

Red de Acceso Móvil 5G

Ing. Bruno Benedetti
2do semestre 2022

Introducción

Arquitectura e
Interfaces de
Red 5G

Interfaz de Radio

Massive MIMO +
Beamforming

Uso de bandas
en 5G

Introducción

Principales Características

EMBB + URLLC + mMTC

FR1 & FR2

OFDM

Massive MIMO +
Beamforming

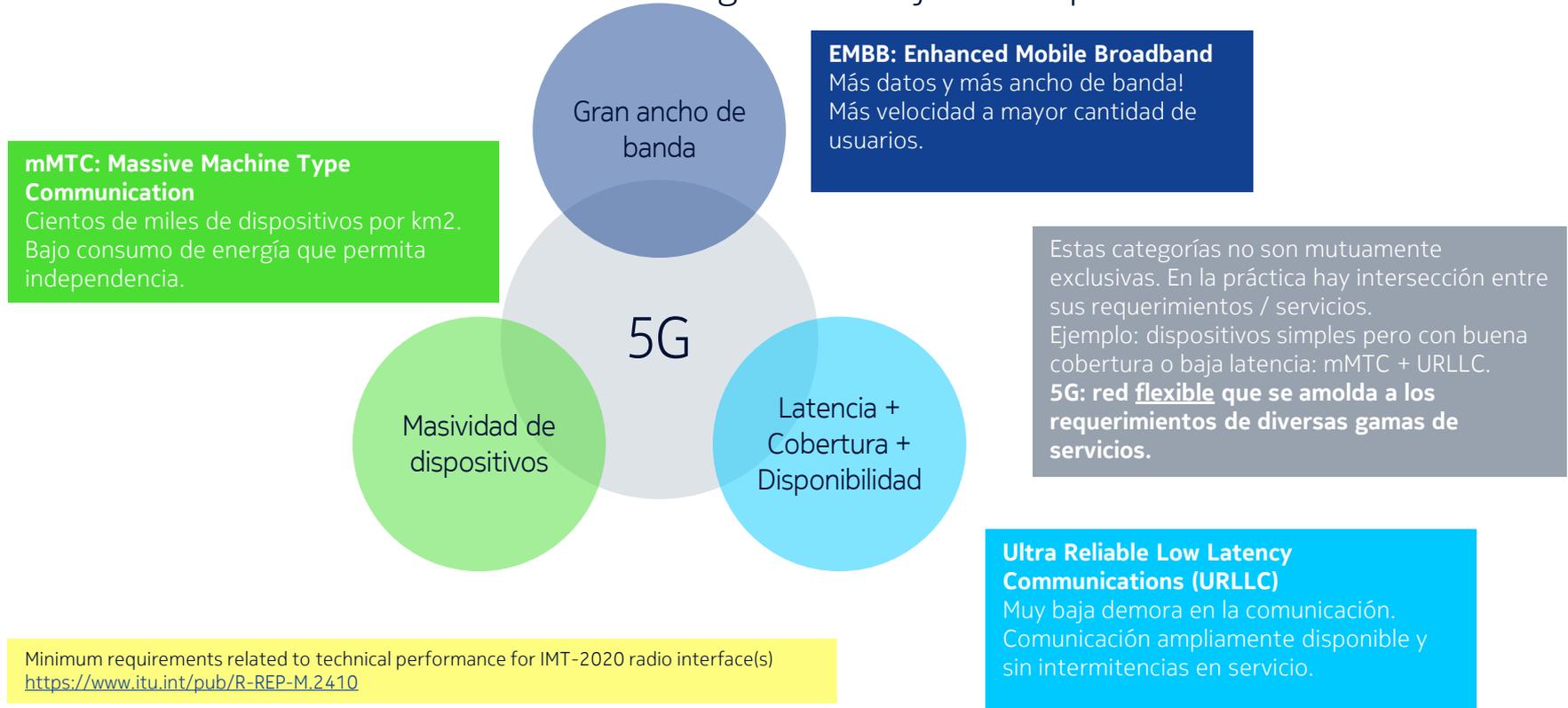
Dual Connectivity

Network Slicing

Introducción

Objetivos

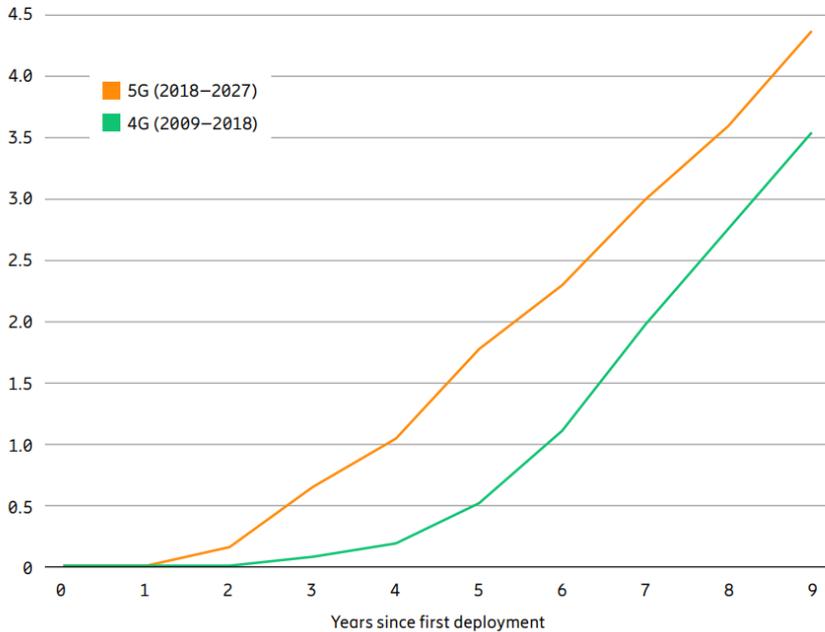
El estándar de 5G fue desarrollado con los siguientes objetivos o pilares:



Introducción

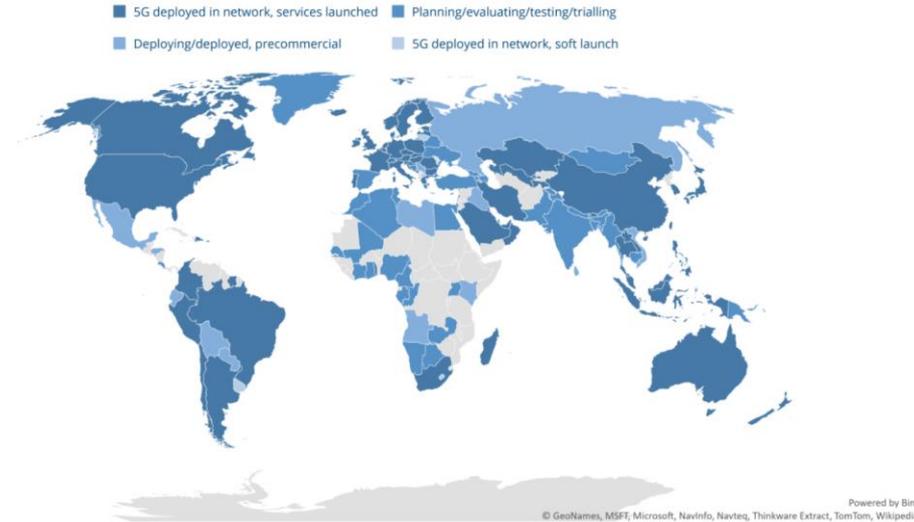
Contexto

Figure 2: Comparison of 5G and 4G subscription uptake in the first years of deployment (billion)



Ericsson: Ericsson Mobility Report – 2022/06
<https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report>

GSAcom: 5G Market Snapshot – 2022/03
<https://gsacom.com/paper/5g-market-snapshot-march-2022/>



Introducción

Flexibilidad

- 5G busca proveer una amplia variedad de servicios. EMBB, URLLC, mMTC...
- La interfaz de radio debe ser moldeable a los requerimientos del servicio.
 - Más variedad de bandas.
 - Multiple Sub-Carrier Spacing.
 - Massive MIMO + Beamforming.
 - QC-LDPC channel coding.
 - Mini-slots.
 - RRC-inactive state.
 - Carrier Aggregation.
- Opción de coexistencia con LTE con DSS (aunque más ineficiente).

Introducción

Bandas

5G amplía el rango de frecuencias en las que puede trabajar respecto a LTE.

Bandas bajas / medias-bajas

- 600 MHz – 2600 MHz
- En general las mismas bandas que usa LTE.
- Mayormente FDD.

Bandas medias

- 2400 MHz – 6000 MHz
- Nuevas bandas. Anchos de banda de hasta 100 MHz.
- TDD.

Bandas altas

- 26, 28, 39 GHz.
- Nuevas bandas. Anchos de banda de hasta 400 MHz.
- TDD.

FR1

FR2

Introducción

Arquitectura y
5G Core

Interfaz de Radio

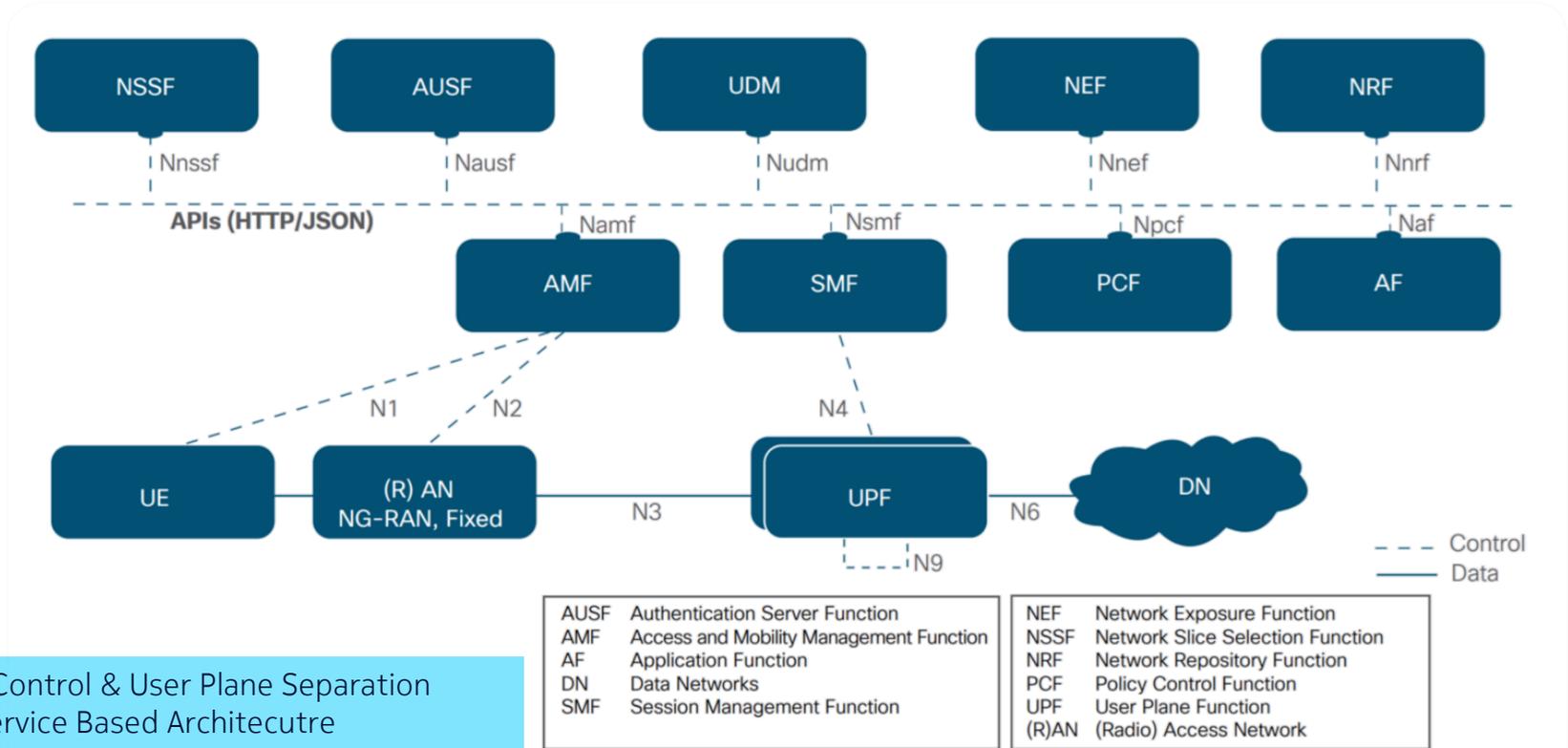
Massive MIMO +
Beamforming

Uso de bandas
en 5G



Arquitectura y 5G Core

5G Core



CUPS: Control & User Plane Separation
SBA: Service Based Architecture

Arquitectura y 5G Core

5G Core

CUPS: Separación de Control Plane y User Plane.

- Permite flexibilidad en el despliegue del core.
- Por ejemplo, control plane centralizado pero salida a internet distribuida, con UPFs distribuidos.

Cloud native

- Las funciones especificadas, tanto aquellas análogas a LTE como las nuevas, están pensadas para un ambiente cloud, con una estructura de SW sobre Hw COTS (Commercial Off The Shelf; de propósito general).
- Ya existen implementaciones de EPC sobre cloud, pero el core 5G predispone una arquitectura pensada para ser incorporada a un ambiente cloud.

SBA: Service Based Architecture

- Facilidad de escalabilidad y definición de nuevos componentes.
- Integración de Network Functions (NF) como servicios que se pueden agregar al core.
- Por ejemplo, una NF para comunicación con core sobre wifi, o para gestionar embs, o para manejo de notificaciones masivas.
- No hay una NF predefinida de antemano. El sistema predispone la flexibilidad de creación de NFs.

Arquitectura y 5G Core

5G Core

AMF: Access and Mobility Management Function

- Análogo al MME: NAS, autenticación, registro, encriptación, movilidad, paging.

SMF: Session Management Function

- Funciones de CP de SGW+PGW Control Plane: asignación de IP, selección de UPF.

UPF: User Plane Function

- Funciones de SGW+PGW User Plane: forwarding hacia red ip, natteo, firewall.

UDM: Unified Data Management

- Análogo al HSS: base de datos de usuarios, tipos de servicios, QoS.
- Authentication a cargo de otro elemento, AUSF.

PCF: Policy Control Function

- LTE: PCRF.

Arquitectura y 5G Core

5G Core

NRF: Network Repository Function

- Repositorio de NFs disponibles.

NEF: Network Exposure Function

- Exposure de capabilities de la red hacia 3rd parties. Permitir desarrollo de Apps Over The Top (OTT). API Gateway.
- En EPC ya había un SCEF.

NSSF: Network Slice Selection Function

- Selección de slice (QoS) en red 5G

AF: Application Function

- Application Server, por ej IMS. Comunicación con PCF sobre utilización de aplicaciones. Por ejemplo P-CSCF en caso de IMS.

Arquitectura y 5G Core

CUPS

- Centralizar el tráfico implica mayor latencia.
- Por ejemplo: si llamo a una persona que está a mi lado, el audio irá de mi celular a la radiobase y luego al núcleo. Para luego ver que es esa misma radiobase a la que tengo que reenviarlo para que finalmente lo mande a quien tengo a mi lado.
- Pero en 5G uno de mis objetivos es bajar la latencia!! No para llamadas... pero para aplicaciones.

