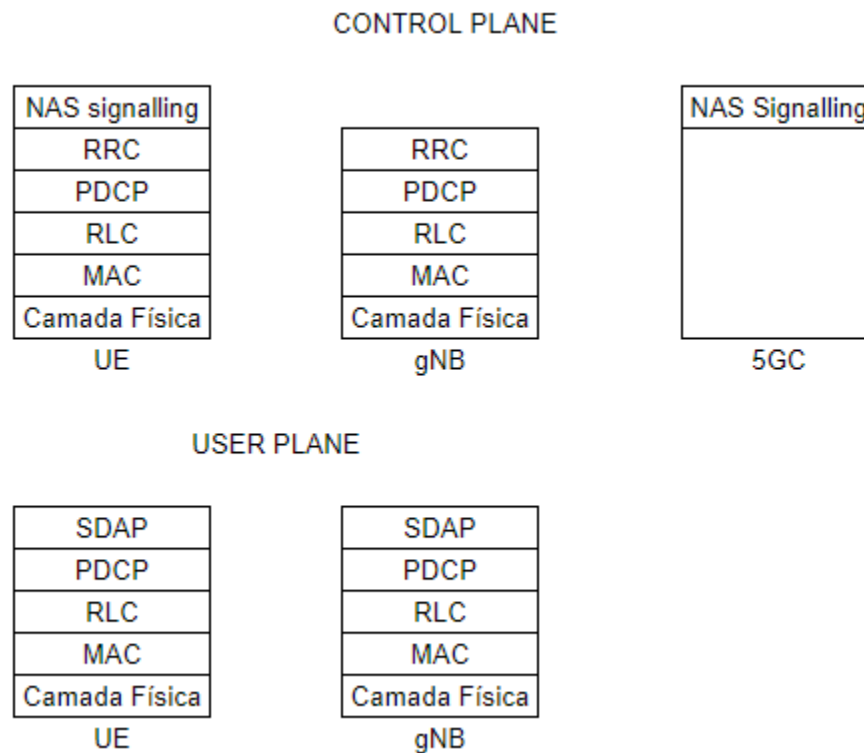


Figura 8 - Camadas de protocolos do interface ar no 5G.

A camada de utilizador ou *user plane* carrega dados de utilizador em comparação com a camada de controlo ou *control plane* que trata de toda a parte de sinalização e que se destina a comunicação com o UE. A camada física controla todo o processamento rádio e de sinal como por exemplo processamento OFDMA por antena e correcção de erros. A camada MAC pela programação e pelo controlo da camada física. O RLC detecta perdas de pacotes e requisita a retransmissão. O PDCP está relacionado com a segurança na transmissão ficando com a encriptação dos dados. O protocolo SDAP existe quando o core é 5G e aplica o QoS do 5GC na NG-RAN. No *control plane* o UE recebe dois tipos de mensagens. O gNB envia mensagens de sinalização *access stratum* para o UE controlar as suas comunicações rádio que são descritas pelo protocolo RRC. A rede core envia mensagens de sinalização NAS (*Non Access Stratum*) com destino ao UE, não relacionadas com controle de comunicações rádio.

A figura mostra as camadas de protocolos que existem no interface ar do 5G. Num dos lados da comunicação temos o UE que comunica com um gNB no contexto de NG-RAN ou seja integrados numa rede 5G de acesso e ligados a uma rede core 5GC. Pode-se excluir desta arquitectura o DC.

Esta pilha de protocolos forma as camadas 1, 2 e 3 do modelo OSI (Open Systems Interconnection). A camada 1 compreende a camada física. Da camada 2 fazem parte os seguintes protocolos:

- MAC (*Medium Access Control*), protocolo que coordena o agendamento e algum controlo da camada física.
- RLC (*Radio Link Control*), protocolo que retransmite dados onde a confiabilidade dos mesmos é importante.
- PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*), compressão de cabeçalho e tarefas de segurança como codificação de dados e protecção de integridade.
- SDAP (*Service Data Adaptation Protocol*), por isso foi escrito em cima que o cenário era de uso de um 5GC porque só é usado numa arquitectura em que o 5GC está presente, no contexto de uma rede NG-RAN. Mapeia o QoS da rede core nos canais rádio.

Da camada 3 fazem parte os seguintes protocolos:

- RRC (Radio Resource Control) faz a gestão de todos os procedimentos de controlo do UE pelo gNB através de mensagens de sinalização.
- NAS (Non Access Stratum) protocolo de comunicação entre o 5GC e o UE que não esteja relacionado com as comunicações rádio.

Esta pilha de protocolos contém toda a sinalização de mensagens para o UE no plano de controlo e também no plano de utilizador. Os fluxos de informação trocam-se recorrendo a canais de comunicação que de seguida vão ser nomeados:

- Canais físicos e os sinais físicos que estão todos abaixo da camada física: PBCH, PDSCH, PDCCH, PUSCH, PUCCH, PRACH.
- Canais de transporte situados entre a camada física e a camada MAC: BCH, PCH, DL-SCH, UL-SCH, RACH.
- Canais lógicos, entre a camada MAC e RLC: BCCH, PCCH, CCCH, DCCH, DTCH.
- Canais RLC entre a camada RLC e a camada PDCP.
- Sinalização de canal rádio entre o PDCP e o RRC: *System Information*, *Paging*, SRB 0, SRB 1, SRB 2.
- Canais de dados rádio entre PDCP e SDAP: DRB.
- Definições de QoS entre SDAP e 5GC.

Sinalização de canal rádio

Um canal rádio (radio bearer) carrega tráfego de dados e mensagens de sinalização entre protocolos das camadas mais altas da pilha de protocolos. Um DRB (*Data Radio Bearer*) leva no seu interior dados da camada de utilizador entre PDCP e SDAP. Um SRB (*Signalling Radio Bearer*) é um canal de comunicação entre PDCP e o RRC. Um canal rádio transporta informação do plano de utilizador e do plano de controlo entre o UE e a rede de acesso rádio. Cada DRB ou

SRB está associado a um QoS como uma determinada taxa de transferência, uma taxa de erros, ou um atraso ou latência. Esse QoS pode ser explícito como num DRB ou implícito, no caso de um SRB. O SRB e o DRB está também associado a uma determinada configuração nos protocolos mais baixos que garante que o QoS fixado pode ser conseguido e que UE e rede de acesso rádio estão alinhados de como o conseguir.

