

Red de Acceso Móvil LTE

Ing. Bruno Benedetti
2do semestre 2024

Introducción

Arquitectura e Interfaces de Red LTE

Interfaz de Radio

Canales Físicos

Canales de Transporte y Canales Lógicos

Stack de Protocolos

Servicios de voz en LTE

LTE-Advanced + otras features

Introducción

Principales Características

Estándar 3GPP

Peak Rate > 100 Mbps

OFDM

IP Packet Core

Interoperabilidad con
GSM/UMTS

LTE-A:
CA + 256QAM y más

Introducción

Arquitectura e
Interfaces de
Red LTE

Interfaz de Radio

Canales Físicos

Canales de
Transporte y
Canales Lógicos

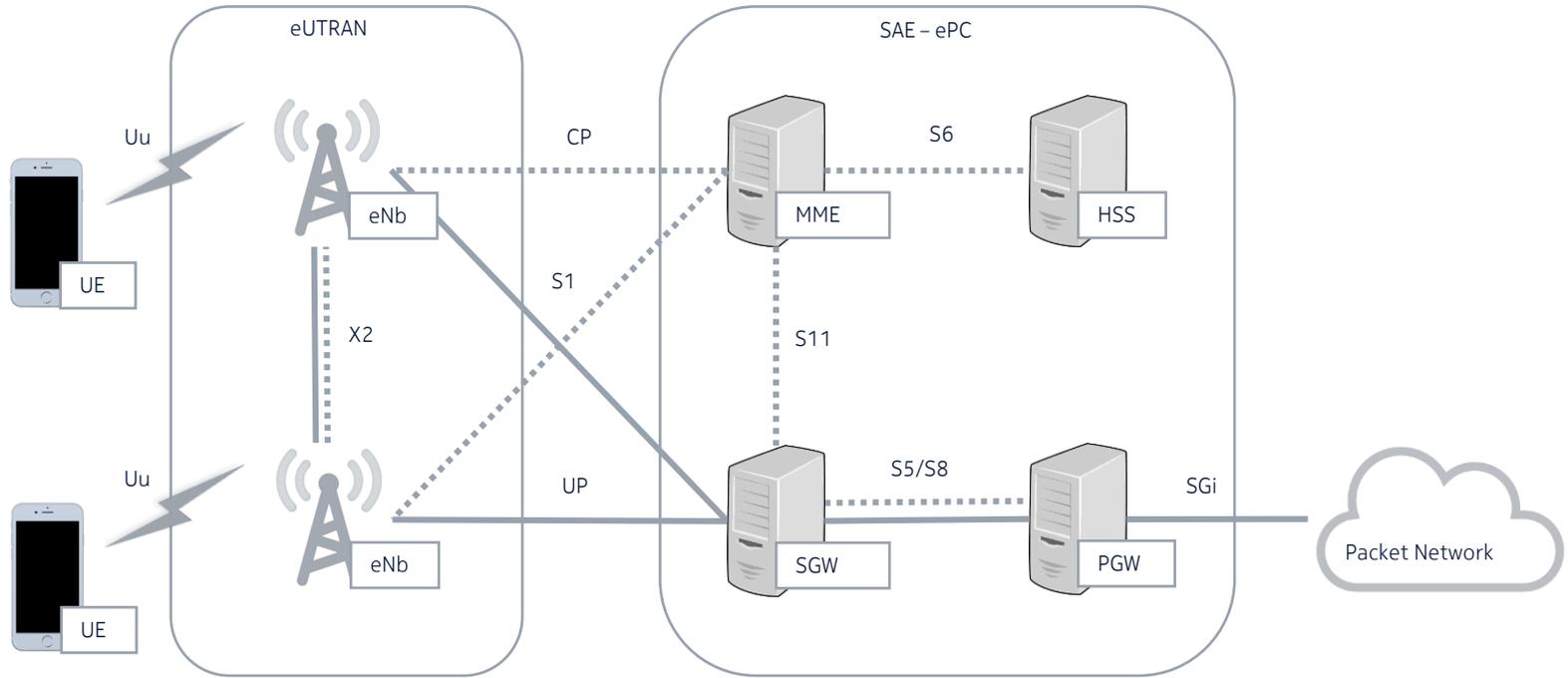
Stack de
Protocolos

Servicios de voz
en LTE

LTE-Advanced +
otras features

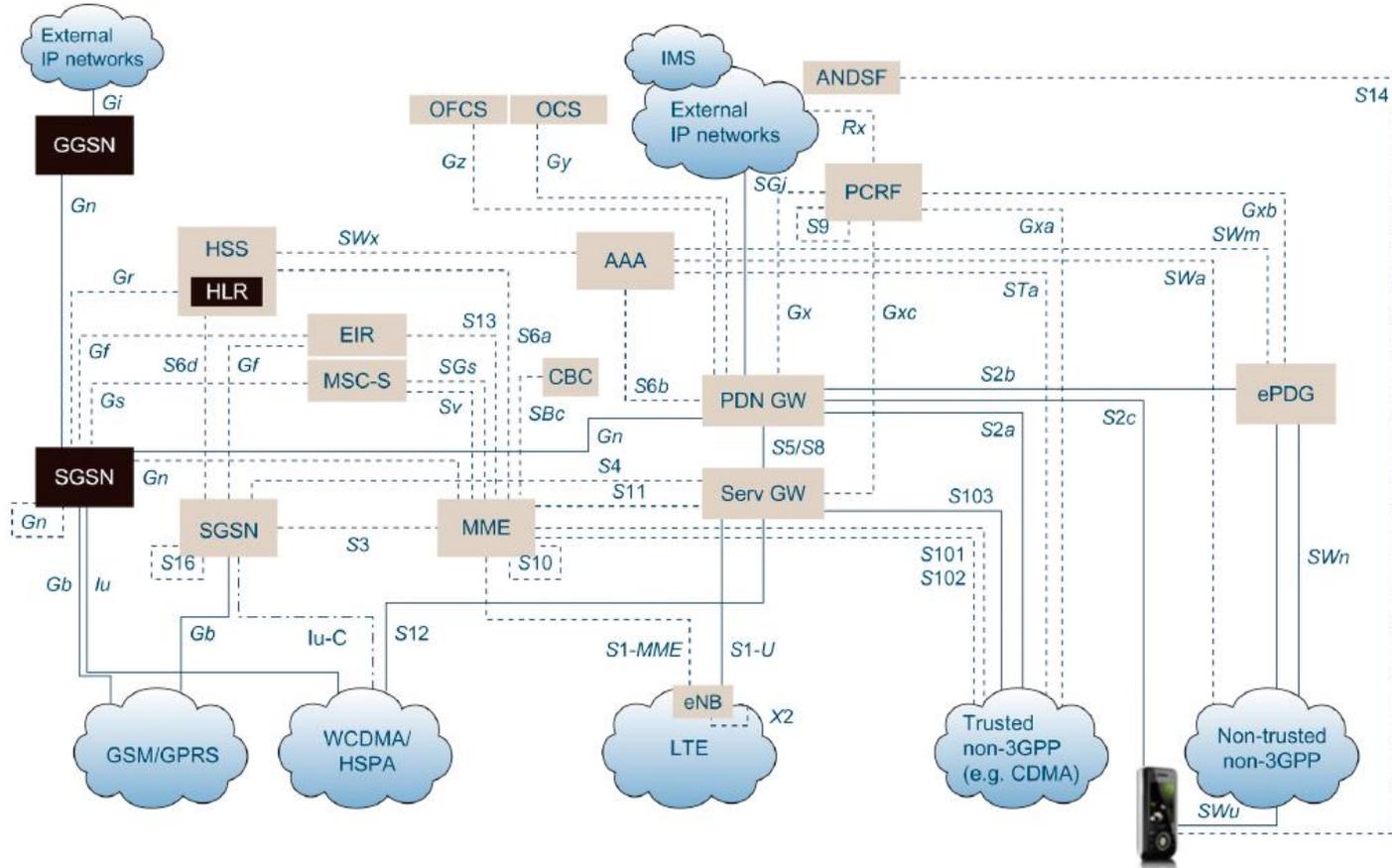
Arquitectura e Interfaces de Red LTE

Arquitectura de Red



Arquitectura e Interfaces de Red LTE

SAE: System Architecture Evolution



Arquitectura e Interfaces de Red LTE

EPC: Evolved Packet Core

- Desde un principio destinado únicamente a servicios de paquetes.
- SAE: System Architecture Evolution prevee interoperabilidad en varios escenarios.
- Interconexión a otras RAN: GERAN y UTRAN.
- Comunicación con redes non-3GPP: WIMAX CDMA2000 WLAN...
- Servicios IMS para VoIP.
- MBMS para broadcast.

Arquitectura e Interfaces de Red LTE

Elementos del EPC

- **MME – Mobility Management Entity**

- Autenticación.
- Establecimiento de Bearers.
- Paging.
- Movilidad intraLTE.
- Movilidad interRAT.

- **HSS – Home Subscriber Server**

- Análogo a HLR en GSM y UMTS. De hecho, en ocasiones se encuentran combinados.
- Comunicación con MME a través de S6a implementada con protocolo DIAMETER.
- IMSI, MSISDN, información de autenticación, actual MME id.

- **PCRF – Policy and Charging Rules Function**

- Encargado de tarificación y gestión de políticas de servicio en forma dinámica.
- Interfaz Rx hacia AF (Application Functions). Ej. hacia P-CSCF en VoLTE para pedidos de establecer QCI1.

Arquitectura e Interfaces de Red LTE

Elementos del EPC

- **SGW – Serving Gateway**

- Manejo de UP. Control de túneles GTP hacia PGW.
- Punto de anclaje en movilidad inter en
- Controlado por MME a través de S11.

- **PDN-GW – Packet Data Network Gateway**

- Gateway hacia internet. NAT.
- Asignación de Ips en el proceso de attach del UE.
- Mapeo de flujos IP con túneles GTP.
- Se conecta por túnel GTP en S5 con SGW.
- En el caso de Roaming, el visitor SGW se conecta al home PGW por S8.

Arquitectura e Interfaces de Red LTE

GTP: GPRS Tunneling Protocol

- Protocolo de comunicación entre GSNs y SGW con PGW.
- Se utiliza también para transporte de UP en S1 en LTE y IuPs en UMTS.
- Encapsulamiento de user plane.
- Separa streams de información en túneles.
- Utiliza UDP para transporte. → ¿Por qué no TCP?
- IPs de origen y destino corresponde a los SGW y PGW involucrados.
- A nivel de UDP el puerto utilizado identifica la versión y uso de GTP (GTP-U GTP-C GTP').
- En el encabezado GTP se define el TEID.
 - TEID: Tunnel Endpoint ID. Permite diferenciar una comunicación en particular del resto.
 - 1 TEID por cada bearer de cada usuario.
- GTP-C: control plane.
 - Ej.: S11 entre MME y SGW.
- GTP-U: user plane.
 - Ej.: S1-U, S5/S8-U.

Arquitectura e Interfaces de Red LTE

Interfaces en EPC

S11: MME <> SGW

- Establecimiento y liberación de cada sesión con una PDN.
- Manejo de sesiones activas y movilidad.
- Utiliza GTP-C.

S6: MME <> HSS

- Autenticación de usuario.
- Información de usuario y ubicación.
- Utiliza DIAMETER sobre SCTP o TCP: Authentication, Authorization and Accounting.

S5 / S8: SGW <> PGW

- Utiliza GTP-C / GTP-U o puede usar PMIP.
- S5 cuando no se está en roaming. SGW y PGW pertenecen a HPLMN (Home PLMN).
- Opcionalmente en roaming S8 hacia PGW de VPLMN. Local breakout: salir por visited PGW.
- Establecimiento de servicios de usuarios para cada PDN solicitada.

S3 y S4

- Movilidad inter-rat hacia SGSN.

Arquitectura e Interfaces de Red LTE

Interfaces en EUTRAN

S1

S1-U: User Plane

- Manejo de datos de usuario con SGW.
- Túnel GTP/UDP/IP.

S1-C: Control Plane

- SCTP/IP.
- Intercambio de información sobre la RBS en su encendido.
- Señalización de usuario en establecimiento y HO.
- Encapsulamiento de mensajería NAS.

X2

X2-U: User Plane

- Forwarding de datos durante inter-ENB HO.
- Forwarding de datos en caso de inter-ENB CA.
- GTP/UDP/IP.

X2-C: Control Plane

- Pedido de recursos para movilidad.
- Intercambio de info de carga para load balancing.
- Coordinación: eLIC, COMP.
- SCTP/IP.

Uu

Interfaz de radio entre ENB y UE implementada sobre OFDM en DL y SC-FDM en UL.

Stack de protocolos en siguiente sección.

Arquitectura e Interfaces de Red LTE

eNodeB

- “evolved” NodeB
- Más inteligente respecto a su par de 3G. No tiene una controladora, se maneja directamente hacia el core.
- Asignación de recursos y scheduling.
- Manejo de QoS.
- Balanceo de carga entre usuarios
- Movilidad intra e inter nodo.
- ANR: Automatic Neighbouring Relation

- Se definen nuevos identificadores para nodo y celda:
 - ECI – Enhanced Cell Identifier
 - ECGI – Enhanced Cell Global Identifier
 - PLMNid: MCC+MNC; 24 bits.
 - ENBID: 20 bits
 - CID: 8 bits



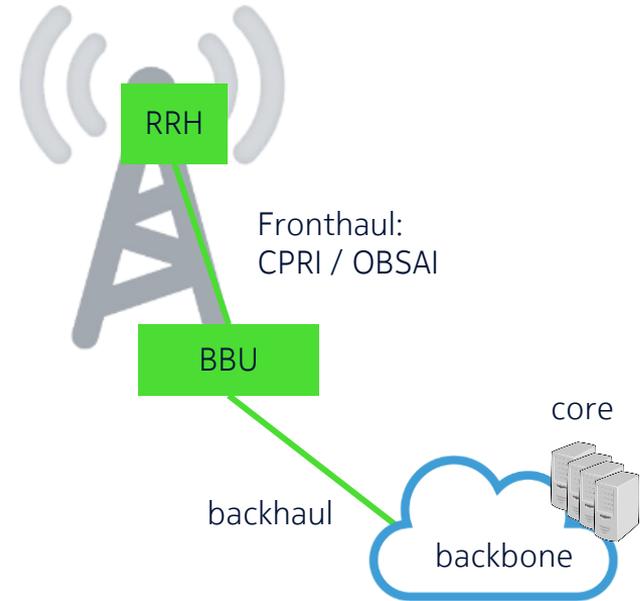
Arquitectura e Interfaces de Red LTE eNodeB

BBU: BaseBand Unit

- Encargado de procesamiento.
- Envía / Toma señal en bandabase hacia / desde RRH.
- Conectado a RRH a través de fibra.
- Comunicación con RRH por protocolo CPRI o OBSAI.

RRH: Remote Radio Head

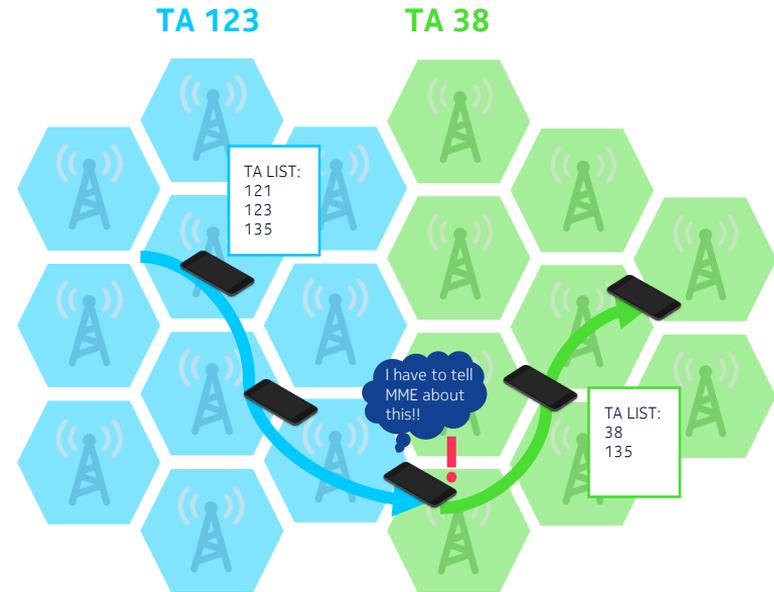
- Modula la señal multiplicando por la portadora central e irradia.
- Ubicado lo más cerca posible de las antenas para minimizar extensión de guía de onda.



Arquitectura e Interfaces de Red LTE

Tracking Area Code

- El TAC es un parámetro de las celdas que se utiliza para ubicar al UE en el proceso de paging.
- Cada vez que el móvil se mueve de un TAC a otro, debe notificar al MME con un TAU.
- **TAU:** Tracking Area Update.
- **TA List:** conjunto de TACs que el MME notifica al UE. Mientras se mueva entre ellos no debe disparar TAU.
- Más cantidad de TACs → Zonas más pequeñas, más cantidad de señalización por movilidad.
- Menos cantidad de TACs → Zonas más grandes, mayor cantidad de pagings a las celdas.
- Trade-off entre ambas opciones.
- Análogo a LAC en UMTS.



Arquitectura e Interfaces de Red LTE

Identificadores relativos al UE

IMEI

International **M**obile **E**quipment **I**dentify.

- Identificador universal del equipo.
- Rangos de IMEI asignados por empresas.
Ej. rango para Apple, Samsung, Motorola, etc.

IMSI

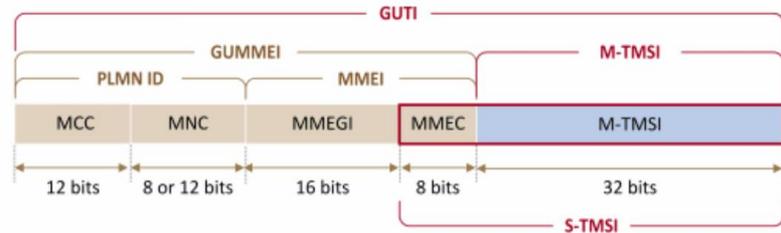
International **M**obile **S**ubscriber **I**dentify.

- Identificador del suscriptor.
- Cada SIM o eSIM tiene un IMSI.
- Se reparten por operador que provee el servicio.
El PLMNID es parte del IMSI.

GUTI

Globally **U**nique **T**emporary **I**dentifier

- Identificador temporal del usuario. Se renueva con cada attach o cada TAU.
- TMSI: Temporal Mobile Subscriber Identity.



Introducción

Arquitectura e Interfaces de Red LTE

Interfaz de Radio

Canales Físicos

Canales de Transporte y Canales Lógicos

Stack de Protocolos

Servicios de voz en LTE

LTE-Advanced + otras features

Interfaz de Radio

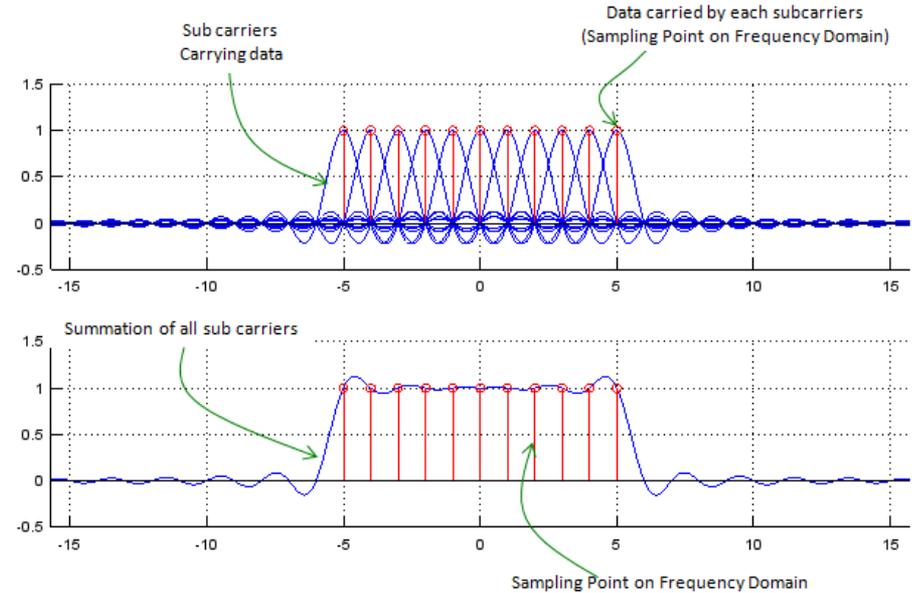
Características Generales

- Duplexing: FDD o TDD.
- OFDM en DL.
- SC-FDM en UL.
- MIMO: Multiple Input Multiple Output.
- Bandwidths: varias opciones → 1.4 MHz | 3 MHz | 5 MHz | 10 MHz | 15 MHz | 20 MHz.

Interfaz de Radio

OFDM

- **OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing.**
- Muchas sub-portadoras de banda angosta y menor symbol rate.
- La ortogonalidad de las sub-portadoras permite “apretar” varias portadoras dentro del ancho de banda disponible.



Interfaz de Radio

OFDM

símbolo complejo en sub-portadora

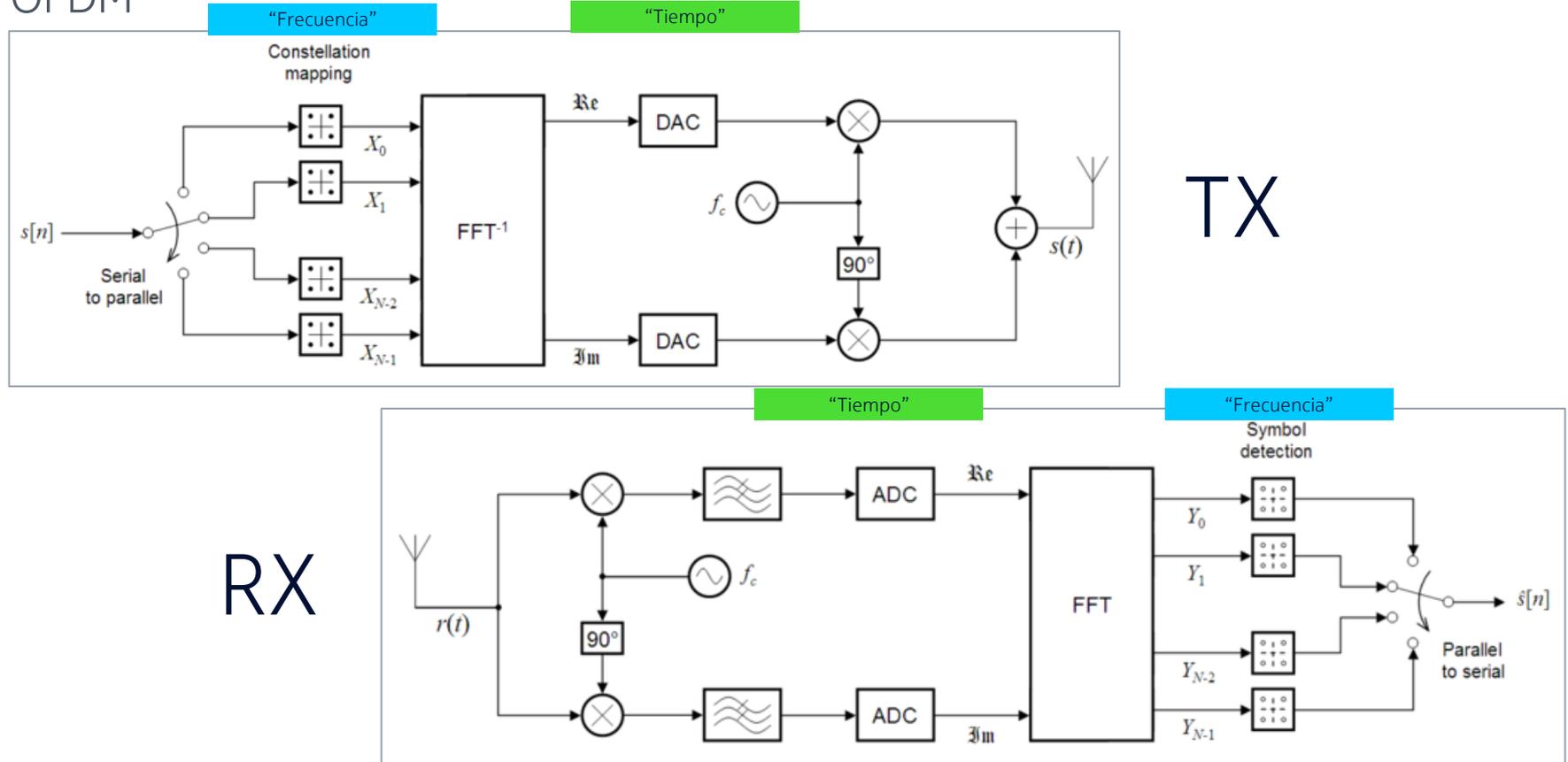
sub-portadora f_k
 T_s : tiempo de símbolo

1. Cada subcanal \mathbf{k} en el symbol OFDM \mathbf{n} : $s_k(t) = \frac{1}{\sqrt{T_s}} \sum_n a_k[n] e^{j2\pi f_k(t-nT_s)}$
2. Si considero las \mathbf{N} sub-portadoras: $s(t) = \frac{1}{\sqrt{T_s}} \sum_n \sum_{k=0}^{N-1} a_k[n] e^{j2\pi f_k(t-nT_s)}$
3. Para formar base ortogonal defino $f_k = k \frac{B}{N} = k \frac{1}{T_s}$: $s(t) = \frac{1}{\sqrt{T_s}} \sum_n \sum_{k=0}^{N-1} a_k[n] e^{j2\pi k(t/T_s-n)}$
4. Considerando ahora solo el sym \mathbf{n} : $s_n(t) = \frac{1}{\sqrt{T_s}} \sum_{k=0}^{N-1} a_k e^{j2\pi kt/T_s}$
5. Si paso a tiempo discreto con $t = mT = m \frac{T_s}{N}$ obtengo: $s_n[m] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} a_k e^{\frac{j2\pi km}{N}}$
Con $m = 0..N-1$

Es una IDFT! → Podemos usar una IFFT para implementarlo!!