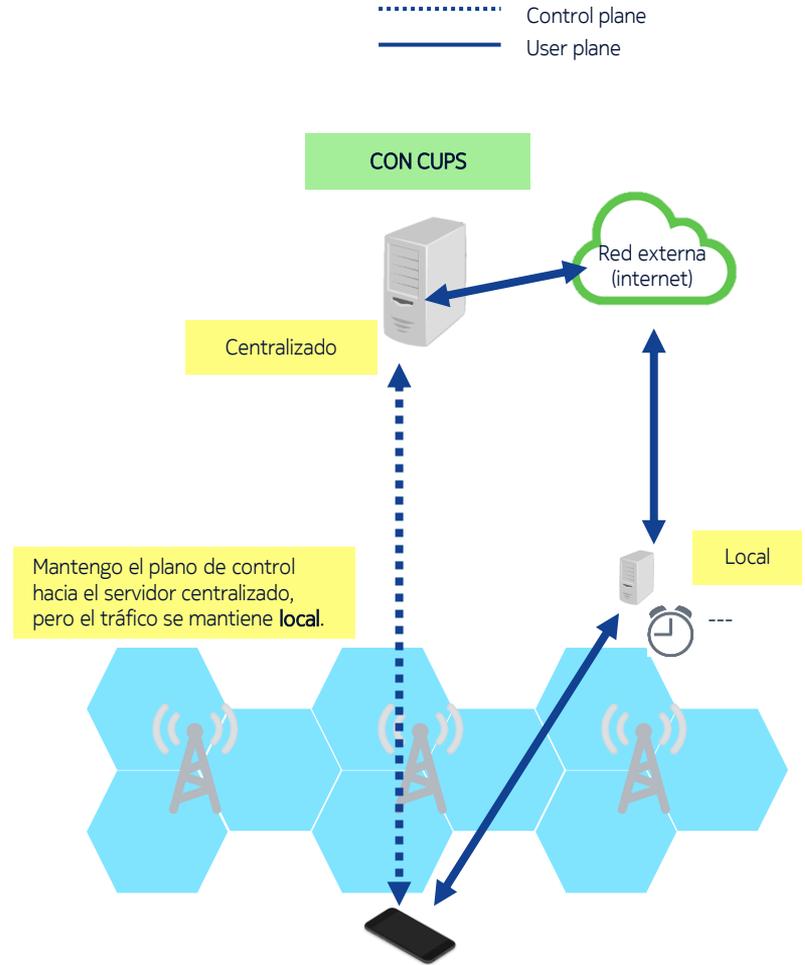
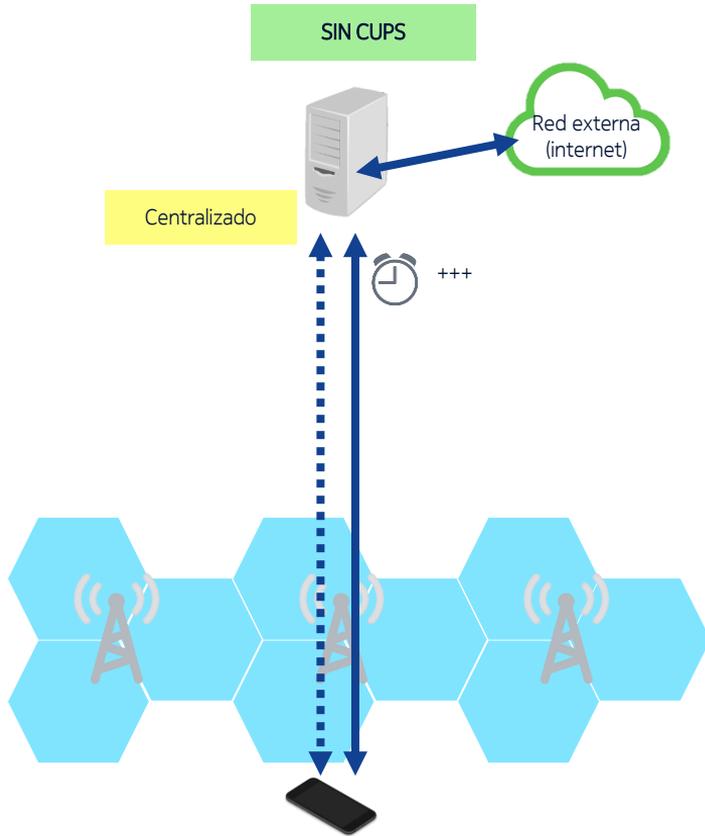
Si puedo acercar el procesamiento al usuario, puedo bajar la latencia.

CUPS: Control & User Plane Separation.

Mantener el control plane centralizado pero distribuir el user plane.

- Control plane: manejo de usuarios, autenticarlos, darles conectividad (ej asignar IP).
- User plane: manejo del tráfico que generan.

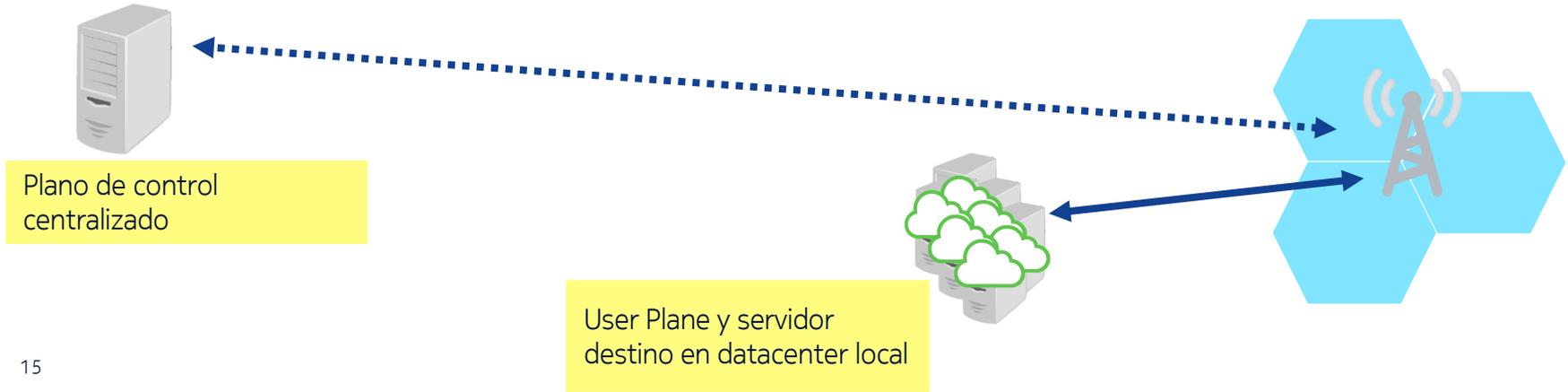
Arquitectura y 5G Core CUPS



Arquitectura y 5G Core

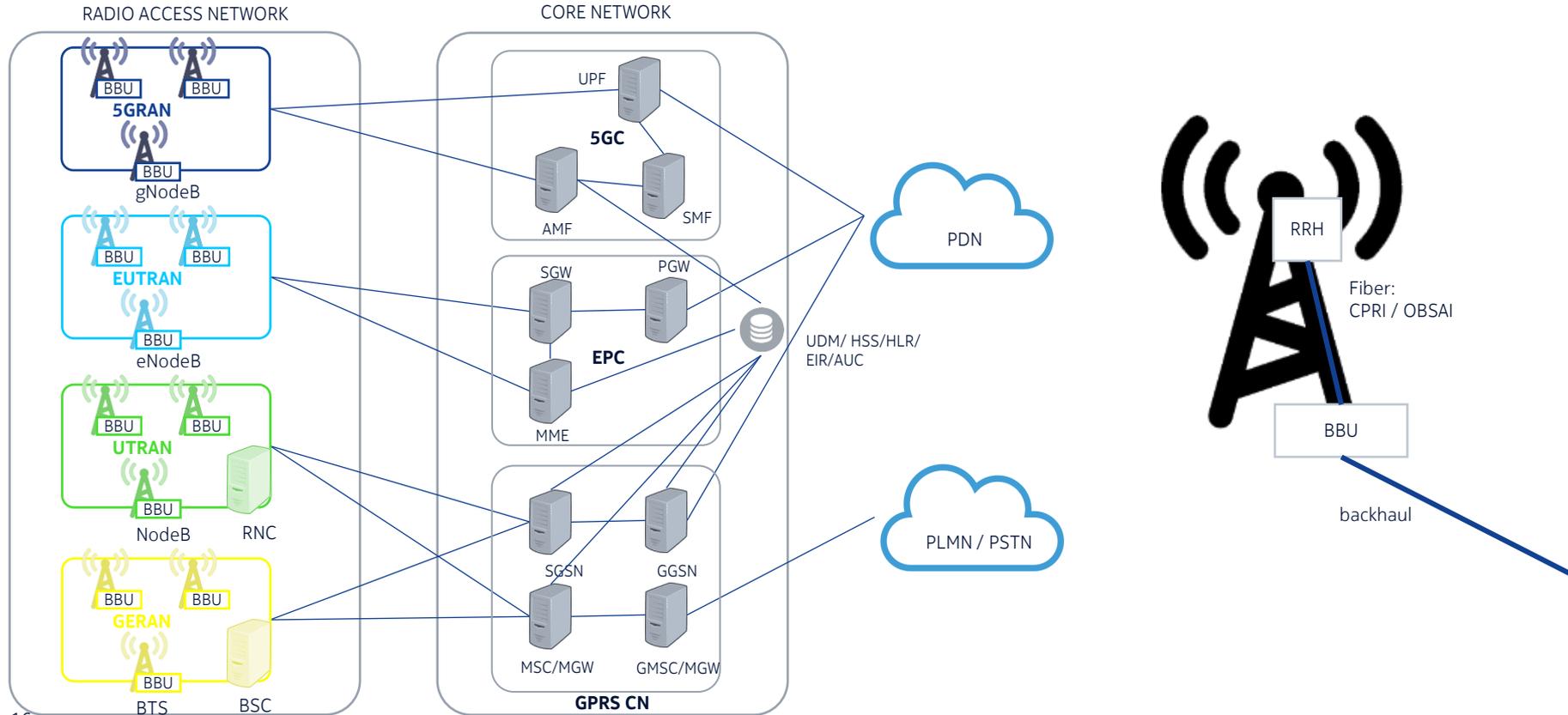
Edge Computing

- El concepto de **edge computing** o cómputo sobre el borde de la red, es la idea de permitir el procesamiento cerca de la red de acceso.
- No solamente la salida a internet la pongo más cerca de las radiobases, sino también pongo el procesamiento final cerca del usuario.
- Por ejemplo, una aplicación de control de drones que corre sobre un datacenter local, en el mismo donde se encuentra la salida a internet de la red de acceso.

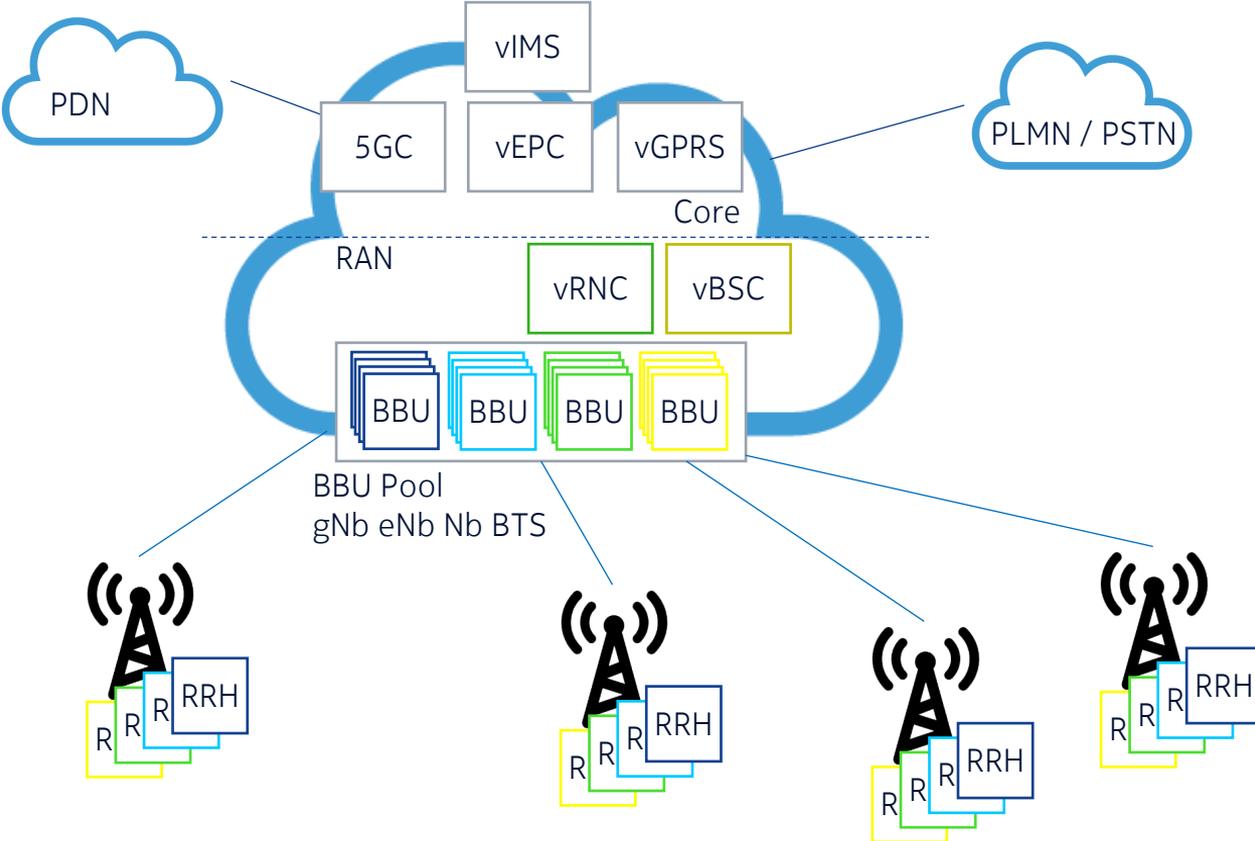


Arquitectura y 5G Core

Arquitectura Clásica



Arquitectura y 5G Core Cloud RAN



Arquitectura y 5G Core

Cloud RAN

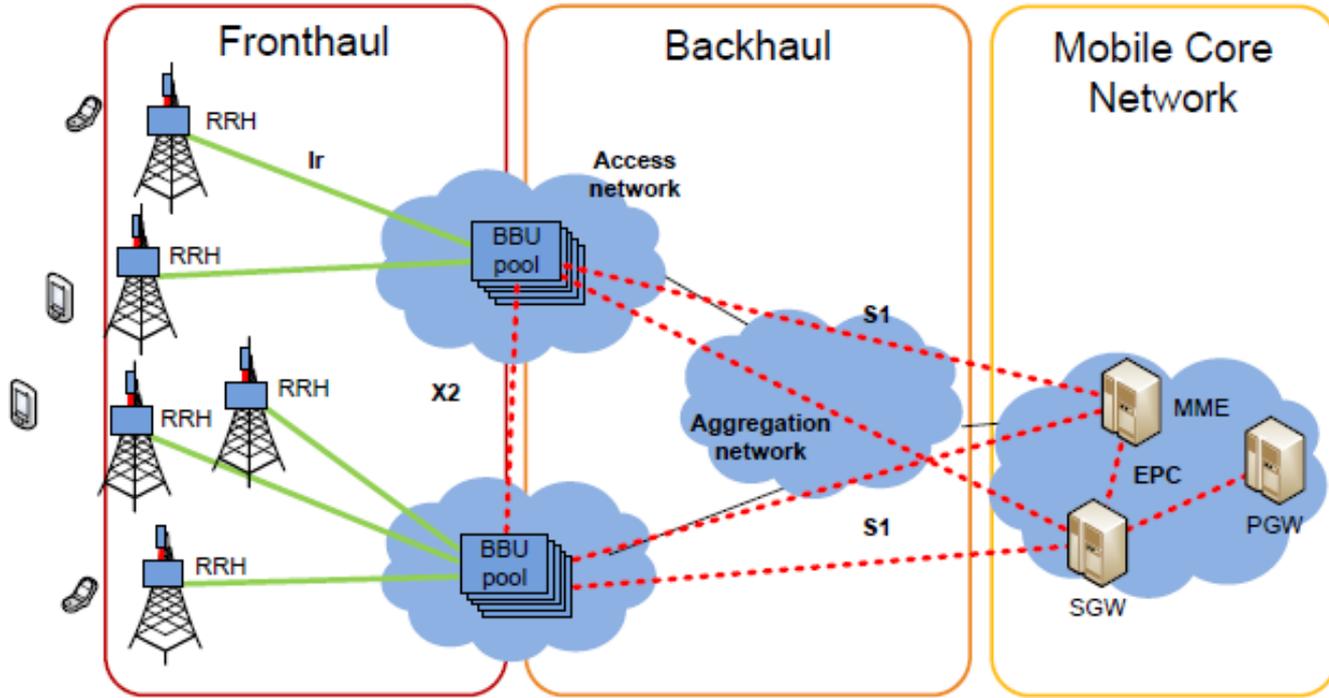
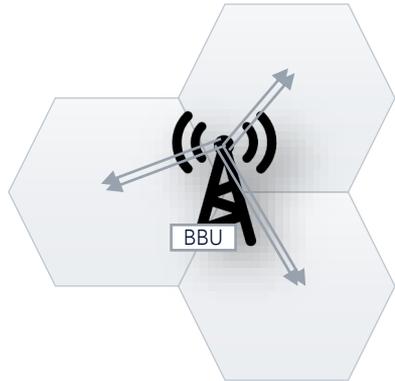


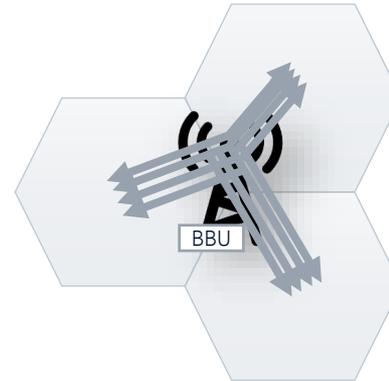
Imagen tomada de Checko, A., Berger, M. S., Kardaras, G., Dittmann, L., & Christiansen, H. L. (2016). Cloud Radio Access Network architecture. Towards 5G mobile networks. Technical University of Denmark (DTU).