As especificações 3GPP referem-se a vários SRBs:

- SRB 0 é usado durante o procedimento de *RRC Connection Establishment*, o UE passa do estado de *RRC_IDLE* para o estado de *RRC_CONNECTED*.
- SRB 1 é configurado durante o procedimento *RRC Connection Establishment*. É usado nas mensagens de *access stratum*, ou seja, entre o UE e o gNB, no caso de uma configuração SA ou NSA em que o gNB é o nó mestre ou MN. Pode também carregar mensagens *non access stratum*, entre o UE e a rede core, antes do estabelecimento do SRB 2.
- SRB 2 é configurado depois do procedimento de *RRC Connection Establishment*. Entrega mensagens entre o UE e a rede core, mensagens *non access stratum*.
- SRB 3 não é obrigatório. É usado no caso de DC com um nó secundário gNB. Se existir carrega informação entre o UE e o nós secundário gNB. Uma alternativa são essas mensagens serem entregues embebidas em SRB1 via MN gNB por interface Xn ou X2.

As especificações definem que canal de sinalização deve ser usado para o transporte de uma determinada mensagem de sinalização. SRB 0 é implementado usando o CCCH pelo RLC. Os outros SRBs são implementados usando o PDCP depois de passar pelo RLC e antes do DCCH.

Canais Lógicos e de Transporte

A informação é transferida entre os protocolos RLC e MAC pelos canais lógicos já referidos em cima. Estes canais que tratam do fluxo de informação entre estas duas camadas são muito semelhantes aos definidos em LTE. A tabela seguinte resume a função de cada canal. O fluxo de informação entre a camada MAC e a camada física circula pelos canais de transporte. Também são muito semelhantes aos usados no LTE. Os canais lógicos são mapeados nos canais de transporte, essa correspondência pode ser directa ou pode ser que mais do que um canal numa fronteira corresponda a um canal na camada de transporte. Há um processamento que acontece nas camadas superiores que na camada MAC pode corresponder a um bloco de transporte. Essa é uma das funções do protocolo MAC, fazer uma correspondência entre os canais lógicos com os canais de transporte. Os canais identificados podem ser definidos só num sentido, como costumam ser os canais de *broadcast* ou nos dois sentidos da comunicação entre o UE e o gNB, só de *uplink*, só de *downlink* ou de *uplink* e *downlink*. As informações mais em detalhe podem ser encontradas na bibliografia deste relatório, mais concretamente nas especificações 3GPP TS 38.212: 4; TS 38.321: 4.5.

Canais Lógicos		
BCCH	Broadcast control channel	Só <i>downlink</i> , informação de sistema
PCCH	Paging control channel	Só <i>downlink</i> , paging
CCCH	Common control channel	<i>Downlink/Uplink</i> , RRC connection establishment, mensagens de sinalização para UEs que estão em <i>stand by</i> (RRC_IDLE) para <i>active</i> (RRC_CONNECTED), usado para acesso.
DCCH	Dedicated control channel	<i>Downlink/Uplink</i> , sinalização variada
DTCH	Dedicated traffic channel	<i>Downlink/Uplink</i> , dados de utilizador
Canais de transporte - uplink		
UL-SCH	Uplink shared channel	Só <i>uplink</i> , sinalização de uplink e dados de utilizador
RACH	Random access channel	Só <i>uplink</i> , acesso de UEs em estado não activo, <i>idle</i> .
Canais de transporte - downlink		
BCH	Broadcast channel	Só <i>downlink</i> , informação de sistema, MIB - Master Information Block
PCH	Paging channel	Só <i>downlink</i> , paging
DL-SCH	Downlink shared channel	Só <i>downlink</i> , sinalização de downlink e dados de utilizador, informação de sistema como SIB

Tabela 4 - Canais lógicos e de transporte no 5G.

Protocolo MAC, Medium Access Control

O protocolo MAC em 5G segue em muitos pontos o protocolo com o mesmo nome em LTE. Alguns detalhes, no entanto, são distintos. Os procedimentos são aplicáveis no transmissor e no receptor em sentido inverso.

Na parte de transmissão existe um objecto MAC por célula cujas entradas são os canais lógicos recebidos das camadas protocolares superiores. No protocolo MAC estão incluídos muitos procedimentos, alguns dos quais complexos.

Um dos processos do protocolo é a multiplexagem/demultiplexagem feita dinamicamente nos pacotes recebidos dos canais lógicos de maneira que os canais de transporte possam transmitir esse conteúdo ao mesmo tempo. O processo é inverso para a parte de recepção.

O protocolo MAC está também responsável pelo scheduling, palavra inglesa para o agendamento de blocos de dados, escolhendo quais os UE que vão usar esses blocos e quais os blocos a serem usados, assim como parametrização de transmissão associada.

A camada física contém procedimentos de mecanismos de retransmissão conhecidos como *Hybrid ARQ*. As retransmissões são rápidas e são usadas por fluxos de dados em tempo real e sem ser em tempo real mas têm falhas por isso os fluxos de informação não em tempo real podem requerer retransmissões com mais frequência ao nível do RLC. Este procedimento é controlado pelo protocolo MAC.

Na camada física existe um procedimento que é conhecido como acesso aleatório (*random access*) que permite ao UE contactar a rede de acesso rádio sem um agendamento anterior para uso de recursos do interface ar. Este procedimento é também controlado pelo protocolo MAC.

As entradas do protocolo, tendo como entradas as comunicações com os protocolos superiores são os canais lógicos. As saídas deste protocolo, tendo como saídas as comunicações com a camada física, são os canais de transporte. Estes canais de transporte serão depois mapeados nos canais físicos pela respectiva camada. Nas arquitecturas aqui apresentadas, neste relatório, o gNB usa sempre a versão 5G do protocolo e o eNB a versão LTE do mesmo protocolo.

Na sua interacção com a camada física, o protocolo MAC controla esta camada usando procedimentos. Os procedimentos mais importantes são os procedimentos para transmissão e recepção de dados controlados por um protocolo superior e implementados pelo protocolo da camada física.

O protocolo MAC pode configurar o UE para transmissão e recepção sem agendamento dinâmico. Em transmissões em uplink de baixa latência, possibilita ao UE, via canal físico PUSCH, uma ligação configurada, activada e desactivada por mensagens de sinalização RRC. Para serviços de baixa taxa de transferência de dados mas de fluxo constante como o VoIP, permite ao UE um canal de acesso periódico também no canal físico PUSCH. Neste caso a configuração também é iniciada pela sinalização RRC. Estes dois procedimentos são conhecidos como *grant type 1* e *grant type 2*, respectivamente. Existe também um procedimento em *downlink* conhecido como *downlink semi-persistent scheduling* muito semelhante ao *grant type 2*.

Os processos de transmissão de dados na recepção e na transmissão são descritos por outros procedimentos. O UE informa o tamanho dos dados armazenados em filas provisórias (chamados de *buffers*) e também sobre a potência de transmissão utilizada. O gNB ajusta o *timing advance* por instruções de *timing advance* e gestiona o DRX (*discontinuous reception*).

Outros procedimentos incluem a activação e a desactivação das comunicações do UE com outras células secundárias, a activação e desactivação de pacotes duplicados, divisão de canais rádios e controlo de BWP no acesso a parte de largura de banda disponibilizada na célula.

Existem também procedimentos relacionados com o uso de múltiplas antenas.

