



Disseny i implementació d'una xarxa LTE.

Francisco José Delgado Arenas

Grau en Tecnologies de la Telecomunicació

Xarxes Sense Fils

Nom Consultor: **Ferran Adelantado Freixer**

Professor responsable: **Ferran Adelantado Freixer**

4 de juny de 2018



Aquesta obra està subjecta a una llicència de [Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada 3.0 Espanya de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

FITXA DEL TREBALL FINAL

Títol del treball:	<i>Disseny i implementació d'una xarxa LTE.</i>
Nom de l'autor:	<i>Francisco José Delgado Arenas</i>
Nom del consultor/a:	<i>Ferran Adelantado Freixer</i>
Nom del PRA:	<i>Ferran Adelantado Freixer</i>
Data de lliurament (mm/aaaa):	<i>06/2018</i>
Titulació o programa:	<i>Grau en Tecnologies de la Telecomunicació</i>
Àrea del Treball Final:	<i>Xarxes Sense Fils</i>
Idioma del treball:	<i>Català</i>
Paraules clau	<i>LTE, Planificació ràdio, full-IP</i>
Resum del Treball (màxim 250 paraules): <i>Amb la finalitat, context d'aplicació, metodologia, resultats i conclusions del treball</i>	
<p>Diàriament, milions d'usuaris de telèfons intel·ligents gaudeixen d'accés a Internet d'alta velocitat fent servir la tecnologia 4G, i el nombre de connexions mòbils 4G està augmentant entorn del 30% cada any. Però, com funciona realment el 4G?</p> <p>L'arquitectura de xarxa 4G depèn de protocols que requereixen força precisió per gestionar la seguretat, la transmissió ràdio i la ràpida transferència de dades per a milions de terminals alhora. Els usuaris han de poder estar en línia, sense importar on es troben o amb quina freqüència fan servir els seus telèfons.</p> <p>Aquest Treball consisteix a comprendre amb profunditat les xarxes 4G i els fonaments que hi ha darrere de la seva arquitectura, ja que per als enginyers de xarxes i de sistemes és important potenciar les habilitats que es necessiten professionalment en l'àmbit de la telefonia mòbil.</p> <p>L'objectiu, d'una banda és proporcionar una visió de sistema de les xarxes de comunicacions mòbils a través de la descripció i l'estudi de les xarxes basades en tecnologia LTE. I en segon cas com a resultat de l'aprenentatge es dissenyarà, pel que fa a la vesant d'arquitectura i protocols, una xarxa LTE (E-UTRAN, IP Backhaul i EPC). I, d'altra banda es farà una simulació de planificació ràdio tenint en compte les consideracions pràctiques per avaluar la cobertura, les interferències produïdes per la reutilització freqüencial, entre d'altres.</p> <p>En definitiva, al finalitzar el Treball s'assolirà la capacitat d'analitzar, modelar i dissenyar les noves arquitectures, protocols i interfícies de comunicació per als sistemes de comunicacions mòbils.</p>	

Abstract (in English, 250 words or less):

Every day millions of smartphone users enjoy high speed internet access using 4G technology. The number of 4G mobile connections is increasing by 30% every year. But how does 4G actually work?

4G network architecture depends on precise protocols to manage security, radio transmission and rapid data transfers for millions of terminals at the same time. Users must be able to get online, no matter where they are or how often they use their phones.

This work consists of an in-depth understanding of 4G networks and the principles behind their architecture, since it is important strengthen skills for network engineer and systems engineer if they want to work in the mobile telephony sector.

The objective, on the one hand is to provide a system overview of the mobile communications networks through a detailed description and a study of the networks based on LTE technology. And secondly, as learning result shall be designed a LTE network, in respect of the architecture and protocols part (E-UTRAN, IP Backhaul and EPC). And, on the other hand a simulation of radio planning shall be made considering the practical considerations for assess the coverage, interferences produced by reuse frequencies, inter alia.

Ultimately, at the end of the project we will obtain the capacity to analyze, model and design the new architectures, protocols and communication interfaces for the mobile communications systems.

Índex

1. Introducció.....	1
1.1 Context i justificació del Treball	1
1.2 Objectius del Treball.....	2
1.3 Enfocament i mètode seguit	3
1.4 Planificació del Treball	4
1.5 Breu sumari de productes obtinguts.....	7
1.6 Breu descripció dels altres capítols de la memòria.....	7
2. Arquitectura i principis generals.....	9
2.0 Introducció històrica de les xarxes mòbils a Europa	9
2.1 Dispositius i nodes visibles (SIM, UE, eNodeB)	11
2.2 Concepte cel·lular.....	14
2.3 Nodes amb pla de dades (SGW, PGW).....	17
2.4 Nodes del pla de control (HSS, MME)	20
2.5 Síntesi de l'arquitectura i les interfícies (S1, S5/S8, S6a, S11, X2).	24
3. Procediments de seguretat.	29
3.0 Connexió de xarxa i funcions de seguretat.	29
3.1 Autenticació	32
3.2 Xifrat i desxifrat	36
3.3 Control de la integritat	40
3.4 Jerarquia de claus.....	43
3.5 Identitat temporal	47
3.6 Procediments de seguretat executats durant l'annexió (attachment).....	50
4. Interfície Ràdio.....	53
4.0 Transmissió ràdio	53
4.1 Blocs de Recursos i Subtrames.....	58
4.2 Assignació de Paquets	63
4.3 Fiabilitat de la transmissió.....	66
4.4 Protocol RLC	71
4.5 Accés aleatori	74
4.6 PDCP i visió global	78
5. Gestió de flux de dades	82
5.0 Principi d'encapsulació i túnels	82
5.1 El protocol GTP	85
5.2 Identificació i gestió de túnels.....	88
5.3 Transmissió de paquets en un túnel	91
5.4 Connexió S1-AP	94
5.5 Establint una connexió S1-AP	97
5.6 Non Access Stratum i Visió Global de la pila de protocols.....	99
6. Gestió de la naturalesa esporàdica del flux de dades	103
6.0 Procediments de connexió i desconnexió.....	103
6.1 Conceptes d'estats ECM Connected i ECM Idle	109
6.2 Passar al mode d'espera després d'un llarg període d'inactivitat	112
6.3 UE-Triggered Service Request	115
6.4 Network-Triggered Service Request	120