Arquitectura y 5G Core

Limitantes del Fronthaul: Ancho de Banda



LTE 3x20MHz
DL MIMO 2x2
~6 Gbps CPRI



5G NR 3x100MHz
16 layer mMIMO 64TRX
~960 Gbps CPRI



LTE-A (3+3)x20MHz
DL MIMO 4x4
~24 Gbps CPRI

La interfaz de aire de 5G puede trabajar en cmWaves o en mmWaves. Grandes anchos de banda → del orden de varias decenas de MHz. Técnicas de beamforming + mMIMO → gran cantidad de TRX.

El ancho de banda en el fronthaul viene en aumento.

¿Cómo mejorar? Bajar ancho de banda:

- I/Q Compression: menos bits por sample.
- Cuantización no lineal.
- Más eficiencia en señal en frecuencia (FFT en modulación OFDM).

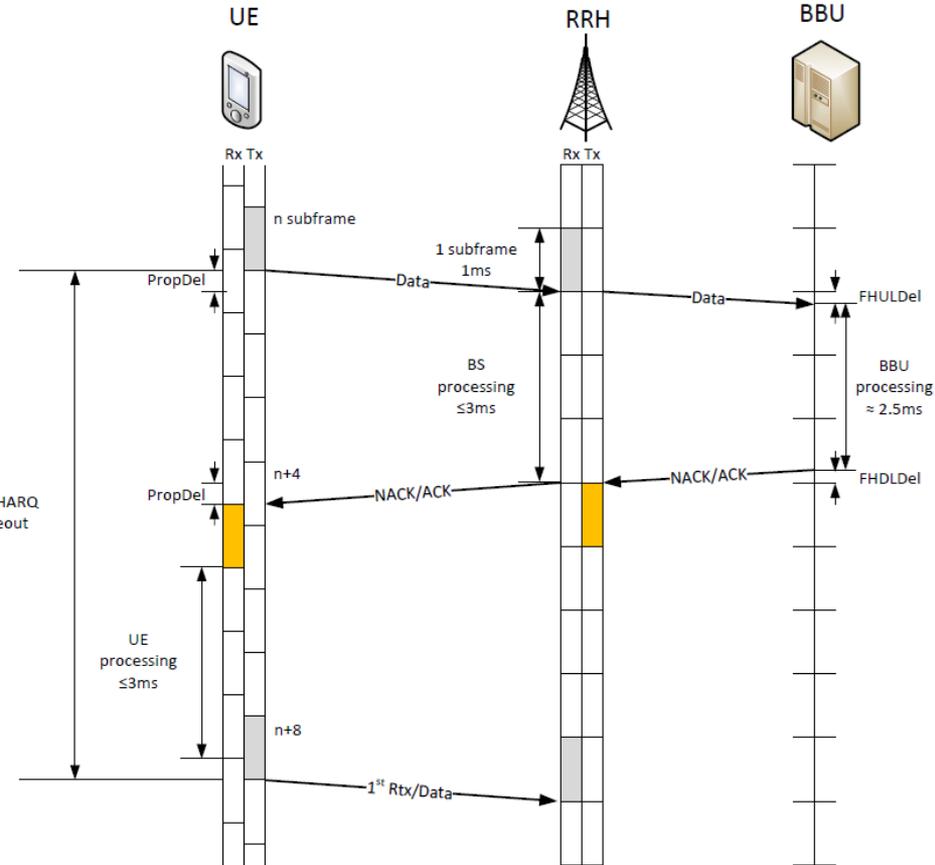
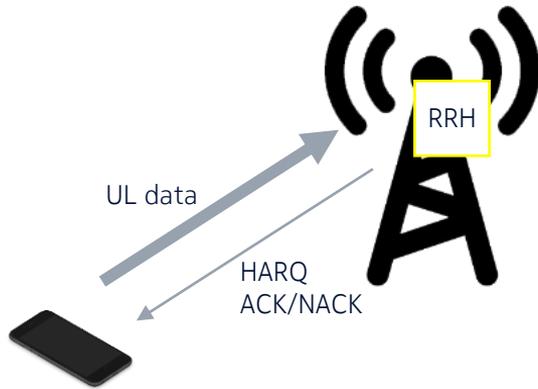
Igual sigue siendo una limitante. → **eCPRI: L1H-L1L Split. Requiere más inteligencia y procesamiento en RRH.**

Arquitectura y 5G Core

Limitantes del Fronthaul: Delay

Imagen tomada de Checko, A., Berger, M. S., Kardaras, G., Dittmann, L., & Christiansen, H. L. (2016). Cloud Radio Access Network architecture. Towards 5G mobile networks. Technical University of Denmark (DTU).

HARQ: Hybrid Automatic Repeat reQuest.
 Antes el ACK/NACK debía venir desde el controlador en 3G (RNC).
 Con introducción de HSPA (3.5G) se agrega HARQ a nivel de capa MAC.
 LTE y NR mantienen el proceso de HARQ a nivel de capa MAC.

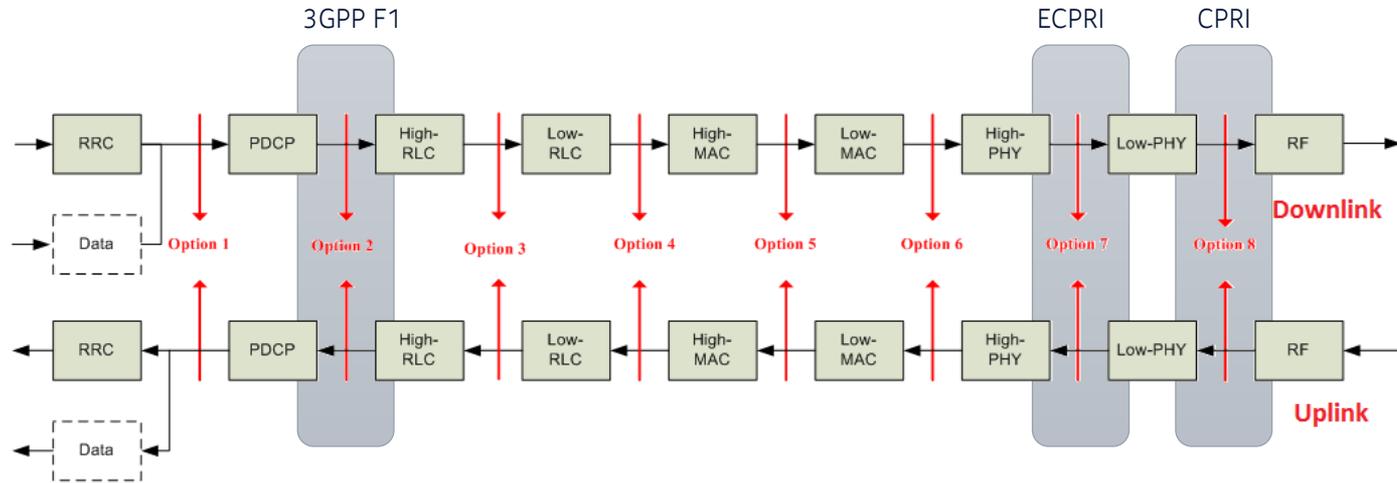


Limite de 8ms en recepción del HARQ lleva a una limitante en el delay entre RRH y BBU.
 → Necesidad de más rápido procesamiento en UE y BBU, o aumento de tiempo para HARQ timeout.

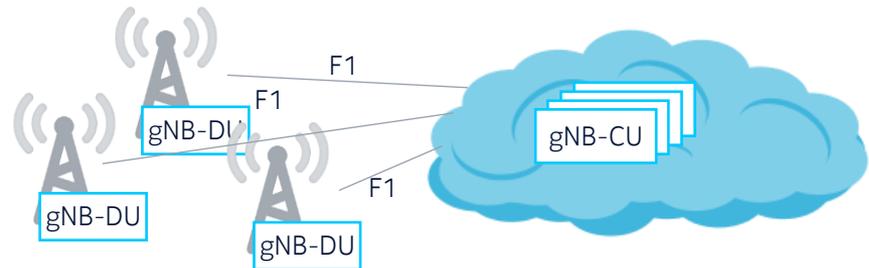
Arquitectura y 5G Core

Split en Protocol Stack

Vistos los problemas y limitantes que tienen los requerimientos del fronthaul, en 3GPP TS 38.401 se define split en las funciones del nodo, tomando el stack de protocolos de LTE como referencia.



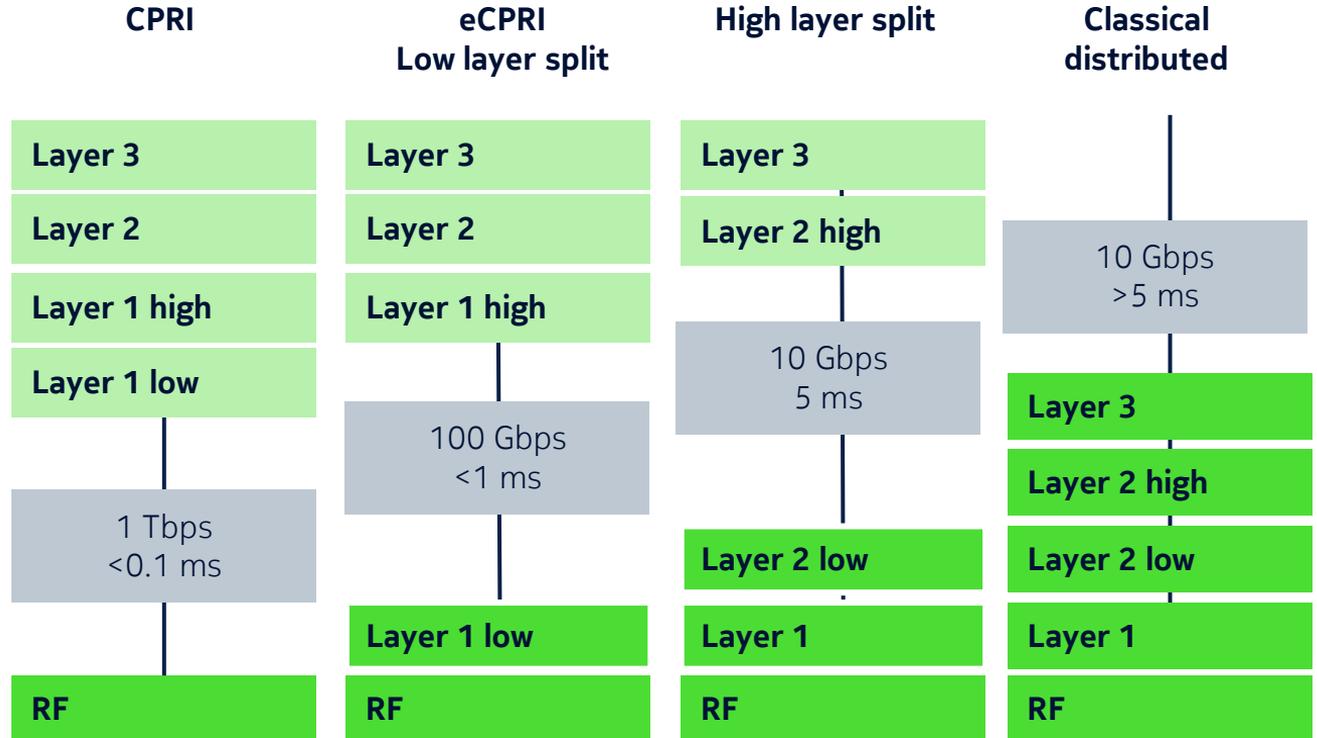
gNB-CU: NodoB en 5G Centralized Unit.
gNB-DU: NodoB en 5G Distributed Unit.
F1: Interfaz entre CU y DU definida en 3GPP TS 38.401.



Arquitectura y 5G Core Fronthaul – Exigencias

Caso de ejemplo:
NR 3x100 MHz.

Al subir en ubicación del split los requerimientos de ancho de banda y delay se flexibilizan.



Arquitectura y 5G Core

Classical Deployment vs. Cloud RAN

Classical deployment

- Radiobases distribuidas.
- Todo el procesamiento relacionado a red de acceso se hace en la radiobase.

Cloud RAN

- Idea: llevar a la nube el procesamiento de la radiobase.
- Puntos radiantes distribuidos + procesamiento en bandabase centralizado.
- Datacenters centralizados con fibra hacia los radios.
- Desafíos de latencia y exigencias de ancho de banda.
- No es único a 5G; también aplica a LTE.
- En el marco de 5G se comienza a hablar más de arquitectura cloud y a estandarizar funcionalidades como interfaz F1.
- **ORAN:** Open RAN. Red de Acceso Abierta. Estandarizar la intercomunicación entre las distintas funciones de una radiobase.
- Las variantes de ORAN y Cloud RAN comienzan a atraer a desarrolladores de SW a participar y competir en oferta de productos, favoreciendo la competencia.

Arquitectura y 5G Core

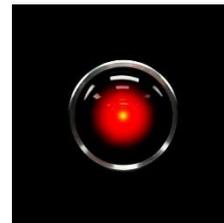
Network Slicing

- Hay un concepto que se incorpora con 5G y se destaca cuando se habla de la nueva tecnología: **Network Slicing**.
- El nombre deriva de la idea de particionar una red de telecomunicaciones en servicios distintos. La idea de varias porciones (slices) de una red (network).
- En el contexto de 5G se busca introducir un nuevo paradigma en el manejo de los servicios de red. La idea es que estas slices se puedan definir a demanda.

Arquitectura y 5G Core

Network Slicing

- Por ejemplo, soy un operador que da servicios de 5G y un cliente quiere poder tener un servicio en las rutas del país que permita la comunicación entre vehículos autónomos, con requerimientos de muy baja latencia.
 - Solución: creo un slice para ello!
- ¿Qué tiene este slice? El holy grail de esto es que automáticamente la red se amolda a los requerimientos del cliente. Por ejemplo, se crean máquinas virtuales en datacenters cercanos a las rutas de interés, que puedan servir de terminación del user plane de este cliente y proveen así de servicio de baja latencia.
 - Se customiza la interfaz de radio para adaptarla a las demandas de baja latencia y se le asigna una prioridad a los usuarios (vehículos) del cliente.
 - Y que la red lo haga por sí sola bajo unos pocos parámetros!
 - ¿Skynet / HAL?



Arquitectura y 5G Core

Network Slicing

¿Qué tan cerca estamos de eso?

- Hoy por hoy, falta bastante. Pero deja de parecer algo utópico.
- Comienza a parecer factible pensar a futuro en una red que se adapta a demanda, optimizada para cada servicio.

5G establece las bases para su desarrollo.

- Flexibilidad en la interfaz de radio. Una interfaz de radio moldeable a distintos tipos de requerimientos: EMBB, URLLC, mMTC.
- Flexibilidad en la definición de radiobases. Cloud RAN y ORAN.
- Flexibilidad en el núcleo de red. Ambiente cloud y CUPS.