O protocolo MAC envia e recebe elementos de controlo. Estes elementos definem configurações do protocolo no UE e no gNB com uma latência inferior àquela que seria conseguida no

protocolo RRC por mensagens de sinalização. Estes elementos são identificados no cabeçalho das mensagens MAC. Os elementos de controlo são resumidos na tabela seguinte.

<i>uplink</i>	<i>downlink</i>
Buffer Status Report (BSR, dados no <i>buffer</i> de <i>uplink</i>) C-RNTI Power Headroom Report (PHR) Confirmação de activação/desactivação grant	UE Contention Resolution Identity (gestão de acesso de múltiplos UEs) Comandos de Timing Advance Definições de DRX Activação/Desactivação de SCell Activação/Desactivação de duplicação PDCP Activação/Desactivação de SP CSI-RS/CSI-IM CSI Trigger Activação/Desactivação de estados TCI Indicação de estados TCI Activação/Desactivação de SP CSI Activação/Desactivação de SP SRS Activação/Desactivação de PUCCH Spatial Relation Activação/Desactivação de SP ZP CSI-RS

Tabela 5 - Elementos de controlo do cabeçalho do protocolo MAC.

Protocolo RLC, Radio Link Control

O protocolo RLC, Radio Link Control existe também nas comunicações em LTE mas no 5G existem algumas diferenças. Na transmissão e na recepção os fluxos de dados são iguais sendo apenas trocados os sentidos de fluxo.

Na parte de transmissão existe apenas um objecto RLC para cada um dos UEs que está acima, hierarquicamente, dos canais RLC existentes. Este objecto RLC pode ser configurado de três maneiras:

- *Transparent Mode* (TM): usado para troca de mensagens de sinalização simples enviadas no SRB 0, *system information*, mensagens de paging, mensagens de ou para UEs em estado *standby*. Armazena e trata da entrega dos pacotes de dados.
- *Unacknowledged Mode* (UM): usado para comunicações em tempo real e quando os tempos de entrega são mais importantes que a integridade e a correcção dos dados. Isto pode ser por exemplo em voz ou vídeo. Tal como em *Transparent Mode* pode haver na transmissão e na recepção segmentação de pacotes e tamanho grande. Quando se refere segmentação num sentido está também implícito a sua reconstrução no sentido inverso. No LTE havia a possibilidade de o protocolo RLC juntar a parte final de um pacote com

a inicial do pacote seguinte. Este procedimento de concatenação já não acontece em 5G para reduzir a latência no protocolo.

- *Acknowledge Mode (AM)*: usado para outras mensagens de sinalização. O AM também é usado para fluxos de dados não categorizados como tempo real, comunicações onde a integridade da informação é mais importante que os tempos de entrega e recepção, acesso a uma página web, transferência de ficheiros são dois exemplos. Tal como em *unacknowledged mode* os pacotes podem ser retransmitidos pelo UE ou pela BTS se forem detectadas falhas no seu conteúdo. Isto corrige a maior parte dos erros de pacote no interface ar e minimiza as retransmissões de outras camadas protocolares superiores entre o UE e um servidor.

Em transparent mode e em unacknowledged mode cada objecto RLC é unidireccional, ou seja existem dois objectos RLC separados para transmissão e recepção. No acknowledged mode o objecto RLC é bidireccional, o mesmo objecto RLC gestiona a transmissão e a recepção.

O resultado para a camada mais baixa de protocolo é sempre enviado nos canais lógicos. O gNB usa sempre a versão 5G do protocolo RLC e o eNB sempre a versão RLC para LTE. Na tabela seguinte resumem-se as capacidades de cada modo de transmissão RLC.

<i>Transparent Mode</i>	<i>Unacknowledged Mode</i>	<i>Acknowledged Mode</i>
Buffering Transmissão	Buffering Transmissão Segmentação	Buffering Transmissão Segmentação Retransmissões

Tabela 6 - modos de transmissão RLC.

Protocolo PDCP, Packet Data Convergence Protocol

O protocolo PDCP, Packet Data Convergence Protocol segue os mesmos princípios do protocolo homónimo do LTE mas também, tal como o RLC, destaca-se em alguns detalhes. Transmissor e receptor funcionam da mesma maneira mas em fluxo inverso.

Na parte da transmissão existe um objecto PDCP para cada canal rádio no UE. Existe também objecto PDCP para cada canal rádio de sinalização (SRB), originados no protocolo RRC que carregam mensagens de sinalização. As especificações definem quatro canais rádio de sinalização para o 5G, são eles o SRB 0, o SRB 1, o SRB 2 e o SRB 3. Tal como os canais de dados, o interface ar pode implementar estes canais de sinalização de diferentes maneiras para satisfazer diferentes necessidades de performance.

Tendo como entrada um pacote de dados de um canal rádio ou de uma mensagem de sinalização e dependendo de como o objecto PDCP é implementado são aplicados alguns ou todos os seguintes processos:

- Cifragem dos dados: este processo codifica a informação trocada entre UE e estação base para assegurar que os dados enviados por qualquer um dos extremos da comunicação não são acedidos de maneira útil por terceiros.
- Integridade: são aplicados algoritmos sobre os dados recebidos para verificar a sua consistência ou para garantir que uma fonte exterior não alterou a informação trocada no sentido de ganhar algum controlo sobre o UE.
- Compressão de cabeçalho: neste processo a informação nos cabeçalhos IP das comunicações com baixa transferência de dados por tempo, como por exemplo comunicações de voz como o VoIP, são comprimidos no sentido de diminuir o tamanho desta estrutura.
- *Handover recovery*: um processo que assegura que os dados não são perdidos quando é feita uma mudança de célula por mobilidade, conhecido em inglês como *handover*.
- Dual connectivity: embora com o mesmo nome da DC este é um processo do protocolo PDCP que define se os pacotes devem ser entregues ao nó master ou ao secundário.

Protocolo SDAP, Service Data Adaptation Protocol

O protocolo SDAP, Service Data Adaptation Protocol é usado quando o UE comunica com a rede NG-RAN, a rede de acesso do 5G e com o core 5G, 5GC, independentemente do nó ser um nó eNB ou um gNB. Como já foi referido neste relatório um nó eNB pode ser integrado numa rede 5G fazendo com que ele tenha uma adaptação aos protocolos requeridos por esta quinta geração móvel, normalmente uma actualização de SW é requerida, bem como algumas configurações adicionais.

O protocolo SDAP é só usado para dados no plano de utilizador, não existe protocolo SDAP no plano de controlo para mensagens de sinalização.

No LTE existe um mapeamento directo entre fluxos de tráfego na rede core e na rede de acesso e nas duas redes há uma etiqueta de QoS exactamente com a mesma descrição. Isso faz juntar os dois fluxos de informação num só. Feito desta maneira torna mais complexo encaixar redes de acesso não 3GPP como o Wifi redes que têm capacidades de QoS diferentes. No 5G os dois conjuntos de fluxos de dados são separados para facilitar a agregação de redes de acesso não 3GPP.