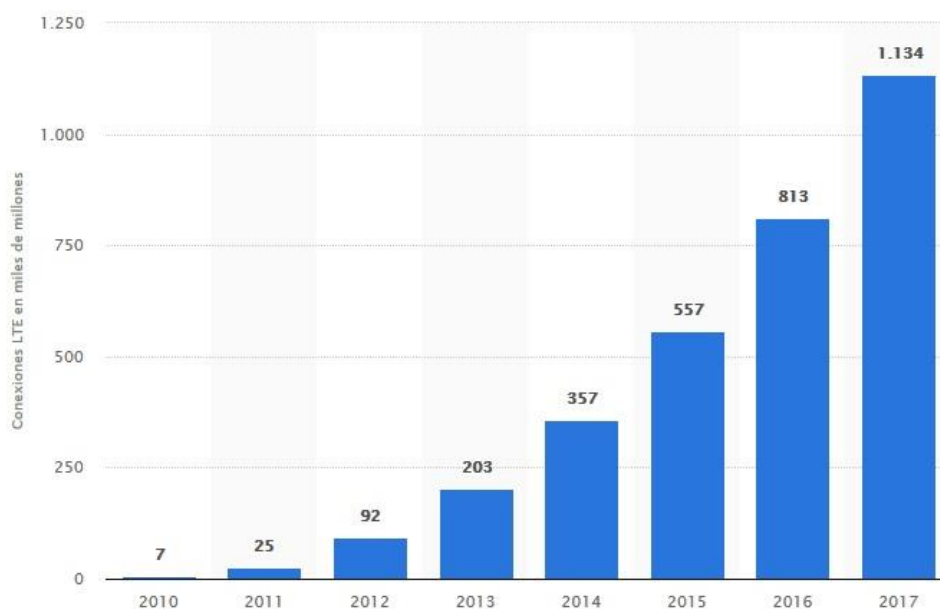
7. Dimensionament i planificació ràdio.....	123
7.0 Banda de freqüència i model de propagació	123
7.1 Càlculs de cobertura.....	128
7.2 Capacitat del DL i del UL.....	142
7.3 Capacitat requerida pels usuaris. Anàlisi de tràfic.....	146
7.4 Introducció a Radio Mobile	150
7.5 Link Budget a Radio Mobile.....	161
7.6 Primera simulació amb Radio Mobile	165
7.7 Desplegament en entorn urbà	180
7.8 Optimització de cobertura	188
7.9 Anàlisi d'interferència	201
7.10 Planificació del Backhaul (a la urbanització Els Canons)	206
8. Disseny de xarxa amb Packet Tracer	214
8.0 Disseny d'una xarxa LTE: E-UTRAN.....	214
8.1 Disseny d'una xarxa LTE: IP Backhaul i EPC.....	220
9. Conclusions.....	231
10. Glossari	233
11. Bibliografia.....	236

1. Introducció

En aquest primer capítol es realitzarà una introducció general del tema proposat. Ens situa en el context del Treball, la justificació que el va motivar, els objectius que es persegueixen i la metodologia emprada per aconseguir-los. En els últims punts del capítol es detallarà la planificació temporal per dur a terme el projecte, un breu sumari del programari que es farà servir i una breu descripció dels següents capítols.

1.1 Context i justificació del Treball

En el món actual, entès com el món de l'era digital, és habitual veure cada vegada més usuaris que necessiten estar connectats permanentment a la gran xarxa, és a dir, a Internet. Això ha repercutit directament a la gran demanda de telèfons intel·ligents, com a dispositius que ofereixen mobilitat i unes prestacions que els fan dels més utilitzats. No obstant, aquestes mateixes prestacions han fet que es creés la necessitat de disposar cada vegada de velocitats de connexió més elevades, amb més ample de banda i, fins i tot amb més estabilitat de connexió. Per tant, d'alguna manera l'enginyeria cel·lular treballa per garantir i proporcionar aquests avantatges respecte de generacions anteriors. De fet, el nombre de connexions mòbils 4G augmenten a un ritme del 30% (com es pot deduir de la il·lustració següent) cada any, motiu pel qual és necessari dotar la telefonia mòbil d'una infraestructura de xarxa capaç de garantir la capacitat demandada pels usuaris.

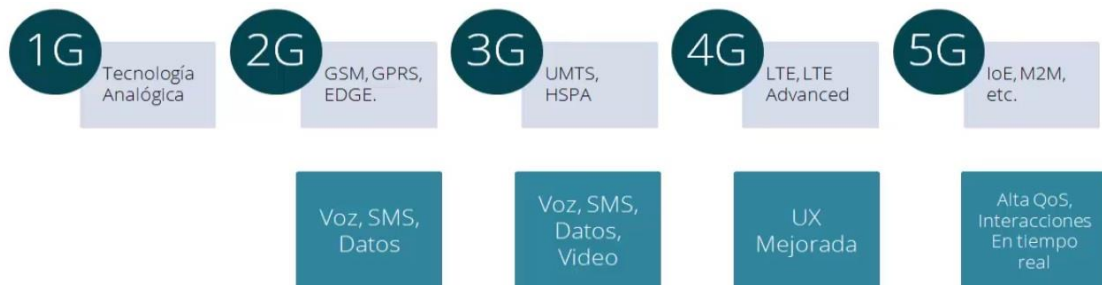


Il·lustració 1. Nombre de connexions d'LTE al món des de 2010 fins 2017. [1]

Per satisfer aquesta demanda, l'LTE ha sigut la tecnologia mòbil de quarta generació que s'ha implantat i, que a dia d'avui continua expandint-se arreu del món.