Interfaz de Radio

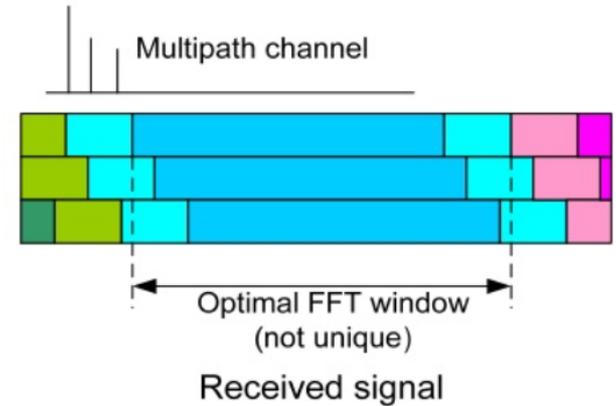
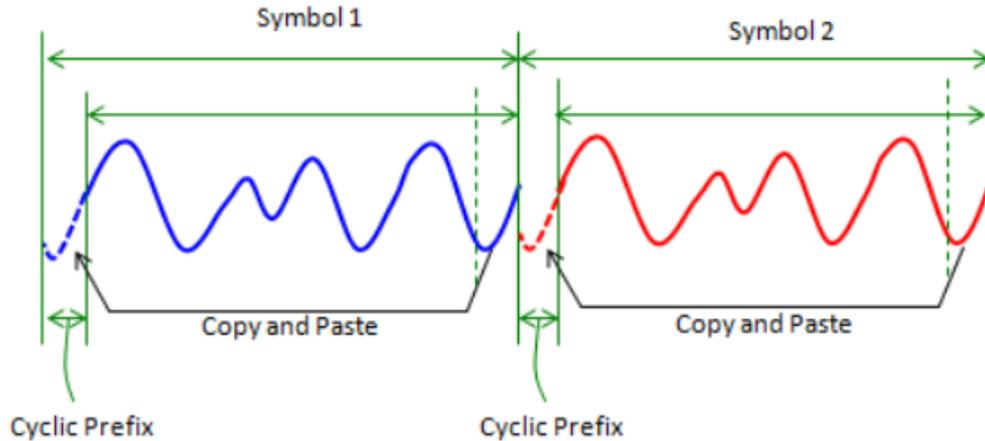
OFDM



Interfaz de Radio

Cyclic Prefix

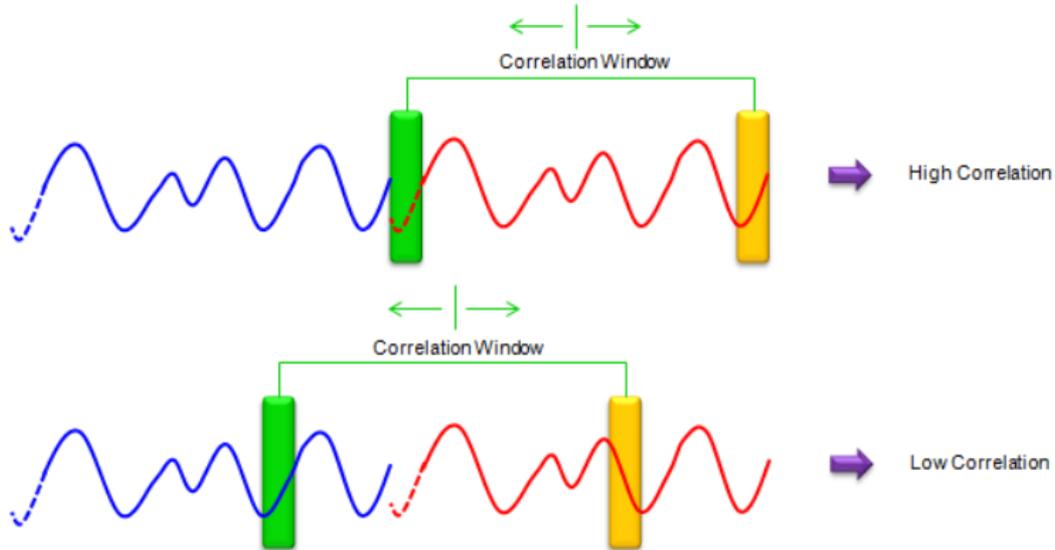
- Período de guarda en que copio el final de la señal y lo pongo al principio.
- Sirve de guarda para evitar ISI: Inter-Symbol Interference.



Interfaz de Radio

Cyclic Prefix

- Y además también permite detectar el comienzo del símbolo OFDM.
- Idea: auto-correlación de la señal en el tiempo. Se el tamaño del prefijo cíclico y qué distancia tiene entre final y repetición.



Interfaz de Radio

OFDM: Pros y Cons

Ventajas

- Se puede adaptar a fadings en portadoras particulares.
- Robusto ante ISI a través de tiempos de guarda con prefijo cíclico.
- Alta eficiencia espectral.
- Escalable en espectro, a diferencia de WCDMA.
- Para cada portadora canal no-selectivo en frecuencia: ecualizador “one-tap” para cada sub-portadora.

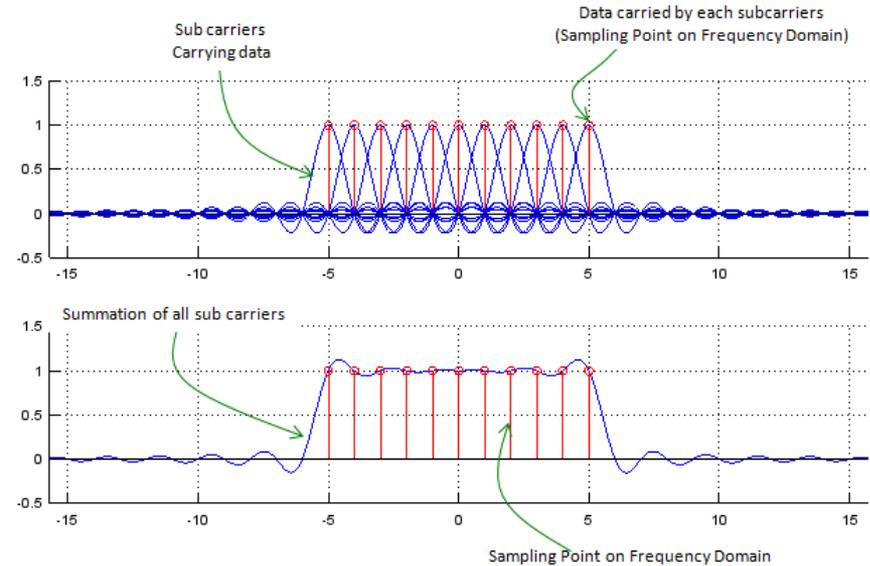
Contras

- Muy importante sincronismo en frecuencia para mantener ortogonalidad entre sub-portadoras.
- Sensible a doppler-shift, corrimiento en frecuencia.
- Alto PAPR (Peak to Average Power Ratio) lleva a ineficiente consumo de potencia y necesidad de mayor rango lineal en amplificadores.

Interfaz de Radio

OFDM en LTE

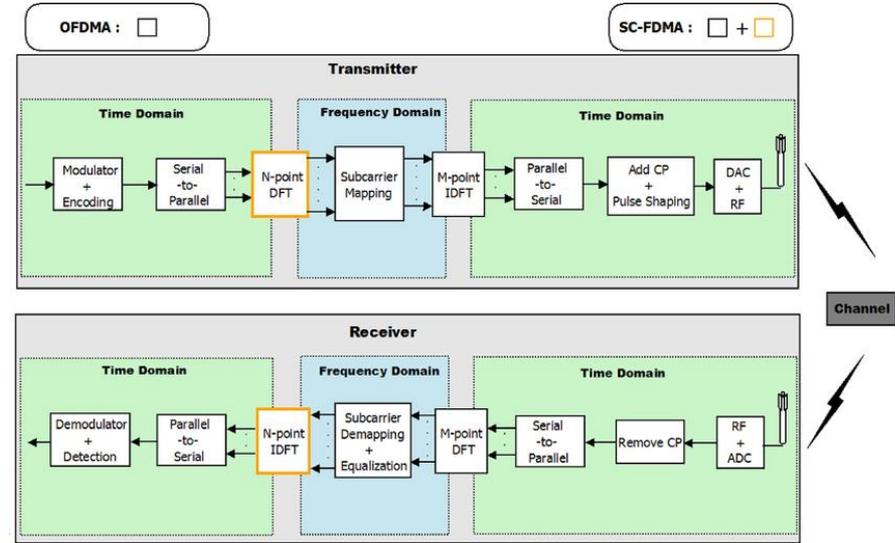
- LTE utiliza OFDM en DL
- Sub-portadoras de ancho de $\Delta f = 15$ kHz.
- Symbol duration: $T_s = 66.67$ μ s.
- Cyclic Prefix: 4.7 μ s (normal CP) o 16.67 μ s (extended CP).
- 1200 subportadoras @ BW 20 MHz.
- FFT Size: $N=2048$ @ BW 20 MHz
→ Samp Freq $f_s = N\Delta f = 30.72$ MHz
- Modulaciones QPSK, 16-QAM, 64-QAM.



Interfaz de Radio

SC-FDM

- Single Carrier Frequency Division Multiplexing.
- El alto PAPR es particularmente problemático para la transmisión del móvil.
- Mayor consumo de potencia y amplificadores más exigentes.
- Alternativa SC-FDM permite disminuir PAPR y así evitar esas desventajas.
→ Utilizado para Tx de móviles en UL.

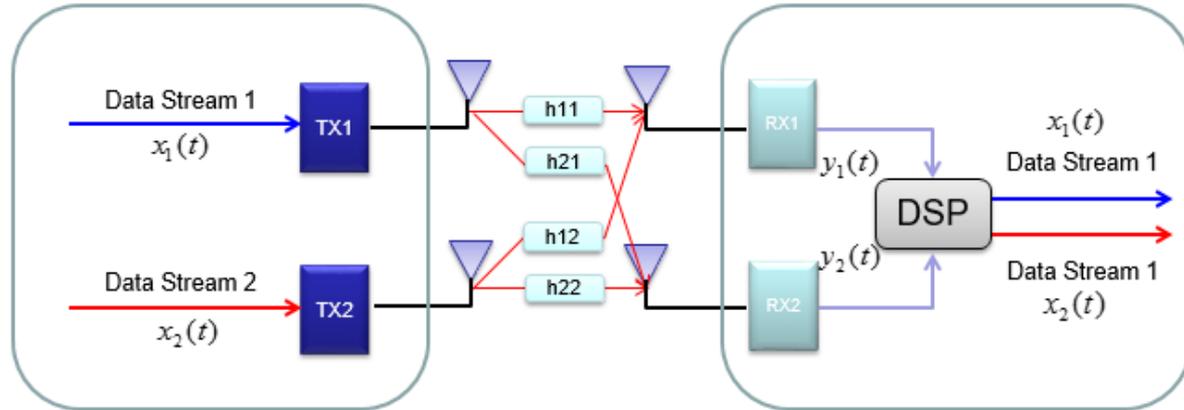


- Agrega DFT de pre-procesamiento.
- La asignación de recursos **debe ser contigua**.
- De esta manera se baja el PAPR.
- Información de cada symbol **distribuida** entre varias sub-portadoras en lugar de ir en una sólo.

Interfaz de Radio

MIMO

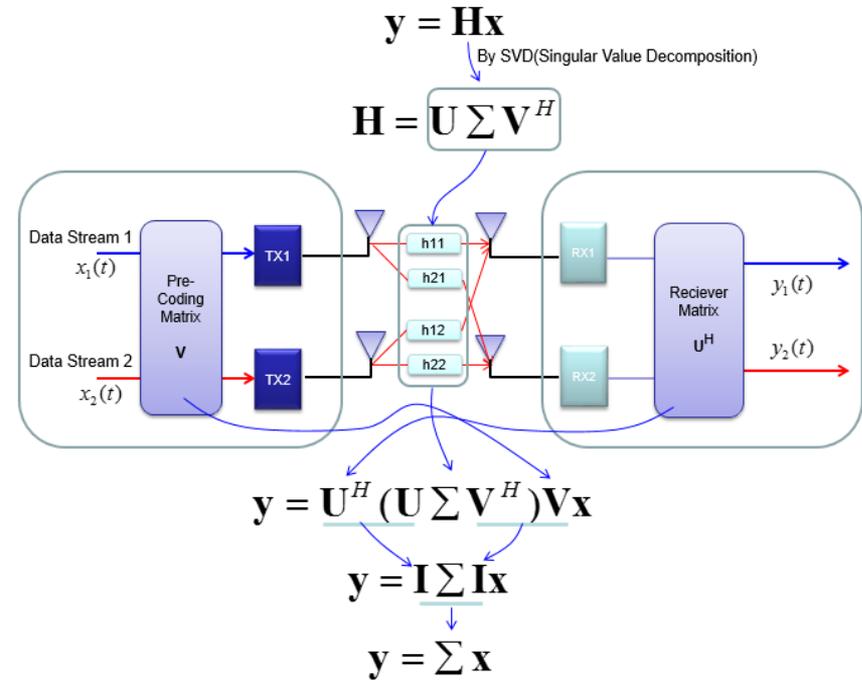
- **M**ultiple **I**nput **M**ultiple **O**utput
- Idea: si tengo más de una antenna en Tx y más de una antenna en Rx, enviar información distinta en caminos distintos.
- 2 parejas de Tx-Rx → obtengo el doble de throughput para un mismo espectro!
- Sólo es posible si puedo lograr tener dos caminos independientes entre sí.
- Matriz de transferencia del canal linealmente independiente.



Interfaz de Radio

MIMO

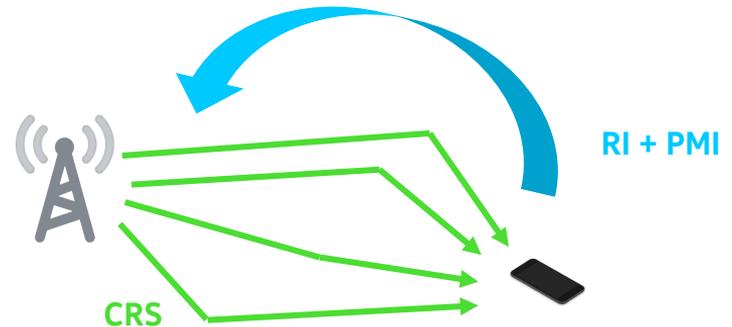
- Si la matriz del canal es LI, se puede tener una descomposición en valores propios.
- **Precoding:** antes de enviar multiplico a los datos por matriz V .
- En Rx multiplico por matriz hermitian de matriz U .
- Importante tener conocimiento del canal.



Interfaz de Radio

MIMO

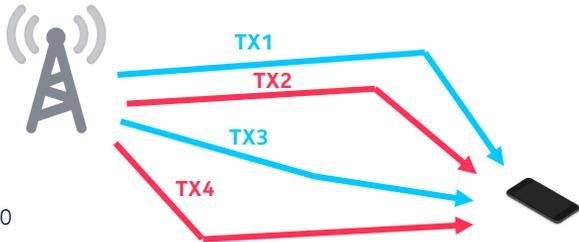
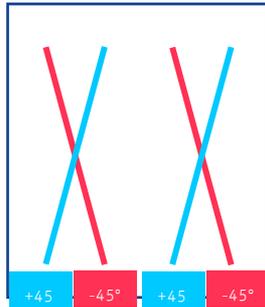
- En sistema **TDD** puede resultar más sencillo de aplicar MIMO siendo el canal recíproco en DL y UL.
- En sistema **FDD** el canal en DL no se puede estimar a partir del canal en UL.
- Para conocer matriz de precoding móvil debe informar a radiobase qué matriz utilizar. → Closed Loop CL MIMO.
- Overhead de señalización. → Se minimiza al utilizar matrices predefinidas por estándar; móvil elige la mejor.
- **RI**: Rank Indicator. Rango de la matriz de canal, o cuántos canales linealmente independientes puedo obtener.
- **PMI**: Precondig Matrix Indicator.
- Hay varias variantes. Puedo tener 2 Tx con 4 Rx para diversidad, o 4 Tx en rbs con 2 Rx en móvil.
- En LTE implementaciones de hasta 4T4R con DL MIMO 4x4 y UL MIMO 1x4.
- ¿por qué no seguir aumentando el # de antenas?
 - difícil mantener hipótesis de caminos independientes.
 - se deben acomodar más antenas también en el móvil, donde hay espacio acotado.



Interfaz de Radio

MIMO

- Cómo se colocan las antenas en la rbs?
- Si 2 Tx: se envían con polarización cruzada, $+45^\circ$ y -45° .
- Si 4 Tx, se ubican espacialmente separadas, dos pares de $\pm 45^\circ$.



HBXX-6516DS-VTM | HBXX-6516DS-A2M
4-port sector antenna, 4x 1710–2180 MHz, 65° HPBW, RET compatible

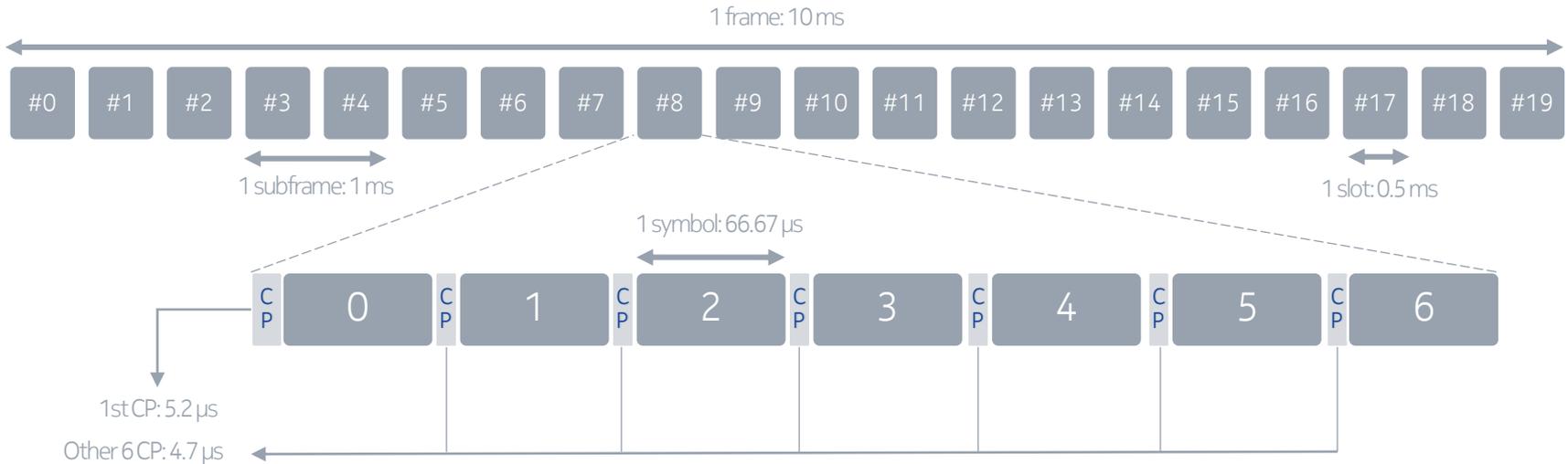
- Each DualPol@ array can be independently adjusted for greater flexibility
- Excellent gain, VSWR, front-to-back ratio, and PIM specifications for robust network performance
- Ideal choice for site collocations and tough zoning restrictions
- Great solution to maximize network coverage and capacity

Ejemplo de antena de 4 puertos

Interfaz de Radio

Frame Structure

- 1 **frame** tiene una duración de 10 ms.
- Compuesto de 10 **subframes** de 1 ms.
- Cada subframe está formado por 2 **slots**.
- Cada slot tiene 7 **symbols OFDM**; 14 por subframe.



Extended CP: prefijo cíclico que se puede utilizar en escenarios con delay spread mayor.

→ Se mantiene duración de slot. CP más largo se compensa con 1 símbolo OFDM menos (6 en lugar de 7).

Interfaz de Radio

Physical Resource Blocks

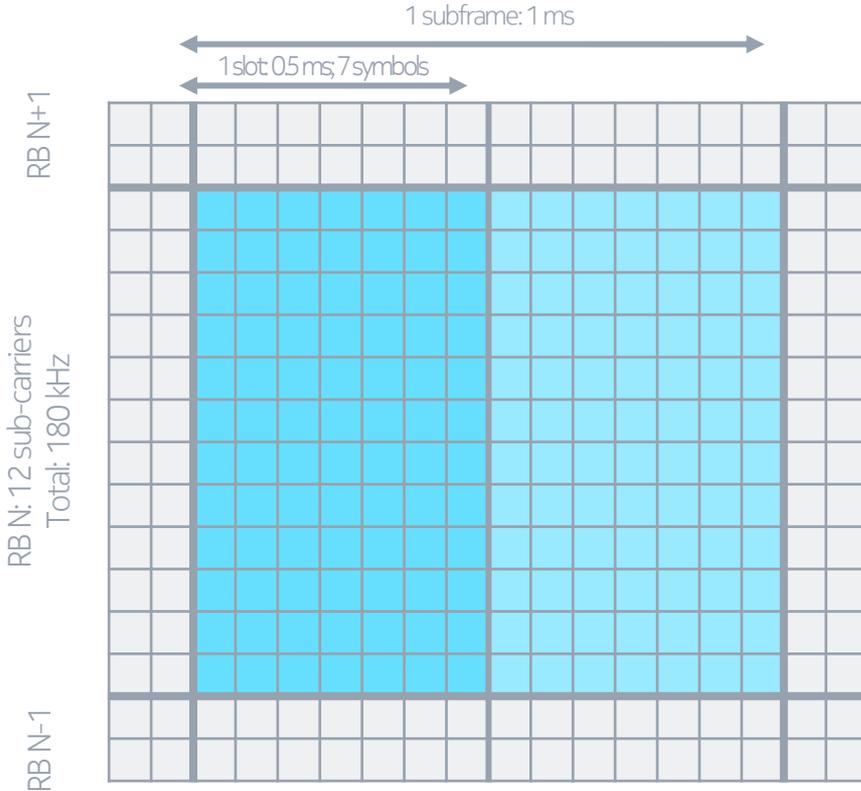
Es la referencia de recursos. En LTE se asignan PRBs.