Na parte da transmissão existe um objecto SDAP para cada sessão PDU de um UE, isto é um objecto SDAP para cada ligação no plano de utilizador. Cada sessão PDU implementa um conjunto de fluxos de tráfego entre o UE e uma rede externa, por exemplo uma ligação a uma página de internet.

Existe uma entrada para cada fluxo QoS de um UE. Cada fluxo QoS representa uma ligação de tráfego na rede core 5GC com uma parametrização distinta. Esses parâmetros definem taxas de

erro no receptor, atrasos permitidos e peso na importância dos dados caso haja congestão na rede. A sessão PDU pode ter um ou vários QoS. Uma sessão PDU pode ter uma ligação a uma página web e uma sinalização de voz em DRB distintos. Um fluxo de dados de uma chamada VoIP e de um serviço de vídeo em tempo real pode ser mapeado no mesmo DRB. Pode acontecer que os dois fluxos de QoS tenham a mesma taxa de erro permitida e os mesmos atrasos máximos definidos divergindo apenas na importância de retenção.

ANEXO 4: Considerações sobre o Interface Ar 5G

Bandas de frequências

Existem algumas maneiras de aumentar a capacidade ou a velocidade de transferência de dados numa rede de telecomunicações. O aumento da largura de banda de um canal de comunicação ou de uma portadora de rádio é um caminho para aumentar essa capacidade de transferência de dados. O aumento da eficiência espectral pode também aumentar a capacidade de transferência de dados por modulação: modulações mais eficientes podem suportar fluxos de dados maiores. Técnicas como MIMO, carrier aggregation (CA) ou dual connectivity (DC) podem também contribuir para o aumento da capacidade de dados numa rede móvel.

No espaço, células maiores cobrem áreas maiores de território e podem suportar mais utilizadores. Quando existem necessidades de comunicação e maior concentração de UE pode-se optar por dividir esse espaço em blocos mais pequenos fazendo células mais pequenas com muita capacidade, usando frequências mais altas com possibilidades de maiores larguras de banda. Com mais células e/ou reduzindo o seu tamanho consegue-se também reutilizar a mesma banda de frequências um número maior de vezes.

Os sistemas de comunicações móveis têm usado frequências que vão dos 300 MHz até aos 3 GHz. Esta gama de frequências permite alguma flexibilidade entre dois factores: o tamanho da cobertura de uma célula e a sua largura de banda. A cobertura em área é melhor para frequências mais baixas e larguras de banda maiores estão disponíveis em gamas de frequências de valores mais altos. O LTE usa bandas de frequências em todo esse espectro (300 MHz até 3GHz).

Essa zona do espectro eletromagnético é chamada de *ultra high frequency*, UHF, e já está saturada de serviços de comunicações de vários tipos e na verdade, não é uma zona muito grande, por isso encontrar buracos onde se possam encaixar frequências para o 5G é uma tarefa impossível. Por causa destas limitações, procurou-se olhar para outras zonas do espectro electromagnético maiores e menos povoadas de serviços. A atenção caiu para a *super high frequency*, SHF, e para a *extremely high frequency*, EHF.

A SHF vai dos 3 GHz até aos 30 GHz, a EHF vai dos 30 GHz até aos 300 GHz. A estas frequências, o comprimento de onda pode variar entre a centena de milímetro e a unidade de milímetro. Por essa razão, acima dos 6 GHz estas bandas são conhecidas como ondas milimétricas.

A SHF e a EHF são usadas por sistemas de ponto a ponto em microondas, por comunicações via satélite e por sistemas de radar, mas são muito menos povoadas e congestionadas que a banda de frequências UHF. Assim sendo, é possível encontrar na literatura usos previstos para o 5G desde os 700 MHz até aos 100 GHz permitindo pensar nas duas dimensões já referidas em cima, cobertura e larguras de banda elevadas.

Modos de transmissão

Num equipamento de transmissão sem fios o transmissor e o receptor são normalmente isolados para prevenir interferência. O modo de *frequency division duplex* (FDD) usa um par de bandas, uma banda somente para transmissão e a outra independente para recepção, também dedicada. O UE transmite e recebe ao mesmo tempo se estiver a operar neste modo. No modo *time division duplex* (TDD) é usada apenas uma banda de frequências para envio e recepção de dados. A transmissão e a recepção, no modo TDD, é feita na mesma banda em frequência mas em tempos distintos para evitar a interferência de sinais. Diferentes bandas são associadas para os modos TDD e FDD.

O FDD é útil em redes onde a carga do *uplink* e do *downlink* é equilibrada. No 5G é usada nas bandas mais baixas de frequências, tipicamente abaixo dos 3 GHz.

O TDD é mais eficiente onde há desequilíbrio na carga dos canais de *uplink* e *downlink*. O sistema, em TDD, consegue configurar os tempos para envio e recepção de acordo com a carga exigida. Ao contrário do FDD que consegue isolar na frequência transmissão e recepção, o TDD é muito sensível à interferência entre canais de envio e recepção e requer uma sincronização mais precisa embora este tema esteja menos presente em células de cobertura menor. Por esta razão o modo TDD tende a ser usado em frequências mais altas, bandas que estão também ligadas a células mais pequenas em área de cobertura.

Matrizes de antenas para ondas milimétricas

As antenas são elementos importantes para qualquer sistema sem fios e dentro desses sistemas é importante focar na particularidade das antenas para comunicações com o uso de ondas milimétricas. O tamanho da antena está relacionado com o comprimento de onda da frequência a que está associada. Em UHF, por exemplo, a uma frequência de 2600 MHz as ondas dessa portadora têm um comprimento de 115mm. A 26 GHz, uma frequência dez vezes maior, a onda tem um comprimento dez vezes menor, 11.5mm. A antena deve ser mais pequena do que a anteriormente indicada para a frequência dez vezes maior.

No *uplink*, a uma frequência de 2600 MHz, a antena da BTS pode ter um tamanho apropriado. A 26 GHz a antena é 10% do tamanho, só tem 10% de área de recepção. Como consequência o sinal só é 10% de boa qualidade e pode ser muito fraco para ser recebido de maneira útil pela estação base.

A solução para este problema é usar matrizes de antenas adicionando mais antenas à medida que a frequência é maior de maneira a ter a mesma área de recepção e assim manter o mesmo nível de sinal recebido mesmo a altas frequências.

Para ondas milimétricas o 5G precisará de usar matrizes de antenas que poderão ser em número de dezenas ou mesmo centenas de antenas. Para processar o sinal resultante de todas estas antenas usam-se técnicas como o Massive MIMO ou o Hybrid Beamforming.