Com a punts forts de l'elecció d'aquest treball, conèixer la tecnologia mòbil que fem servir diàriament i com a futur enginyer de telecomunicació interessat en les xarxes sense fils són les raons principals d'abordar aquesta temàtica.

Si fem ràpidament una mirada a la història de la telefonia mòbil ens trobem amb les següents tecnologies.



Il·lustració 2. Evolució de la telefonia mòbil. Xavier Marichal "Long Term Evolution", Telecapp Academy (Course Slides), 2018.

Pel que fa al 4G, concretament l'LTE, és la tecnologia mòbil amb diferència que més alta capacitat ha proporcionat. A més, com a característiques essencials, és una tecnologia basada en IP que proporciona alta eficiència espectral, és adaptable a diferents amplituds de banda i introdueix baixa latència respecte del seu antecessor. D'altra banda, l'experiència de l'usuari (UX) quant a navegació, qualitat del senyal i interacció amb els serveis de veu, dades i vídeo són les millores que tothom ha pogut experimentar.

Com a inconvenient, les xarxes LTE han suposat una forta inversió per part dels operadors de xarxa i, d'alguna manera ha acabat repercutint a l'usuari en el cost de servei.

1.2 Objectius del Treball

L'objectiu principal d'aquest Treball és conèixer la tecnologia de xarxa d'avantguarda que connecta milions de telèfons intel·ligents a Internet.

S'obté una idea general sòlida de les xarxes 4G LTE / EPC (Long Term Evolution / Evolved Packet Core), com funciona, com es dissenya l'arquitectura de xarxa i quins protocols es fan servir.

S'exposarà en primer lloc l'arquitectura global de xarxa, com funciona la interfície ràdio i com es garanteix la seguretat.

En segon lloc ens endinsarem a la part operacional (portador, com es configura i s'allibera ràpidament, o com el 4G és capaç de manejar milions de terminals que estan en moviment tot el temps).

Tenint en compte que en els propers anys l'adveniment del 5G comportarà més de 20 mil milions de terminals mòbils en línia, dominar els conceptes clau del 4G ens permetrà estar llests per a la propera generació de xarxes mòbils i dels treballs futurs.

Es pretén desenvolupar les habilitats requerides tant a nivell de coneixements detallats com pràctics d'utilitat que es pugin fer servir immediatament en un entorn de treball.

Per concloure l'explicació dels objectius, afegir alguns matisos importants:

- Es descriurà el funcionament i l'arquitectura de les xarxes 4G.
- S'explicarà com els operadors de telecomunicacions proporcionen als usuaris mòbils una direcció IP permanent de manera segura.
- S'analitzarà els intercanvis interns i els protocols fets servir en una xarxa 4G (attachment, location updating, handover).
- S'identificarà les funcions de transport i de control en una xarxa 4G: com diagnosticar un problema de servei de xarxa.
- Es simularà una xarxa LTE a nivell d'arquitectura i protocols amb el programari Packet Tracer de Cisco (dissenyant la capa d'accés de la xarxa LTE, la xarxa de distribució IP Backhaul i la interconnexió amb xarxes externes d'altres operadors).
- Es farà una simulació de planificació ràdio en el desplegament de eNodeBs en un municipi amb el programari Xirio Online d'Àptica, on s'estudiarà les àrees de cobertura, les interferències produïdes pel reus freqüencial, capacitats, etc.

1.3 Enfocament i mètode seguit

El plantejament per al disseny i implementació d'una xarxa LTE en aquest projecte estarà dividit en dues parts ben diferenciades. D'una banda hi haurà una part teòrica fonamental que tractarà d'aprofundir en l'enteniment de la tecnologia LTE com a estàndard ja ben definit, evolucionat i amb una forta penetració a nivell mundial. I, d'altra banda hi haurà una vessant pràctica caracteritzada per diferents eines informàtiques que servirà per posar de manifest els coneixements adquirits i potenciar les habilitats que es requereixen en el disseny d'una xarxa LTE.

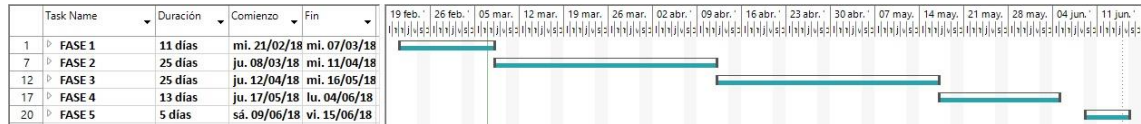
El fet de triar una proposta basada en l'aprenentatge autònom comporta l'estructuració del Treball en un model basat en l'adquisició de coneixements previs que permetin, posteriorment, dur a terme simulacions de caire professional. És a dir, s'intentarà que els resultats obtinguts siguin el més real possible per garantir l'èxit del projecte.

La presa de decisions estarà enfocada per maximitzar la transferència, aplicabilitat i significació de l'aprenentatge mitjançant la realització d'activitats reals, a partir de les quals s'indueixi a la construcció de coneixement en comú dels principis teòrics i detecció de bones pràctiques. A més, es tracta d'un treball basat en la pro activitat. És a dir, es procurarà activament en l'anticipació, consulta, pregunta i demanda d'informació en funció de les necessitats.

1.4 Planificació del Treball

El treball està planificat en 5 fases. El motiu que tingui aquest nombre de fases és perquè ve determinat per les entregues de les Proves d'Avaluació Contínua.

A la següent imatge (il·lustració 3) es mostra el diagrama de Gantt, on es pot observar les 5 fases, la duració de cadascuna i les seves corresponents dates d'inici i d'entrega.