Algunas definiciones:

1 Resource Element (RE)

1 Resource Element Group (REG)

1 Physical Resource Block (PRB):
2 slots x 12 sub-carriers x 7 symbols



Interfaz de Radio

Configuraciones según BW

| Tx BW (MHz) | 1.25 | 2.5 | 5 | 10 | 15 | 20 |
|--------------------|---------------------------------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| # PRBs | 6 | 12 | 25 | 50 | 75 | 100 |
| # subcarriers | 72 | 144 | 300 | 600 | 900 | 1200 |
| FFT size | 128 | 256 | 512 | 1024 | 1536 | 2048 |
| Δf (kHz) | 15 | | | | | |
| Samp Rate (MHz) | 1.92 | 3.84 | 7.68 | 15.36 | 23.04 | 30.72 |
| # sc / prb | 12 | | | | | |
| # sym / slot | 7 (normal CP) / 6 (extended CP) | | | | | |
| Modulación | QPSK / 16QAM / 64QAM | | | | | |
| Guard subcarriers | 55 | 75 | 211 | 423 | 635 | 847 |
| BW efficiency | 78% | 90% | 90% | 90% | 90% | 90% |

Interfaz de Radio

Señales DL de Sincronismo y Referencia

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.
- Sincronismo a nivel de half-frame.

SSS

- **S**econdary **S**ynchronization **S**ignal.
- Lleva valor de Physical Layer Cell Identity Group (0 .. 167).
- Una de 168 secuencias binarias predefinidas.
- Sincronismo a nivel de frame; el patron cambia con cada frame.

RS

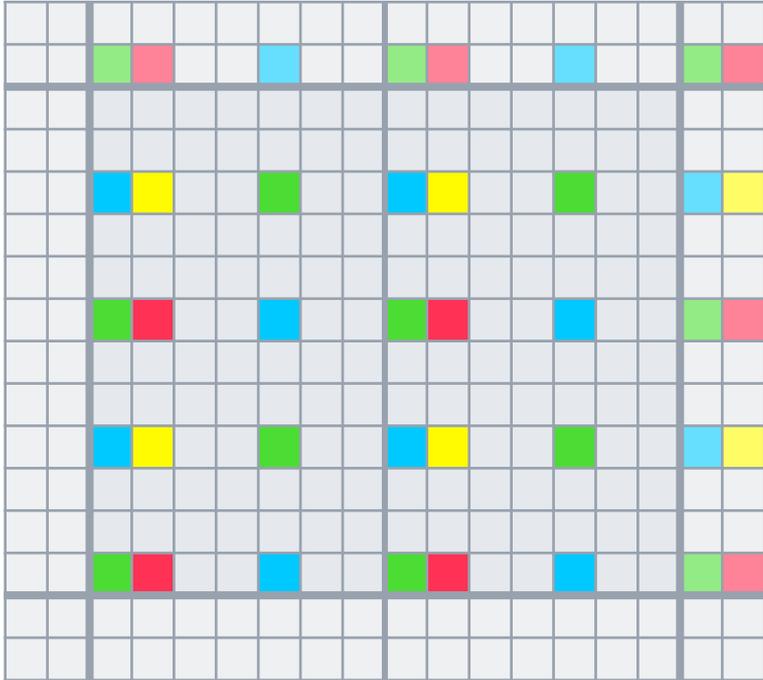
- **R**eference **S**ignal.
- Señal piloto.
Análogo a CPICH en UMTS.
- Cell Selection, Cell Reselection, Handover, Channel estimation, Rank Index & PMI.

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

Reference Signal



- Se envía **en todos los subframes** en forma persistente a lo largo de **toda la banda**.
- En subframes de multicast solo los RS de los primeros 2 symb OFDM.
- La ubicación en frecuencia dentro de cada PRB depende de PCI mod 6.
- Se envía 1 RS por cada puerto de TX. Sí solo tengo 1 TX, solo mando RS0.
- Mientras un puerto manda, el otro se no transmite.



Interfaz de Radio

Señales UL de Referencia

SRS

- Sounding Reference Signal.
- Opcional.
- Permite estimar el UL channel en diferentes partes del canal, pudiendo servir para elección de PRBs.
- Utilizan el último symbol SC-FDMA del subframe.
- No se envían en todos los subframes, se asignan a móviles periódicamente o aperiódicamente.

DMRS

- Se envía en el 4to symbol de cada slot.
- Se utilizan como referencia para estimar canal en UL y así ecualizar y poder decodificar.

Interfaz de Radio

Medidas del UE

RSRP [dBm]

- **Reference Signal Received Power.**
- Potencia promedio en Rx de los Reference Signals en el bandwidth.

RSSI [dBm]

- **Received Signal Strength Indicator.**
- Se mide toda la potencia que se recibe en toda la banda en los symbols que se recibe el RS (ie. symbol #0 o symbol #5).
- Potencia de usuario + Interferencia + Ruido.
- No se reporta al eNB.

RSRQ [dB]

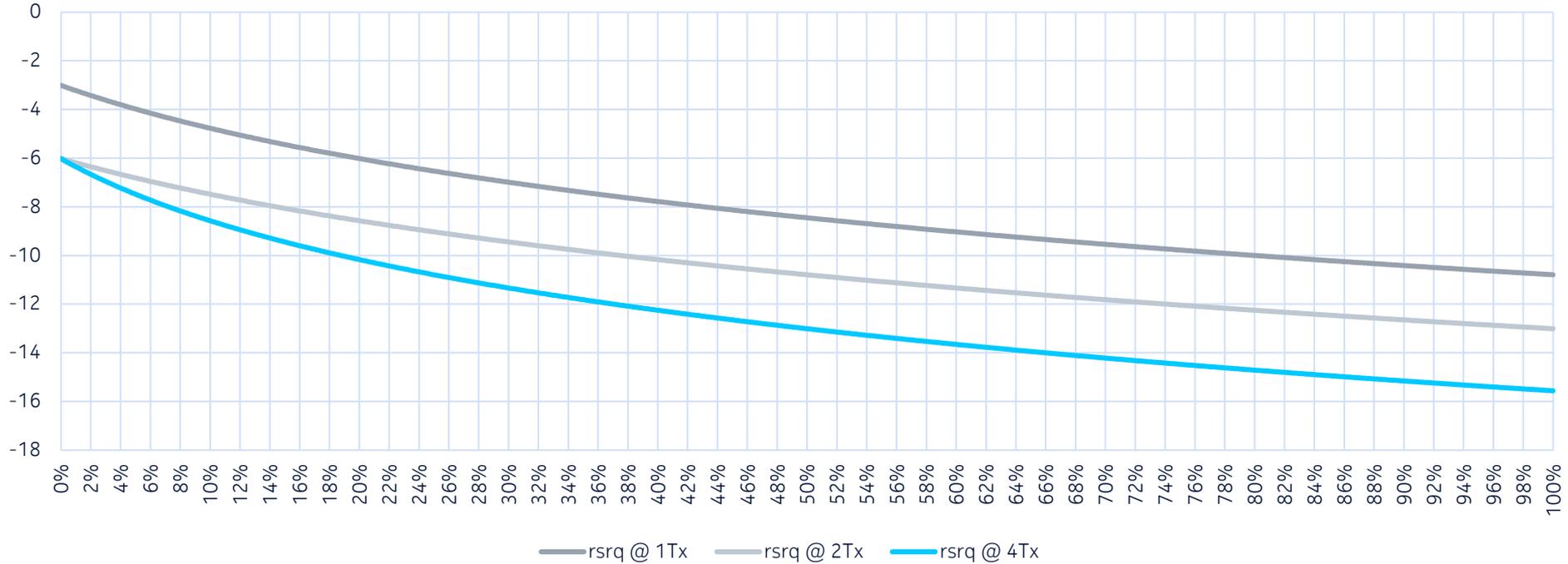
- **Reference Signal Received Quality.**
- $RSRQ = N \times RSRP / RSSI$
- RSSI/N: Potencia promedio por PRB. -
→ Se puede entender como ratio promedio entre PRx RS y PRx RB.
- **Influye la carga de la propia celda y sus vecinas!**
Al medir en toda la banda también se miden canales de control y de tráfico que aumentan la potencia total recibida RSSI.
RSRQ alto, baja carga (RSSI bajo).
RSRQ bajo, alta carga (RSSI alto).

Measurement Gaps: para medidas InterFreq.
Se fijan subframes en que el móvil tomará medidas. Análogo a CM en UMTS.

Interfaz de Radio

Medidas del UE

RSRQ @ 0% interference



Interfaz de Radio

TD-LTE

- FDD ha sido en general la versión más popular de LTE.
- Sin embargo, TDD se favoreció en países que ya venían trabajando con sistemas TDD como TD-SCDMA. Principalmente en China.
- FDD necesita paired spectrum: por ej. 20 MHz en DL apareados con 20 MHz en UL.
- TDD usa el mismo espectro de hasta 20 MHz y divide en el tiempo el DL y el UL.
- Los conceptos vistos hasta ahora en general se mantienen.
- La estructura de frames cambia para adaptarse a **subframes en DL** y **subframes en UL**.

Interfaz de Radio

TD-LTE

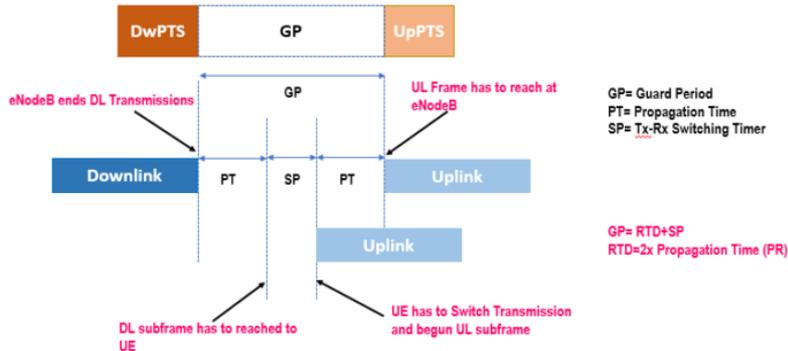
- Se definen 7 posibles configuración de frame.
- Flexibilidad para adoptar el ratio entre DL y UL que sea necesario.
- Es necesario slot de transición con guarda entre DL y UL.
 - Quiero evitar que colisionen réplicas del DL con la recepción del UL de antenas vecinas.
 - También dar tiempo a que el móvil termine de escuchar el DL antes de switchear al UL.
- En transición UL a DL no es necesario. Timing Advance ya permite evitar interferencia en UL inter-subframe.

| | UL-DL config | DL/UL radio | subframe | | | | | | | | | | |
|---|-------------------|-------------|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| D | Downlink subframe | 0 | 1/3 | D | S | U | U | U | D | S | U | U | U |
| U | Uplink subframe | 1 | 1/1 | D | S | U | U | D | D | S | U | U | D |
| | | 2 | 3/1 | D | S | U | D | D | D | S | U | D | D |
| | | 3 | 2/1 | D | S | U | U | U | D | D | D | D | D |
| | | 4 | 7/2 | D | S | U | U | D | D | D | D | D | D |
| | | 5 | 8/1 | D | S | U | D | D | D | D | D | D | D |
| | | 6 | 3/5 | D | S | U | U | U | D | S | U | U | D |

Interfaz de Radio

TD-LTE

- 9 variantes de slot S, dependiendo de período de guarda asignado.
- El tiempo de guarda que se defina da lugar a limitante de rango de celda.
- DwPTS: Downlink Pilot Time Slot. PDCCH + PDSCH + RS.
- GP: Guard Period
- UpPTS: Uplink Pilot Time Slot. Short RACH / SRS.



| TDD subframe config | DwPTS | GP | UpPTS | GP dur (us) | max. cell radius (km) |
|---------------------|-------|----|-------|-------------|-----------------------|
| 0 | 3 | 10 | 1 | 667 | 100 |
| 1 | 9 | 4 | 1 | 267 | 40 |
| 2 | 10 | 3 | 1 | 200 | 30 |
| 3 | 11 | 2 | 1 | 133 | 20 |
| 4 | 12 | 1 | 1 | 67 | 10 |
| 5 | 3 | 9 | 2 | 600 | 90 |
| 6 | 9 | 3 | 2 | 200 | 30 |
| 7 | 10 | 2 | 2 | 133 | 20 |
| 8 | 11 | 1 | 2 | 67 | 10 |

Introducción

Arquitectura e Interfaces de Red LTE

Interfaz de Radio

Canales Físicos

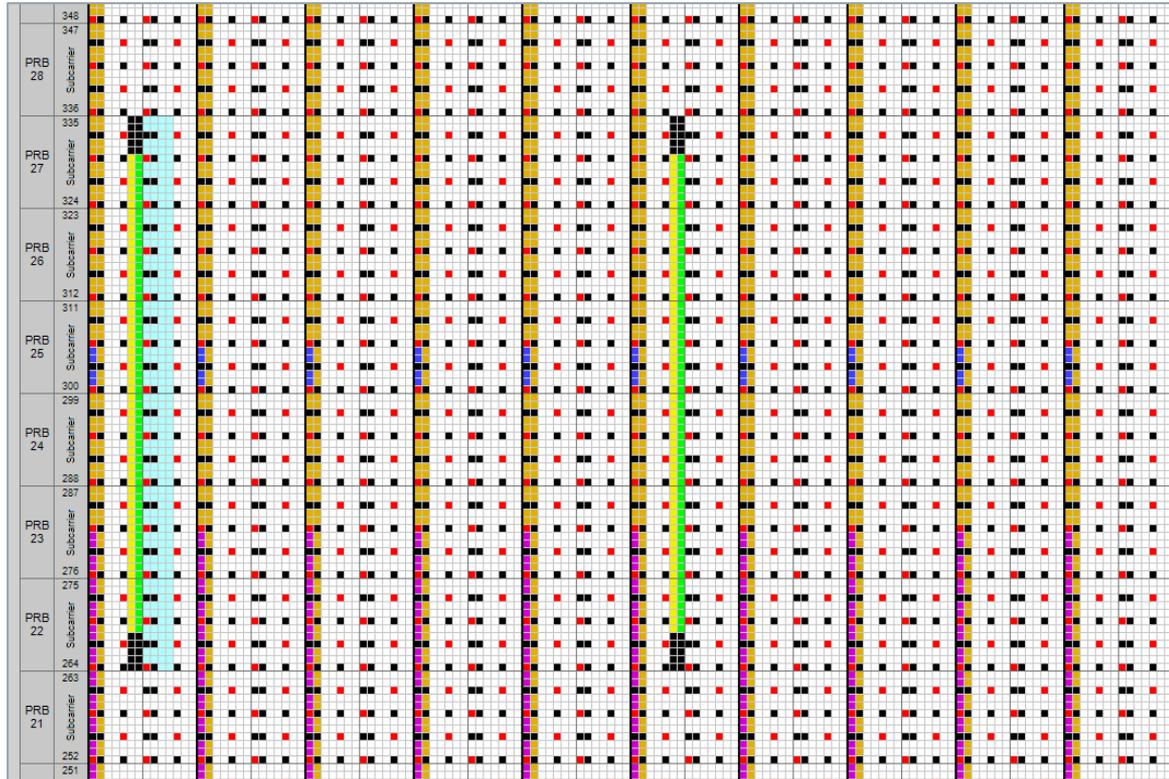
Canales de Transporte y Canales Lógicos

Stack de Protocolos

Servicios de voz en LTE

LTE-Advanced + otras features

Canales Físicos Downlink



-  PSS: Primary Sync Signal. Zadoff-Chu sequence.
-  SSS: Secondary Sync Signal. Pseudo-random binary sequence.
-  PBCH: Physical Broadcast Channel. Info básica de broadcast.
-  PCFICH: Physical Control Format Indicator Channel. Info sobre tamaño de PDCCH.
-  PHICH: Physical Harq Indicator Channel. UL HARQ ACK/NACK
-  PDCCH: Physical Downlink Control Channel. Asignación de recursos de PDSCH y PUSCH.
-  CRS: Cell specific Reference Signal. Utilizada por móvil para estimación de canal.
-  Disponible para PDSCH: Physical Downlink Shared Channel. Broadcast, Paging, SRB, DRB.
-  DTx

https://www.sqimway.com/lte_resource_grid.html

Canales Físicos

Downlink

PCFICH

- **Physical Control Format Indicator Channel**
- Indica # symbols OFDM reservados (1, 2 o 3) para el canal PDCCH al principio cada subframe de 1 ms. CFI: Control Format Indicator.
- Se envía en 16 RE con QPSK divididos en 4 REGs en el primer symbol de cada subframe a lo largo de toda la banda.
- La ubicación de cada REG depende del PCI de la celda y del bandwidth del sistema. Siempre es al inicio del subframe.

PHICH

- **Physical HARQ Indicator Channel**
- ACK / NACK de información del canal de UL. Se pueden mapear más de un PHICH a un REG formando un PHICH Group. Multiplexados por códigos ortogonales de SF 4 (normal CP) o 2 (extended CP).
- Se envía en el primer symbol de cada subframe. La cantidad de REG y su ubicación dependen del PCI, system bandwidth y cuantos PHICH pueden haber en un PHICH group.

PBCH

- **Physical Broadcast Channel**
- Envío del Master Information Block (MIB) que contiene información de configuración de parámetros y ubicación de los System Information Blocks (SIBs) en el canal de PDSCH.
- Se envía una vez cada 40 ms (4 frames) en los primeros 4 symbols del 2o slot del frame en los 6 PRBs alrededor del DC (1080 kHz) □
Contígua a PSS y SSS.

Canales Físicos

Downlink

PDCCH

- **Physical Downlink Control Channel.**
- Información de control relativa a capa física.
- Asignación de recursos.
- Lo hace a través de transporte de DCI: Downlink Control Information.

PDSCH

- **Physical Downlink Shared Channel**
- Transporte de datos de capas superiores.
- Puede ser señalización de capa 3 o datos de usuario.
- Distintas opciones para asignación recursos (RATs: Resource Allocation Type):
 - RAT0: por bitmap de RBG, grupo de PRBs.
 - RAT1: por bitmap de vRBG.
 - RAT2: PRBs contiguos.

PMCH

- **Physical Multicast Channel**
- Encargado de Multimedia Broadcast and Multicast Services (MBMS).
- Transmitido en forma coordinada por conjunto de celdas.

Canales Físicos

PDCCH

- Se utiliza para envío de Downlink Control Information (DCI).
- Lleva información de allocations DL y UL, MCS, UL power, etc.
- Modulación QPSK.
- Se tienen distintos formatos cuyo uso varía con la información de DCI.

| Message type (DCI format) | Content |
|------------------------------|--|
| 0 | Uplink scheduling grants for the PUSCH |
| 1 | PDSCH assignments with a single codeword |
| 1a | PDSCH compact downlink assignment |
| 1b | PDSCH compact downlink assignment with precoding vector |
| 1c | PDSCH assignments using a very compact format |
| 1d | PDSCH assignments for multiuser MIMO |
| 2 | PDSCH assignments for closed-loop MIMO |
| 2a | PDSCH assignments for open-loop MIMO |
| 3 | Transmit power control for the UL with 2-bit power adjustments |
| 3a | Transmit power control for the UL with 1-bit power adjustments |

| PDCCH Format | # CCE | # REG | # RE | PDCCH bits |
|--------------|-------|-------|------|------------|
| 0 | 1 | 9 | 36 | 72 |
| 1 | 2 | 18 | 72 | 144 |
| 2 | 4 | 36 | 144 | 288 |
| 3 | 8 | 72 | 288 | 576 |

Canales Físicos

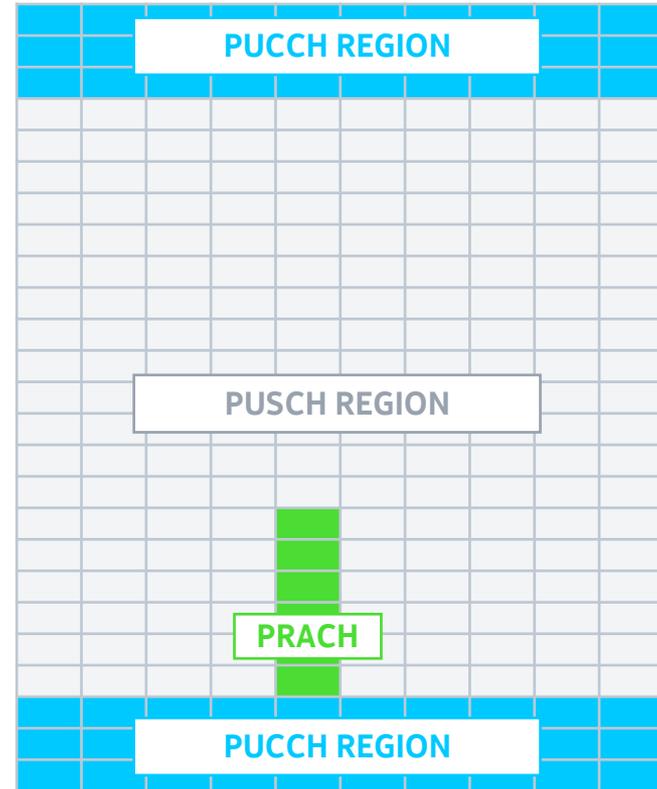
PDCCH

- **RNTI: Radio Network Temporary Identifier**
- Sirve para poder señalar a qué tipo de información le corresponde el mensaje de PDCCH.
- Ejemplos:
 - **C-RNTI:** scheduling unicast de móvil. Identificador del móvil para la celda.
 - **SI-RNTI:** Información de broadcast (SIBs). System Information.
 - **RA-RNTI:** Utilizado para indicar respuesta de Random Access Attempt.
 - **P-RNTI:** Paging.

Canales Físicos

Uplink

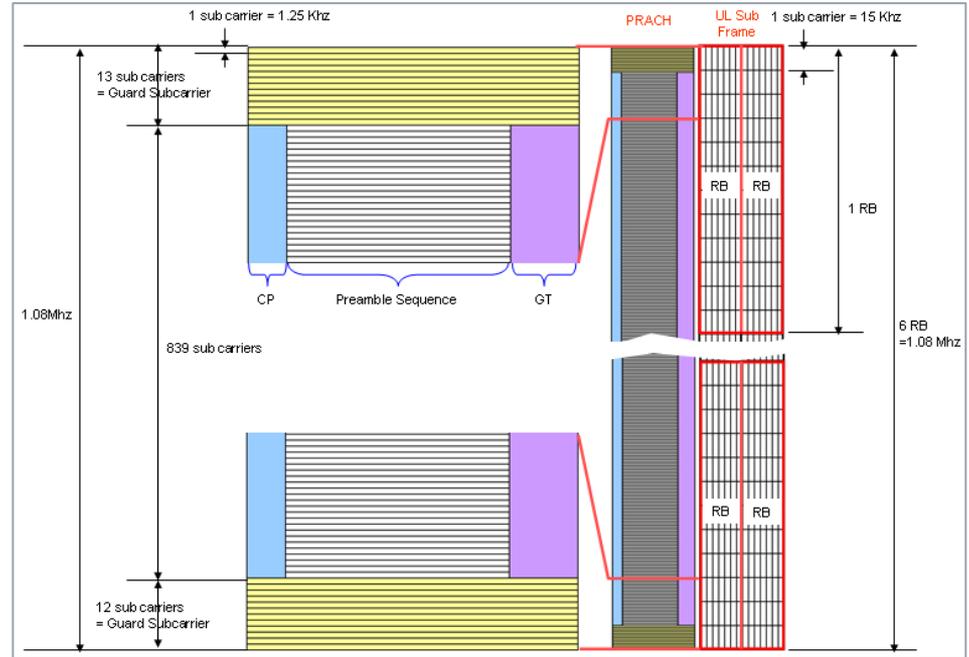
- **PUSCH**: **P**hysical **U**plink **S**hared **C**hannel.
Envío de datos. Control plane y User plane.
- **PUCCH**: **P**hysical **U**plink **C**ontrol **C**hannel.
A los extremos de la banda, de tamaño variable.
Utilizado para envío de periódico de UCI:
 - Estado de canal (CSI).
 - Solicitud de recursos en UL (SR).
- **PRACH**: **P**hysical **R**andom **A**ccess **C**hannel.
Se utiliza en conexión inicial y en handover.
Cuando no se tienen recursos en la celda destino.
- SC-FDM: en UL se utiliza Single Carrier FDM.
La utilización de recursos en la interfaz de radio es con asignación **contigua** de PRBs.