Arquitectura y 5G Core

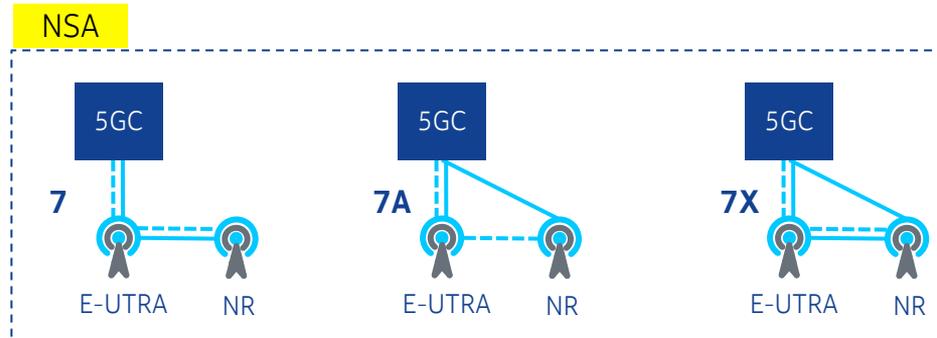
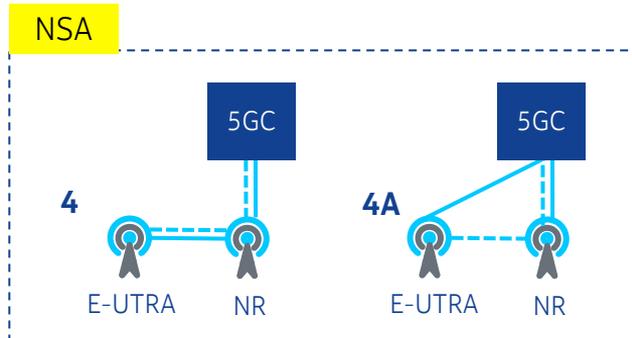
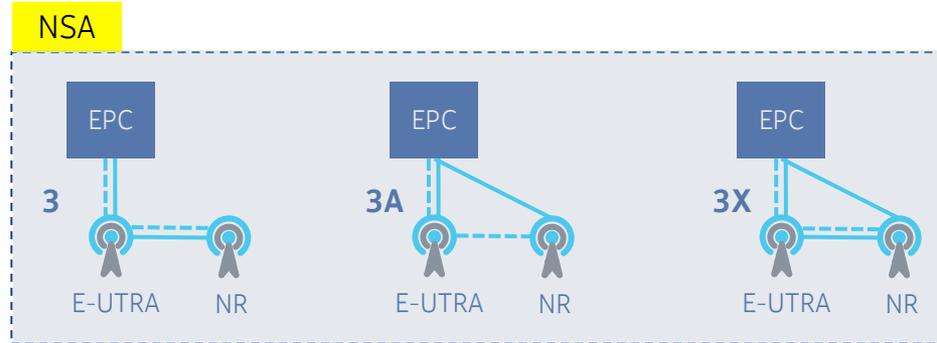
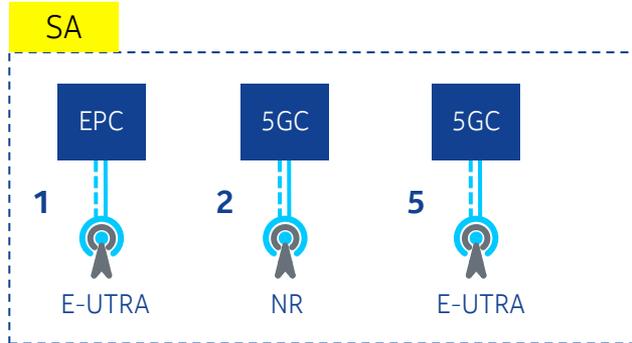
NSA v SA

NSA: Non Stand Alone.

- Refiere a la idea de tener conectividad por más de una tecnología. A diferencia de SA, que sólo se maneja con una única como es tradicional.
- 3GPP define distintas opciones de NSA, variando el core utilizado (5GC o EPC) y variando el tipo de anclaje de la señalización y del tráfico.
- La opción 3 es la que se ha utilizado para agilizar el despliegue de 5G.
 - No necesito 5GC, puedo ya dar servicio 5G con EPC.
 - Mantengo plano de control y tráfico GBR por LTE, con lo cual puedo mantener la conexión en una red con mejor cobertura por estar ya más desplegada.
 - Agrego celda 5G para tráfico nonGBR cuando el móvil mide y ve que hay cobertura.
 - LTE puede ayudar a extender cobertura con bandas FDD en caso que tenga 5G en bandas altas. Particularmente pensando en el tráfico UL que por lo general es más limitado.
 - Más capacidad de tráfico al agregar tráfico nonGBR por LTE y por NR en simultáneo.
- Los primeros despliegues han sido en NSA, pero ya se tienen redes SA en operadores más avanzados (ej. US, Korea).

Arquitectura y 5G Core NSA

Primeros despliegues NSA y reutilizan EPC de LTE. Más adelante se introducirá core 5G y versiones SA.



C-plane - - - -
U-plane ————

Arquitectura y 5G Core

Dual Connectivity

El concepto de Dual-Connectivity refiere a estar conectado a dos rbs en simultáneo.

- **MCG:** Master Cell Group.
- **SCG:** Secondary Cell Group.
- **ENDC: EUTRA – NR Dual C**onnectivity. Va de la mano con el servicio NSA. ENDC refiere a conectividad dual, LTE+5G. LTE corresponde al MCG y NR al SCG.
- **NRDC: NR Dual C**onnectivity. Estar conectado a dos rbs 5G. Por ejemplo una con servicio en lowband o midband que también lleve la señalización, mientras que se agrega otro gNB para tráfico nonGBR.
- **Pcell:** Celda primaria dentro del MCG.
- **PScell:** Celda primaria dentro del SCG.

Arquitectura y 5G Core

Combinaciones de Bandas

No todos los móviles soportan cualquier combinación de bandas en ENDC.

- Un móvil puede soportar 4 CCs en LTE CA pero sólo 3 si está con ENDC.
- También dependerá de cada móvil qué banda soporta en LTE para anclaje. Puede soportar muchas bandas de LTE pero sólo puede levantar ENDC en una sólo.
- Depende de cada móvil, en hardware y firmware, las combinaciones y opciones de ancla LTE que puede soportar.
- También depende para cada móvil de cuál es la banda NR que se quiere utilizar.

Ejemplo de combinación ENDC:
3CC LTE CA b1+b3+b28 + 2CC NR CA n7+n78.
b28 Pcell en LTE, n7 PScell en NR.

```
bandList {
  eutra : {
    bandEUTRA 1,
    ca-BandwidthClassDL-EUTRA a
  },
  eutra : {
    bandEUTRA 3,
    ca-BandwidthClassDL-EUTRA a
  },
  eutra : {
    bandEUTRA 28,
    ca-BandwidthClassDL-EUTRA a,
    ca-BandwidthClassUL-EUTRA a
  },
  nr : {
    bandNR 7,
    ca-BandwidthClassDL-NR a,
    ca-BandwidthClassUL-NR a
  },
  nr : {
    bandNR 78,
    ca-BandwidthClassDL-NR a
  }
},
```

Arquitectura y 5G Core

Stand Alone

- Ya se ha empezado a utilizar SA en redes más avanzadas. Ej. US, Korea.
- El uso de SA permite mejor servicio particularmente en latencia, además de ir paulatinamente migrando los servicios y la red a 5G.
- También permite el manejo de tráfico GBR por 5G. Por ej. VoNR, Voice over NR.
- Además no depende de cobertura LTE.
 - Si LTE tiene más cobertura no es tan problemático.
 - Pero por ej. TMO en US tiene banda n71 en 600 MHz que da una cobertura más extensa que LTE... no se aprovecha al máximo si depende de que haya un LTE para anclaje.
- Resulta muy útil contar con bandas bajas para tener mejor cobertura en SA. En NSA LTE me ayudaba a extender el servicio.
- RRC Inactive: en 5G se define nuevo estado del RRC con el objetivo de reducir latencia en el establecimiento. Sólo aplica a SA.

Introducción

Arquitectura y
5G Core

Interfaz de Radio

Massive MIMO +
Beamforming

Uso de bandas
en 5G

Interfaz de Radio

Aspectos generales

- La interfaz de radio en NR en muchos aspectos se asemeja a la de LTE. Podemos tomar lo que sabemos de LTE como referencia.
- Mismos canales que en LTE con en general mismas funcionalidades:
 - DL: PDSCH PDCCH PBCH PSS SSS.
 - UL: PUSCH PUCCH PRACH.
- Por sobre ello veremos:
 - Multiple Sub-Carrier Spacing.
 - Frame Structure y Sync.
 - Señales de Referencia y medidas de los móviles.
 - Broadcast y RACH.
 - Channel Coding.
 - Dynamic Shared Spectrum (DSS).
- Massive MIMO y Beamforming, por la relevancia que tiene, lleva su propio capítulo dedicado.

Interfaz de Radio

Multiple Sub-Carrier Spacing

La interfaz de radio OFDM en LTE tenía un sub-carrier spacing (SCS, Δf) fijo en 15 kHz.
En 5G el sub-carrier spacing es variable.

SCS más bajo:

- Tiempo de símbolo más largo.
- TTIs más largos.
- Contraproducente para baja latencia.
- Menos vulnerable a ISI al ser $T_s \gg \text{delay_spread}$.
- Más PRBs para un mismo BW (FFT más grande).

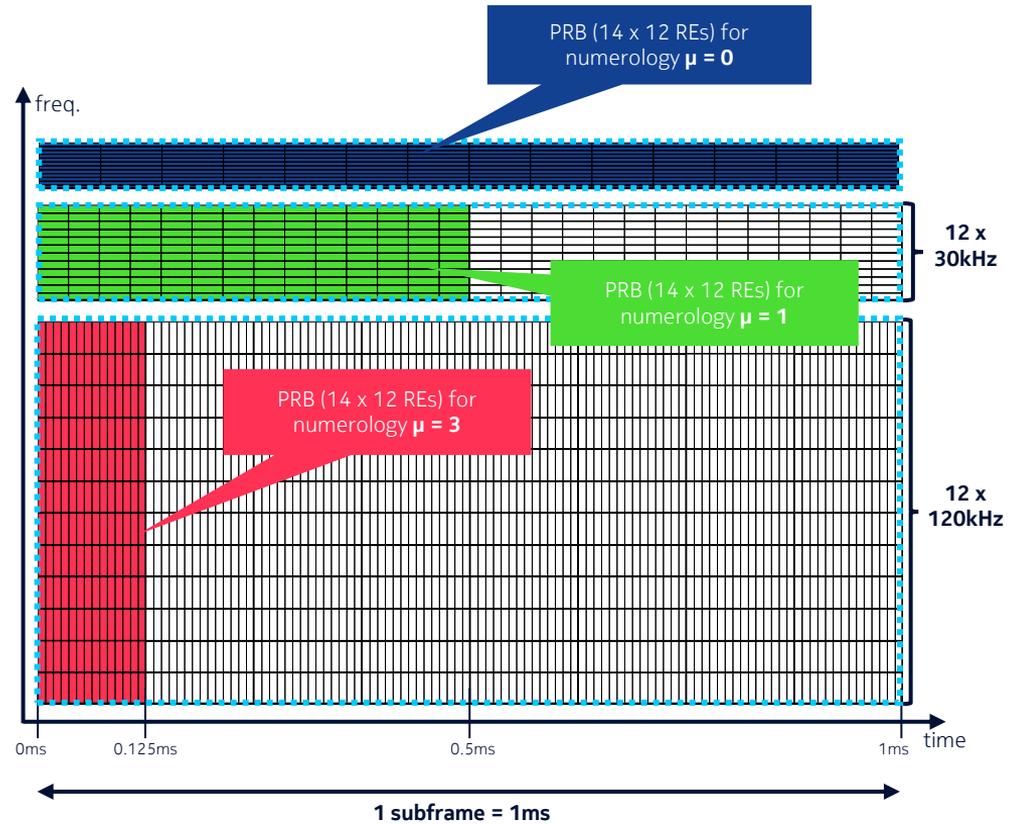
SCS más alto

- Tiempos de símbolo más cortos.
- TTIs más cortos.
- Puede permitir más baja latencia.
- Más vulnerable a ISI al ser T_s más comparable al delay spread.
- Menos PRBs para un mismo BW (FFT más chica).

Interfaz de Radio

Multiple Sub-Carrier Spacing

- μ : sub-carrier spacing configuration.
 $\Delta f = 2^\mu \times 15 \text{ kHz}$.
- 1 Slot = 14 symbols OFDM.
Slot duration = $1 \text{ ms} / 2^\mu$.
- La definición de PRB es la misma:
 - 14 symbols OFDM x 12 SCs.
 - 168 REs por PRB.
 - Cambia duración en tiempo y largo en frecuencia.



Interfaz de Radio

Multiple Sub-Carrier Spacing

- μ : sub-carrier spacing configuration. $\Delta f = 2^\mu \times 15$ kHz.
- 1 Slot = 14 symbols OFDM. Slot duration = $1 \text{ ms} / 2^\mu$.
- La definición de PRB es la misma: 14 symbols OFDM x 12 SCs.

μ	Δf	PRB	Sym Duration	# slots/sf	Slot dur.
0	15 kHz	180 kHz	66.67 μs	1	1 ms
1	30 kHz	360 kHz	33.33 μs	2	500 μs
2	60 kHz	720 kHz	16.67 μs	4	250 μs
3	120 kHz	1.44 MHz	8.33 μs	8	125 μs
4	240 kHz	2.88 MHz	4.17 μs	16	62.5 μs

Interfaz de Radio

Bandwidth

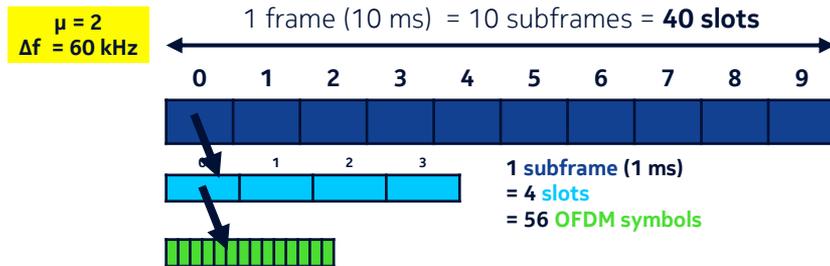
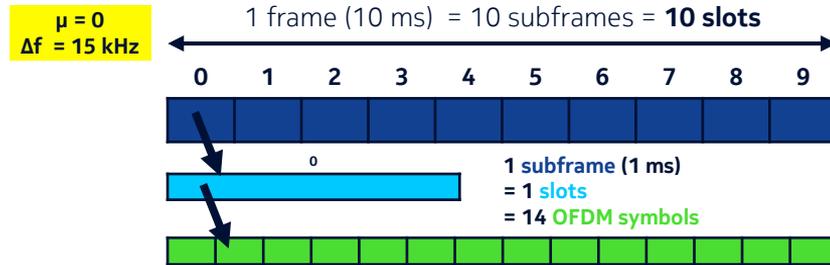
- Hasta 400 MHz de bandwidth con 120 kHz o 240 kHz de SCS.
- Permite configurar anchos de banda mayores que en LTE.
- Rango de hasta 275 PRBs.