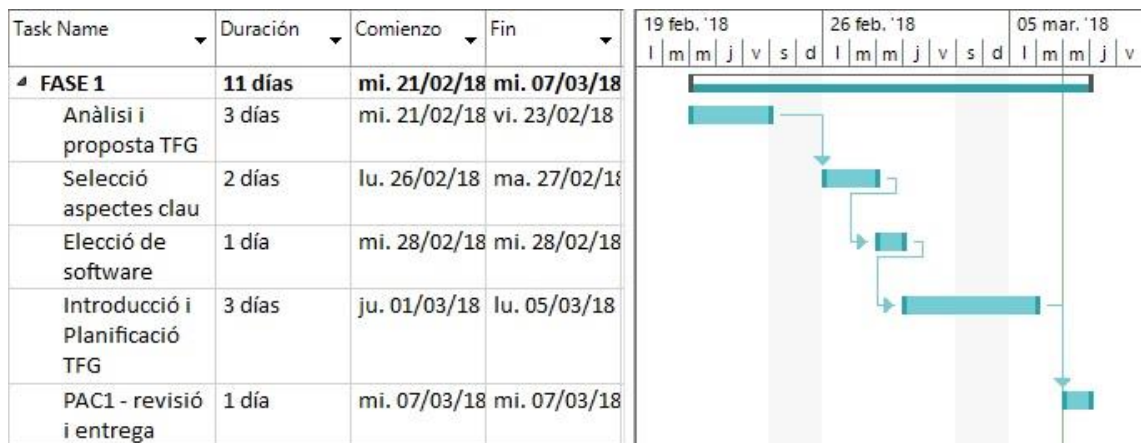
Il·lustració 4. Diagrama de Gantt de les 5 fases.

Fase 1.

En aquest primer ítem es fa la proposta del TFG, l'anàlisi i la planificació. Es farà un estudi orientat a seleccionar el software adequat per a la implementació i la selecció d'aspectes clau.

Quant a la memòria, es realitza el primer capítol, el qual comprèn el context, l'objectiu, la motivació, l'enfocament, la metodologia emprada, la planificació temporal, un breu sumari dels productes obtinguts i una breu descripció dels següents capítols. La fase finalitza amb l'entrega de la PAC1.

A continuació es mostra la fase I del diagrama de Gantt estesa (il·lustració 5), on es poden veure les tasques, la duració d'aquestes i les seves corresponents dates d'inici i final.



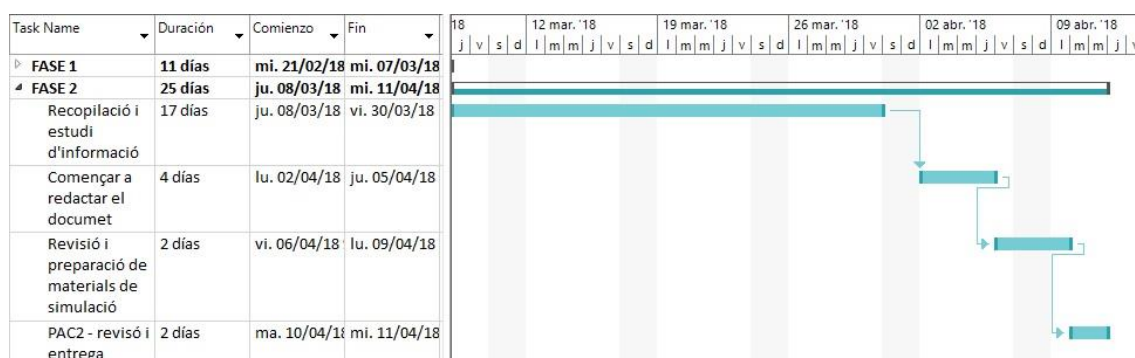
Il·lustració 5. Diagrama de Gantt estès de la fase 1.

Fase 2.

A la segona fase, la tasca principal serà la de recopilació, selecció i estudi de la informació, ja que el Treball no disposarà d'un estudi de l'Estat de l'Art. Per tant, es documentarà en el capítol 2 de la memòria amb la prèvia recopilació i selecció dels aspectes més importants i indispensables per entendre les xarxes LTE.

Alhora, s'anirà recopilant totes les referències bibliogràfiques de les quals s'hagi fet consulta. La fase finalitza amb l'entrega de la PAC2. Es tracta d'una fase amb molt pes teòric, ja que respecte a la part pràctica, en aquesta fase només es farà una revisió i preparació dels materials de simulació.

A continuació es mostra la fase 2 del diagrama de Gantt estesa (il·lustració 6), on es pot observar les tasques, la durada d'aquestes i les seves corresponents dates d'inici i final.



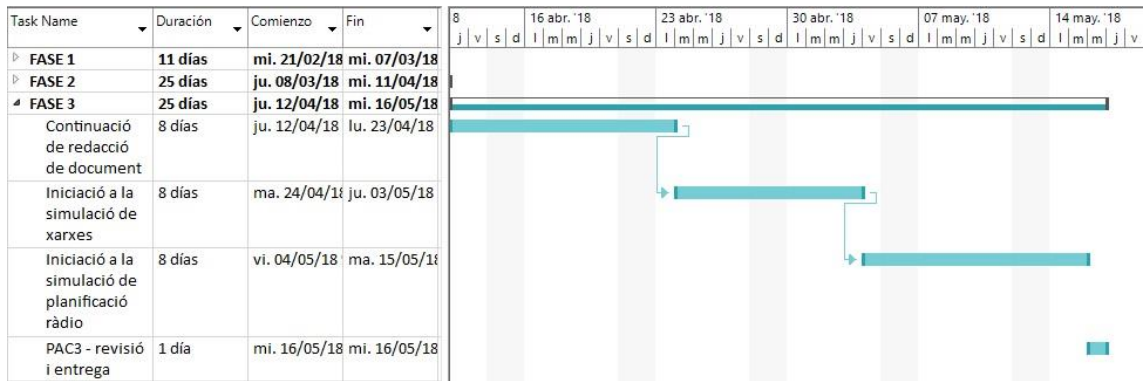
Il·lustració 6. Diagrama de Gantt estès de la fase 2.

Fase 3.

La tercera fase té una extensió similar a la fase II. No obstant, aquesta fase abasta la continuació de la redacció de document i de la iniciació de les simulacions (de xarxes i de planificació ràdio).

Les principals tasques consisteixen a dissenyar una xarxa LTE des del punt de vista de protocols amb un programari de simulació de xarxes. I d'altra banda es farà una planificació ràdio amb programari de simulació radioelèctrica.