Canales Físicos

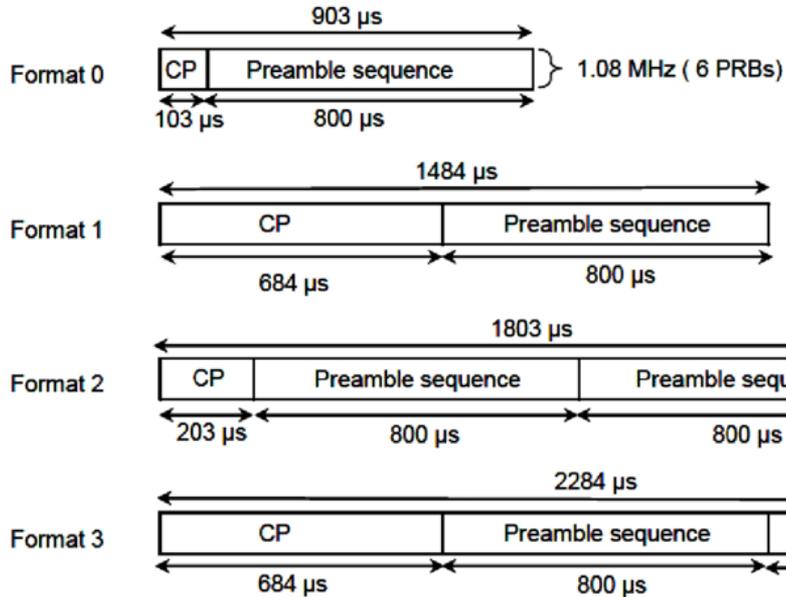
PRACH

- Se utilizan **6 PRBs contiguos** de la banda, cada uno con 144 sub-carriers de 1.25 kHz cada una (duración de 800 μ s):
 - 839 sc para RACH.
 - 25 sc de guarda.
- En cada sub-carrier se envía un único símbolo, generando una secuencia de símbolos “en frecuencia” que con IFFT da señal “en tiempo”.
- PRACH Configuration Index.
 - Tipo de formato y # subframes en que se envía.
 - Formatos 2 y 3 más robustos: envían 2 veces la misma secuencia.
 - Formatos 1 y 3 más robustos ante DS (CP mayor).



Canales Físicos

PRACH



| Format | T_{CP} (ms) | T_{seq} (ms) | # sub frames | GT (ms) | max range |
|--------|---------------|----------------|--------------|---------|-----------|
| 0 | 0,103 | 0,8 | 1 | 0,097 | 14 km |
| 1 | 0,684 | 0,8 | 2 | 0,516 | 75 km |
| 2 | 0,203 | 1,6 | 2 | 0,197 | 28 km |
| 3 | 0,684 | 1,6 | 3 | 0,716 | 108 km |

- Formatos 2 y 3 más robustos: envían 2 veces la misma secuencia.
- Formatos 1 y 3 más robustos ante DS (CP mayor).

Canales Físicos

PRACH

Formato de preámbulo

En qué frames se envía.

En qué subframes se envía.

| PRACH Configuration Index | Preamble Format | System frame number | Subframe number | PRACH Configuration Index | Preamble Format | System frame number | Subframe number |
|---------------------------|-----------------|---------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| 0 | 0 | Even | 1 | 32 | 2 | Even | 1 |
| 1 | 0 | Even | 4 | 33 | 2 | Even | 4 |
| 2 | 0 | Even | 7 | 34 | 2 | Even | 7 |
| 3 | 0 | Any | 1 | 35 | 2 | Any | 1 |
| 4 | 0 | Any | 4 | 36 | 2 | Any | 4 |
| 5 | 0 | Any | 7 | 37 | 2 | Any | 7 |
| 6 | 0 | Any | 1, 6 | 38 | 2 | Any | 1, 6 |
| 7 | 0 | Any | 2, 7 | 39 | 2 | Any | 2, 7 |
| 8 | 0 | Any | 3, 8 | 40 | 2 | Any | 3, 8 |
| 9 | 0 | Any | 1, 4, 7 | 41 | 2 | Any | 1, 4, 7 |
| 10 | 0 | Any | 2, 5, 8 | 42 | 2 | Any | 2, 5, 8 |
| 11 | 0 | Any | 3, 6, 9 | 43 | 2 | Any | 3, 6, 9 |
| 12 | 0 | Any | 0, 2, 4, 6, 8 | 44 | 2 | Any | 0, 2, 4, 6, 8 |
| 13 | 0 | Any | 1, 3, 5, 7, 9 | 45 | 2 | Any | 1, 3, 5, 7, 9 |
| 14 | 0 | Any | 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 | 46 | N/A | N/A | N/A |
| 15 | 0 | Even | 9 | 47 | 2 | Even | 9 |
| 16 | 1 | Even | 1 | 48 | 3 | Even | 1 |
| 17 | 1 | Even | 4 | 49 | 3 | Even | 4 |
| 18 | 1 | Even | 7 | 50 | 3 | Even | 7 |
| 19 | 1 | Any | 1 | 51 | 3 | Any | 1 |
| 20 | 1 | Any | 4 | 52 | 3 | Any | 4 |
| 21 | 1 | Any | 7 | 53 | 3 | Any | 7 |
| 22 | 1 | Any | 1, 6 | 54 | 3 | Any | 1, 6 |
| 23 | 1 | Any | 2, 7 | 55 | 3 | Any | 2, 7 |
| 24 | 1 | Any | 3, 8 | 56 | 3 | Any | 3, 8 |
| 25 | 1 | Any | 1, 4, 7 | 57 | 3 | Any | 1, 4, 7 |
| 26 | 1 | Any | 2, 5, 8 | 58 | 3 | Any | 2, 5, 8 |
| 27 | 1 | Any | 3, 6, 9 | 59 | 3 | Any | 3, 6, 9 |
| 28 | 1 | Any | 0, 2, 4, 6, 8 | 60 | N/A | N/A | N/A |
| 29 | 1 | Any | 1, 3, 5, 7, 9 | 61 | N/A | N/A | N/A |
| 30 | N/A | N/A | N/A | 62 | N/A | N/A | N/A |
| 31 | 1 | Even | 9 | 63 | 3 | Even | 9 |

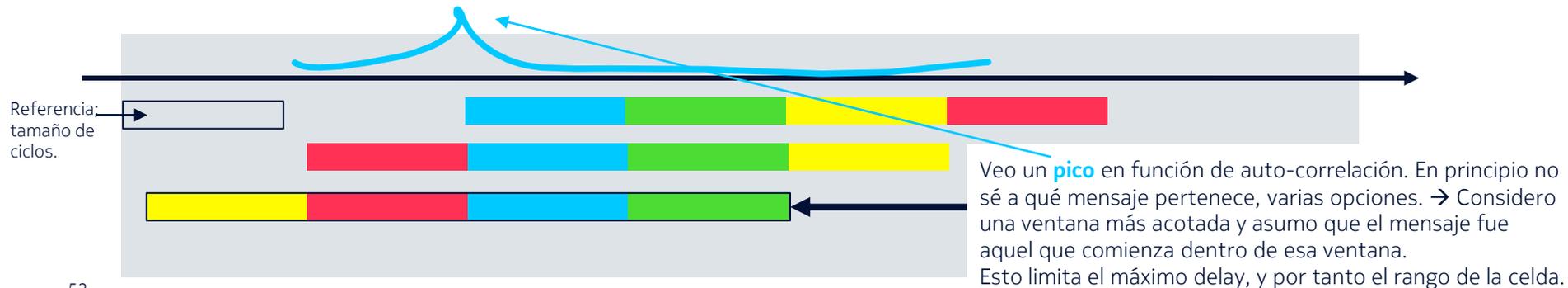
El PRACH Configuration Index determina con qué formato se debe enviar el prach y en qué momento (en cuales subframes de cuales frames).

En los subframes que no se usan para PRACH, se utilizan esos 6 prbs para asignación de PUSCH.

Canales Físicos

PRACH

- El UE envía uno de **64 preambles** posibles para una celda.
- Cada preámbulo consiste de **839 symbols**, que se envía uno a uno en cada una de las 839 sub-portadoras de 1.25 kHz.
- **Root Sequence Index (RSI)**: Identificador de raíz que se utiliza en secuencia Zadoff Chu para generarla.
- Zadoff Chu: una secuencia y la misma corrida cíclicamente en el tiempo tienen baja auto-correlación entre sí. Con un RSI puedo generar varias preámbulos corriendo secuencia cíclicamente de X pasos.
- Cada cuántas muestras X de la secuencia puedo ir corriendo depende del rango de la celda. Ej.: si corro 100 muestras y el preámbulo demora más de 100 muestras en llegar entonces la radiobase lo confundirá con el siguiente.
- El rango de la celda establece cuantos preámbulos puedo generar por cada RSI. Si un RSI no es suficiente para generar 64 preámbulos debo entonces utilizar varios RSI. **RSI planning** → evitar que celdas vecinas usen los mismos preámbulos.



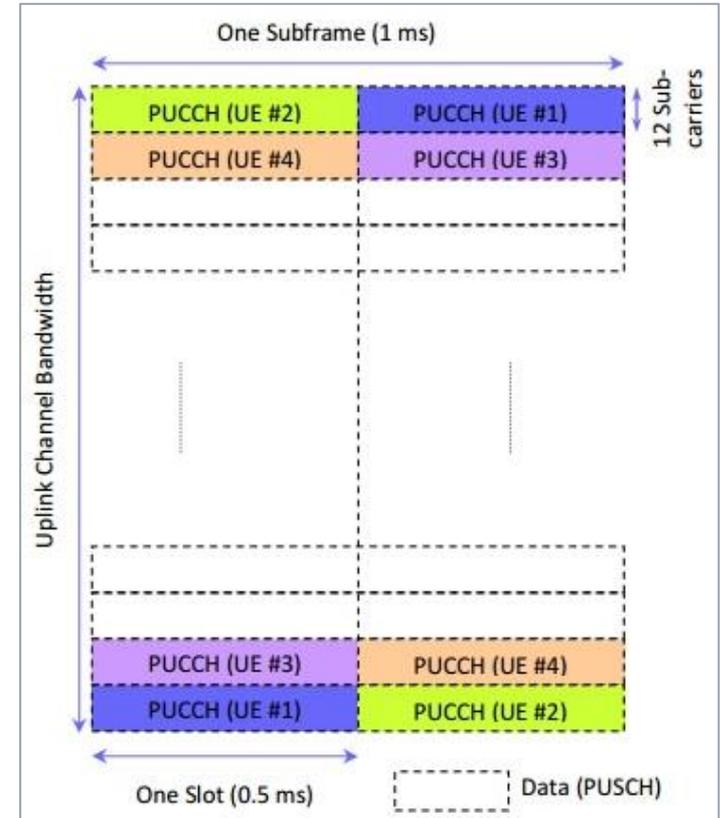
Canales Físicos

PUCCH

- Se utiliza para envío de **Uplink Control Information (UCI)**.
 - Scheduling Request Indicator (**SR**).
 - HARQ** ACK/NACK.
 - Reporte de **CSI** Channel Status Indicator (CQI, PMI).
- Se envían en los RB de borde del bandwidth, durante 1 subframe.
- Un slot se envía en un RB y el otro en el otro RB.
- Se deben asignar recursos de PUCCH periódicamente a los móviles. → Capacidad (# de PRBs) de PUCCH es importante para dimensionar cantidad de usuarios que pueden estar conectados en la celda.

| PUCCH Formats | Control type | Modulation (data part) | Bit rate (raw bits/subframe) | Multiplexing capacity (UE/RB) |
|---------------|----------------------|------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 1 | Scheduling request | Unmodulated | – (on/off keying) | 36, 18*, 12 |
| 1a | 1-bit ACK/NACK | BPSK | 1 | 36, 18*, 12 |
| 1b | 2-bit ACK/NACK | QPSK | 2 | 36, 18*, 12 |
| 2 | CQI | QPSK | 20 | 12, 6*, 4 |
| 2a | CQI + 1-bit ACK/NACK | QPSK | 21 | 12, 6*, 4 |
| 2b | CQI + 2-bit ACK/NACK | QPSK | 22 | 12, 6*, 4 |

*Typical value



Canales Físicos

CSI: Channel State Indicator

- **CQI** – Channel Quality Indicator
 - 0..15
 - Permite informar sobre condiciones de radio en canal DL y así determinar MCS apropiado.
 - Con mejores condiciones de radio se puede utilizar MCS menos robusto pero más eficiente.
- **RI** – Rank Index
 - Rango de la matrix de estimación del canal.
 - Simplificado: qué tan bien distingo los otros Tx?
 - Toma valores 1, 2, 3, 4 dependiendo de la configuración de MIMO.
- **PMI** – Precoding Matrix Indicator.
- El envío del reporte puede ser periódico o aperiódico.
 - Periódico: se envía por PUSCH o PUCCH.
 - Aperiódico: se envía por PUSCH luego de que le pidan por PDCCH.

| CQI | modulation | code rate x 1024 | efficiency |
|-----|------------|------------------|------------|
| 0 | | out of range | |
| 1 | QPSK | 78 | 0,1523 |
| 2 | QPSK | 120 | 0,2344 |
| 3 | QPSK | 193 | 0,3770 |
| 4 | QPSK | 308 | 0,6016 |
| 5 | QPSK | 449 | 0,8770 |
| 6 | QPSK | 602 | 1,1758 |
| 7 | 16QAM | 378 | 1,4766 |
| 8 | 16QAM | 490 | 1,9141 |
| 9 | 16QAM | 616 | 2,4063 |
| 10 | 64QAM | 466 | 2,7305 |
| 11 | 64QAM | 567 | 3,3223 |
| 12 | 64QAM | 666 | 3,9023 |
| 13 | 64QAM | 772 | 4,5234 |
| 14 | 64QAM | 873 | 5,1152 |
| 15 | 64QAM | 948 | 5,5547 |

Canales Físicos

MCS: Modulation and Coding Scheme

- Define la modulación a utilizar y el Transport Block Size (TBS) en bits a enviar durante el subframe.
- Con mejores condiciones de radio el canal es más robusto y permite modulaciones y codificaciones más eficientes.
- Con la elección de una modulación y un coding rate para DL (a través de CQI) y para UL (a partir de canal en UL) se elige el TBS.
- El mapeo entre DL CQI / UL SINR, y el MCS y TBS index es vendor specific.
- La asignación de TBS se realiza con tablas y debe ser tal que se pueda alcanzar el coding rate requerido.
- Se entiende por coding rate como el cociente entre TBS y la cantidad de bits disponibles en el canal.

| | | | | | |
|----------------|-----|-------|-------|-------|-------|
| #PRBs→ TBS↓ | ... | 98 | 98 | 99 | 100 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 24 | ... | 59256 | 59256 | 61664 | 61664 |
| 25 | ... | 61664 | 61664 | 63776 | 63776 |
| 26 | ... | 71112 | 73712 | 73712 | 75376 |

DL MCS

| MCS Ind | Mod | TBS ind |
|---------|-------|---------|
| 0-9 | QPSK | 0-9 |
| 10-16 | 16QAM | 9-15 |
| 17-28 | 64QAM | 15-26 |

UL MCS

| MCS | Mod | TBS ind |
|-------|--------|---------|
| 0-10 | QPSK | 0-10 |
| 11-20 | 16QAM | 10-19 |
| 21-28 | 64QAM* | 19-26 |

* Si el móvil es 64QAM capable

Canales Físicos

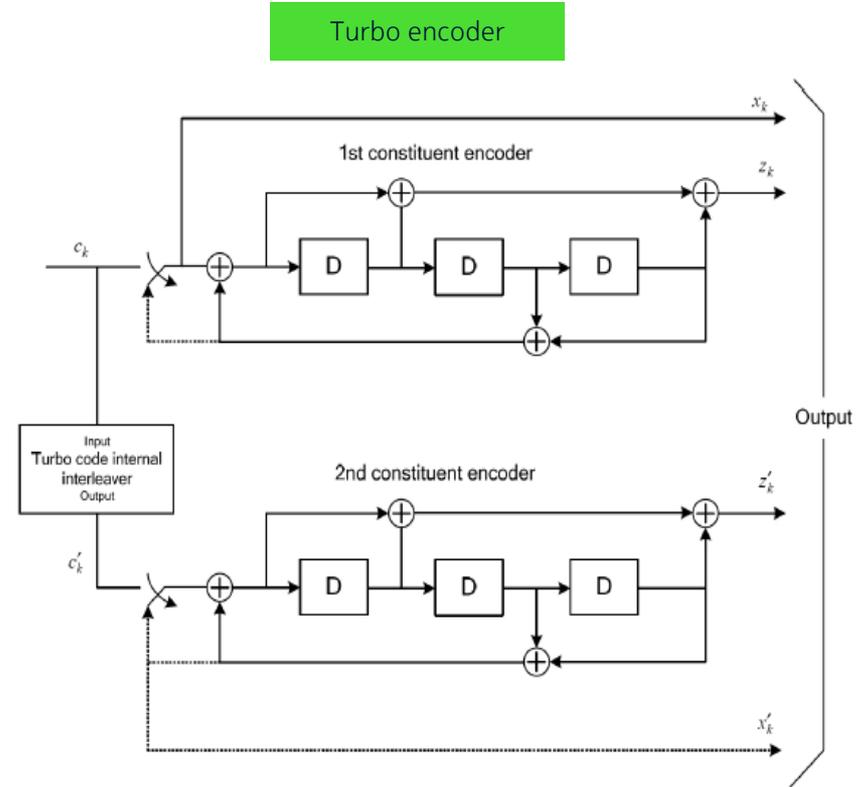
Coding Rate

- Cociente entre el TBS y la cantidad de bits disponibles en el canal.
- Ejemplo: 100 PRB en 1 subframe. TBS index 26 → 75376 bits.
- Caso SISO. Mod 64QAM CFI = 1. No considero REs de PSS SSS PBCH.
 - $100 \text{ PRB} \times 12 \text{ sc} \times 7 \text{ symb} \times 2 \text{ slots} = 16800 \text{ RE}$.
 - PDCCH: $- 100 \text{ PRB} \times 12 \text{ sc} \times 1 \text{ symb} = - 1200 \text{ RE}$.
 - RS: $- 6 \text{ RE} \times 100 \text{ PRB} = - 600 \text{ RE}$. (SISO)
 - Total: $15000 \text{ RE} \rightarrow 90000 \text{ bits} \rightarrow \text{Coding rate: } 75376/90000 = 0,8375$.
- El throughput entonces se calcula respecto al TBS que a su vez dependerá de los recursos disponibles (#PRBs) y la calidad del canal (que se traduce en MCS).
- Rate Matching: ajustar bits de información a total de bits a transmitir.

Canales Físicos

Channel Coding

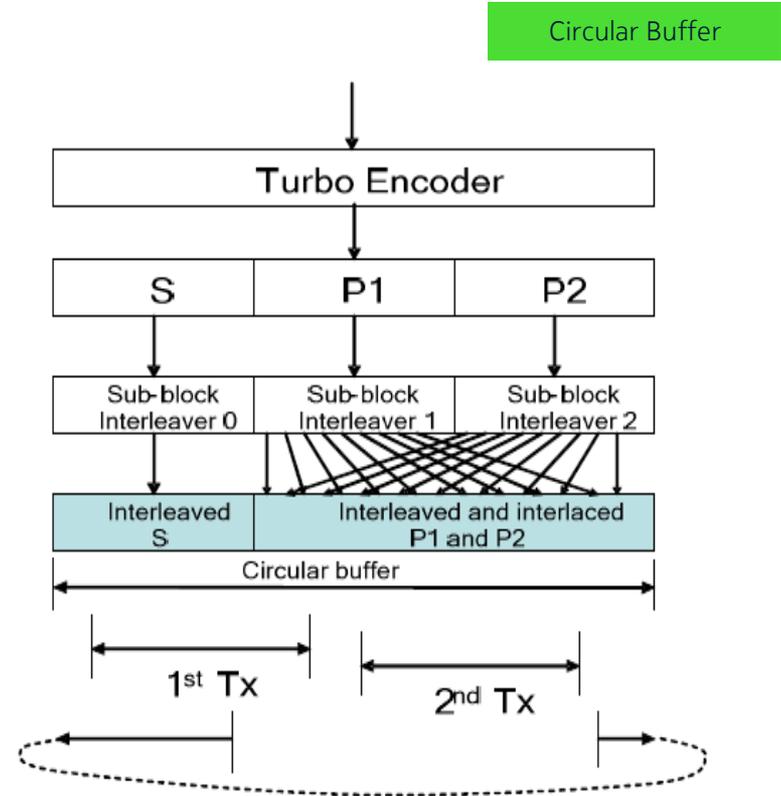
- **Shannon:** límite en cantidad de información que se puede enviar por un canal con ruido en forma fiable.
 - límite teórico con coding randómico.
 - en la práctica no puedo usar código random; tengo que ser capaz de sistematizar encoding y decoding.
- Channel Coding: optimizar envío de redundancia para acercarse al límite de Shannon.
- La codificación del canal debe ser posible de sistematizarse, pero igualmente pseudo-random para maximizar Shannon.
- LTE: se utilizan **códigos turbo** 1/3 para codificación del canal. Se obtienen 3 secuencias de igual tamaño:
 - S: Systematic bits, aquellos con la info que quiero enviar.
 - P1: Parity bits 1. Bits de redundancia.
 - P2: Parity bits 2. Bits de redundancia.
- Los mismos que se utilizaban en HSPA.
- Dos codificadores convolucionales en paralelo.
- Por cada bit a la entrada, se obtienen dos más de paridad.



Canales Físicos

Channel Coding

- **Rate Matching:** adaptar codificación de canal de 1/3 a requerimientos de acuerdo a condiciones de radio (SINR).
- **Puncturing** → no envío todos los bits de paridad, solo una porción de ellos.
- Cuanto mejor SINR, menos bits de paridad, coding rate más eficiente.
- **IR-HARQ:** Incremental Redundancy HARQ
 - **HARQ** → **H**ybrid **A**utomatic **R**epeat **r**e**Q**uest. ACK/NACK a nivel de capa MAC en base a código CRC de trama.
 - **IR** → **I**ncremental **R**edundancy. En la retransmisión se envían nuevos bits de paridad. Transmisión diferente a la original.



Canales Físicos

Reparto de Recursos

- Los PRBs tanto en DL como en UL se asignan en forma dinámica.
- Previo a cada TTI debo decidir una asignación de recursos.
- ¿Con qué criterio asigno los recursos?
 - Le doy más PRBs al que tienen más tráfico pendiente?
 - Al que tiene mejor radio?
 - Al que hace más tiempo no asigno?
- La decisión de asignación de recursos no está estandarizada.
- Queda a criterio de cada vendor su implementación.

Proportional Fair:

- Punto medio entre maximizar max thput e igualar thput.
- Métrica M por usuario. Ordeno usuarios por métrica.

$$M = \frac{T^\alpha}{R^\beta}$$

- T: Proporcional a thput instantáneo (radio).
- R: Proporcional a thput pasado (asignación+radio previos).
- α, β : criterios de fairness.