Matrizes de antenas também podem ser usadas no outro extremo, no lado do UE mas serão sempre em muito menor número por causa do espaço disponibilizado e possível num terminal móvel e também porque mais sistemas de antenas encarece o aparelho na sua produção e comercialização para um consumidor final.

Propagação de ondas milimétricas

Numa rede de telecomunicações móveis que usa frequências de ondas milimétricas é necessário prestar alguma atenção aos efeitos provocados na sua propagação pela difracção e pela reflexão. A difracção é um efeito da propagação de sinais rádio em torno de um obstáculo que está entre o emissor e o receptor. A difracção é mais sentida a frequências mais baixas com comprimentos de onda maiores e é uma maneira de ter comunicações entre dois pontos que não estão em linha de vista. Em ondas milimétricas a difracção é muito mais fraca. Só com a difracção, o sinal recebido de ondas milimétricas é um sinal muito mais fraco numa comunicação entre emissor e receptor fora de linha de vista.

A reflexão, ao contrário, origina sinais mais fortes em ondas milimétricas do que em bandas mais baixas como UHF. Baseada na reflexão é possível ter comunicações bem sucedidas entre elementos que não estão em linha de vista e comunicam entre si com ondas milimétricas. Com a distância, as ondas milimétricas têm mais perdas do que as ondas em bandas UHF, por exemplo. São também as ondas milimétricas mais afectadas pela textura e tipo de materiais existentes nas superfícies onde reflectem.

Em altas frequências, num contexto de ondas milimétricas, há uma grande absorção e atenuação na atmosfera provocada pelos gases que a compõem. Se houver queda de chuva, granizo, ou neve e tendo em conta que o tamanho destes elementos atmosféricos são muitas vezes da ordem do comprimento de onda das comunicações 5G, a atenuação tem um factor adicional. Existem gráficos com atenuações típicas por quilómetro em função da frequência e para vários tipos de precipitação atmosférica e absorção de gases atmosféricos que mostram os efeitos e a variação dessa atenuação. As atenuações provocadas pelos vários tipos de precipitação têm crescimentos ao longo da frequência. A atenuação por gases atmosféricos que a compõem já não é de tendência constante podendo apresentar valores muito altos em algumas frequências ou bandas de frequências. Existem, por exemplo, atenuações bem conhecidas para o oxigénio a 60 GHz e 120 GHz e para os 20 GHz, 180 GHz e 320 GHz para o vapor de água. Essas atenuações podem não ser um grande problema para células muito pequenas, podem até ajudar no sentido de isolar células vizinhas e evitar interferências. Já seriam um problema se a área de cobertura aumentasse.

Combinando os efeitos referidos em cima, em ondas milimétricas, pela difracção e pela reflexão, encontramos na literatura tamanhos de célula típicos que não ultrapassam os 200 metros em diâmetro.

As perdas por penetração em edifícios por ondas milimétricas podem ser consideráveis. Tal como para os tipos de precipitação atmosférica e gases que a compõem, estas perdas por

penetração em edifícios e por materiais podem também ser encontradas na literatura mas neste tema a complexidade aumenta dada as muitas combinações de tipos de material que um edifício pode ter, bem como as diferenças de arquitectura que pode assumir no espaço. Neste caso de comunicações móveis em ondas milimétricas em que a comunicação se dá do exterior para o interior, a implementação pode encontrar muitas dificuldades.

Familiar a este último parágrafo, existem também as perdas em vegetação e linhas de água que podem ser de estudo muito complexo em sistemas de ondas milimétricas. Gráficos com estas perdas típicas existem também e estão disponíveis na bibliografia deste relatório. Tal como nos edifícios, o tipo de vegetação e geometria da vegetação tornam estes temas um grande desafio no desenho de sistemas rádio a altas frequências.

Modulação

O propósito de um transmissor rádio é codificar informação (que pode ou não ser digital) numa onda analógica através de um modulador. O modulador converte a informação recebida em símbolos representados por ondas que serão depois transmitidas. Cada símbolo pode ser definido por uma amplitude e por uma fase ou por uma componente em fase e outra em quadratura. No receptor o processo é o inverso, do sinal recebido têm de ser extraídos os símbolos inicialmente modulados.

Das modulações mais simples o BPSK, ou *binary phase shift keying*, é uma modulação onde existem dois símbolos e onde cada um desses símbolos tem a mesma amplitude mas fases diferentes: 0° e 180° . Esta modulação codifica um bit de cada vez.

Outra modulação próxima a esta última também que podemos ter é a QPSK, ou *quadrature phase shift keying*. Em QPSK existem quatro símbolos, ou seja podemos codificar dois bits de cada vez. Nesta modulação, QPSK, os sinais que representam os símbolos têm todos a mesma amplitude mas fases diferentes, separadas de 90° cada uma, apresentam fases de 45° , 135° , 225° e 315° .

Podemos encontrar outras modulações no 5G: 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM. Estas modulações apresentam respectivamente 16, 64 e 256 símbolos e podem codificar blocos de 4, 6 e 8 bits por símbolo. Como o próprio nome indica, nas modulações QAM, quadrature amplitude modulation, há uma componente de fase e amplitude em cada símbolo que pode ser variada.

Nas modulações apresentadas, aquela que apresenta maiores velocidades de transferência de dados é a 256-QAM. Na desmodulação do sinal, ou seja, na conversão do sinal analógico para os símbolos originais, o receptor tem de comparar o símbolo da onda recebida com 256 símbolos possíveis. Esta comparação só é possível de ser feita se o sinal recebido tiver uma qualidade mínima, isto é, o SNR for acima de um valor de referência. Sendo o SNR abaixo de determinado valor a preferência deve ser considerada a outra modulação menos eficiente, como uma QPSK ou uma BPSK. Tal como no 4G, o 5G também se adapta às variações do SNR usando modulações mais eficientes como a 256-QAM se o SNR for suficientemente alto ou uma modulação QPSK se o SNR não permitir usar outra modulação mais potente.

Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

Tal como no LTE, o 5G também usa a *orthogonal frequency division multiple access* (OFDMA) na modulação dos sinais no interface ar. Em OFDMA os bits são convertidos em símbolos pela modulação. O transmissor agrega grupos de símbolos e transmite-os em paralelo usando diferentes frequências, também conhecidas como subportadoras. Cada subportadora ocupa uma pequena parte da largura de banda disponibilizada pela célula. Colectivamente, todas as subportadoras ocupam uma largura de banda bem maior, em conjunto, próxima da largura de banda da célula.

Substituindo um ineficaz ramo de processamento analógico que consiste num conversor digital-analógico, conversão para a frequência de subportadora, amplificação, filtragem e transmissão requerido para cada andar de subportadora, por um processo conhecido como IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*, consegue-se simplificar o sistema. O transmissor OFDMA adiciona todas as subportadoras digitalmente. Na entrada do módulo IFFT estão todos os sinais representados pelas suas amplitudes e fases que deverão ser transmitidos em cada uma das subportadoras. Na saída desse módulo está o sinal que deverá ser transmitido em função do tempo. Existe ainda um módulo adicional que consiste num conversor digital-analógico que coloca o sinal na posição RF determinada fazendo a sua amplificação e filtragem antes da transmissão.