μ	Δf	# PRB min	# PRB máx	BW min	BW máx
0	15 kHz	24	275	4.32 MHz	49.5 MHz
1	30 kHz	24	275	8.64 MHz	99 MHz
2	60 kHz	24	275	17.28 MHz	198 MHz
3	120 kHz	24	138	69.12 MHz	397.44 MHz
4	240 kHz	24	69	138.24 MHz	397.44 MHz

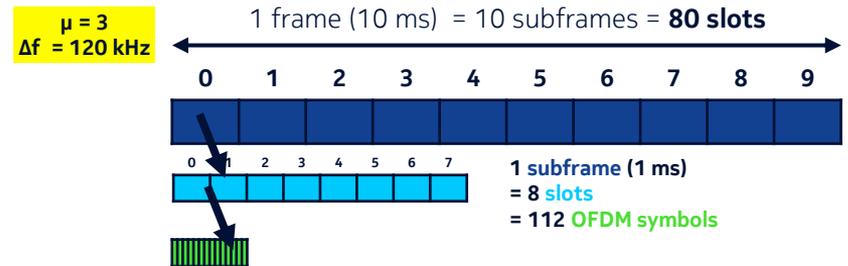
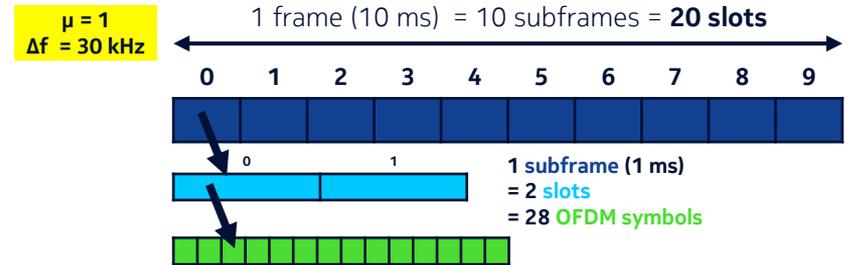
Interfaz de Radio

Frame Structure

- 1 frame = 10 ms.
- 10 subframes (1 ms) en 1 frame.
- 2^μ slots en 1 frame.



- TTI (Time Transmission Interval) = 1 slot.
- Mayor SCS, menor slot duration, menor TTI.
- Mini-Slots: opción de disminuir TTI asignando slots de menor cantidad de symbols.

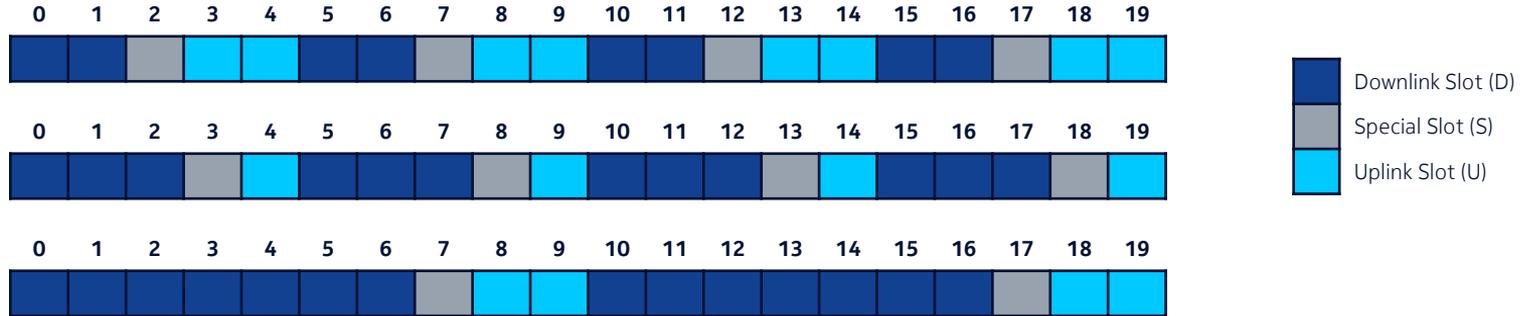


Interfaz de Radio

Frame Structure

Así como en TD-LTE se tenían distintas configuraciones de slots dentro de un frame, se mantiene idea general en 5G para bandas TDD.

Ejemplos:



- Los Special Slots sirven de transición entre el DL y el UL con guardas entre ambos.
- Las guardas permiten evitar interferencia entre radiobases vecinas.
- El estándar permite flexibilidad de definición de reparto de symbols entre DL y UL en cada slot.
- Llamarle D, S, U, en realidad es una forma de hacer referencia al uso predominante, pero la configuración de slots podría, en principio, variar.

Interfaz de Radio

Frame Structure

Se definen distintas opciones de formatos por Slot. Slots D tendrán mayormente symbols downlink... pero no necesariamente deben serlo todos. Flexibilidad.

Format	Symbol number in a slot													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
1	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
...														
26	D	D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	U	U	U
27	D	D	D	X	X	X	X	X	X	X	X	U	U	U
28	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	X	U
29	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	X	X	U
30	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	X	X	X	U
31	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	X	U	U
32	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	X	X	U	U
33	D	D	D	D	D	D	D	D	D	X	X	X	U	U
34	D	X	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
35	D	D	X	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
36	D	D	D	X	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
...														
53	D	D	X	X	X	X	U	D	D	X	X	X	X	U
54	X	X	X	X	X	X	X	D	D	D	D	D	D	D
55	D	D	X	X	X	U	U	D	D	D	D	D	D	D
56 - 255	Reserved													

Interfaz de Radio

Sincronismo en TDD

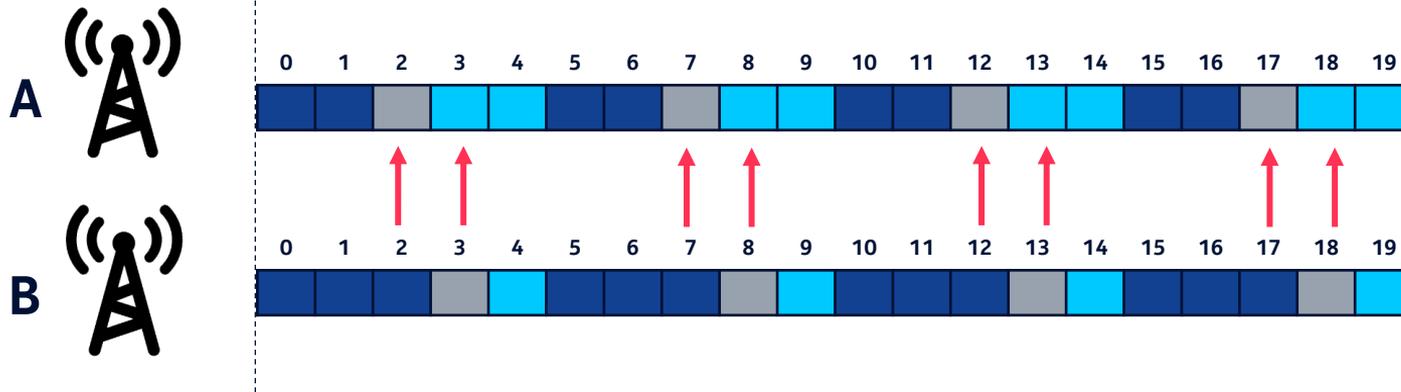
En sistemas TDD es importante el sincronismo y utilizar el mismo frame structure.

- Esto aplica a NR pero también a TD-LTE.
- Si una RBS irradia en DL mientras su vecina está escuchando en UL, la vecina se verá interferida por el DL de la RBS.
- Esto es importante entre celdas de la misma banda, **por más que estén en portadoras distintas**. Si bien los radios buscan restringirse a su ancho de banda en que deben irradiar, la potencia por fuera no es nula.
- Deben asegurarse entre operadores que irradian en la misma zona y en la misma banda, un mismo uso de frame structure. Incluso si es entre tecnologías distintas (ejemplo, TD-LTE con WiMax o con NR).
- El uso de guardas de tiempo en switch de D a U permiten considerar distancias entre las RBS y entre UE y RBS.
- Más énfasis en caso de interferencia de D sobre U.
- En switch de U a D puede suceder que móviles que están enviando U en una banda afecten móviles cercanos que están recibiendo D en otra. Pero, el Timing Advance implica que los móviles para enviar UL deben comenzar a enviarlo antes del comienzo del U en el frame; esto ya implica que hay una guarda en los hechos.

Interfaz de Radio

Sincronismo en TDD

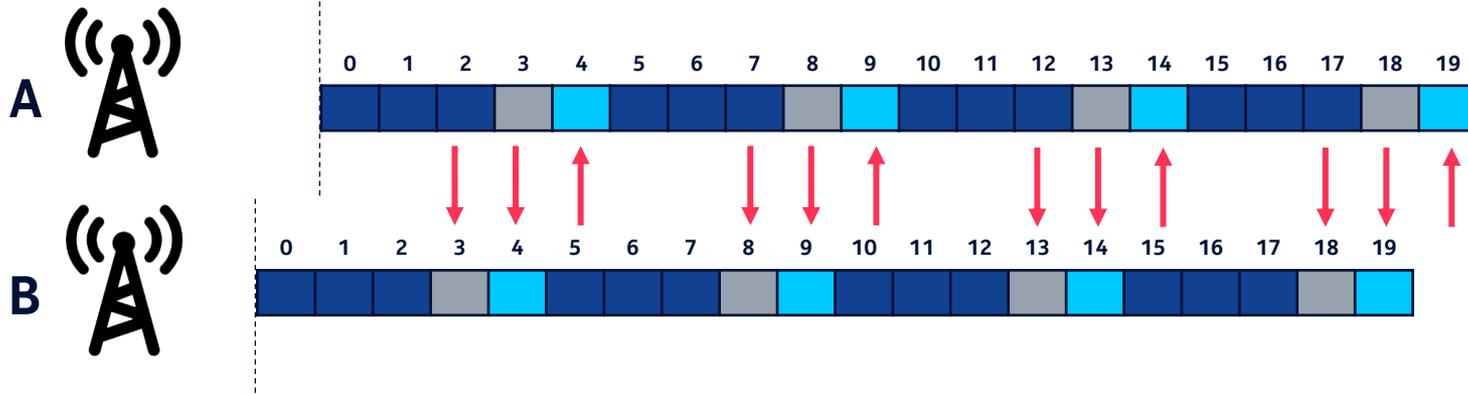
Interferencia por distinto frame structure:



Interfaz de Radio

Sincronismo en TDD

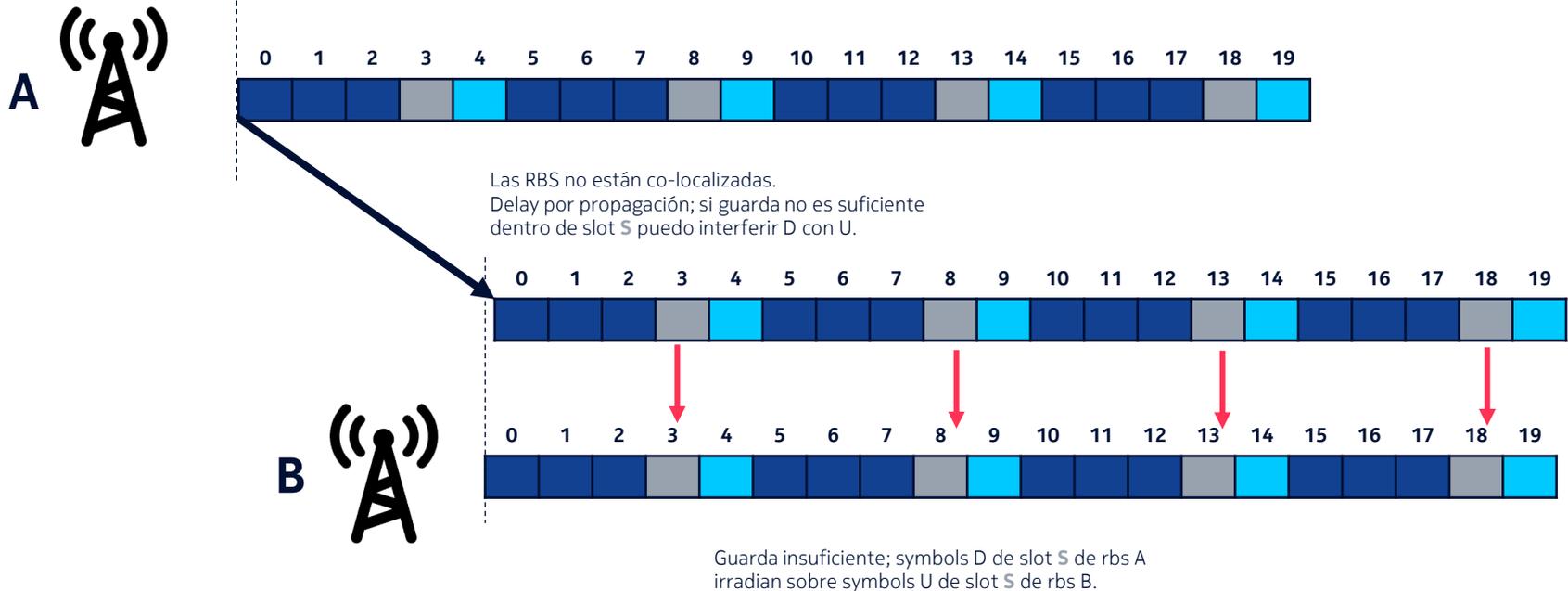
Interferencia por distinto sync:



Interfaz de Radio

Sincronismo en TDD

Interferencia por distinto por guarda insuficiente:



Interfaz de Radio

Señales de Sincronismo

PSS

- **P**rietary **S**ynchronization **S**ignal.
- Lleva valor de Physical Layer Identity (0 .. 2).
- Una de 3 posibles secuencias complejas Zadoff Chu ya conocidas.

SSS

- **S**econdary **S**ynchronization **S**ignal.
- Lleva valor de Physical Layer Cell Identity Group (0 .. 335).
- Una de 336 secuencias binarias predefinidas.

PCI: Physical Cell Identifier

- Identificador de la celda a nivel de capa física.
- $PCI = 3 \times SSS + PSS$
- No pueden haber dos PCI iguales entre vecinas. → PCI planning. PCI collision (1er anillo) y PCI confusion (2do anillo).

Interfaz de Radio

Señales de Referencia

CSI-RS

- **C**hannel **S**tate **I**ndicator **R**eference **S**ignal.
- Se utiliza esta señal como referencia para indicar status del estado del canal. Por ejemplo, referencia para definición de PMI.

DMRS

- **D**e**M**odulation **R**eference **S**ignal.
- Señal de referencia que ocupa 1 symbol OFDM (o más) en los PRBs asignados a un canal.
- Front-Loaded DMRS. Se utiliza uno de los primeros symbols OFDM (ej #2 o #3). La idea es que el decoder no tiene que esperar a recibir todo el PRB para empezar el decoding.

PTRS

- **P**hase **T**racking **R**eference **S**ignal.
- Ocupa una sub-carrier en algunos de los PRBs asignados al UE.
- Al ocupar una sc se permite dar seguimiento al canal a lo largo del tiempo.

A diferencia de LTE que teníamos la RS para referencia en demodulación y también de referencia para estado del canal, en 5G **no** hay una señal de referencia persistente que se envía en todos los slots.

Interfaz de Radio

Medidas del UE

A diferencia de LTE:

- No hay señal de referencia persistente para medidas.
- Para referencia en movilidad se utiliza señal de sync. SS-RSRP, SS-RSRQ, SS-SINR. Muchas veces no se especifica el “SS-” asociado a “Synchronization Signal”.

RSRP [dBm]

- **R**eference **S**ignal **R**eceived **P**ower.
- Potencia promedio en Rx de los Reference Signals en el bandwidth.

SINR [dB]

- Signal to Interference Noise Ratio.
- Medida de calidad del canal de radio.

RSRQ [dB]

- **R**eference **S**ignal **R**eceived **Q**uality.
- $RSRQ = N \times RSRP / RSSI$
- RSSI/N: Potencia promedio por PRB. -
→ Se puede entender como ratio promedio entre PRx RS y PRx RB.
- RSSI medido en symbols con señales de sync.
- Puede reflejar carga... pero no tanto como en LTE, pues es sólo evaluado durante señales de sync.