Maximizar thput celda:

- Priorizar a los usuarios con mejor radio.
- Espectralmente más eficiente.
- (Muy) injusto con móviles en cell edge.
- $\alpha = 1; \beta = 0$

Round Robin:

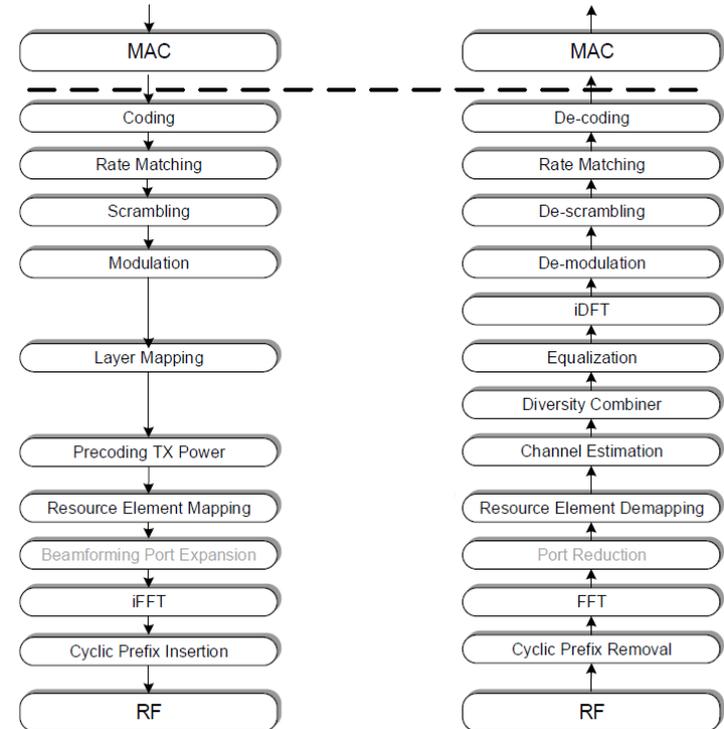
- Reparto los PRBs de forma pareja.
- Todos los usuarios reciben la misma cantidad de recursos.
- Los que están más cerca de la radiobase se aseguran mejor servicio.

Igualar thput por usuario:

- Más PRBs a usuarios en cell edge para compensar radio.
- Sacrificio eficiencia espectral.
- Injusto con móviles cercanos a celda.
- $\alpha = 0; \beta = 1$

Canales Físicos

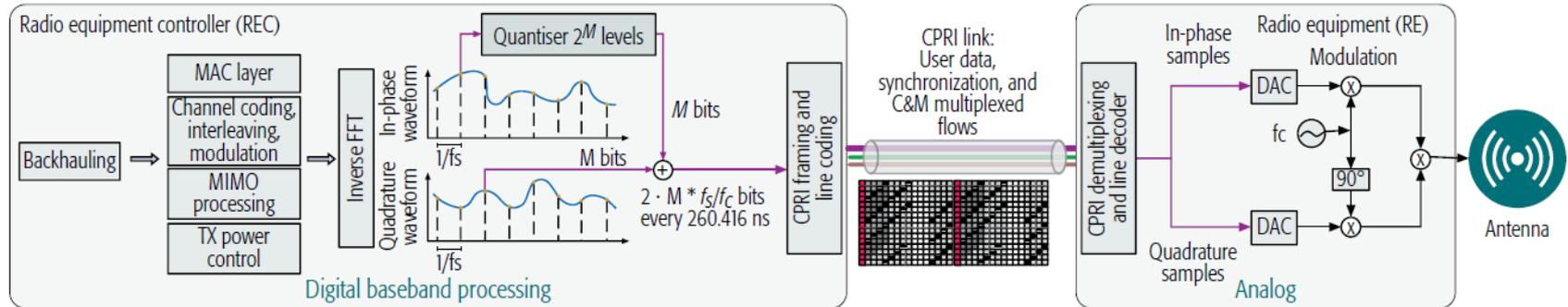
Procedimiento L1



Canales Físicos

CPRI

- **C**ommon **P**ublic **R**adio **I**nterface. Estandarización conjunta entre varios proveedores.
- Protocolo para envío de muestras señal en el tiempo hacia el radio. **No varía con carga de usuarios o tráfico!**
- 15 bits para I y 15 bits para Q: 30 bits/sample.
- LTE 20 MHz sample rate 30.72 Msps → CPRI payload: 921.6 Mbps por cada Tx
- MIMO 4x4 → 4 Tx. CPRI payload: 3.68 Gbps.
- Se debe además tener en cuenta overhead de protocolo CPRI que depende de configuración.



Introducción

Arquitectura e Interfaces de Red LTE

Interfaz de Radio

Canales Físicos

Canales de Transporte y Canales Lógicos

Stack de Protocolos

Servicios de voz en LTE

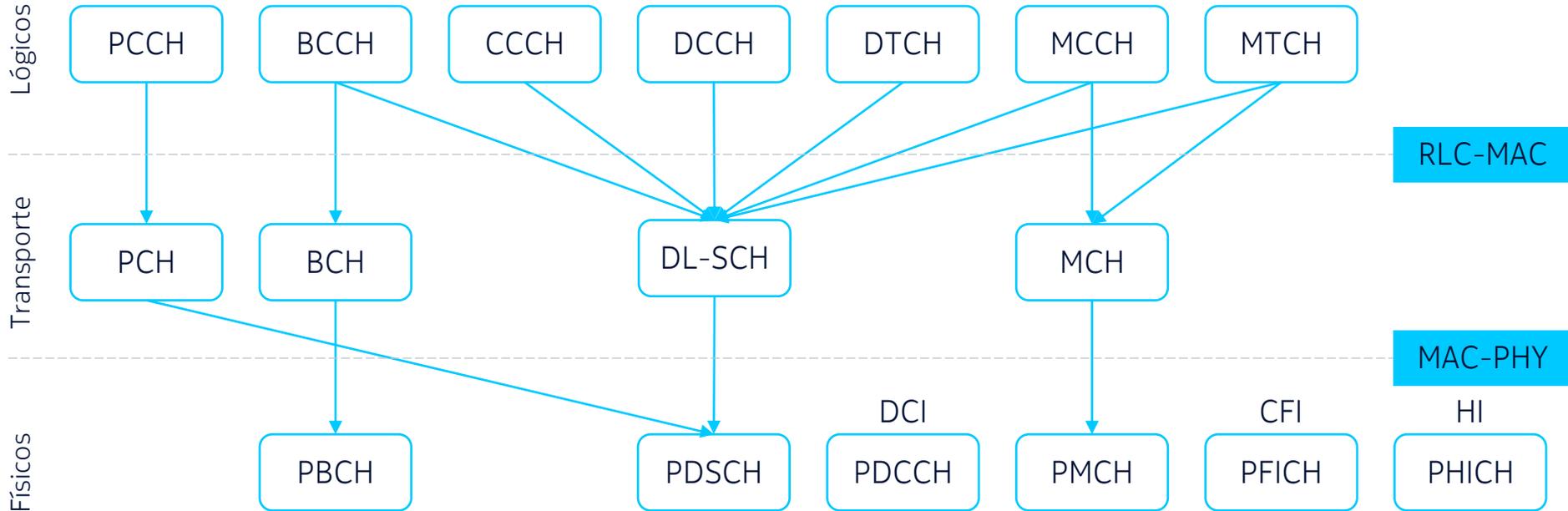
LTE-Advanced + otras features

Canales de Transporte y Canales Lógicos

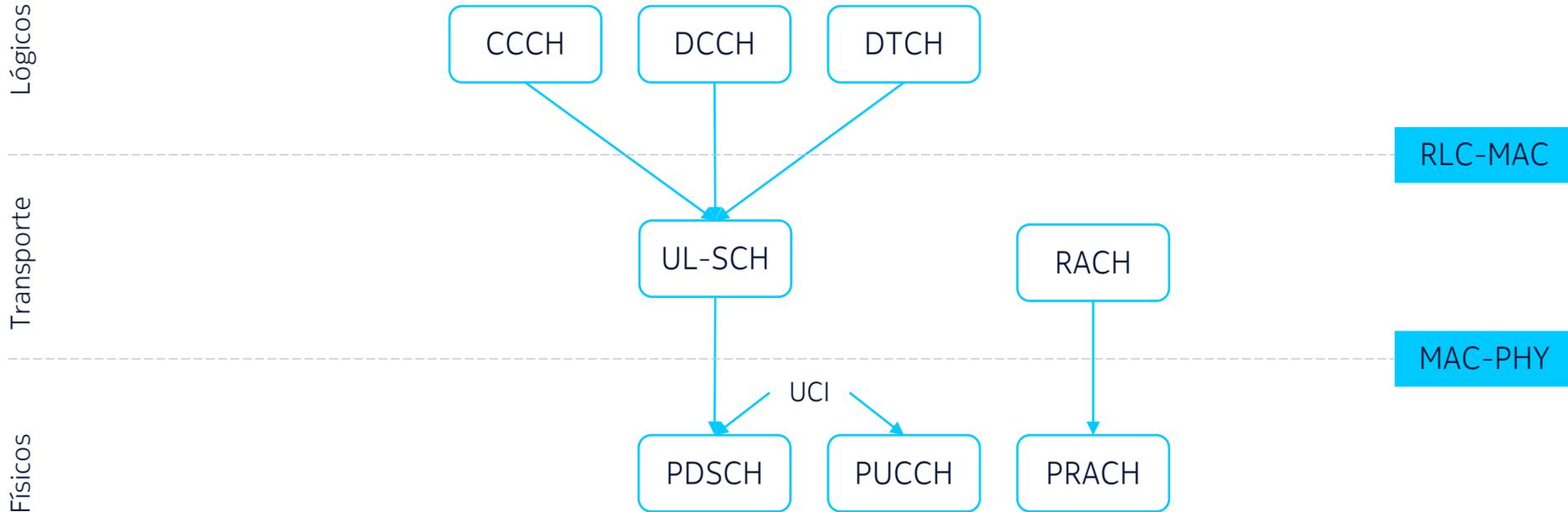
Listado de Canales

- **BCCH – Broadcast Control Channel [DL]:**
Información del Sistema. MIB en PBCH y SIB en PDSCH.
- **PCCH – Paging Control Channel [DL]:**
Pedido de paging a UE en celdas del TAC.
- **CCCH – Common Control Channel [DL/UL]:**
Canal compartido para establecimiento de conexión. UE sin conexión RRC.
- **MCCH – Multicast Control Channel [DL]:**
Información de Multicast. Se puede mapear a PMCH o a PDSCH.
- **DCCH – Dedicated Control Channel [DL/UL]:**
Canal dedicado para información especificada de usuario. Power control, handover, etc.
- **DTCH – Dedicated Traffic Channel [DL/UL]:**
Tráfico de usuario.
- **MTCH – Multicast Traffic Channel [DL]:**
Transmisión de datos multicast. Se puede mapear a PMCH o a PDSCH.

Canales de Transporte y Canales Lógicos Downlink



Canales de Transporte y Canales Lógicos Uplink



Canales de Transporte y Canales Lógicos

SIB: System Information Broadcast

Hay varios, 20+ SIBs definidos en el estándar, con distintos usos.

| | |
|-------|---|
| MIB | Carries physical layer information of LTE cell which in turn help receive further SIs, i.e. system bandwidth |
| SIB1 | Contains information regarding whether or not UE is allowed to access the LTE cell. It also defines the scheduling of the other SIBs. carries cell ID, MCC, MNC, TAC, SIB mapping. |
| SIB2 | Carries common channel as well as shared channel information. It also carries RRC, uplink power control, preamble power ramping, uplink Cyclic Prefix Length, sub-frame hopping, uplink EARFCN |
| SIB3 | carries cell re-selection information as well as Intra frequency cell re-selection information |
| SIB4 | carries Intra Frequency Neighbors(on same frequency); carries serving cell and neighbor cell frequencies required for cell reselection as well handover between same RAT base stations(GSM BTS1 to GSM BTS2) and different RAT base stations(GSM to WCDMA or GSM to LTE or between WCDMA to LTE etc.) . Covers E-UTRA and other RATs as mentioned |
| SIB5 | Carries Inter Frequency Neighbors(on different frequency); carries E-UTRA LTE frequencies, other neighbor cell frequencies from other RATs. The purpose is cell reselection and handover. |
| SIB6 | carries WCDMA neighbors information i.e. carries serving UTRA and neighbor cell frequencies useful for cell re-selection |
| SIB7 | carries GSM neighbours information i.e. Carries GERAN frequencies as well as GERAN neighbor cell frequencies. It is used for cell re-selection as well as handover purpose. |
| SIB8 | carries CDMA-2000 EVDO frequencies, CDMA-2000 neighbor cell frequencies. |
| SIB9 | carries HNBID (Home eNodeB Identifier) |
| SIB10 | carries ETWS prim. notification |
| SIB11 | carries ETWS sec. notification |

Introducción

Arquitectura e Interfaces de Red LTE

Interfaz de Radio

Canales Físicos

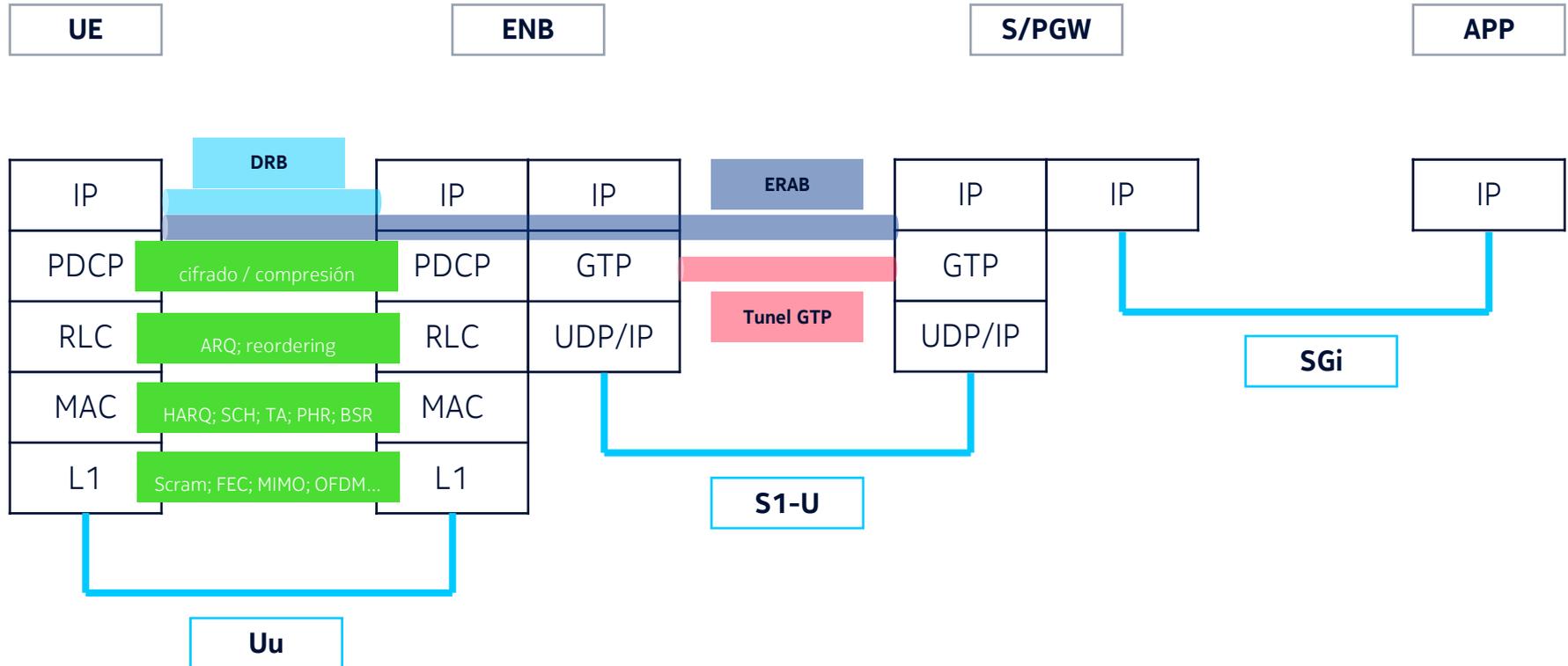
Canales de Transporte y Canales Lógicos

Stack de Protocolos

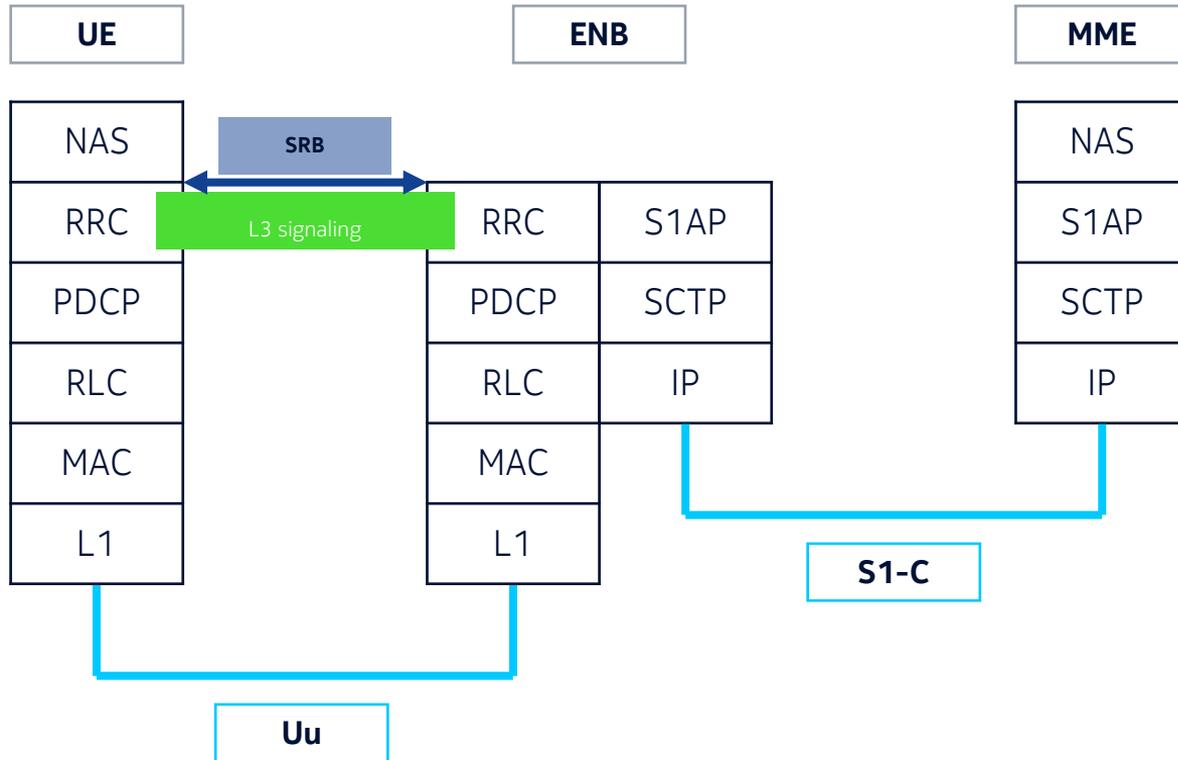
Servicios de voz en LTE

LTE-Advanced + otras features

Stack de Protocolos User Plane



Stack de Protocolos Control Plane

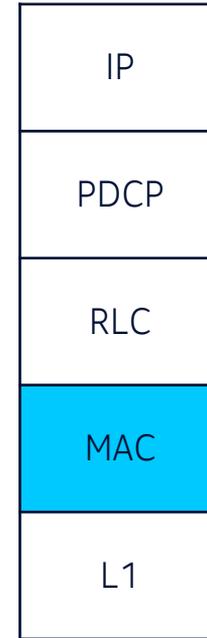


Stack de Protocolos

Radio – capa MAC

MAC: Medium Access Control

- Mapeo de Canales Lógicos en Canales de Transporte.
- Scheduling en el eNB.
- Multiplexing/demultiplexing RLC Payload Data Units (PDU) en/desde Transport Blocks.
- Medida de volúmen de tráfico.
- Error Correction con HARQ.
- Intercambio de info relativa a MAC. Ej.:
 - [ENB>UE] TA → Timing Advance
 - [ENB>UE] DRX Command.
 - [UE>ENB] PHR → Power Headroom
 - [UE>ENB] BSR → Buffer Status Report.

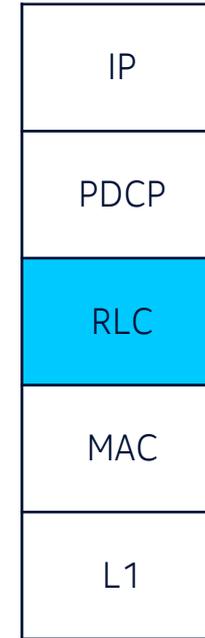


Stack de Protocolos

Radio – capa RLC

RLC: Radio Link Control

- Transferencia de PDUs recibidas de capas superiores.
- Tiene tres modos de operación.
 - TM – Transparent Mode
Envía y recibe PDUs pero no lleva registro de PDU. Adecuado para canales sin retransmisiones en L1 (BCCH PCCH CCCH).
 - UM – Unacknowledge Mode
In-sequence delivery por ejemplo en casos de retransmisiones por HARQ. Se forman SDUs y se les asigna encabezado con número de secuencia. DCCH DTCH MCCH MTCH.
 - AM – Acknowledge Mode
También In-sequence delivery del UM. Permite pedido de retransmisiones de PDU en caso de pérdida en aguas abajo.
- Split de tráfico entre carriers en caso de LTE CA.

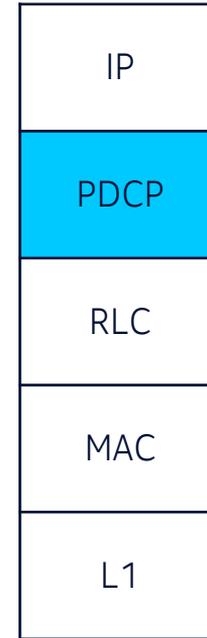


Stack de Protocolos

Radio – capa PDCP

PDCP: Packet Data Convergence Protocol

- Ciphering y deciphering tanto de control plane como de user plane.
- Verificación de integridad de los mensajes de control plane. Verifica que los mensajes de control vienen del lugar correcto.
- Header compression/decompression de paquetes IP de user plane.
 - ROHC Robust Header Compression
 - Permite reducir el overhead por encabezado de paquete IP durante la transmisión.
 - No se utiliza siempre. Hace mayor diferencia en por ejemplo VoIP donde el overhead es más comparable con el payload.

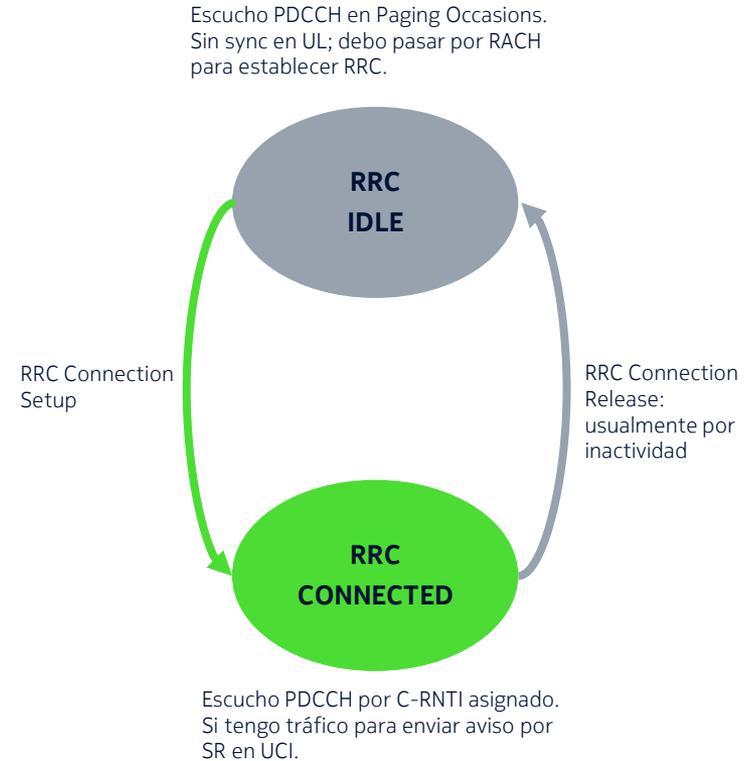


Stack de Protocolos

RRC: Radio Resource Control

RRC: Radio Resource Control

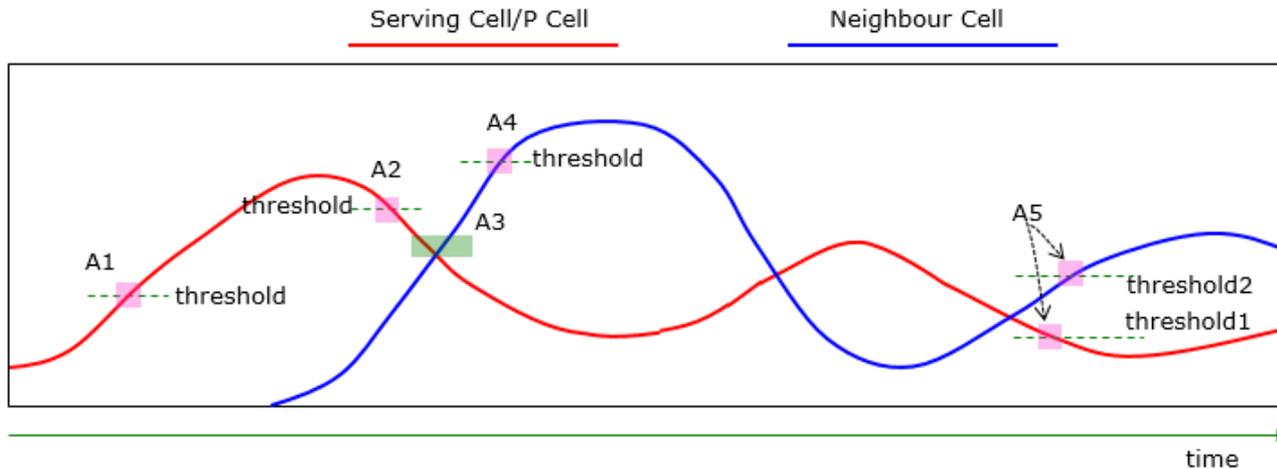
- Protocolo encargado del control plane en la interfaz de radio.
- Attachment
- Session Setup
- UE measurements y handover
- Paging
- Transporte de mensajería NAS (Non Access Stratum) entre UE y MME.
- Dos estados:
 - RRC no establecido: RRC_IDLE.
Debo escuchar PDCCH por si recibo paging (P-RNTI). Para comenzar a traficar debo usar RACH.
 - RRC establecido: RRC_CONNECTED.
Debo escuchar PDCCH por si recibo tráfico (C-RNTI). Para tráfico UL debo avisar con Sched Req.