A BTS 5G consegue atribuir a vários UE ao mesmo tempo conjuntos distintos de subportadoras e consegue mudar esses conjuntos dinamicamente, ao longo do tempo. Na prática o OFDMA é uma modulação que usa ao mesmo tempo *time division multiple access* (TDMA) e *frequency division multiple access* (FDMA).

No 5G, tal como no LTE, existe uma relação entre a largura de banda da subportadora de 15 kHz e a duração do sinal que é dada por $1/15000$ e que assume o valor de 66.6 microsegundos. No 5G, ao contrário do LTE, não há tamanho de subportadora fixo, podendo esse tamanho variar em múltiplos de 15 kHz.

Em OFDMA o transmissor insere um símbolo de guarda entre símbolos consecutivos que é também chamado de *cyclic prefix* (CP). Em LTE são usados dois valores de *cyclic prefix*, um normal de valor 4.7 microsegundos e outro estendido de 16.6 microsegundos. Num ambiente onde há múltiplas reflexões o sinal recebido encontra-se afectado por esses múltiplos sinais ligeiramente desfasados. Se o *cyclic prefix* for muito curto, a parte final de um símbolo pode interferir com o começo do símbolo seguinte. Para que este fenómeno de interferência entre símbolos (ISI) não ocorra o CP deverá ter um valor superior a este desfasamento causado pelos diferentes percursos do sinal. A duração do sinal também deverá ser muito maior que o desfasamento referido também.

Em OFDMA as subportadoras são todas ortogonais entre si e não interferem umas com as outras por causa disso. Como o UE pode estar em movimento as comunicações de e para ele estão sujeitas ao efeito doppler. Num ambiente em que há multipercursos dos sinais o UE

aproxima-se algumas vezes de alguns sinais, de outras vezes distancia-se. Como resultado disso, as subportadoras deixam de ser ortogonais entre si passando a interferir umas com as outras. Para diminuir esta interferência, a separação entre subportadoras deve ser tal que o seu espaçamento seja muito maior que este desfasamento causado pelo multipercurso dos sinais recebidos.

Em LTE é usado um tamanho fixo de subportadora e o seu valor é de 15 kHz. Esse tamanho corresponde a um também fixo tempo de duração de símbolo de 66.6 microsegundos também já referido neste texto. Essa escolha tem duas razões principais: a duração do símbolo tem de ser grande o suficiente para evitar interferência entre símbolos para grandes valores de desfasamento entre sinais e o seu tamanho deve ser o suficiente para garantir que não há interferência entre subportadoras quando há grandes desfasamentos de sinal motivados por sinais recebidos devido ao multipercurso ou por grandes grupos de subportadoras.

O 5G foi projectado para poder usar muitas frequências em muitas bandas para as quais o LTE não foi. Isso torna impossível usar sempre o mesmo tamanho de subportadora para evitar interferências entre símbolos e entre frequências. Em alternativa o 5G usa mais tamanhos de subportadoras em que o mais pequeno é o de 15 kHz e o maior é o 240 kHz o que dá uma duração de símbolo de 4.16 microsegundos para este último valor de tamanho de subportadora. O maior tamanho de subportadora definido pelas especificações, em frequência, é o de 480 kHz, o que corresponde a uma duração de símbolo de 2.083 microsegundos.

Subportadoras menores ajustam-se melhor a maiores desfasamentos de sinal provocados por multipercurso de sinais recebidos. Grandes tamanhos de subportadoras ajustam-se melhor a velocidades maiores de deslocamento do UE ou grandes frequências de portadora. Situações onde velocidades de deslocamento de UE são grandes e existem grandes desfasamentos de sinal recebido por multipercurso e as frequências de portadora são elevadas podem comprometer a operabilidade do 5G. A altas frequências as células têm coberturas mais pequenas não existindo muita componente de multipercurso que pode afectar as comunicações sendo por isso este um cenário que deverá ser muito pouco frequente.

Um dos componentes de um transmissor é um oscilador local que gera um sinal analógico na frequência da portadora e é usado para modular o sinal na banda base até à frequência desejada para a transmissão. O receptor também possui um oscilador local usado para transformar a frequência de recepção RF numa frequência intermédia, antes da desmodulação ser feita. A existência de jitter na onda originada no oscilador provoca flutuações na fase do sinal e isso origina ruído no sinal transmitido e no sinal recebido. Se o jitter ficar constante mas a frequência da portadora RF aumentar, as flutuações de fase aumentam também e também aumenta o ruído de fase. A potência de ruído de fase é proporcional ao quadrado da frequência de portadora RF. Em ondas milimétricas o ruído de fase é importante e não pode ser desconsiderado. Em 5G esse ruído de fase pode ser compensado com a introdução de sinais de referência de fase que permitem ao receptor medir as flutuações de fase e compensá-las. As flutuações de fase também provocam uma falta de correspondência entre o emissor e o receptor. Em OFDMA esta é uma fonte adicional de interferência entre frequências nas subportadoras. Como já foi referido neste texto anteriormente em 5G a interferência entre frequência nas subportadoras é diminuída por uma variação no tamanho dessas subportadoras em frequência nas frequências de portadora

mais altas. Esta é a mesma técnica usada para combater as interferências entre frequências causada pelo efeito Doppler para o caso de o UE em movimento.

O 5G usa vários sinais de referência. Por exemplo, na desmodulação, ao usar o QPSK, o transmissor codifica as quatro combinações de dois bits de cada vez substituindo por quatro símbolos possíveis, símbolos esses que têm fases de 45, 135, 225 e 315 graus. Para identificar uma alteração de fase um sinal de referência é necessário. A solução é injectar sinais de referência na transmissão para a desmodulação. Estes são sinais enviados com uma amplitude e fase bem determinadas. Num processo de estimação de canal o receptor mede a amplitude e a fase do símbolo que recebe, compara essas medidas com a transmissão de um símbolo igual e estima a atenuação de amplitude e o desvio de fase. Com esta estimativa recupera a amplitude dos sinais transmitidos e efectua a desmodulação. Num sistema de comunicações que usa ondas milimétricas com OFDMA este processo pode ser ajudado com um sinal de referência para seguimento de sinal de fase. Este último sinal é usado para compensar flutuações de fase devido ao jitter muito variável em função do tempo mas de variação mais lenta em função da frequência.

No uplink o UE transmite sinal de referência. A BTS 5G mede a potência do sinal recebido em função da frequência e determina a melhor subportadora para ser usada na transmissão do UE (*uplink*), determina também a melhor modulação assinalando a sua escolha ao equipamento móvel e este responde na sequência.