Interfaz de Radio

Sync & Broadcast

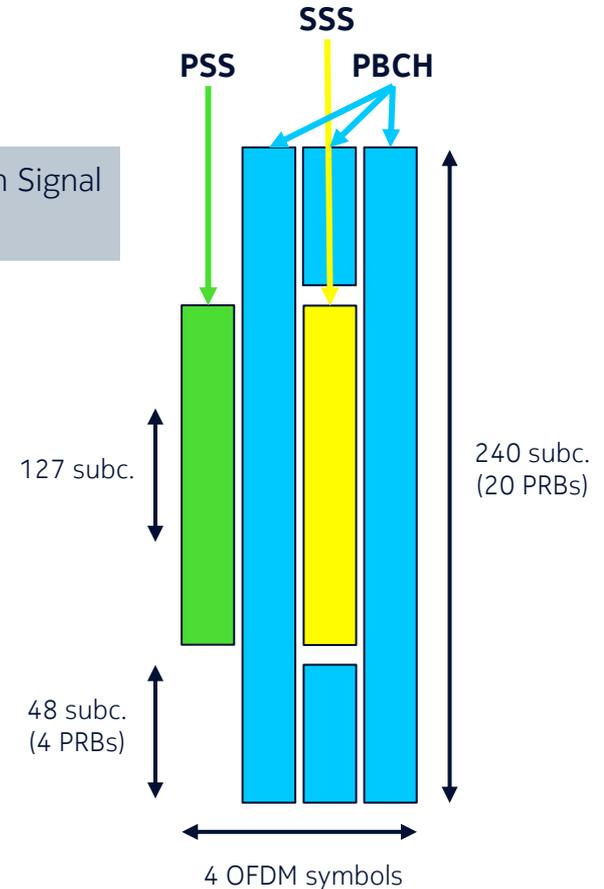
SSB: Synchronization Signal Block.

- Tiene una duración de 4 symbols OFDM.
- Periodicidad en general de 20ms, pero puede modificarse.
- Ocupa 240 sc, 20 PRBs en frecuencia.
- Puede ubicarse libremente dentro del ancho de banda; no necesariamente en el medio como LTE.

SS-Burst

- Conjunto de SSBs enviados en ventana de 5ms.
- Ejemplo: varios SSB, uno por beam, formando un SS-Burst.
- Hasta 4 SSBs si $f < 3$ GHz.
- Hasta 8 SSBs si $3 \text{ GHz} < f < 6$ GHz.
- Hasta 64 SSBs si $f > 6$ GHz.

Synchronization Signal Block (SSB)



Interfaz de Radio

RACH

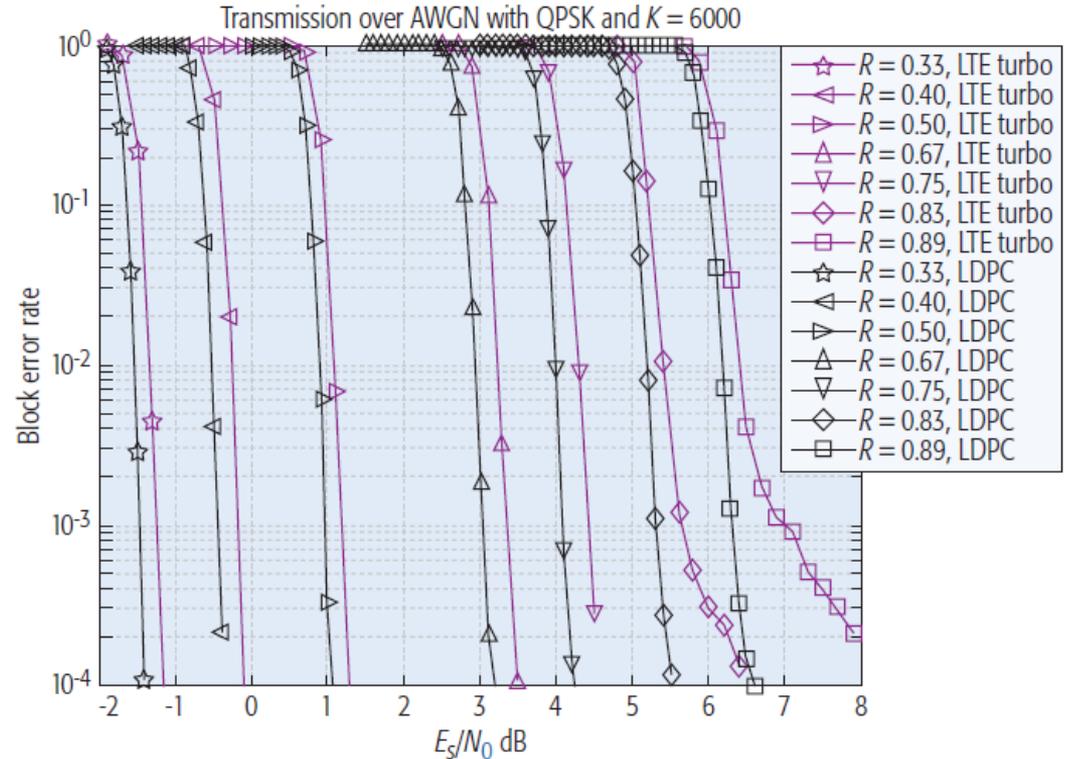
- RACH sigue mismos lineamientos que LTE.
- Esto es: uso de preambles, secuencia Zadoff-Chu con propiedades de CAZAC y corrimiento cíclico.
- Agrega nuevos formatos de tipo short RACH. En TD-LTE teníamos un short-RACH. Estos son del mismo tipo, pero con más variedad.
- En caso de usar SSBs en set, el UE debe saber según cuál detecta, qué instancia de RACH utilizar. Cada SSB que envió debe tener una ocasión de RACH correspondiente.

Interfaz de Radio

Channel Coding

Nuevas técnicas de codificación del canal:

- Canales de datos:
 - PDSCH, PUSCH.
 - Códigos **LDPC**: Low Density Parity Checks.
 - Más específicamente, QC-LDPC. Quasi-Cyclic.
 - Mejor desempeño que códigos turbo hacia límite de Shannon.
 - Decoding más eficiente y escalable hacia mayores tamaños de bloque.
- Canales de control:
 - Códigos **polares**.
 - Mejores propiedades en floor error rate. Puedo alcanzar tasas de errores más bajas que con LPDC.
 - Mejor desempeño para tasas de errores muy bajas.



Interfaz de Radio

Carrier Aggregation

- Al igual que en LTE, en NR se utiliza Carrier Aggregation.
- En ENDC hasta 2 CCs en FR1 y hasta 8 CCs en FR2.
- En SA se pueden tener combinaciones de más CCs en NR.
- Además de permitir más ancho de banda para el usuario, es importante en despliegue SA para tener cobertura de lowband + midband, permitiendo que la lowband pueda robustecer el tráfico UL.

Interfaz de Radio

Dynamic Spectrum Sharing

- Quiero lanzar mi red 5G!! Pero no tengo espectro para 5G...
- ¿Y si uso el que ya tengo de LTE FDD e irradio NR en alguna de esas bandas?
- Pero
 - En esas bandas el servicio que puedo dar no es muy distinto al de LTE.
 - Pierdo capacidad tráfico en LTE.
- Entonces para qué hacerlo?
 - Mostrar el logo 5G si no tengo bandas o si tengo bandas altas en una cobertura más amplia.
 - Motivar usuarios a comprar móviles 5G?
- También Puede ser buena alternativa para extender cobertura UL NR en escenario de Carrier Aggregation.
 - En EN-DC LTE contribuye al UL y ayuda a extender cobertura. Pero el PUCCH con HARQ y CSI de NR se envía por el UL de NR.
 - En escenario SA tener una banda baja permite mejorar la cobertura.

Interfaz de Radio

Dynamic Spectrum Sharing

Pero ya que voy a usar 5G en bandas de LTE FDD al menos la portadora en lugar de pasarla completamente a NR, la comparto dinámicamente y no pierdo completamente la capacidad de LTE.

DSS: Dynamic Spectrum Sharing.

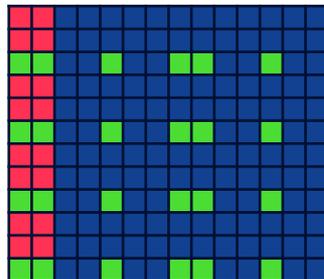
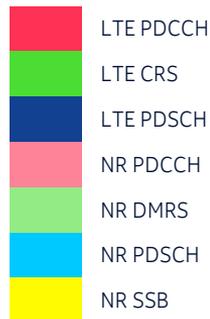
- La idea es compartir el espectro entre ambas tecnologías.
- En DL TTIs van sin tráfico en LTE y envío NR en su lugar.
- En UL reparto zonas de espectro entre LTE y NR. Deben ser zonas contiguas por SC-FDM en LTE. También debo dejar espacio en extremos para LTE PUCCH.
- Contras:
 - Uso ineficiente del espectro. *Mucho* más overhead. Alrededor de 20+% de OH respecto a NR “puro”.
 - Le saco menos recursos a LTE que si dedicara toda la portadora a NR... pero igual se los estoy sacando. Privilegio de unos pocos que tienen móviles más nuevos con NR en detrimento de muchos con equipos LTE?
 - Interferencia inter-celda DL. Falta de cancelación en los terminales del LTE CRS vecino sobre NR PDSCH. Ayuda reparto static+sync, pero pierde un poco la gracia del “dynamic”.

Interfaz de Radio

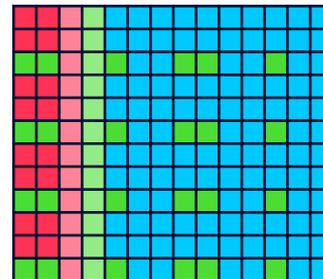
Dynamic Spectrum Sharing

Cómo hago el reparto de subframes en DL?

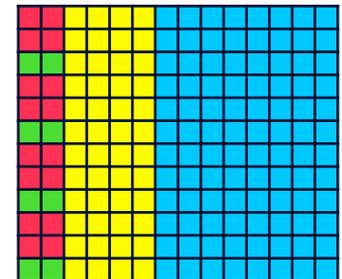
- Fácil: defino algunos para LTE y otros para NR de acuerdo a la demanda que tenga cada tecnología.
- Pero... LTE CRS (Cell-specific Reference Signal) se envía en forma persistente en LTE, en todos los subframes. Tengo dos opciones:
 - CRS rate-matching o puncturing: en los subframes con NR no envío PDSCH en los REs de la CRS.
 - No puedo hacerlo con el broadcast que requiere 4 symbols OFDM y 20 PRBs. Utilizo para ello los subframes MBSFN: Multicast-Broadcast Single Frequency Network. Originalmente usado en LTE para broadcast o multicast; no enviar la misma información para cada usuario por separado, sino a todos los usuarios el mismo contenido en los mismos recursos. El MBSFN sólo lleva LTE CRS en los 2 primeros symbols OFDM, tengo espacio para el broadcast.



PRB con tráfico de LTE



PRB con tráfico de NR



Subframe para SSB NR

Introducción

Arquitectura e Interfaces de Red 5G

Interfaz de Radio

Massive MIMO +
Beamforming

Uso de bandas en 5G

Massive MIMO + Beamforming

Motivación

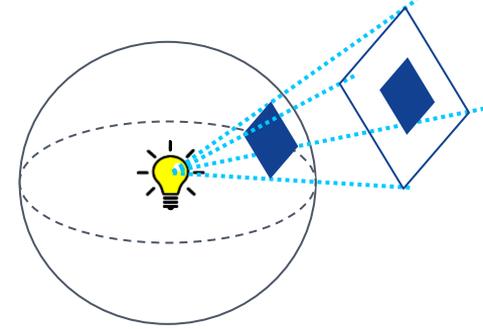
Problema:

El área efectiva de la antena es proporcional a la longitud de onda.

Friis: pathloss aumenta con la frecuencia.

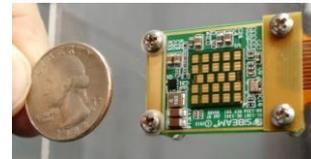
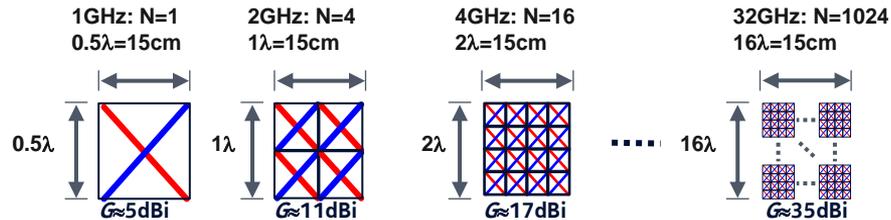
→ Al trabajar en frecuencias más altas el radio de cobertura decrece.

$$P_r = G_r G_t P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2}$$



Solución:

Aumentar # de antenna elements que irradian por polarización.

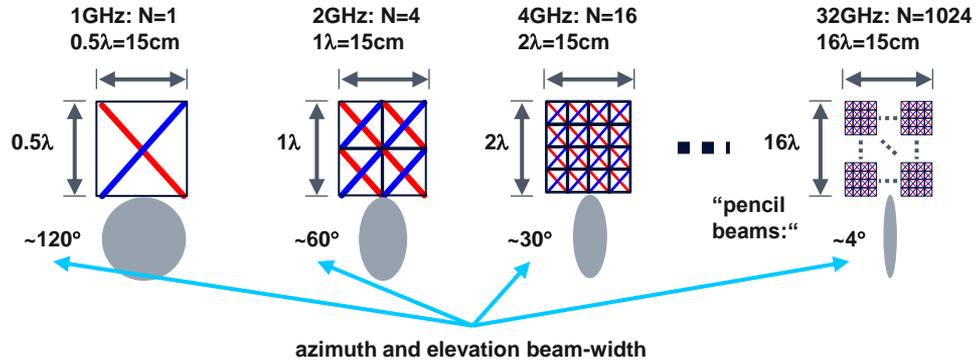


Massive MIMO + Beamforming

Motivación

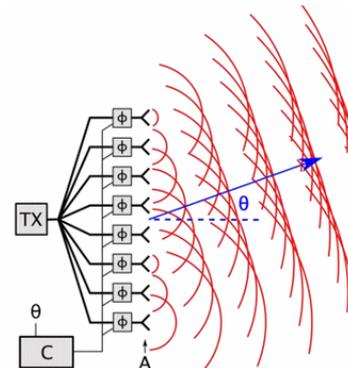
Al aumentar la cantidad de antena elements, más ganancia pero con menor beamwidth.

El beam ya no cubre la totalidad del sector!



Beamforming:

Varios antenna elements, cambiando pesos en cada uno e introduciendo desfase en la señal pueden hacer un steering del beam.



Massive MIMO + Beamforming

Ventajas

En lugar de transmitir a todo el sector puedo enfocar la onda electromagnética en dirección al usuario.

Más capacidad!

Al enfocar la onda una dirección, puedo enviar al mismo tiempo en el mismo sector ondas distintas a usuarios distintos.

MU-MIMO: Multi User MIMO.

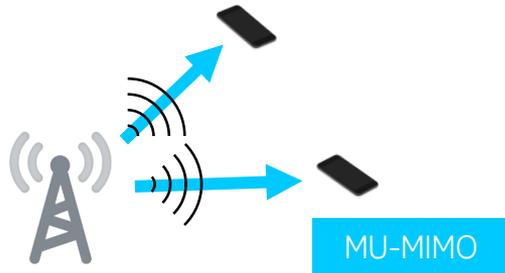
Mejor cobertura!

Al enfocar la potencia en una dirección y no hacia donde no la necesito.

Trabajar en bandas más altas es más factible.

Menos interferencia!

Evito irradiar hacia usuarios a quienes no estoy sirviendo.



Seamos justos con LTE. También puede incorporar massive MIMO...