La fase finalitza amb l'entrega de la PAC3, la qual comprèn bona part del temari de caire teòric del Treball. A continuació es mostra la fase III del diagrama de Gantt estesa (il·lustració 7), on es pot observar les tasques, la durada d'aquestes i les seves corresponents dates d'inici i final.

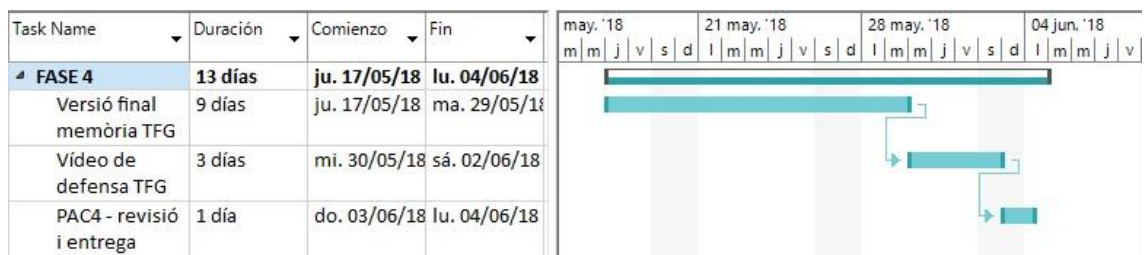


Il·lustració 7. Diagrama de Gantt estès de la fase 3.

Fase 4.

La quarta fase correspon a la PAC4. Consisteix en la redacció final de la memòria.

A continuació es mostra la fase IV del diagrama de Gantt estesa (il·lustració 8), on es pot observar que conté les tasques “Versió final memòria TFG” i “Vídeo de defensa TFG” amb la durada d’aquests.



Il·lustració 8. Diagrama de Gantt estès de la fase 4.

Fase 5.

La cinquena i darrera fase, consisteix en la defensa del TFG a través d’un Debat Virtual.

A continuació es mostra la fase 5 del diagrama de Gantt estesa (il·lustració 9), on s’observa les dues darreres tasques i la data amb la qual conclou el Treball.



Il·lustració 9. Diagrama de Gantt estès de la fase 5.

1.5 Breu sumari de productes obtinguts

El propòsit d'aquest Treball és aconseguir un disseny i implementació d'una xarxa LTE el més real possible, tal com s'havia mencionat en el punt 1.2 *Objectius del Treball*.

Per dur a terme el disseny, a la part pràctica del Treball es farà servir el següent programari informàtic:

- Packet Tracer v7.1 de Cisco: és un potent programari de simulació que permet experimentar el comportament d'una xarxa i elaborar suposicions. És a dir, simula la pràctica i la detecció i solució de problemes. Concretament es dissenyarà una xarxa LTE, des del punt de vista d'arquitectura i protocols (E-UTRAN, IP Backhaul, EPC).
- Radio Mobile: és un eina de planificació radioelèctrica que permet realitzar tasques i càlculs que abasten des de la parametrització i anàlisi de la cobertura radioelèctrica d'una única estació fins la planificació de xarxes en escenaris complexos. Respecte a la simulació ràdio, es pretén fer un desplegament d'estacions base en un territori delimitat, com podria ser una població. Per tant, serà necessari establir les condicions de contorn, fer càlculs de *Link Budget*, dissenyar les cel·les, anàlisi interferent, càlcul de capacitats, etc.

Aquestes dues eines informàtiques seran essencials per al disseny que es pretén fer en el Treball i aniran a la part dels capítols finals.

1.6 Breu descripció dels altres capítols de la memòria

En cadascun dels següents capítols de la memòria, s'aprofundeix i s'analitza les diferents temàtiques relacionades amb el desenvolupament d'aquest Treball Final de Grau de la següent manera:

A la següent fase (fase 2) està summament dedicada a la recopilació i estudi de la informació obtinguda en la recerca, però també en la redacció de la memòria. Per tant, aquesta fase contindrà els següents capítols, pel que fa a les xarxes LTE:

Capítol 2. Arquitectura i principis generals: s'explicarà els dispositius i nodes visibles de la xarxa (SIM, UE, eNodeB). El concepte cel·lular. Nodes amb pla de dades (SGW, PGW). Nodes del pla de control (HSS, MME). Síntesi de l'arquitectura i les interfícies (S1, S5/S8, S6a, S11, X2).

Capítol 3. Procediments de seguretat: es detallarà les funcions de seguretat i connexió a la xarxa. Autenticació. Xifrat i desxifrat. Control d'integritat. Jerarquia de claus. Identitat temporal. Annexió a la xarxa (attachment).

Capítol 4. Interfície ràdio: transmissió ràdio. Blocs de recursos i subtrames. Assignació de paquets. Fiabilitat de transmissió. Protocol RLC. Accés aleatori. PDCP i Visió Global.

Pel que fa a la preparació de materials per a la simulació en aquest capítol, caldrà:

Prendre contacte amb els programaris esmentats al punt 1.5. És a dir, anar familiaritzant-se amb ells amb la l'ajuda de manuals i exemples que puguin donar una idea més concreta de com es farà el disseny de xarxa i la planificació ràdio.

Quant a la fase 3, es continuarà amb la realització de la memòria i estarà formada per els capítols següents.

Capítol 5. Gestió de fluxos de dades: s'exposarà el principi d'encapsulament i túnels. Protocol GTP. Identificació i gestió de túnels. Transmissió de paquets en túnels. Connexió S1-AP. Establiment de connexió S1-AP. Non Access Stratum i protocol Stack.

Capítol 6. Gestió de la naturalesa esporàdica del flux de dades: s'explicarà la unió i separació de procediments revisats. Concepte d'ECM connectat i estats inactius d'ICM. Passar a mode d'espera després d'un llarg període d'inactivitat. Sol·licitud de servei d'activament UE. Sol·licitud de servei d'activament de la xarxa. Portadores dedicades.