No caso do modo TDD as comunicações nas duas direcções estão na mesma frequência. As perdas por propagação são as mesmas nos dois sentidos sendo que os sinais e referência funcionam da mesma maneira nos dois sentidos. Neste caso a BTS usa as mesmas subportadoras e modulação assinala a sua escolha ao UE e usa essa escolha na sua próxima transmissão. No modo FDD a frequência de *uplink* é diferente da frequência de *downlink*. O UE mede o sinal recebido em função da frequência e determina quais as melhores subportadoras a serem usadas no *downlink*, determina também a melhor modulação a ser usada no mesmo sentido. É então que sinaliza essa recomendação à BTS. Baseada nessa recomendação a BTS informa o UE da sua escolha e usa essa escolha na próxima transmissão para a estação móvel. A informação de canal pode ser importante no modo TDD por duas razões, pode haver assimetrias no processamento de sinal recebido motivado pelo hardware no *uplink* e no *downlink* e tanto a BTS como o UE podem estar a ser afectados de diferente maneira por interferências mais sentidas por um do que por outro.

Diversidade

Na diversidade em *downlink* a BTS envia informação de várias antenas, as antenas são separadas no espaço por alguns comprimentos de onda ou podem estar com polarizações cruzadas de maneira que os sinais recebidos não sejam correlacionados. O UE adiciona os dois sinais, isso reduz o *fading* e o erro, a cobertura da célula é assim melhorada, é melhorada também as condições de recepção dos UEs que estão próximos da fronteira cobertura da célula. A estação

móvel indica a diferença de fases entre os sinais recebidos num formato conhecido como Precoding Matrix Indicator (PMI). O PMI é usado pela estação base para ajustar a diferença de fase entre os sinais transmitidos, para que o sinal recebido seja reforçado em vez de ser cancelado.

Numa configuração SU-MIMO (*Single User MIMO*), a BTS e o UE têm ambos múltiplas antenas. Se há M antenas transmissoras e N antenas receptoras a configuração é conhecida como MxN MIMO.

Por exemplo, numa configuração 2x2 MIMO. A BTS usa duas antenas para fazer a transmissão. A BTS envia dois símbolos diferentes na mesma subportadora em cada antena usada. Usando duas antenas para recepção o UE mede duas combinações diferentes dos símbolos transmitidos. Destas duas medidas o UE consegue recuperar duas quantidades desconhecidas que são os dois símbolos transmitidos, conseguindo-se assim duplicar a taxa de transmissão de dados. Em geral, esta taxa de transmissão de dados é proporcional ao mínimo dos dois números M e N com a adição de novas antenas proporcionando diversidade adicional.

Tal como na diversidade os sinais deverão ser não correlacionados, para isto ser conseguido as antenas devem estar separadas por múltiplos do comprimento de onda da frequência usada, a sua polarização deverá ser cruzada e numa configuração sem linha de vista. Se alguma destas condições não for totalmente verificada a correlação entre os sinais aumenta e o UE repete as medições nas duas antenas, ou seja, fica com uma medição duplicada. Com a medição duplicada não é capaz de recuperar os dois símbolos transmitidos. A mesma coisa acontece se o sinal recebido for afectado de muito ruído. Neste caso o UE indica à BTS o número de sinais que consegue processar com sucesso.

Beamforming

O *beamforming*, palavra em inglês, ou a formação de feixes, é muito semelhante à diversidade. Neste caso, do *beamforming* a BTS usa antenas mais próximas (valores típicos de meio comprimento de onda) com a mesma polarização. A BTS opera num contexto de pouco multipercurso por reflexão, tipicamente em que emissor e receptor estão em linha de vista. Esta configuração garante que o UE recebe sinais correlacionados e que a fase dos sinais recebidos tem muito pouca variação.

Em algumas direcções os sinais transmitidos de diferentes antenas interferem construtivamente reforçando-se, noutras direcções cancelam-se pois as interferências são destrutivas.

O beamforming é usado na transmissão *downlink* e na recepção *uplink*. O UE fica situado no feixe principal e recebe um sinal forte do nó no *downlink*. Da mesma maneira se o UE estiver na direcção do feixe principal a BTS recebe um sinal forte da estação móvel.

O *beamforming* pode ser implementado de várias maneiras:

- *Beam Sweeping* - a BTS tem um número de feixes fixos que apontam para várias direcções. A BTS varre periodicamente os feixes e o UE escolhe o melhor feixe no *downlink*. O 5G usa esta técnica para sincronização, o gNB transmite sinais de

sincronismo por varredura de feixes e o UE responde identificando o melhor feixe recebido.

- *Analogue Beam Steering* - a BTS direcciona o seu feixe principal por ajuste de fase. Para fazer este ajustamento a BTS primeiro estima a direcção do UE maximizando o seu SNR que recebe no uplink. Depois calcula os ajustes fase no uplink e no downlink (em TDD são iguais). A mudança de fase é um processo tido como simples dado que só depende de um parâmetro, a diferença de fase de uma antena para a outra. Pode ser implementado depois de uma conversão digital analógico, por processamento de sinal.
- *Digital Beamforming* - por aplicação de pesos à amplitude e um desvio de fase em cada antena individual a BTS consegue direccionar o feixe principal, consegue também direccionar os pontos nulos e o lobos laterais. Esta técnica permite diminuir a interferência entre UEs. O processamento é mais complexo que o Analogue Beam Steering com um conversor D/A e A/D por antena, o que aumenta o consumo energético quando usando ondas milimétricas. Também pressupõe informação de estado de canal rigorosa para cada antena que em FDD implica usar um sinal de referência CSI para cada antena. Por causa destas razões só é usado em configurações de matrizes de antenas pequenas, ou no modo TDD. Num sistema OFDMA, diferentes pesos de antenas podem ser usados para diferentes conjuntos de subportadoras.
- *Hybrid Beamforming* - usa uma mistura da técnica analógica e digital. Existem várias implementações, por exemplo a BTS pode usar uma técnica digital para direccionar o feixe principal em azimuth e pode usar a técnica analógica para direccionar em elevação. Isto mantém alguns dos benefícios do digital limitando o consumo energético nas ondas milimétricas.

Camada Física Interface Ar 5G

Na camada física do interface ar são definidas todas as funções de baixo nível da transmissão e recepção de dados.

A camada física do interface ar do 5G é configurada pelo RRC, protocolo Radio Resource Control. Determina parâmetros como as frequências rádio que o UE e o gNB devem usar para comunicar entre si. Essas configurações usam mensagens de sinalização RRC recebidas do gNB. O protocolo MAC gere operações de baixo nível que têm em vista a manipulação e o controle da camada física, por exemplo, na atribuição de recursos de transmissão ou recepção no tempo, no interface ar. A camada física é responsável por várias funções descritas nas especificações 3GPP, por exemplo TS 38.211 (modulação, OFDMA, processamento em antenas múltiplas), TS 38.212 (multiplexing e codificação de canal), TS 38.213 (procedimentos de controle na camada física), TS 38.214 (procedimentos de dados na camada física), TS 38.215 (medidas no UE e na rede de acesso).