Stack de Protocolos

Eventos de movilidad

- Para la movilidad en conectado se definen medidas de móviles que triggeren eventos.
 - **A1:** Serving RSRP por encima de umbral.
 - **A2:** Serving RSRP por debajo de umbral.
 - **A3:** Diferencia de RSRP o RSRQ entre serving y neighbor.
 - **A4:** Neighbor RSRP o RSRQ por encima de umbral.
 - **A5:** Serving RSRP o RSRQ por debajo de umbral. Neighbor por encima de umbral.
 - **B1:** Neighbor inter-rat por encima de umbral.
 - **B2:** Neighbor inter-rat por encima de umbral. Serving RSRP o RSRQ por debajo de umbral.

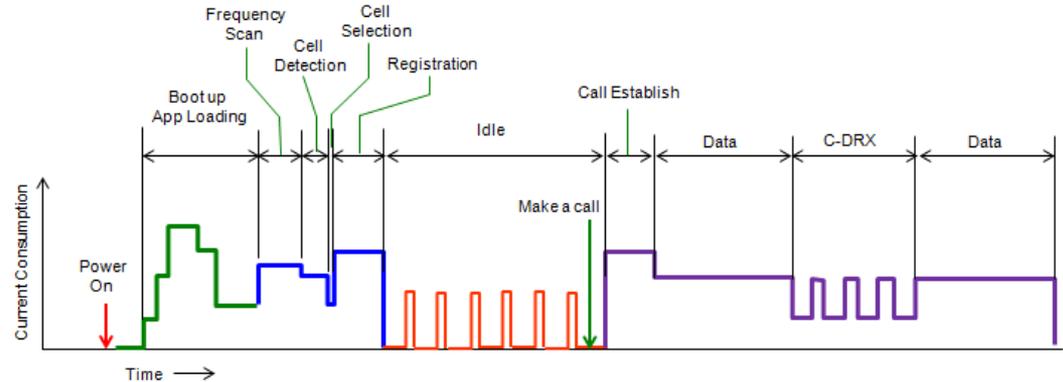
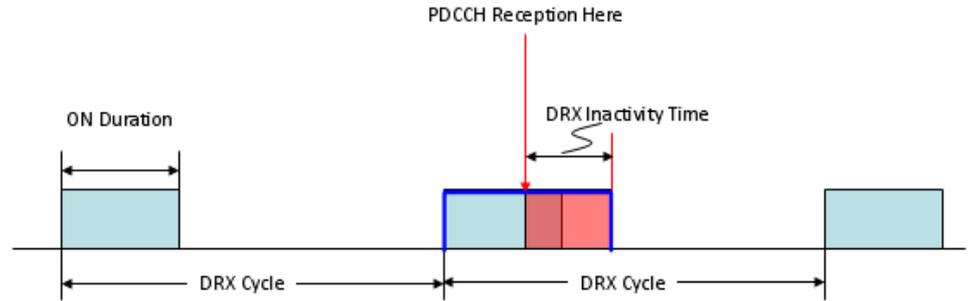


Stack de Protocolos

C-DRX

C-DRX: Connected DRX

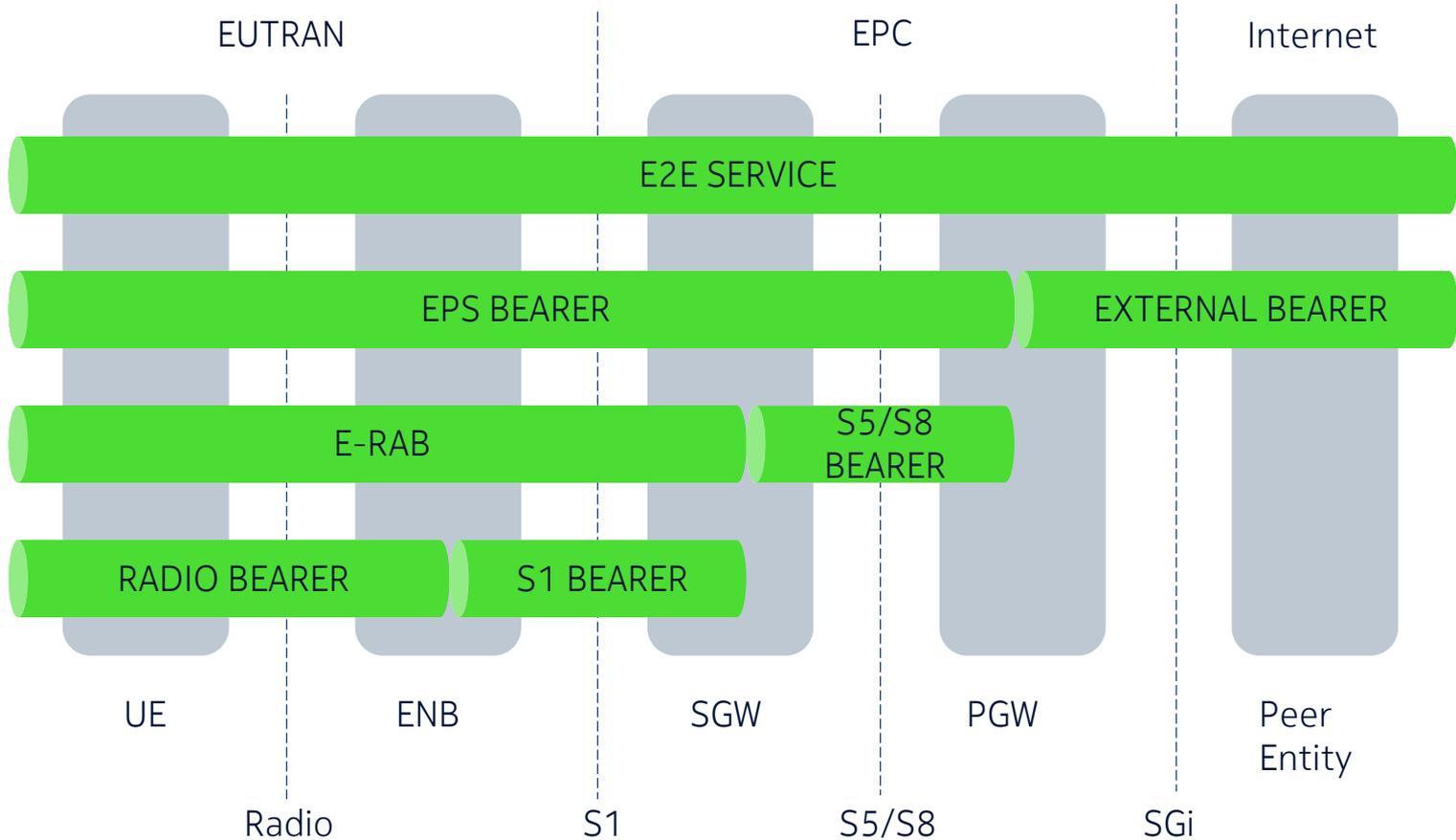
- Estando en estado conectado (RRC Connected), C-DRX permite no estar todo el tiempo escuchando el PDCCH buscando datos asignados.
- Esto permite ahorro de batería en estado connected, a costo de mayor delay en el comienzo de transmisión de datos.
- Se configura tiempo de inactividad tras el cual se entra en ciclo de DRX.
- DRX ON: período en que estoy activamente escuchando por recursos.



Stack de Protocolos

Bearers

Default Bearer: Bearer utilizado por defecto para una red.
Dedicated Bearer: Tráfico GBR. Asociado a un default bearer.



DRB: Data Radio Bearer.
SRB: Signaling Radio Bearer.

Stack de Protocolos

QCI: QoS Class Identifier

- Identificador de tipo de tráfico del bearer.
- Permite brindar QoS dependiendo de la clase.
- Guaranteed Bit Rate: Tráfico GBR vs. NonGBR.

| QCI | Resource Type | Priority | Packet Delay Budget | Packet Error Loss Rate | Aplicaciones |
|-----|---------------|----------|---------------------|------------------------|--|
| 1 | GBR | 2 | 100 ms | 10^{-2} | Conversational voice |
| 2 | | 4 | 150 ms | 10^{-3} | live streaming of conversational voice |
| 3 | | 3 | 50 ms | 10^{-3} | Real time gaming |
| 4 | | 5 | 300 ms | 10^{-6} | Non conversational video (Buffered streaming) |
| 5 | Non GBR | 1 | 100 ms | 10^{-6} | IMS signaling (SIP) |
| 6 | | 6 | 300 ms | 10^{-6} | Video (buffered streaming), TCP based applications |
| 7 | | 7 | 100 ms | 10^{-3} | Voice, video (live streaming), interactive gaming |
| 8 | | 8 | 300 ms | 10^{-6} | Video (Buffered streaming), TCP based applications |
| 9 | | 9 | | 10^{-6} | |

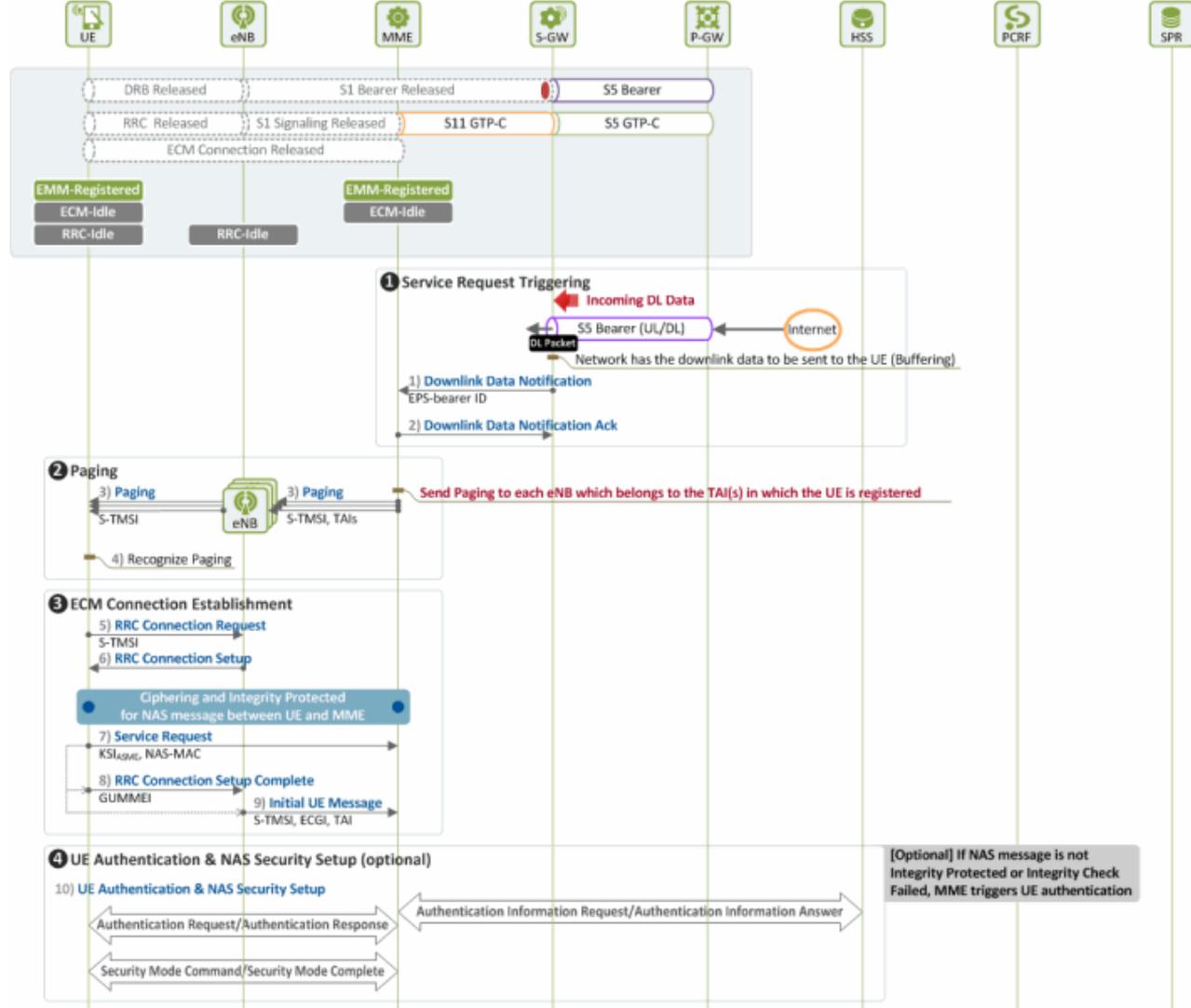
Stack de Protocolos

Ejemplo Call Flow

Móvil se encuentra attached (registrado) en la red.

Llega tráfico DL para UE en idle.

1. SGW recibe tráfico por S-Gi. Retiene en buffer y dispara con MME notificación a UE.
2. MME envía paging a UE a último ENB o vecinos o por TAC. UE encuentra paging.
3. UE pasa por RACH y solicita RRC a ENB. Luego envía Initial UE Message a MME.
4. Autenticación e intercambio de claves para cifrado.



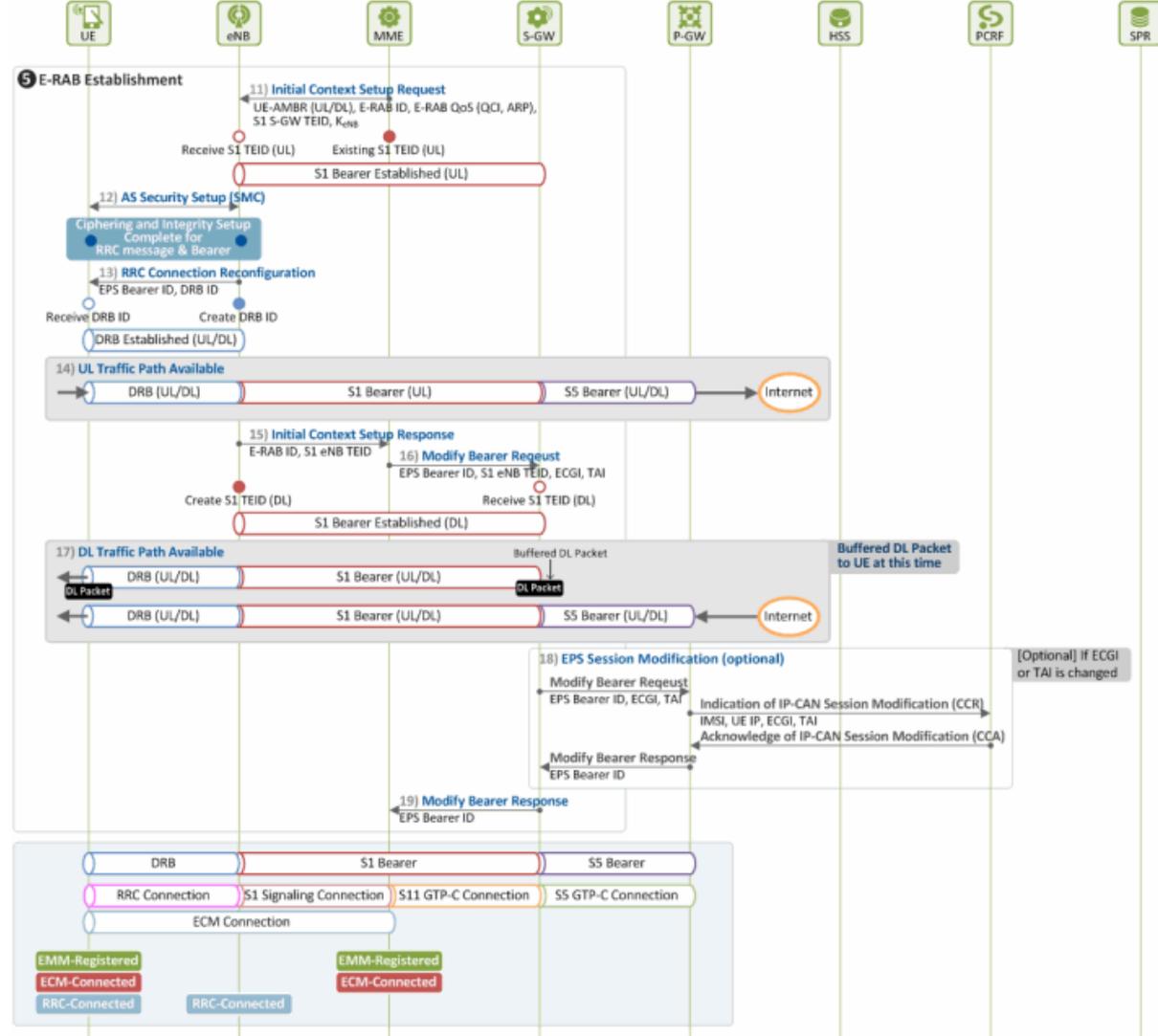
Ejemplo tomado de <https://www.netmanias.com/en/?m=view&id=techdocs&no=6134>.

Stack de Protocolos

Ejemplo Call Flow

- MME envía Initial Context Setup Request para establecer los ERABs. Intercambian TEIDs con ENB. Con Initial Context Setup Response quedan ERABs establecidos. MME reenvía a SGW cuál TEID usar para tráfico DL.
- Queda pronto el camino desde internet al usuario.

El ejemplo fue con tráfico iniciado desde server externo. Caso con tráfico inicial en móvil es igual pero sin paso inicial de recepción de paging.



Ejemplo tomado de <https://www.netmanias.com/en/?m=view&id=techdocs&no=6134>.

Introducción

Arquitectura e Interfaces de Red LTE

Interfaz de Radio

Canales Físicos

Canales de Transporte y Canales Lógicos

Stack de Protocolos

Servicios de voz en LTE

LTE-Advanced + otras features

Servicios de Voz en LTE

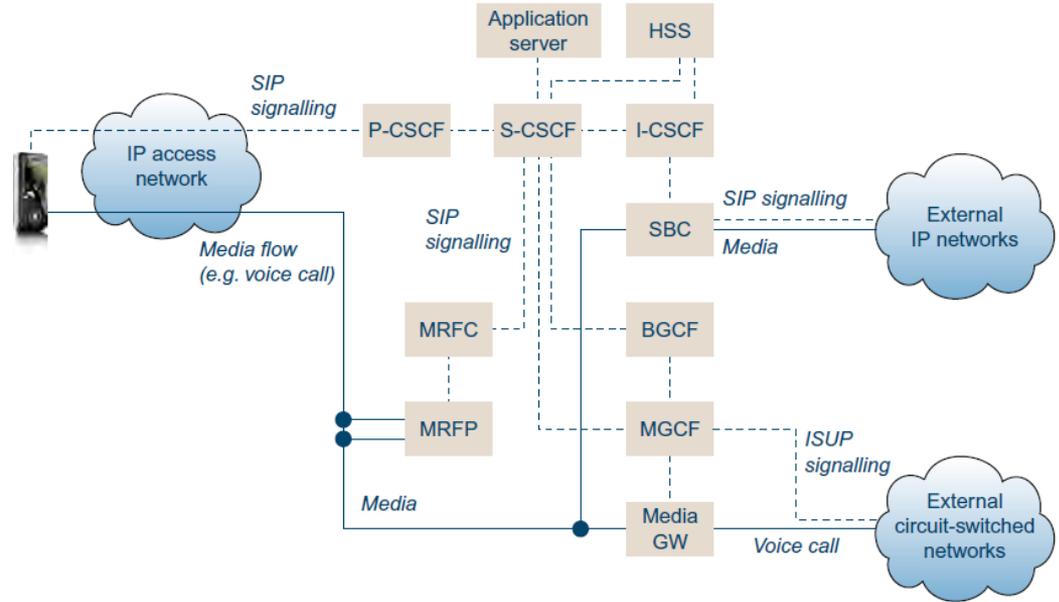
Vista General

- El EPC únicamente provee servicios de paquetes.
- La solución por defecto para tráfico de voz es **Cs Fallback** (CSFB):
 - El usuario es redirigiendo el móvil hacia GSM o UMTS para la duración de la llamada, y volviendo luego de finalizada.
 - Mayor delay en el establecimiento de la llamada.
 - El usuario debe cortar la conexión en LTE para luego reselección a 2G/3G y pedir recursos (RRC Connection Request).
- **VoLTE**: Voice over LTE. Implementación de servicios de voz sobre IP en la red LTE.
- Se realiza a través de servidor IMS:

Servicios de Voz en LTE

IMS

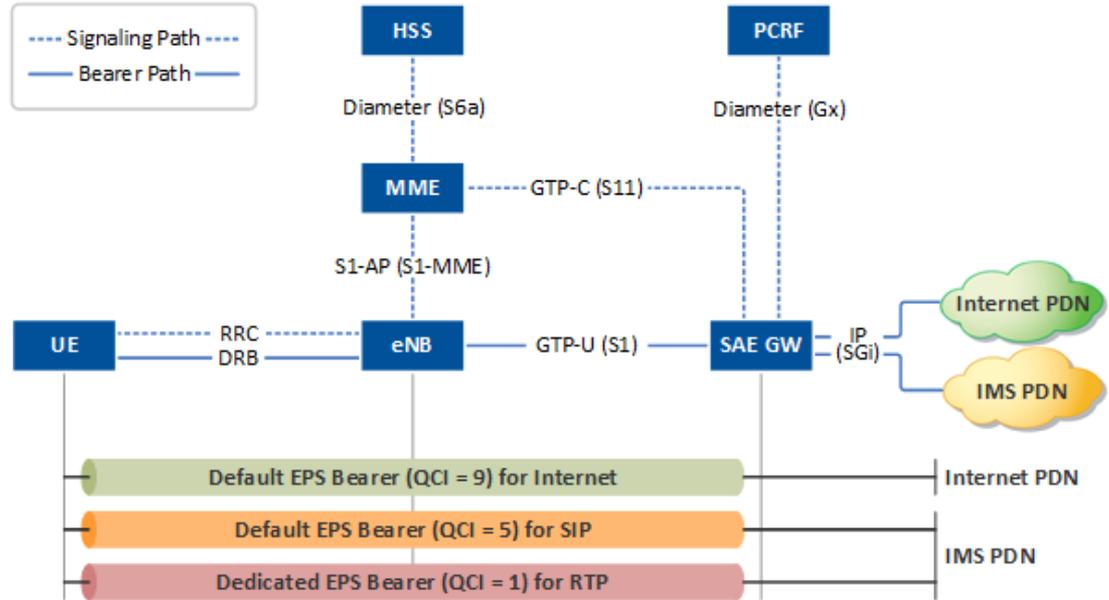
- **IP Multimedia Subsystem.**
 - Inicialmente desarrollado por 3GPP pero adoptado para servicios non-3GPP.
 - Mismas especificaciones para fijo y para móvil.
- Basado en señalización con protocolo **SIP**.
- User plane con **RTP/UDP**.
- Más información sobre IMS en sección de NGN de curso Tecnologías de Redes y Servicios de Telecomunicaciones (TRST).