A més, en aquest capítol s'iniciarà, d'una banda, la simulació de xarxes amb el programari Packet Tracer de Cisco. I també es farà simulació de planificació ràdio amb l'eina d'Àptica (Xirio Online).

A la fase 4 es tractarà d'enllestir els aspectes esmentats en els capítols anteriors. Perfilar la documentació que es presentarà a la memòria final del TFG, així com la possibilitat d'afegir altres punts que siguin indispensables a l'hora de dissenyar una xarxa LTE. A la fase 4 s'intentarà obtenir millores en l'obtenció de resultats de la part pràctica. Per tant, es podrà incloure els capítols següents:

Capítol 7. Procediment, descripció i obtenció de resultats de disseny d'una planificació ràdio: es detallarà seguint un ordre els diferents aspectes que cal considerar en el disseny de la planificació ràdio LTE i es visualitzarà els resultats obtinguts.

Capítol 8. Procediment, descripció i obtenció de resultats de disseny d'una xarxa LTE amb Packet Tracer: caldrà visualitzar pas a pas com es du a terme el disseny, des del punt de vista de l'arquitectura i protocols.

2. Arquitectura i principis generals

2.0 Introducció històrica de les xarxes mòbils a Europa

Què vol dir 2G, 3G o 4G? Com a introducció històrica es pretén veure a grans trets les similituds i/o diferències entre aquestes tecnologies.

El concepte de dividir el territori en cel·les, on cada cel·la és servida per una estació base, es va definir en els anys 70 als Estats Units d'Amèrica.

Les primeres xarxes a Europa van aparèixer en els anys 80 als països nòrdics, anomenades actualment xarxes de primera generació o 1G, basades en transmissions analògiques el principi del qual era transmetre una comunicació a una freqüència. És el que anomenem FDMA, que vol dir, *Frequency Division Multiple Access*. La vida útil d'aquestes xarxes va ser entre els anys 1980 i 1995.

Una gran innovació va ser el desplegament de la primera xarxa basada en la transmissió digital anomenada GSM, de l'anglès *Global System Mobile*. El GSM es fa servir encara avui dia i el principi fonamental és utilitzar una freqüència per transmetre diverses comunicacions dividint el temps en ranures temporals (time slots), on cada ranura admet una comunicació. Aquesta tècnica es coneix com TDMA, de l'anglès *Time Division Multiple Access* i es va introduir a la segona generació o 2G. Les xarxes 2G només admetien en els seus inicis trucades de veu (telefonía) i l'intercanvi de SMS (*Short Message Services*).

No obstant, amb el desenvolupament d'Internet en els anys 90, va sorgir la necessitat de tenir accés mòbil a Internet. Això es va aconseguir afegint procediments i equips a la xarxa GSM, el nom del qual es coneix com GPRS, de l'anglès *Global Packet Radio Service*. Amb l'evolució consecutiva d'aquest, va donar lloc al EDGE o *Enhanced Data Rate for the GSM Evolution*, el rendiment del qual es va incrementar en comparació amb el que inicialment era possible amb GPRS. El principi del GPRS és subministrar un servei de transmissió de paquets, utilitzant accés de paquets amb noves modulacions en el canal ràdio. Va ser el primer cop on l'accés IP era possible i, en el millor dels casos, assolir 100Kbits/s només era possible quan hi hagués poca càrrega a la xarxa.

Aquest rendiment, amb el que coneixem avui dia, era relativament baix. Per tant, a finals dels anys 90 es va començar a treballar en la creació i especificació d'un nou sistema que permetés majors rendiments. Es tractà del UMTS o *Universal Mobile Telecommunication System*. La tecnologia emprada pel UMTS està basada en l'espectre eixamplat, denominada CDMA, de l'anglès *Code Division Multiple Access*. Aquestes primeres xarxes es van implementar a partir del 2002-2003 i, encara són en ple funcionament. A més, es podia accedir amb una taxa de bit típicament de 1Mbit/s. Tot i que va comportar una millora significativa respecte la segona generació o 2G, encara estava relativament limitada.

La tercera generació o 3G, es va completar amb el que es denominà 3.9 (HSDPA) o *High Speed Data Packet Access* i es va començar a implementar a partir del 2008. El rendiment d'aquest va millorar amb l'ús d'una nova modulació, arribant fins als 10Mbit/s.

Pel que fa a la quarta generació, té un enfocament diferent. Fins ara, molts serveis s'especificaven en les xarxes mòbils. No obstant, a la quarta generació o 4G, tenim molts serveis disponibles en IP (veu sobre IP, videotrucada, navegació web, missatgeria instantània, xarxes socials, etc.). Per tant, es va pensar que no seria útil definir serveis específics per a una xarxa mòbil, ja que el que proporciona la xarxa 4G és només la transmissió de paquets IP des d'un terminal mòbil a un servidor que pot ser fixe o mòbil i, viceversa. És a dir, l'únic servei proveït en el 4G és l'accés IP d'alt rendiment: amb taxes de bit fins a 100Mbit/s. La tecnologia a Europa i a la resta del món corresponent al 4G es denomina LTE o *Long Term Evolution*. Molts puristes consideren que el terme "Evolution" es va escollir malament, perquè no és una evolució, sinó un sistema diferent al 3G o al 3.9G.

Quant a la transmissió a la interfície ràdio del 4G està basada en el OFDMA, de l'anglès *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* i és un tipus de transmissió utilitzada en una gran quantitat de sistemes com DVB-T/T2, ADSL, entre d'altres. El seu benefici radica en l'ús del processament matemàtic, permetent així, transmissions paral·leles i, obtenir consegüentment un alt rendiment. El fet d'utilitzar moltes portadores ortogonals entre si, és a dir, moltes transmissions en paral·lel, és que cada transmissió es realitzi amb un rendiment mig. Això és així per a combatre els efectes del canal. Com sabem, el canal es variant en el temps i la seva resposta impulsional ha de ser molt inferior al puls de cada portadora (inversament proporcional a la taxa de bit). Per tant, si cada portadora transmet amb una taxa de bit prou baixa, s'aconseguirà obtenir un puls de durada major que la resposta impulsional del canal.