Na parte da modulação dos sinais no interface ar 5G foi escolhido o OFDMA, modulação que apresenta valores PAPR considerados altos. O PAPR (peak to average power ratio) é um parâmetro de grande importância em qualquer sinal. Um valor baixo de PAPR possibilita implementar amplificadores com consumos mais baixos de energia sendo preferíveis para as baterias dos equipamentos móveis terem acesso a tempos de duração ou tempos de vida maiores. No caso do LTE e para DL o OFDMA foi adoptado apresentando valores altos de PAPR. Por essa razão e para UL o 4G não usa OFDMA mas sim SC-FDMA uma variante que permite ter valores de PAPR mais baixos possibilitando a construção de amplificadores com consumos mais modestos de energia. Já para o 5G no interface ar existe a possibilidade de usar OFDMA ou SC-FDMA.

Em LTE é usado um valor fixo de espaçamento de subportadoras de 15kHz o que dá uma duração de temporal de 66.6 microsegundos ($1/15000$). O símbolo tem de ter duração suficiente para diminuir a um nível aceitável a sua interferência com outros símbolos e a largura de banda das subportadoras tem de ser grande o suficiente para evitar interferência entre frequências a grandes velocidades ou integradas em grandes larguras de banda. Porque o 5G opera nas frequências do 4G e em muitas outras isso torna o uso de um espaçamento de frequências de portadoras fixo mais difícil. Por essa razão o 5G usa vários espaçamentos de subportadoras de frequências, múltiplos de 15kHz. Subportadoras pequenas são melhores de usar em ambientes com muita interferência por reflexão, em células maiores. Subportadoras mais pequenas, em duração, são melhores para uso em alta velocidade. Não é possível assim a um sistema 5G ter bom desempenho em altas frequências, em que os UEs estão a alta velocidade com uma enorme área de cobertura.

Diferentes configurações são usadas em diferentes contextos nas duas categorias de frequências FR1 e FR2. FR1, *frequency range 1* referida normalmente para bandas até ao 6GHz usa subportadoras de largura 15 kHz, 30 kHz e 60kHz para transmissão e recepção. Usa também 15kHz e 60kHz para sincronização inicial entre o gNB e o UE. Na *frequency range 2*, FR2, que contempla as faixas acima de 24 GHz até 52 GHz usa subportadoras de 60kHz e 120 kHz para dados, 120 kHz e 240 kHz para sincronização entre o UE e o eNB. Cada uma das configurações

de subportadoras suporta um *cyclic prefix* e para FR2 um *cyclic prefix* estendido de duração maior para prevenir interferência em células maiores com reflexões mais distantes. A escolha da célula por tamanho de subportadora não é fixo, a célula pode dinamicamente alterar esse espaçamento transmitindo diferentes espaçamentos. O UE só pode usar espaçamentos do mesmo tipo de cada vez.

A BTS poder agendar e atribuir ao UE uma subportadora seria muito ineficiente e sobrecarregaria desnecessariamente a sinalização, por isso são usados blocos de subportadoras organizados em grupos de 12. Mas no 5G, ao contrário do LTE, os espaçamentos de subportadoras não têm tamanho fixo, logo também a sua largura de banda não tem uma capacidade fixa. No 5G os blocos de subportadoras são definidos em função da frequência e não da frequência e do tempo como no 4G. O número máximo de blocos de subportadoras que uma célula pode usar são 275, o que multiplicado por 12 subportadoras por bloco dá um número máximo de 3300 subportadoras que podem ser usadas. Os números apresentados são números máximos, há sempre uma dependência na banda de frequência escolhida, na sua largura de banda e no espaçamento de subportadoras, o que resulta num sempre menor número do que o valor máximo.

As especificações para o 5G suportam certas combinações bem definidas de bandas de frequências, larguras de banda e espaçamento de subportadoras. A largura de banda transmitida pela BTS é a largura de banda da portadora 5G, esse valor é determinado pelo operador de acordo com a licença de uso do espectro obtida ao regulador para cada território, região ou país. A largura de banda de canal pode variar entre os 5 MHz e os 100 MHz em FR1 e varia entre os 50 MHz e os 400 MHz em FR2. A largura de banda de canal é a largura de banda que contém a portadora 5G da célula. Dentro da largura de banda de canal existe a largura de banda de transmissão que contém todos os blocos de subportadoras. A largura de banda de transmissão é sempre menor que a largura de banda de canal por causa da existência das bandas de guarda que não são um exclusivo do 5G e são comumente usadas em tecnologias de telecomunicações móveis para evitar a interferência entre canais adjacentes. As bandas de guarda garantem alguma protecção contra esse tipo de interferência.

Em LTE a largura de banda usada pelo UE é igual em geral à largura de banda da célula que cobre a sua localização e que é por ele usada. Em MTC isso não acontece, mas só para os UEs com capacidade para usar essa tecnologia MTC.

Em 5G a largura de banda usada pelo UE pode ser menor que a largura de banda transmitida pela célula a que está ligado. As especificações referem a *Bandwidth Part*, BWP, como um conjunto de blocos de subportadoras (*resource block*) contíguo que é uma fatia da largura de banda da célula. Cada BWP tem um espaçamento de subportadora e uma duração de *cyclic prefix*. Um UE pode ser configurado com até quatro BWP em *downlink* e o mesmo número de BWP em *uplink*. Esses diferentes BWP podem-se sobrepor. Só um BWP pode estar activo no *downlink* e no *uplink* de cada vez de maneira que o UE só transmite por um BWP de *uplink* e só recebe de um BWP, os BWP activos de *uplink* e *downlink*. As BWP são escolhidas através por mensagens em RRC de sinalização mas a escolha dos BWPs activos é feita de maneira dinâmica pela célula. Em TDD os BWP de *uplink* e *downlink* têm a mesma frequência central, em FDD os BWP são independentes. O gNB pode configurar os BWP para os UEs que usam o MTC com

larguras bem pequenas para minimizar os seus consumos energéticos e poder poupar as respectivas baterias. O gNB pode também configurar os restantes equipamentos que não usam MTC para o PDCCH num canal mais pequeno também para poder diminuir os respectivos consumos e só fazer a transição para um canal com mais capacidade para recepção PDSCH. O mesmo se pode passar para mudar o espaçamento de subportadoras e a duração de símbolo para melhorar o uso de serviços para o UE. O gNB pode configurar BWP que se sobrepõem ou adjacentes de maneira a ficarem com o mesmo espaçamento de subportadoras. Transmissão para diferentes UEs com o mesmo tamanho de subportadoras são ortogonais não interferindo entre si. Transmissões com subportadoras de tamanho diferente interferem por não serem ortogonais.