Servicios de Voz en LTE

Implementación en Red Móvil

- Desde el punto de vista de la red móvil, es conectividad hacia otra red.
- Nueva sesión hacia PDN correspondiente al IMS para tráfico SIP. Definición de APN “ims” pre-configurada en UE que apunta hacia red IMS.
- Sobre este APN se establece un default bearer **QCI5 para señalización SIP** con tráfico nonGBR.
- Cuando se realiza una llamada de voz se levanta un **QCI1 para tráfico RTP** con tráfico GBR.
- Esta sesión es independiente del tráfico “normal” de datos del usuario, que no necesariamente tendrá el mismo PGW como destino.



Servicios de Voz en LTE

VoLTE: Pros y Cons

Ventajas

- Puedo tener una conexión de datos de alta velocidad en paralelo.
- No tengo delay adicional de establecimiento por CSFB.
- Mejores bitrates para la voz posibilitan codecs de mejor calidad.
- No dependo de redes legacy espectralmente ineficientes.

Contras

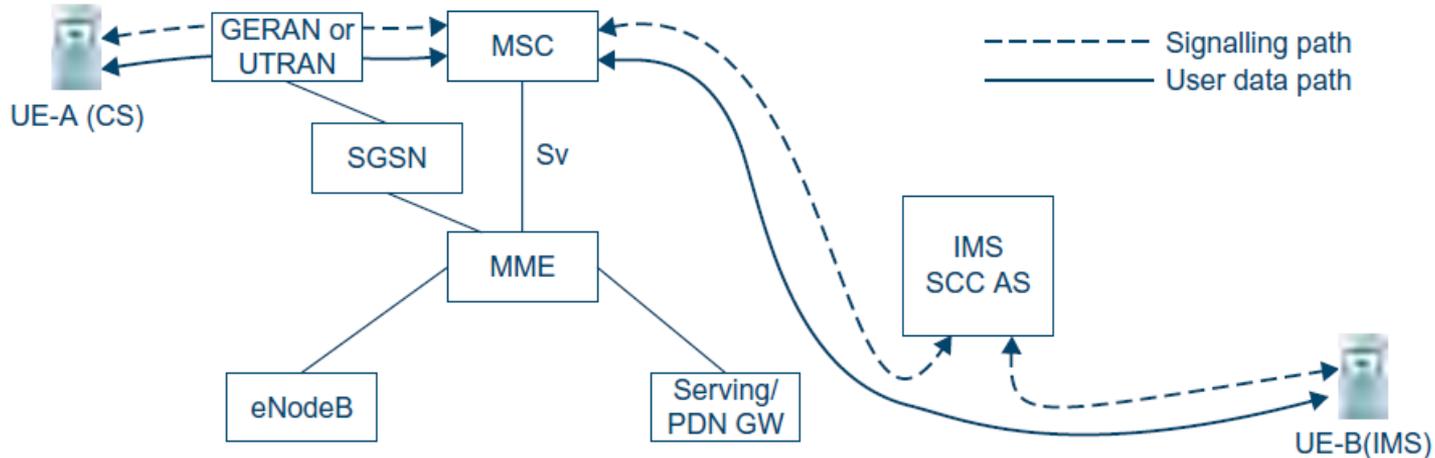
- En GSM y UMTS tengo recursos de radio dedicados fijos (slot y código, respectivamente). **En LTE los recursos de radio son compartidos.**
- Macro-diversidad intrínseca a 3G permite robustecer los enlaces hacia el móvil.
- Hoy en día puede tener más carga la red LTE lo cual lleva a más pelea por recursos y más interferencia en el sistema.
- Core y transporte sobre red de paquetes y no basado en circuitos.

Servicios de Voz en LTE

SRVCC

Single-Radio Voice Call Continuity

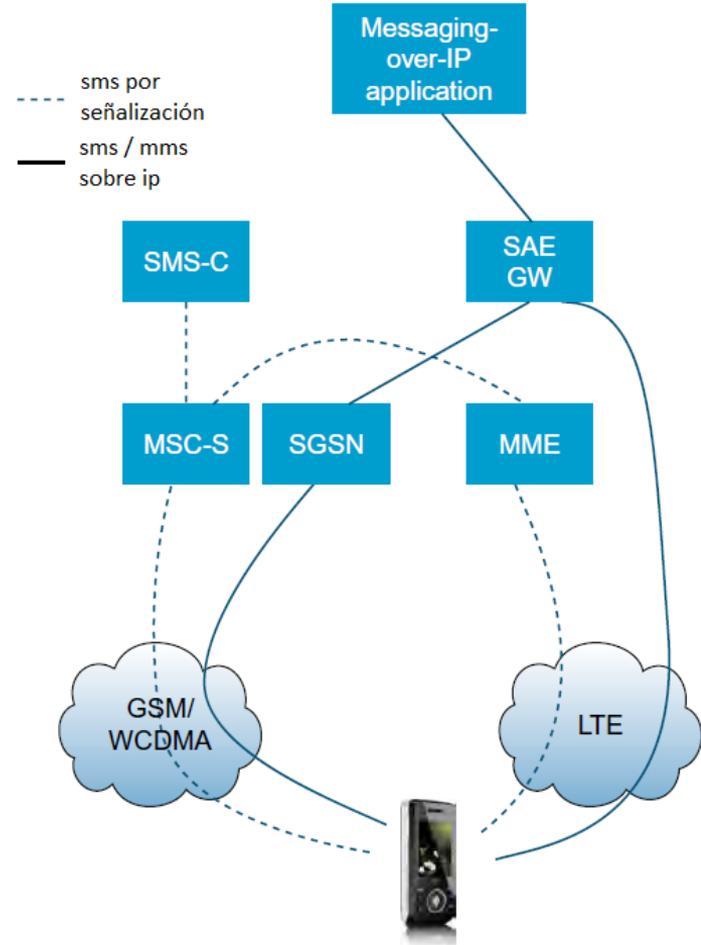
- Single-Radio: en general los móviles no contemplan conexión dual a LTE y UMTS/GSM simultáneamente.
- Se debe contemplar el pasaje desde LTE hacia redes 3G/2G.
 - Por ejemplo por falta de cobertura en LTE, posibilitar movilidad a redes legacy.
 - Debe ser imperceptible para el usuario. Sin demoras que afecten sustancialmente el delay.
- IMS se mantiene como prestador de servicios de voz antes y después del HO.



Servicios de Voz en LTE

SMS y MMS

- Los mensajes por SMS y MMS son servicios de core de Cs.
- En 2G/3G se envían mediante server SMS-C por el MSC.
- Dos alternativas para SMS en LTE:
 - Enviar los SMS por **señalización**. Se envía sobre mensajería NAS desde MME al UE.
 - Enviar por **IP** directamente a través del SGW.
- Los MMS se deben hacer por IP.



Introducción

Arquitectura e Interfaces de Red LTE

Interfaz de Radio

Canales Físicos

Canales de Transporte y Canales Lógicos

Stack de Protocolos

Servicios de voz en LTE

LTE-Advanced + otras features

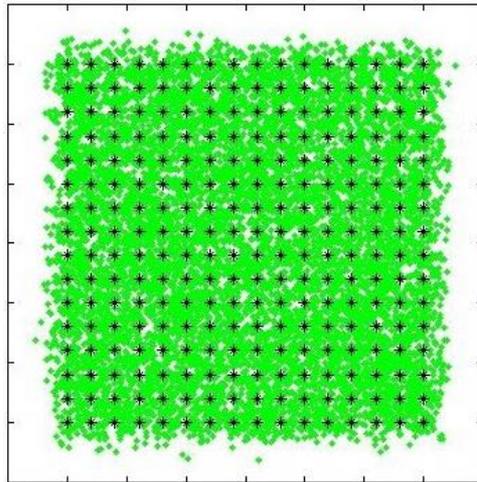
LTE-Advanced

256QAM

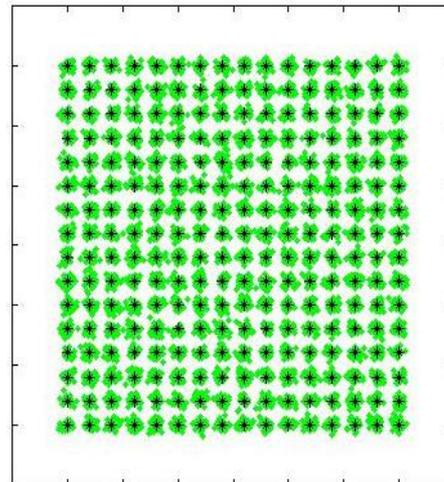
A partir del release 12 de LTE se estandariza el uso de 256 QAM como nueva modulación para el DL.

Esta modulación utiliza $2^8 = 256$ symbols distintos, con lo cual cada symbol representará una palabra de 8 bits. El crecimiento en throughput es prácticamente lineal. Paso de una modulación de 64 QAM de 6 bits/symbol a 256 QAM de 8 bits/symbol, lo que supone una mejora de +33% en la eficiencia espectral y en el throughput.

SINR @ 20 dB



SINR @ 30 dB



256 QAM
modulation

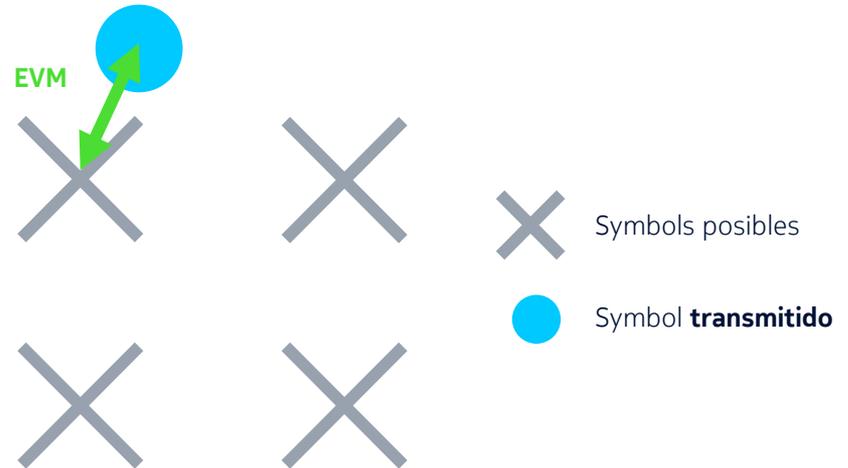
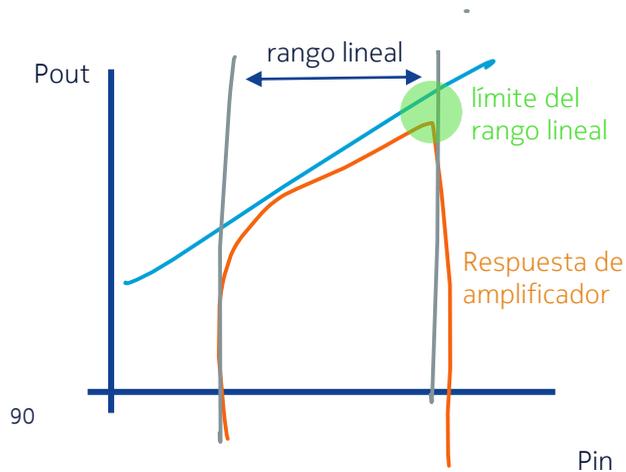
Es muy importante tener alto SINR para poder distinguir symbols tan cercanos entre sí en el espacio complejo.

LTE-Advanced

256QAM

- Al ser muy exigente el SINR requerido es importante tener controlado el EVM.
- EVM: Error Vector Magnitude. Diferencia entre symbol que quiero transmitir y lo efectivamente transmitido.
- 256QAM exige un EVM más controlado para minimizar el error.

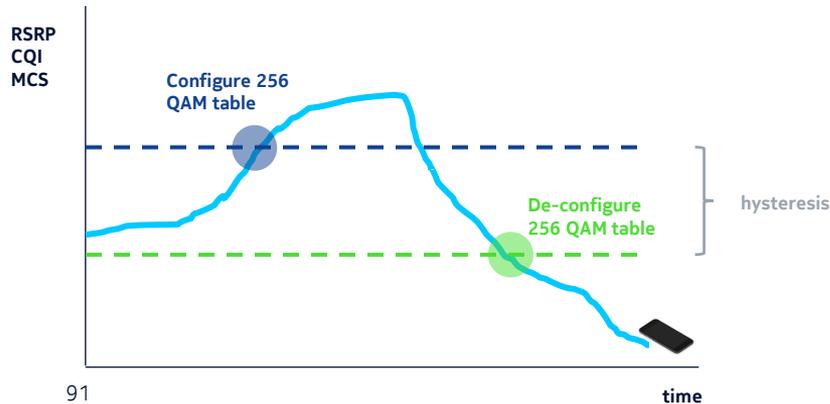
Problema: intentar evitar trabajar sobre límite del rango lineal de amplificador de potencia en TX para evitar distorsión en la amplificación que de lugar a EVM.



LTE-Advanced

256QAM

- El MCS es el Modulation and Coding Scheme. Del 0 al 27 va aumentando la eficiencia espectral mediante cambio de modulación y cantidad de bits de paridad.
- El tamaño en bits del MCS es fijo. Para implementar 256QAM se redefinen los rangos con una nueva tabla de MCS. Para dar lugar a codificaciones de canal distintas con la nueva modulación se quita granularidad de modulaciones más bajas.
- Por tanto, se pierde flexibilidad del canal en modulaciones de baja eficiencia espectral.



3GPP TS #36.213 Tables 7.1.7.1-1 & 7.1.7.1-1A

| MCS index [i_{MCS}] | Modulation Order [Q_m] | | TBS Index [i_{TBS}] | |
|-------------------------|----------------------------|------------|-------------------------|----------|
| | legacy* | new** | legacy* | new** |
| 0 | 2 (QPSK) | 2 (QPSK) | 0 | 0 |
| 1 | 2 (QPSK) | 2 (QPSK) | 1 | 2 |
| 2 | 2 (QPSK) | 2 (QPSK) | 2 | 4 |
| 3 | 2 (QPSK) | 2 (QPSK) | 3 | 6 |
| 4 | 2 (QPSK) | 2 (QPSK) | 4 | 8 |
| 5 | 2 (QPSK) | 4 (16QAM) | 5 | 10 |
| 6 | 2 (QPSK) | 4 (16QAM) | 6 | 11 |
| 7 | 2 (QPSK) | 4 (16QAM) | 7 | 12 |
| 8 | 2 (QPSK) | 4 (16QAM) | 8 | 13 |
| 9 | 2 (QPSK) | 4 (16QAM) | 9 | 14 |
| 10 | 4 (16QAM) | 4 (16QAM) | 9 | 15 |
| 11 | 4 (16QAM) | 6 (64QAM) | 10 | 16 |
| 12 | 4 (16QAM) | 6 (64QAM) | 11 | 17 |
| 13 | 4 (16QAM) | 6 (64QAM) | 12 | 18 |
| 14 | 4 (16QAM) | 6 (64QAM) | 13 | 19 |
| 15 | 4 (16QAM) | 6 (64QAM) | 14 | 20 |
| 16 | 4 (16QAM) | 6 (64QAM) | 15 | 21 |
| 17 | 6 (64QAM) | 6 (64QAM) | 15 | 22 |
| 18 | 6 (64QAM) | 6 (64QAM) | 16 | 23 |
| 19 | 6 (64QAM) | 6 (64QAM) | 17 | 24 |
| 20 | 6 (64QAM) | 8 (256QAM) | 18 | 25 |
| 21 | 6 (64QAM) | 8 (256QAM) | 19 | 27 |
| 22 | 6 (64QAM) | 8 (256QAM) | 20 | 28 |
| 23 | 6 (64QAM) | 8 (256QAM) | 21 | 29 |
| 24 | 6 (64QAM) | 8 (256QAM) | 22 | 30 |
| 25 | 6 (64QAM) | 8 (256QAM) | 23 | 31 |
| 26 | 6 (64QAM) | 8 (256QAM) | 24 | 32 |
| 27 | 6 (64QAM) | 8 (256QAM) | 25 | 33 |
| 28 | 6 (64QAM) | 2 (QPSK) | 26/26A | |
| 29 | 2 (QPSK) | 4 (16QAM) | | reserved |
| 30 | 4 (16QAM) | 6 (64QAM) | reserved | reserved |
| 31 | 6 (64QAM) | 8 (256QAM) | | |

Mods/rates no disponibles en tabla de 256QAM

LTE-Advanced

MIMO

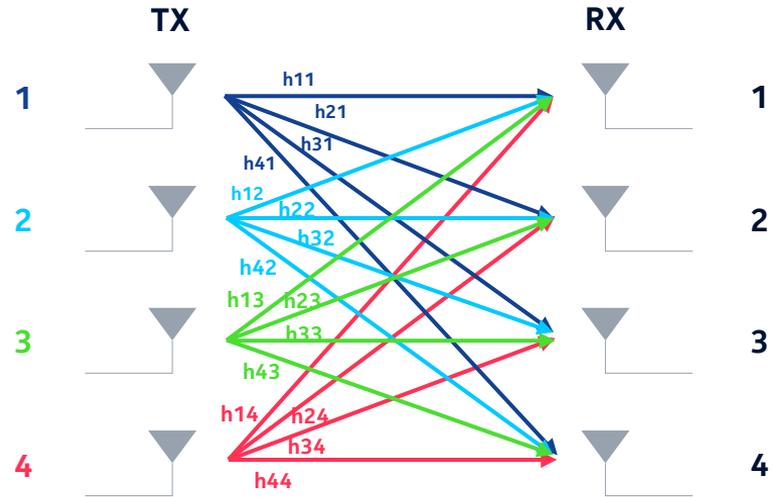
MIMO: Multiple Input Multiple Output.

MIMO busca utilizar varios transmisores y varios receptores para multiplicar el throughput enviado sobre la interfaz de radio.

Cada antena receptora ve un canal distinto desde cada uno de los transmisores en uso.

Esto da lugar a una matriz del canal con las transferencias de cada par TX-RX como componentes de la matriz.

RI: Rank Index. Rango de la matriz del canal.



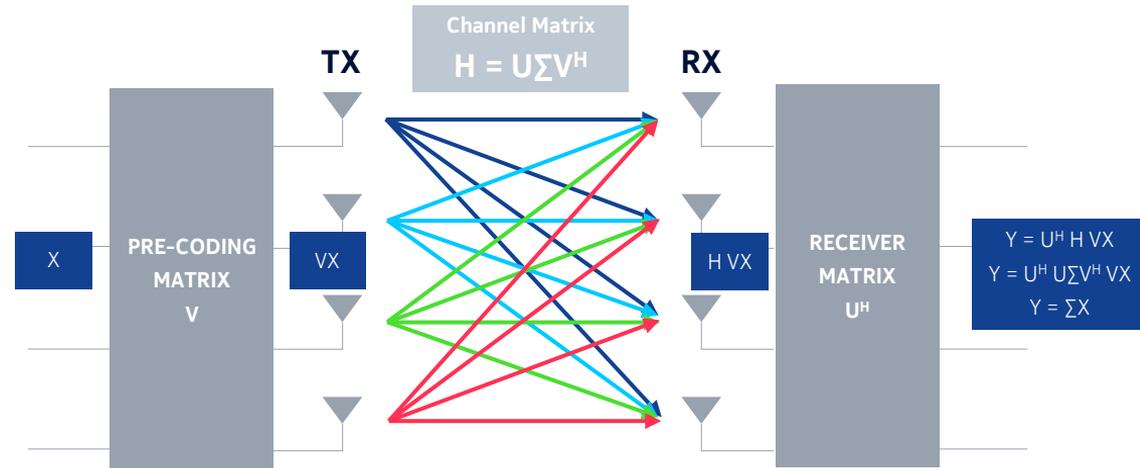
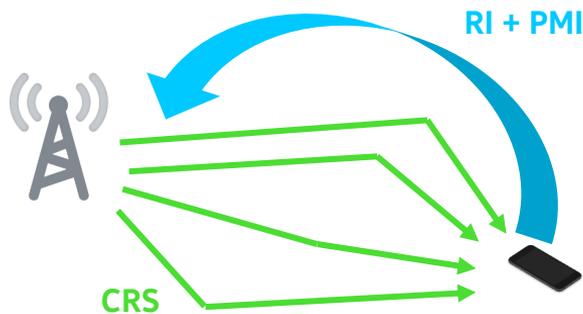
CHANNEL
MATRIX

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix}$$

LTE-Advanced

MIMO

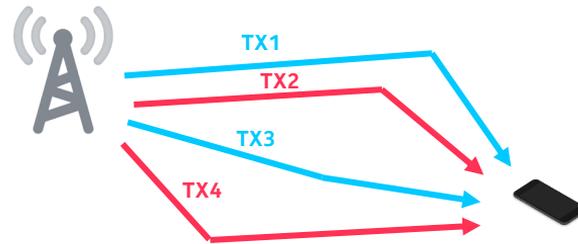
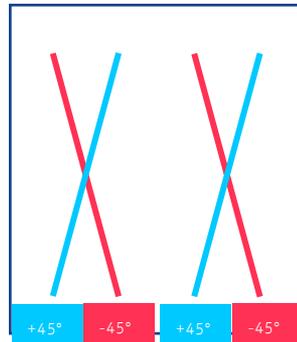
- Una matriz de canal ideal es una matriz diagonal, lo que significaría que cada RX recibe sólo de un TX. Si bien puede no ser diagonal, si puede ser diagonalizable mediante descomposición.
- MIMO trabaja con una matriz de pre-coding en el TX y su correspondiente matriz de recepción en RX.
- Con Closed Loop (CL) MIMO el móvil solicita cuál matriz de pre-coding utilizar, con un puntero denominado Precoding Matrix Indicator (PMI) y que lo determina a partir de su estimación del canal. Trabajar con un puntero en lugar de los valores expresos de la matriz permite reducir overhead.
- Esto aplica a cualquier combinación MxN MIMO.



LTE-Advanced

MIMO

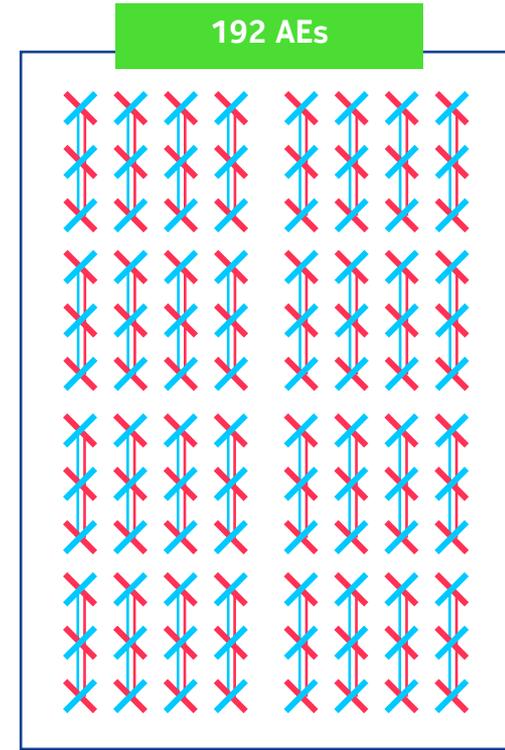
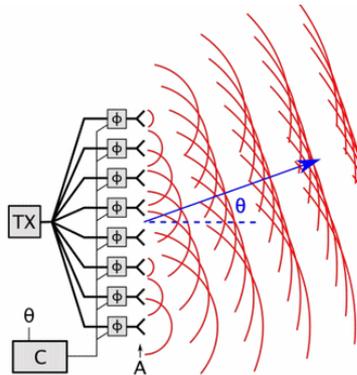
- La mayoría de los despliegues de LTE comenzaron con la instalación de radomos con 2 antenas trabajando con polarización cruzada entre sí. Esto permite tener 2x2 DL MIMO. Los despliegues en LTE-Advanced permiten trabajar con 4x4 DL MIMO en bandas altas, utilizando un par más de antenas tanto del lado de la radiobase como en el móvil.
- No es posible hacerlo en banda baja debido al tamaño necesario de las antenas de esa banda en el móvil.
- 4x4 MIMO aprovecha los escenarios de multi-path que pueden dar lugar a una recepción independiente de la señal enviada por los 4 transmisores. No siempre sucede pero en con las condiciones de radio correcta se puede mejorar la eficiencia espectral enviando más información sobre la misma porción de espectro. Incluso si no se logran estos canales independientes, utilizar 4 Tx permite obtener una ganancia por diversidad, aunque con el costo de tener más potencia radiada en la celda.