Les xarxes LTE porten desplegant-se des de l'any 2010 i, la cobertura que ofereix aquest tipus de xarxa, tant a Europa com a la resta del món, és molt gran. Aquesta serà la tecnologia que s'estudiarà en aquest Treball.

Generació	Serveis principals	Nom de la tecnologia a Europa	Tipus d'accés a la interfície ràdio	Vida útil
1	Telefonia	R2000, NMT, ...	FDMA analògic	1980-1995
2	Telefonia, SMS	GSM	TDMA	1995-
2.5	Telefonia, SMS, accés IP fins 100Kbit/s	GPRS, extensió EDGE	+ accés de paquets amb nova modulació	2000-
3	Telefonia, SMS, accés IP fins 1Mbit/s	UMTS	CDMA	2002-
3.9	Telefonia, SMS, accés IP fins 10Mbit/s	Extensió HSDPA	+ accés de paquets amb nova modulació	2008-
4	Accés IP fins 100Mbit/s amb baixa latència	LTE, LTE-A	OFDMA	2010-

Il·lustració 10. Diverses generacions de xarxes mòbils. Elaboració pròpia.

2.1 Dispositius i nodes visibles (SIM, UE, eNodeB)

Entre els elements que conformen una xarxa mòbil, com pot ser una xarxa LTE, hi ha els elements visibles. Aquests elements se'ls anomena així perquè el mateix usuari els pot identificar.

Tothom coneixem el primer element, ja que sempre ho portem amb nosaltres. Es tracta del terminal (telèfon cel·lular o telèfon intel·ligent). No obstant, segons l'estàndard LTE es denomina UE, de l'anglès *User Equipment*. D'ara endavant es farà referència a un telèfon mòbil com a terminal o com a UE.

Perquè puguin operar els UE, aquests han d'estar equipats amb una targeta SIM inserida. La SIM, de l'anglès *Subscriber Identity Module*, conté la identitat del subscriptor i, aquesta és unívoca en tot el món. També conté dades sobre la subscripció i habitualment, la targeta SIM és propietat de l'operador en la majoria de països. No obstant, però, aquesta targeta s'anomena USIM o *Universal Subscriber Identity Module* pel que fa a les terminologies 3G i 4G. Tot i així, es fa servir l'acrònim SIM perquè és més simple i, sovint s'empra indistintament per a les tecnologies 2G, 3G i 4G.

La SIM es troba en equips com poden ser els smartphones, pen 4G i, fins i tot en routers per poder dotar d'accés a Internet mòbil a ordinadors portàtils. Pel que fa al Treball, no es diferenciarà entre els diferents tipus de terminals. És a dir, tots els terminals seran tractats de la mateixa manera.

Òbviament, la xarxa no només es limita a això. Si anem pel carrer veurem antenes en els terrats d'alguns edificis, com les que s'il·lustren a continuació.



Il·lustració 10. Antenes panell de telefonia mòbil al terrat d'un edifici. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

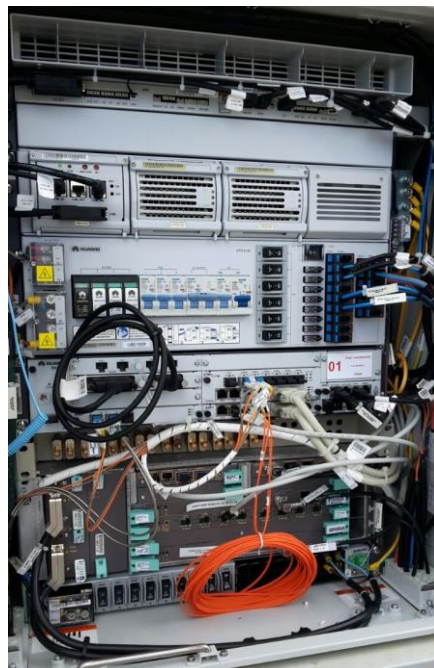
Aquestes antenes també acostumen a instal·lar-se en torres de gelosia o tubulars. Habitualment els operadors de xarxa comparteixen emplaçaments (sites) i, per tant, el SS.RR. (Sistema Radiant) estarà format per les diferents antenes de diversos operadors.



Il·lustració 11. SS.RR. en torre de gelosia (esquerra)[\[2\]](#). SS.RR. en torre tubular (dreta)[\[3\]](#).

En alguns casos, és més difícil veure les antenes de telefonia mòbil perquè els operadors fan servir tècniques per mimetitzar-les. D'alguna manera busquen reduir l'impacte visual i paisatgístic que provoca les instal·lacions d'aquestes estacions base de telefonia. Depenent de l'ordenança municipal de radiocomunicació de cada població, és habitual trobar aquestes antenes camuflades (ús de radomos, ús de caps de Slim en forma de xemeneia, etc.) per tal que sigui imperceptible per a l'usuari des del carrer.

Realment, les antenes són dispositius radiants que transformen el corrent altern d'alta freqüència en ones electromagnètiques i viceversa. A banda del SS.RR, les estacions base disposen d'un gabinet tècnic i, dins d'aquest gabinet hi ha un conjunt de transceptors que permeten la transmissió ràdio entre els UE, que també són transceptors, i la xarxa.