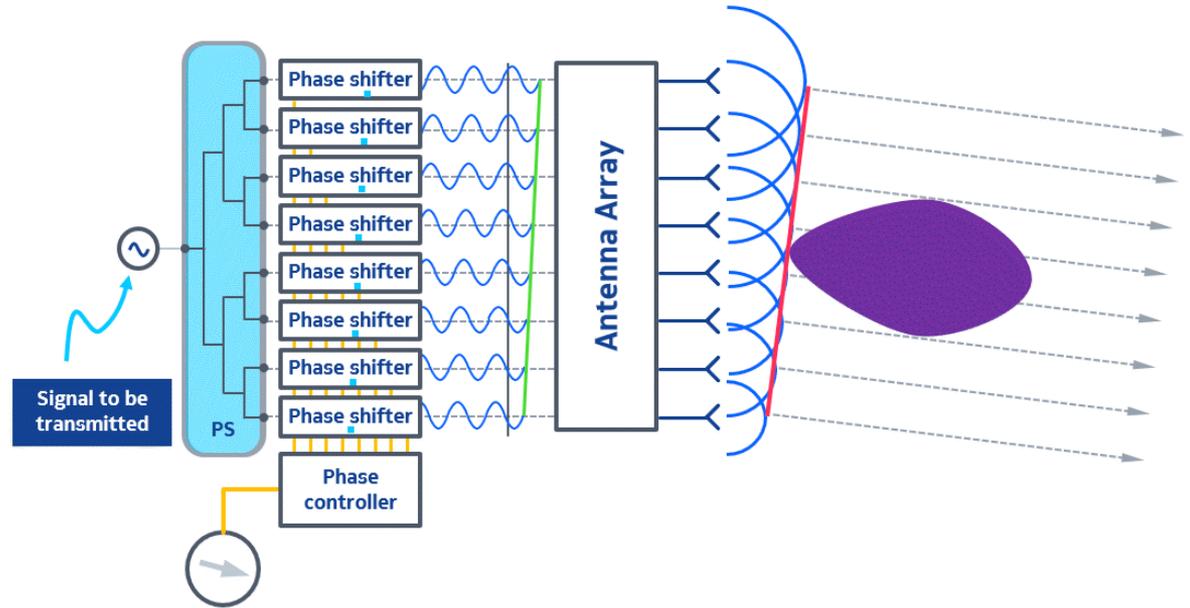
Pero 5G está desde sus comienzos pensado en usarlo e incorpora bandas que lo pueden explotar aún más.

Massive MIMO + Beamforming

Implementación

Beamforming funciona utilizando muchos transmisores (TRX) y Antenna Elements (AE) trabajando en conjunto para formar una onda.

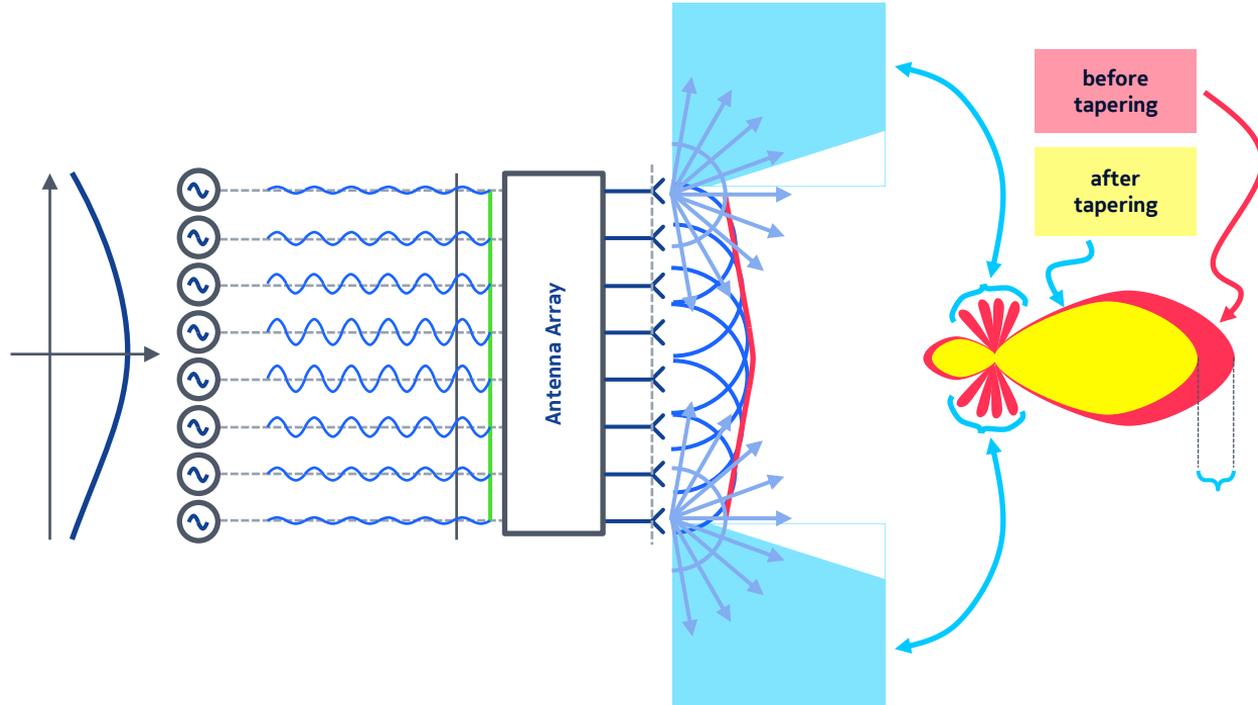
Enviando la señal a distintas fases y con distintos pesos puedo ajustar la dirección del frente de ondas.



Massive MIMO + Beamforming

Tapering

También variar la amplitud ayuda a suprimir side lobes



Massive MIMO + Beamforming

AE y TRX

TRX: Transceiver.

- Transmisores / receptores de la onda electromagnética. Acumulan la energía que llega de uno o más AEs.
- En cada TRX puede controlar la señal con cambios de fase / amplitud para generar beams.
- + TRX = + capabilities para steering, + consumo de energía.

AE: Antenna Element.

- Son las antenas que utilizan los TRX. Cada TRX puede estar asociado a uno o más AEs.
- + AEs = mayor cobertura al permitir más ganancia.

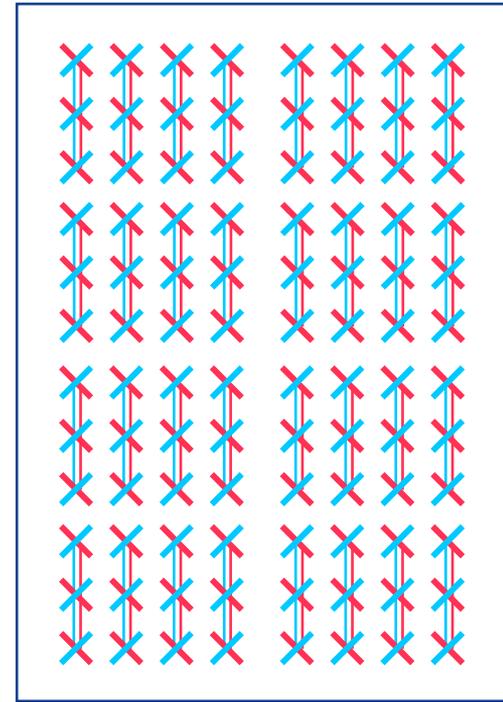
2 x-pol AEs.



2 x-pol TRX



192 AEs
64 TRX



Ejemplo de
radio+antena

Radio

Massive MIMO + Beamforming

Analog y Digital BF

Analog BF:

- Los cambios de amplitud y de fase se implementan en hardware.
- Set de ganancias y desfasajes fijo de antemano. Set de beams fijo de antemano.
- Menos demandante en lo que es fronthaul; tengo que enviar menos info al radio. No tengo que procesar la señal con precoding de bf.

Digital BF:

- La señal a irradiar se divide en los distintos TRX necesarios. Cada uno tiene su señal que se multiplica por un número complejo el cual determina cambio de amplitud y de fase.
- Los beams no son predefinidos, puedo sintetizarlos a mi gusto, siempre y cuando tenga capacidad de cómputo e info necesaria del canal.
- Más TRX implica más necesidad de fronthaul.
Opciones:
 - Procesamiento de pesos en bandabase. Necesito mayor exigencia de bw en fronthaul.
 - Procesamiento de pesos en el radio. Requiere más inteligencia en el radio.

Massive MIMO + Beamforming

Tipos de BF

Static BF:

- Se definen beams en forma estática que no se modifican en el tiempo.
- Por ejemplo: dividir un sector en dos sub-sectores.
- Es una configuración más sencilla y que no necesita de obtener en forma rápida y dinámica feedback de estado del canal.
- No tiene mucha gracia...

Dynamic BF:

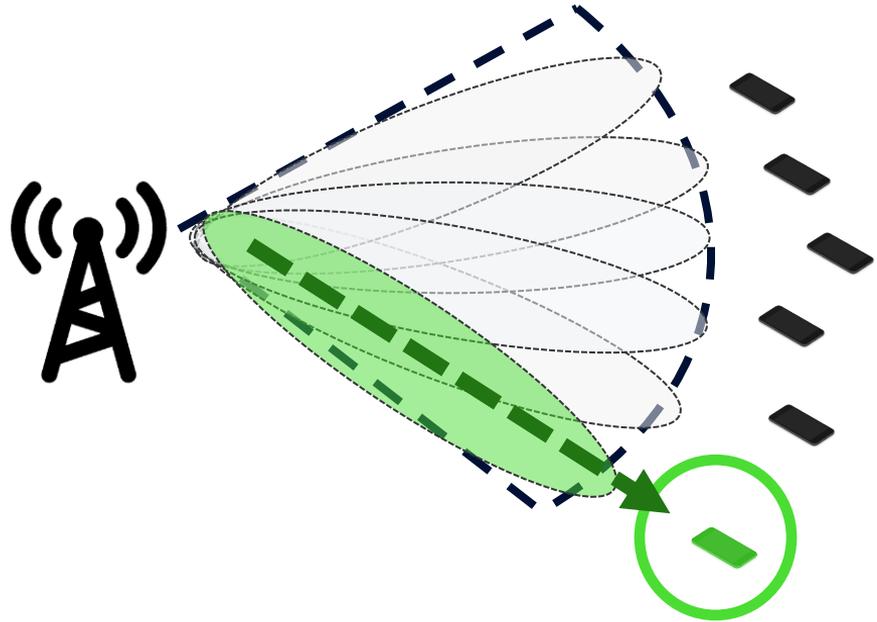
- El beamforming se adapta en forma dinámica a los requerimientos de cada usuario. Hay dos posibilidades para adaptación.
- Beam switching:
Hay un set de beams pre-definido y se selecciona para cada usuario en cada momento el que se ajusta mejor a sus condiciones de radio en cada momento.
- Beam steering.
Cada beam se sintetiza para cada usuario en cada momento.
Técnicas como ZF-beamforming permiten un manejo aún mejor de MU-MIMO.

Massive MIMO + Beamforming

Tipos de BF

Beam switching.

- Hay un set de beams pre-definido y se selecciona para cada usuario en cada momento el que se ajusta mejor a sus condiciones de radio en cada momento.
- Puede no ser el mejor beam, pero es el que “apunta más directamente”.
- No tengo un control específico para un usuario particular o para evitar interferencia hacia otro usuario particular.
- Más sencillo de implementar. No tengo que calcular los coeficientes. Analog y Digital BF.
- A veces se puede leer como GoB: Grid of Beams.



Massive MIMO + Beamforming

Tipos de BF

Beam steering.

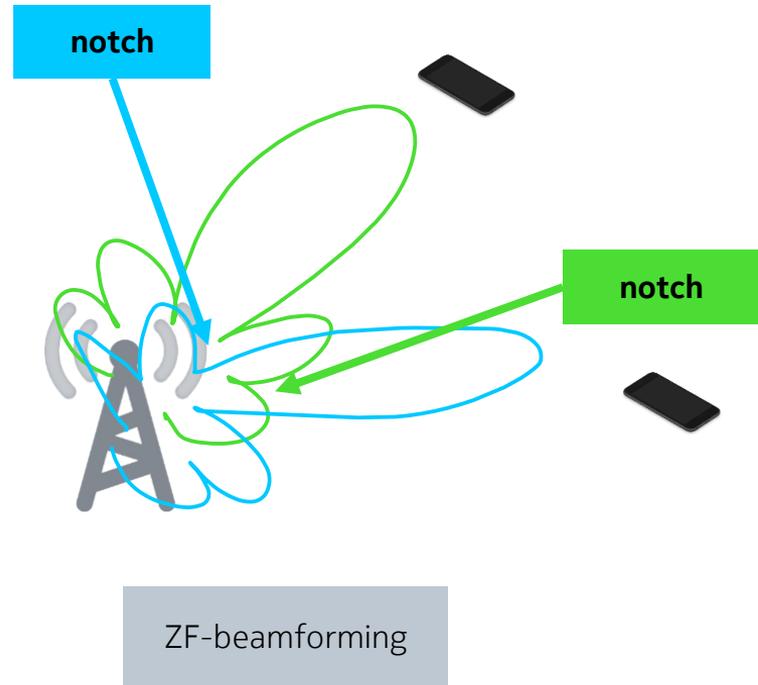
- Cada beam lo sintetizo en forma particular. Le doy a cada usuario el mejor beam que pueda sintetizar, a costo de mayor necesidad de computo y de feedback del canal. Sólo aplica a Digital BF.

EBB: Eigen-Based BF:

- Elección del mejor beam para el usuario en base a info del canal.

ZF-beamforming:

- En caso de MU-MIMO al usar beams distintos en usuarios distintos al mismo tiempo, puedo tener interferencia.
- Zero-Forced BF permite al sintetizar un beam, forzar ganancia baja o nula en dirección del otro usuario.



Massive MIMO + Beamforming

Switching vs. Steering

No es que uno sea mejor que el otro. Cada uno tiene usos distintos.

- Para steering parece mejor al ser un beam customizado... pero necesito mucho más conocimiento del canal.
- Switching es más sencillo y puede ayudar a acotar el espacio de posibilidades.

Broadcast / RACH:

- La info de broadcast y las ocasiones de RACH deben permitir cubrir la totalidad del sector.
- Hacer un steering de esta info a cada usuario no parece la mejor forma de encararlo. No sé dónde están los usuarios en idle que deben escuchar el broadcast...
- Beam switching es un mejor encare en ese sentido.
- Beam sweeping: ir cubriendo el sector, envío el broadcast beam a beam en un set de beams predefinido → hasta 8 beams en FR1, 64 beams en FR2.

Massive MIMO + Beamforming

Elección del beam

Una primer opción muy sencilla es enviar el broadcast en varios beams posibles, que el móvil elija el mejor de ellos y me lo notifique... pero es una elección bastante acotada.

La alternativa es fijar una señal de referencia y que se elija el mejor beam de acuerdo a lo que el canal haga con esa señal de referencia. Para ello tenemos dos opciones:

Codebook-based BF:

- El GNB agrega una señal en DL: CSI-RS.
- El móvil la utiliza para evaluar el canal y elegir un beam de un conjunto de sets predefinido en estándar (un codebook).
- El móvil comunica la elección al GNB con PMI.
- Se conoce también como PMI-based BF a raíz de ello.
- Puede aplicar tanto en TDD como en FDD.

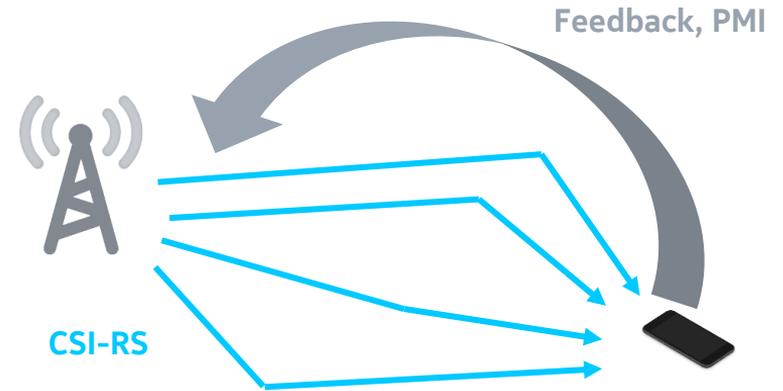
SRS-based BF:

- El GNB asigna periódicamente una señal de referencia en UL, la SRS (Sounding Reference Signal).
- Aprovecho dualidad del canal en TDD para que la estimación del UL me sirva para el DL.
- El UE debe enviar la SRS para poder estimar el canal en todo el bandwidth de la celda.

Massive MIMO + Beamforming

Codebook-based BF

- **CSI-RS: Channel State Indicator Reference Signal.**
- El GNB envía la CSI-RS. El UE debe elegir en base a la info que obtenga del canal la mejor matriz de precoding para el canal y enviar el PMI por PUCCH.
- La estimación es en base a una señal en DL, lo que permite mejor la cobertura en comparación con SRS-based BF.
- El conjunto de opciones no es infinito. Si bien puede dar buenos resultados, no aplica a un enfoque de customizar el beam como EBB o ZF-BF.
- Permite estimar el canal en DL cuando no tengo UL (ej. con NR CA) o cuando no es dual (FDD).