LTE-Advanced

mMIMO + Beamforming

- **Massive MIMO** (mMIMO) es la idea de utilizar una gran cantidad de antenas para generar la transmisión de la onda electromagnética. Se puede utilizar esta cantidad masiva de antenas para que trabajen en conjunto y direccionar la onda electromagnética en una dirección.
- A esto se le llama **beamforming**. Se utiliza solo en bandas altas debido a que se debe contar con varias antenas pequeñas.
- Beamforming permite extender la cobertura al enfocar la potencia radiada en una dirección. También permite reducir interferencia pues esta potencia no se envía a zonas donde no es necesaria.



Radio

Ejemplo de radio+antena

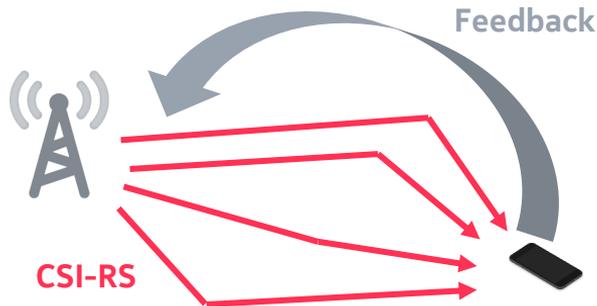
LTE-Advanced

Beamforming en FDD

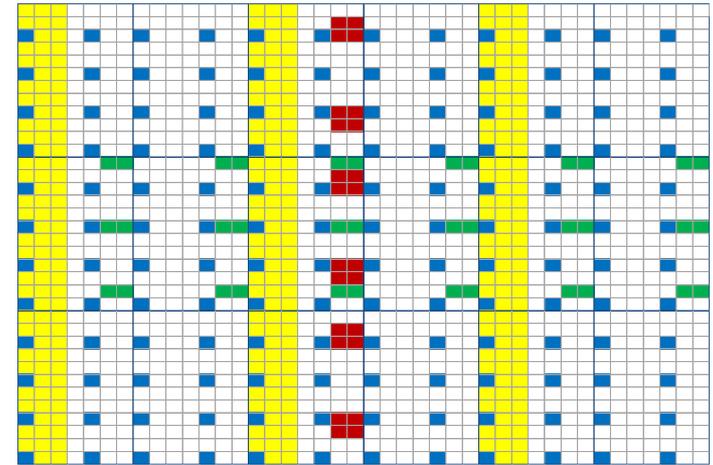
Aplicar beamforming en FDD tiene la contra de que necesita feedback del UE sobre el estado del canal. Por tanto, se deben prever señales en DL para la estimación del canal y la comunicación de feedback desde el móvil sobre su estimación del canal.

Esto tiene las siguientes contras:

- Es un proceso de adaptación más lento. El UE tiene que estimar el canal y reportarlo.
- Mayor overhead, de señales en DL y de envío de feedback.
- Menos preciso. El feedback deberá ser quantizado para su transmisión y no será con mucha apreciación para evitar mayor overhead.



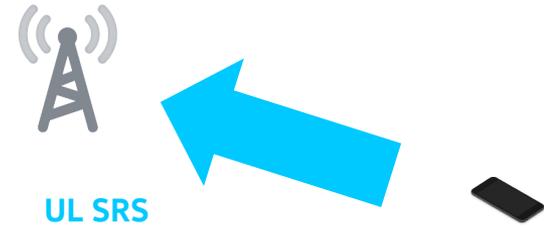
■ Señales de referencia
■ adicionales



LTE-Advanced

Beamforming en TDD

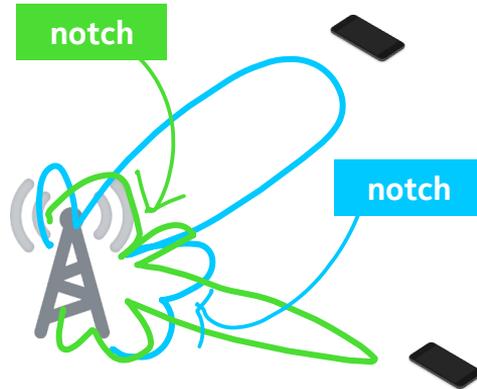
- La diferencia en TDD es que puedo aprovechar la dualidad del canal.
- Tanto DL como UL utilizan la misma porción del espectro, con lo cual puedo utilizar la estimación del canal en UL para sintetizar el beam en DL.
- El UE envía una señal de referencia previamente definida y la radiobase calcula los coeficientes del beam en base a la estimación del canal que hace sobre ella en su recepción.
- SRS: Sounding Reference Signal.
- Se debe asignar a los móviles una cadencia de envío de esta señal.



LTE-Advanced

MU-MIMO

- Aprovechando de la direccionalidad adquirida con beamforming, se puede aprovechar a enviar transmisiones en direcciones distintas a usuarios distintos, utilizando los mismos recursos de radio.
- Esto es **MU-MIMO**. Multi User MIMO.
- Zero-Forced beamforming. Sintetizo el beam de forma tal de que no sólo doy una ganancia en dirección al usuario destino, sino que fuerzo un *notch* o ganancia nula en dirección al otro usuario al que también le daré servicio.



LTE-Advanced

Carrier Aggregation

Carrier Aggregation (CA) se traduce como Agregación de Portadoras.

La idea está en el nombre: agregar más de una portadora para recibir de ambas en simultáneo.

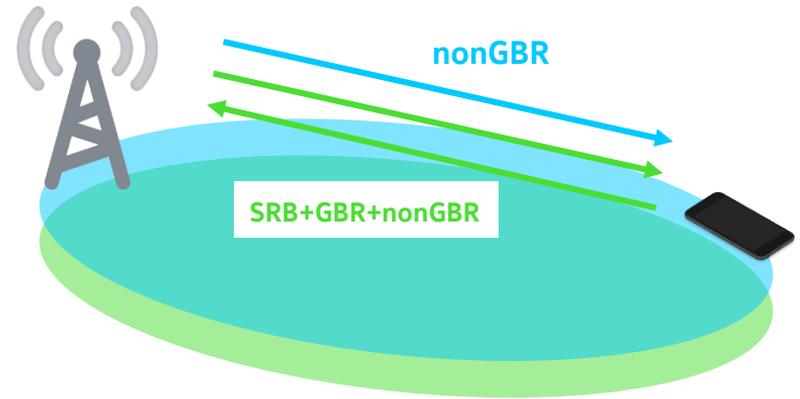
Las funcionalidades de MIMO trabajan junto a CA. Surge concepto de *layer* en referencia a cuantos streams independientes de información se pueden enviar al usuario. Una celda que puede funcionar con 4x4 MIMO se dice puede dar 4 layers.

PCELL: Primary Cell. Se utiliza para Uplane DL y UL. También se encarga de tráfico correspondiente a CPlane.

SCELL: Secondary Cell. Portadora adicional agregada. Sólo se encarga de tráfico nonGBR. Puede ser de los siguientes tipos:

- DL+UL.
- Supplemental DL. Se utiliza solo para DL CA.
- Supplemental UL. Se utiliza solo para UL CA.

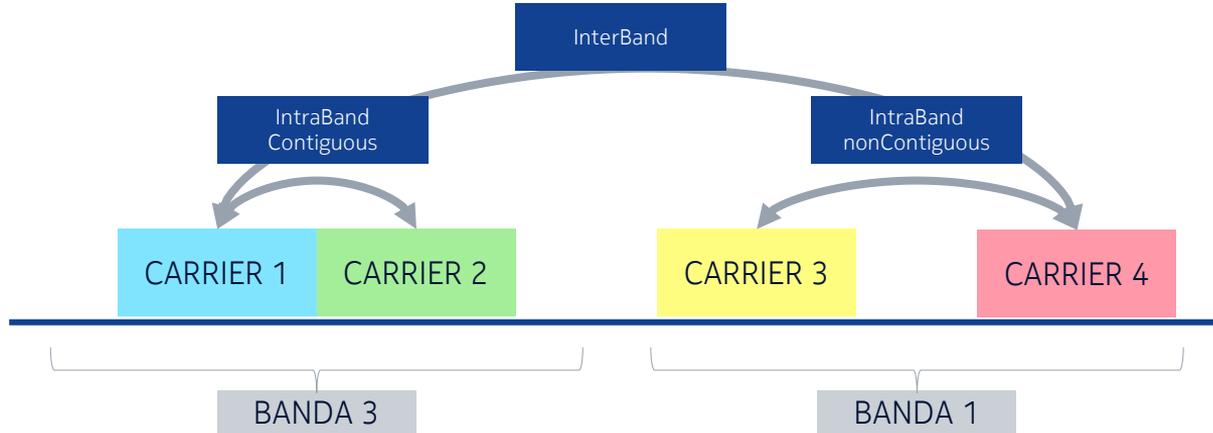
CC: Component Carrier. Una celda en CA.



LTE-Advanced Carrier Aggregation

Hay 3 tipos de CA:

- **INTRA-BAND CONTIGUOUS:** las portadoras a agregar pertenecen a la misma banda y están una al lado de la otra en el espectro.
- **INTRA-BAND NON-CONTIGUOUS:** las portadoras pertenecen a la misma banda pero no están contiguas en espectro.
- **INTER-BAND:** las portadoras pertenecen a bandas distintas.

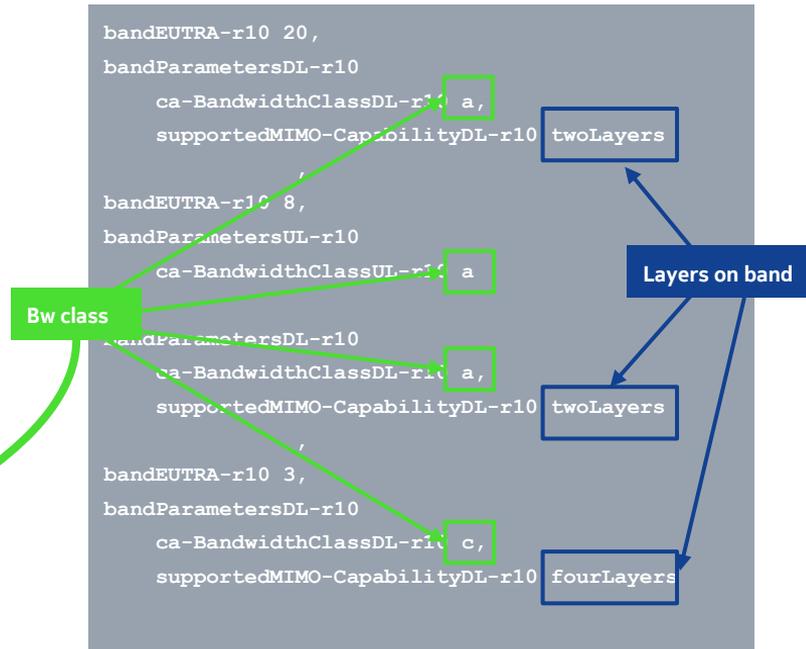


LTE-Advanced Carrier Aggregation

- Es muy importante saber qué combinaciones de bandas soportan los móviles.
- Por ejemplo, un móvil puede soportar banda 3 y banda 1 pero no utilizadas en conjunto con CA.
- El móvil reporta las combinaciones mediante mensajería RRC.
- *CA bandwidth class* hace referencia al tipo de intraBand Contiguous CA que se soporta dentro de la banda indicada.

| Class | Max Bw (MHz) | #CCs |
|-------|--------------|------|
| A | 20 | 1 |
| B | 20 | 2 |
| C | 40 | 2 |
| D | 60 | 3 |
| E | 80 | 4 |
| F | 100 | 5 |
| I | 160 | 8 |

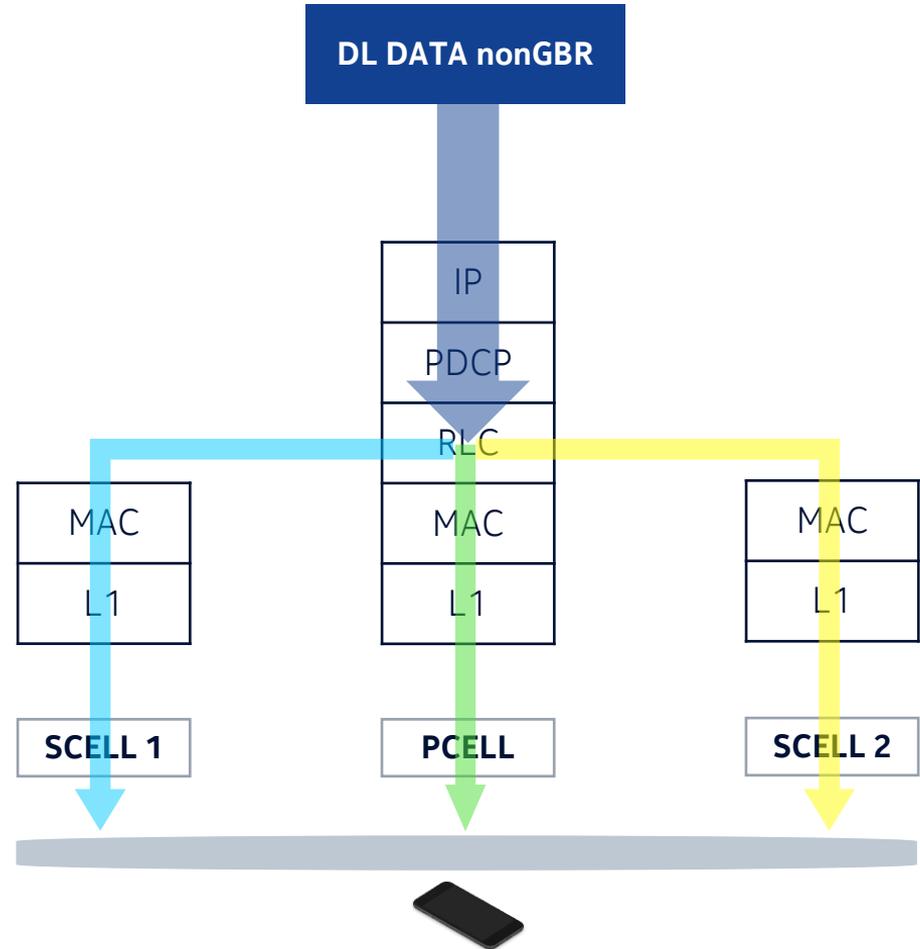
Ejemplo de combinación 4CC de LTE CA b20+b8+b3; Pcell en b3.



LTE-Advanced Carrier Aggregation

CA Protocol Stack.

- Data Split → Tráfico nonGBR se separa desde la capa RLC.
- El tráfico GBR así como SRB (signaling) se envía únicamente por PCELL.
- A nivel de RLC se recombinan los paquetes y se determina el flujo de tráfico asignado a cada celda.
- Cada celda maneja su propio scheduler independiente en MAC.
- Feedback de PUCCH (CSI, HARQ) se envía por PCELL.



LTE-Advanced

LAA: Licensed Assisted Access

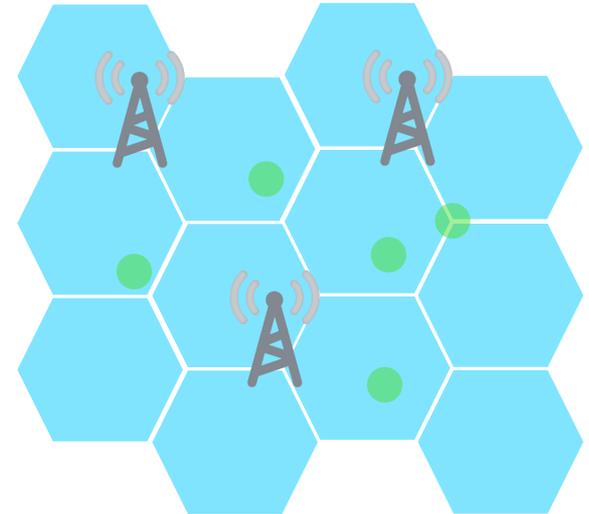
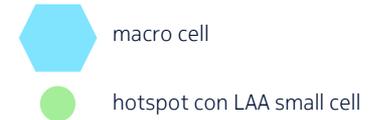
Carrier Aggregation es muy útil para alcanzar valores altos de throughput y es lo que permite lo que se denomina Gigabit-Class LTE. Pero el operador debe disponer de espectro licenciado adicional para poder sacarle provecho.

Funcionalidades de LAA permiten que los operadores utilicen bandas no licenciadas (5 GHz) como secondary cells para mejorar el throughput sin necesidad de adquirir más espectro.

Algunas limitantes:

- No todos los móviles soportan las bandas de LAA.
- Las celdas LAA deben cumplir con regulación de uso de espectro no licenciado. Por ejemplo: limite de potencia radiada.
- Las celdas LAA deben co-existir con otras tecnologías como WiFi. Se utilizan algoritmos de Listen Before Talk (LBT), que funcionan en forma similar al CSMA/CA de WiFi.

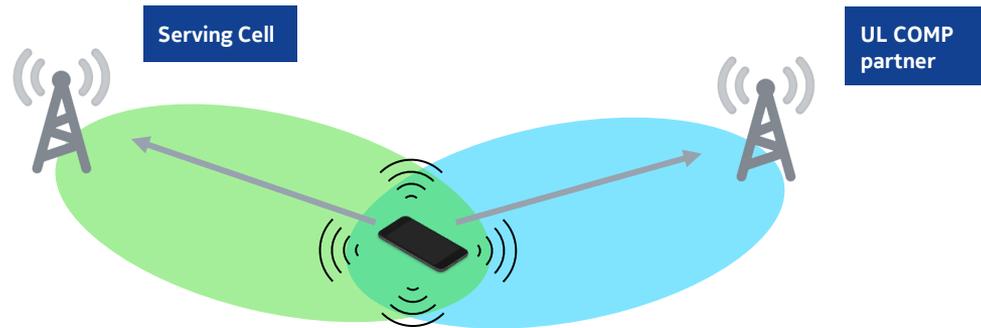
Es por estas limitantes que LAA se utiliza principalmente en hotspots donde hay una gran cantidad de usuarios demandando recursos.



LTE-Advanced

UL COMP

- COMP: Coordinated MultiPoint operation.
- Los UEs por lo general utilizan antenas OMNI; no enfocada en ninguna dirección. Por tanto, la potencia radiada es dispersada hacia todas las direcciones. Parte de esta potencia es entonces desaprovechada.
- UL COMP busca sacarle provecho a esto. La idea es utilizar antenas de otras celdas dentro del mismo ENB o en un ENB vecino para tratar de recuperar la señal en UL con diversidad de caminos.
- Esto permite mejorar la cobertura y el servicio en UL. Las mejoras son dependientes a la diversidad que se pueda lograr entre las celdas partners en COMP.
- En caso de ser inter-ENB, tiene fuertes requerimientos de latencia y bandwidth en enlace entre los ENBs.



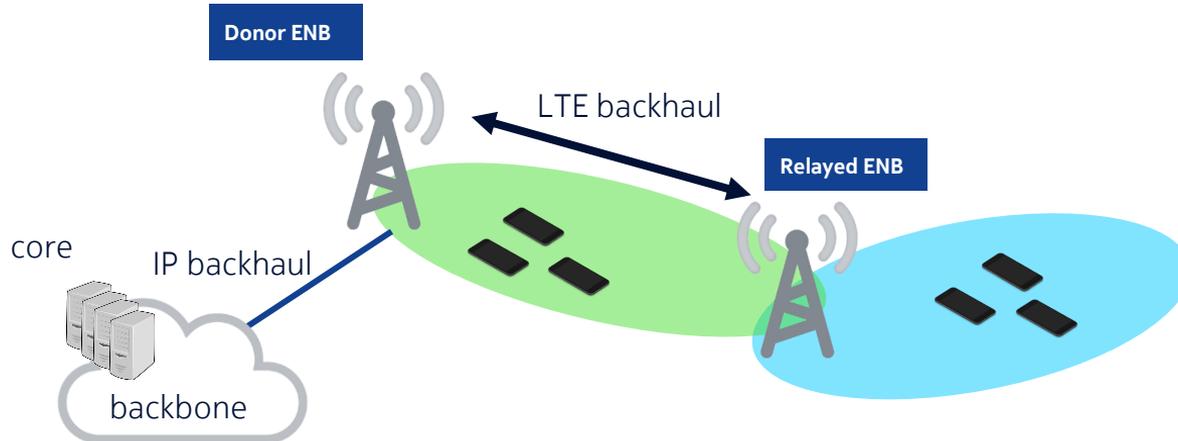
LTE-Advanced

UE Relay

La idea del relay es cascadear enbs como solución de transporte en zonas remotas.

- Donor ENB → Provee transporte a Relayed ENB a través de interfaz de radio LTE.
- Relayed ENB → Servicio de radio en zona sin acceso fijo para transporte.

Es una solución para extender cobertura. Además el relayed ENB puede contar con servicio de LTE backhaul mediante antena angosta y ubicada en altura, con lo cual se logra un mayor alcance.



LTE-Advanced

IOT en LTE

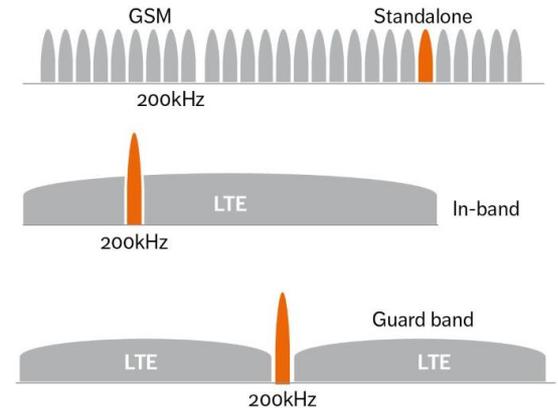
- Idea de IOT: muchos dispositivos sencillos conectados.
- No quiero que masividad de dispositivos afecte usuarios de banda ancha.
- No quiero que el tráfico de usuarios normales comprometa el servicio de iot.
- Conexión robusta de baja tasa de bits, con repeticiones para redundancia.
- Interfaz de aire flexible a ahorro de batería.
- EDRX → períodos largos para ciclos de paging, que puedan quedar “dormidos” un buen tiempo, ahorro de energía.
- Opciones: **NBIOT** y **CATM**.

CATM

- CAT en referencia a Category.
- Se destinan 6 PRBs de LTE para priorizar tráfico de usuarios CAT-M.
- Mejor thput que NBIOT al tener más ancho de banda.
- Agrega movilidad en conectado.

NBIOT

- Narrow Band IOT.
- Se reserva 1 PRB (180 kHz) en DL y otro en UL para IOT.
- Sin movilidad en conectado.
- Tres opciones:
 - **In-band**: se saca un PRB de LTE y se le da a IOT.
 - **Guardband**: se agrega PRB en la guarda de LTE.
 - **Standalone**: PRB “suelto”, por ej. junto a GSM.



Bibliografía

Bibliografía

Documentos de Interés

- **LTE: SAE and the Evolved Packet Core**
Olsson, Sultana, Rommer, Frid y Mulligan
- **4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband**
Dahlman, Parkvall y Sköld
- **LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access**
Holma y Toskala
- **LTE – The UMTS Long Term Evolution**
Sesia, Toufik y Baker
- **From GSM to LTE**
Martin Sauter
- **LTE Handbook**
sharetechnote.com
- **Netmanias**
netmanias.com