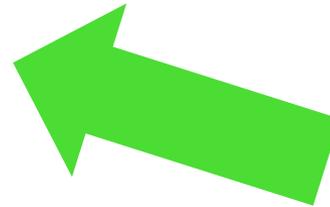
Massive MIMO + Beamforming

SRS-based BF

- **UL SRS: Sounding Reference Signal.**
- La señal de referencia en este caso la pone el móvil.
- Se le debe asignar periódicamente. Podría ser a través de todo el espectro, o por rangos en cada transmisión. Hacerlo por rangos permite que tenga que usar menos potencia / sub-portadora y permite multiplexar usuarios, pero demora más en dar toda la info al GNB.
- TAS: Transmit Antenna Switching. Cuando tengo más de 1 Rx en el móvil pero sólo puedo transmitir de a 1 o de a 2, debo ir switchando el Tx para enviar la SRS.
- Al ser una señal del móvil, puede estar limitada en potencia en UL, que puede no ser suficiente en cell-edge.
- El GNB tiene toda la info del canal con lo cual puede elegir o sintetizar un beam mucho más apto.
- En DL sólo aplica a sistema TDD pues aprovecho la dualidad del canal.
- Se utiliza la SRS para sistema basados en EBB o ZF-BF.



UL SRS



Introducción

Arquitectura e
Interfaces de
Red 5G

Interfaz de Radio

Massive MIMO +
Beamforming

Uso de bandas
en 5G

Uso de bandas en 5G

Bandas FDD existentes



COBERTURA

- Pueden dar buen alcance de servicio, particularmente si son de banda baja.



CAPACIDAD

- El ancho de banda seguramente no va a ser distinto al que tengo en LTE.



PERFORMANCE

- Similar a LTE, sobre todo en caso NSA. En NSA al agregar LTE+5G puedo ver buen servicio con buen LTE.
- En SA puede dar mejoras de latencia.
- Pérdida de capacidad en LTE.
- Caso compartido (Dynamic Shared Spectrum, DSS): sistema ineficiente con aún más overhead y problemas de interferencia.



USO

- Permite acceso rápido a servicios 5G sin necesidad de adquirir espectro.
- Promover temprano la tecnología y fomentar adquisición de terminales. Mostrar el logo de 5G.
- Apoyo de cobertura para bandas más altas.
- En SA mejorar huella de 5G (cobertura).
- Rural/Suburbano/Urbano.

EJEMPLO: VodafoneZiggo en Holanda con DSS: <https://mobileeurope.co.uk/features-me/14940-dutch-operator-deploys-5g-with-dynamic-spectrum-sharing> (jul 2020)
"Why is my 5G so slow? Comparing the hype to the reality"; "while the 5G side of DSS is legitimate 5G, of a sort, (...) its actual performance is comparable to its 4G LTE"
<https://www.zdnet.com/article/why-is-my-5g-so-slow-comparing-the-hype-to-the-reality/> (feb 2022)

Uso de bandas en 5G

Bandas bajas FDD nuevas



COBERTURA

- Buen alcance de servicio. Cobertura extensa.
- Banda más popular: n71 impulsada por TMO en US.



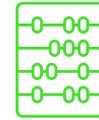
CAPACIDAD

- Similar a lo que puede permitir LTE hoy.
- Las bandas bajas no tienen más ancho de banda.



PERFORMANCE

- Similar a LTE.
- En SA puedo tener mejoras de latencia.



USO

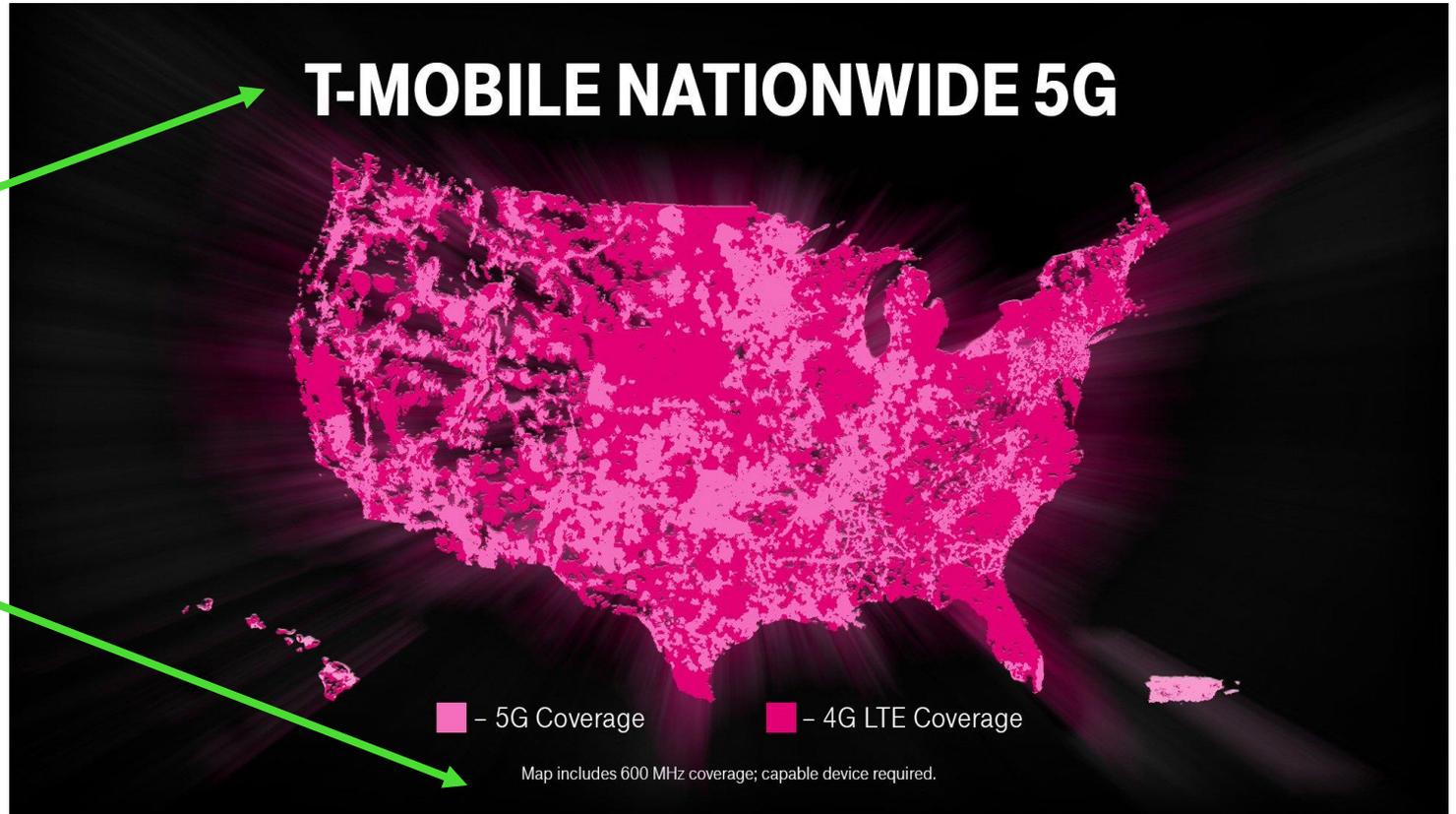
- Cobertura, principalmente en caso SA pues en NSA sigo dependiendo de cobertura LTE.
- Apoyo de servicio a bandas más altas.
- Principalmente pensado en rural / suburbano.

EJEMPLO: T-Mobile en US con banda de 600 MHz (n71). Empezó como NSA y ya lo pasaron a SA.

"T-Mobile's deployment of standalone 5G (SA 5G) in the 600 MHz band has improved both latency and coverage, according to a new report from Opensignal."
<https://www.telecompetitor.com/report-t-mobile-600-mhz-standalone-5g-improves-latency-coverage-especialmente-rural/> (feb 2021)

Uso de bandas en 5G

Bandas bajas FDD nuevas



Nationwide 5G!!

Pero cuando vamos a la letra chica...

Map includes 600 MHz coverage.

Uso de bandas en 5G

Bandas medias TDD



COBERTURA

- Aprovecha el uso de beamforming para mejorar la cobertura.
- Buen alcance considerando además la capacidad que aporta.



CAPACIDAD

- Por lo general anchos de banda mayores que en LTE.
- Muy buena capacidad de tráfico.
- Potenciada con MU-MIMO al reutilizar recursos de la interfaz de aire.



PERFORMANCE

- Mejoras en velocidades alcanzadas y en la capacidad del sistema.
- Depende del ancho de banda, pero permite alcanzar velocidades por encima de 1 Gbps, velocidades promedio en las centenas de Gbps.



USO

- Banda para capacidad pero aún dando buena cobertura.
- Puede apoyarse en una banda baja para mejorar la cobertura.
- Es el rango más popular en despliegues de 5G en el mundo.
- Suburbano / urbano.

Ejemplos varios a nivel global.

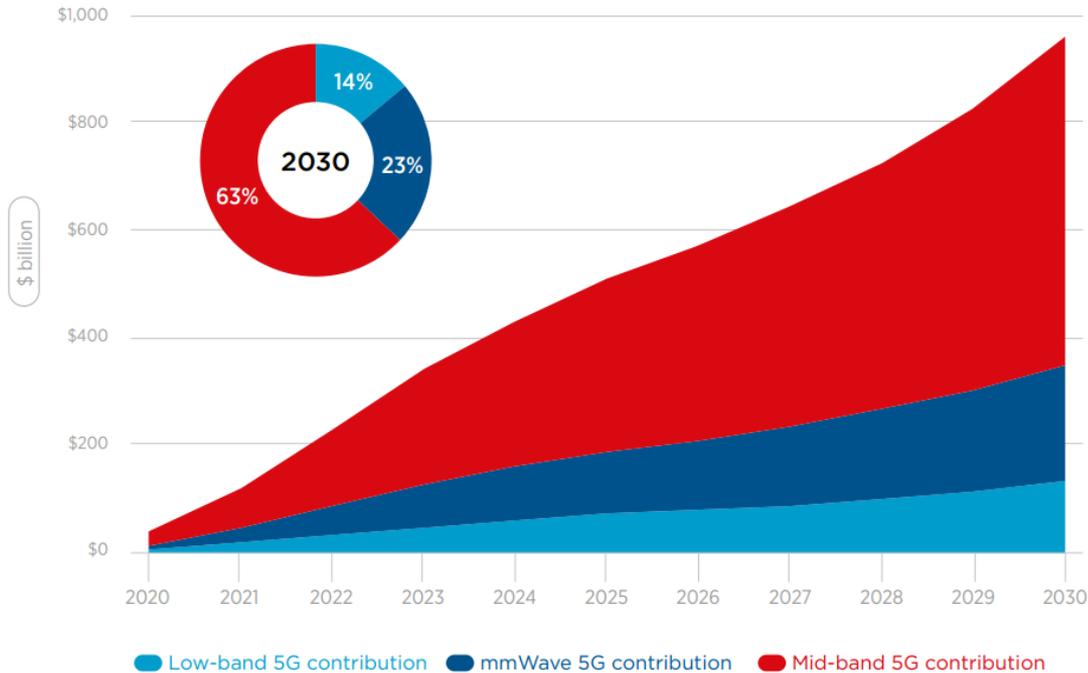
"Verizon's faster C-band 5G is live and off to a promising start" [C-band en referencia a espectro entre 3.5 GHz – 4 GHz]

<https://www.theverge.com/2022/1/19/22891284/verizon-c-band-5g-ultra-wideband-now-available> (ene 2022)

Uso de bandas en 5G

Bandas medias TDD

Figure 1: Annual impact of 5G on GDP, by band, 2020-2030



The Socio-Economic Benefits of Mid-Band 5G Services – Feb 2022 (GSMA)
<https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2022/02/mid-band-5G-spectrum-benefits.pdf>

Uso de bandas en 5G

Bandas altas TDD



COBERTURA

- Baja cobertura.
- Dependencia de LOS (Line Of Sight; Línea de vista) para tener buen servicio.
- Fuerte dependencia de mMIMO para hacerle frente a la cobertura reducida.



CAPACIDAD

- **GRAN** capacidad de ancho de banda.
- Asignación de espectro por las centenas de MHz.
- En general más barato en \$/MHz.



PERFORMANCE

- Velocidades super altas, de hasta 3-4 Gbps.
- Al tener baja cobertura y necesitar LOS, no son valores que se pueden ver en cualquier lado de la ciudad.



USO

- Hotspots. Zonas con muchos usuarios y/o gran demanda de tráfico.
- Puede apoyarse en una banda baja para mejorar la cobertura.
- Poca cantidad de equipos que lo soporten.
- También opción de FWA; Fixed Wireless Access.

Ejemplos varios a nivel global.

“Nokia achieves 5G speed world record with Turk Telekom”; “Over 4.5 Gbps speed achieved for the first time during a trial on live commercial equipment”.
<https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2021/03/22/nokia-achieves-5g-speed-world-record-with-turk-telekom/> (mar 2021).

Uso de bandas en 5G

Bandas altas TDD



"Verizon has the fastest 5G in the world—if you're within about 750 feet of one of its panels".

<https://www.pcmag.com/news/samsung-galaxy-s21-ultra-busts-3gbps-on-verizons-5g-network> (ene 2021)

Figure 1: Use of 5G spectrum between 24.25 GHz and 29.5 GHz, countries/territories plotted by status of most advanced operator activities

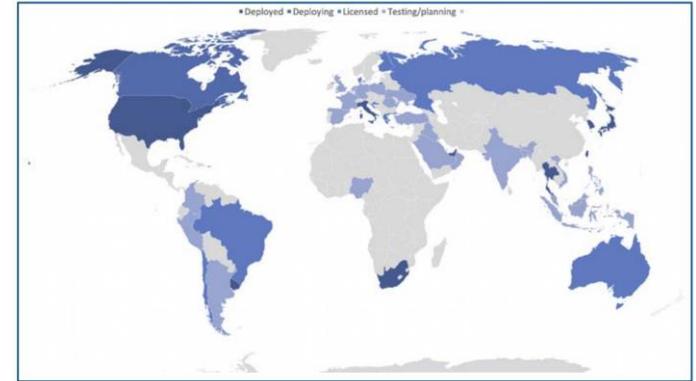
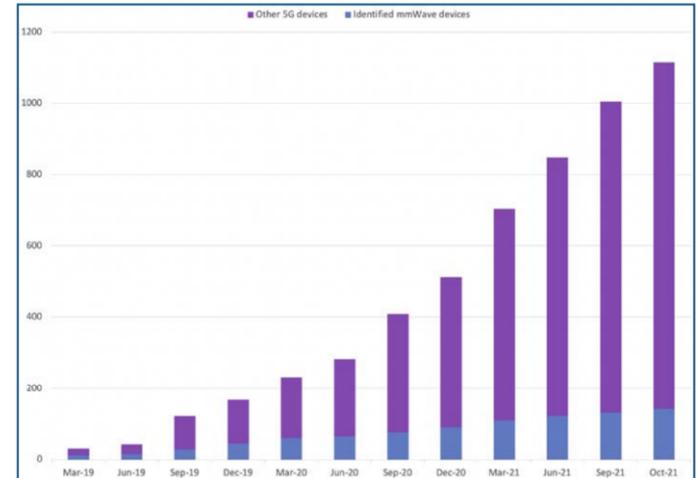


Figure 3: Announced mmWave and other 5G devices



Uso de bandas en 5G

5G necesita espectro en todas las bandas

Para la amplia variedad de servicios que busca cubrir, es necesario contar con espectro en todas las bandas.



*@NevilleRay (TMO President of Technology):
5G needs all spectrum bands - low, mid and high.
<https://twitter.com/nevilleray/status/973703345960468480>
(mar 2018)*

*mmW: dense urban
Midband: metropolitan
Low band: nationwide*

Bibliografía

Bibliografía

Documentos de Interés

- **3GPP Series 38**
<http://www.3gpp.org/DynaReport/38-series.htm>
- **5G Handbook**
sharetechnote.com
- **5G Technology: 3GPP New Radio**
Harri Holma, Takehiro Nakamura, Antti Toskala
- **5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology**
Erik Dahlman, Johan Skold, Stefan Parkvall