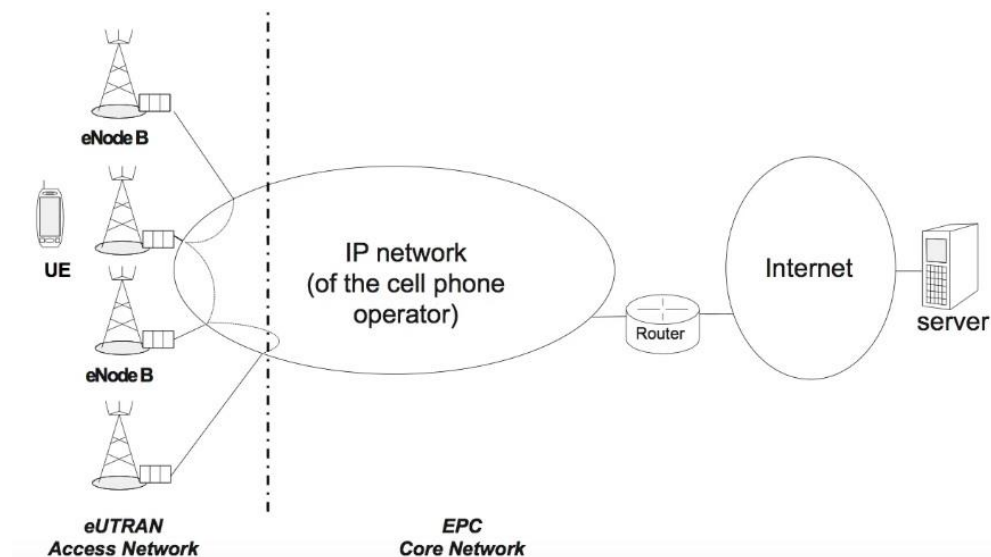


Il·lustració 12. Gabinet tècnic d'una estació base de Vodafone (equips Huawei). Imatge pròpia capturada en una auditoria a l'empresa NIP S.A.

Per tant, hi ha dues parts diferenciades. L'estació base com a conjunt de transceptors que es troben en un lloc determinat i han de cobrir l'àrea que l'envolta. I les antenes com a dispositius radiants situats a top de masteler per tindre diversitat en espai.

Els UE acampats a una estació base poden comunicar-se amb l'estació mitjançant la transmissió ràdio. En terminologia 4G, una estació base s'anomena eNodeB. "e" vol dir evolucionat, per indicar que hi ha hagut una evolució en relació amb la generació anterior. Node, per indicar que està inserit en una xarxa. I "B" fa referència a l'Estació Base.

Com hem vist, una xarxa mòbil no es limita només en els SS.RR. De fet, com a introducció podem dir que una xarxa mòbil és un conjunt d'estacions base distribuïdes en un territori i, aquestes estan connectades a una xarxa IP, desplegada per l'operador de telefonia mòbil. Aquesta xarxa està interconnectada a Internet (a les xarxes IP d'altres operadors) a través d'un o diversos routers, com es veurà més endavant. Per tant, tenim dues subxarxes. La xarxa d'accés i la xarxa central.



Il·lustració 13. Xarxa d'accés i xarxa central d'un operador mòbil. . X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

La xarxa d'accés es compon del conjunt de eNodeBs. A causa que estan connectades a la mateixa xarxa IP, aquestes estacions base poden comunicar-se entre si. En l'estàndard, la xarxa d'accés s'anomena eUTRAN, del anglès *evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*. D'altra banda, tenim en nucli de la xarxa o xarxa central, que s'anomena EPC, de l'anglès *Evolved Packet Core*.

Com hem vist, la xarxa eUTRAN en el 4G és relativament senzill ja que només hi ha un tipus d'equip, el eNodeB. Més endavant veurem què compon el EPC. Resumint en aquest primer punt d'Arquitectura i principis generals, a una xarxa mòbil 4G hi ha un conjunt de eNodeBs repartits geogràficament, on cada eNodeB està equipat amb antenes i un gabinet tècnic connectat a una xarxa IP que conforma la xarxa d'accés.

2.2 Concepte cel·lular.

Com és possible que puguem comunicar-nos amb els nostres smartphones a tot arreu? La resposta a aquesta pregunta s'explicarà en aquest apartat.

Pel que fa a la potència de transmissió d'un terminal, o d'un UE és típicament de 0,2W o 200mW. El marge dinàmic de potència, òbviament depèn de cada situació. Per exemple, si ens trobem en una ciutat, el rang de potència no serà el mateix que si ens trobem en un entorn rural. No obstant, per donar un ordre de magnitud, amb una potència màxima de transmissió de 0,2W el terminal pot aconseguir assignació de recursos ràdio en un radi de diversos quilòmetres de l'estació base.



Il·lustració 14. Terminal intentant acampar a una estació base. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

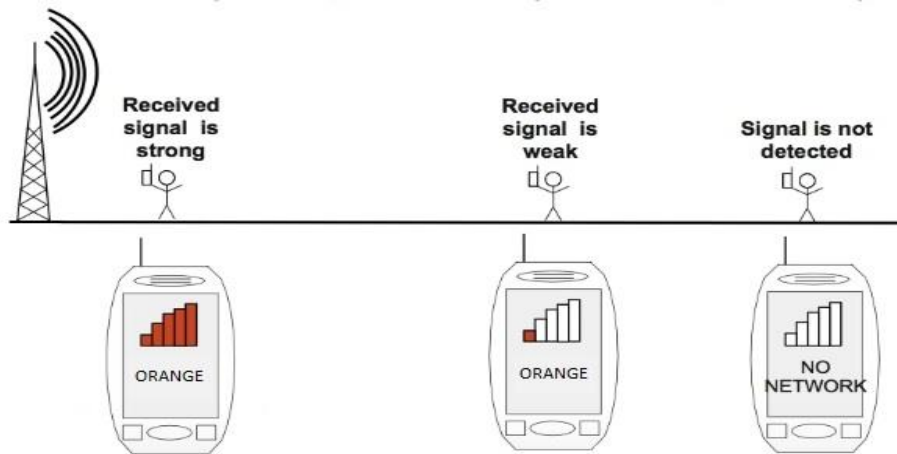
Si ens trobem massa allunyats de l'estació base, probablement no aconseguirem establir comunicació, ni tindre accés a Internet mòbil. La pràctica habitual per part dels operadors és desplegar estacions base el més regular possible per cobrir el territori, de manera que estiguem a menys d'uns pocs centenars de metres d'una estació base.



Il·lustració 15. Necessitat de cobrir el territori amb estacions base. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Per descomptat, a la pràctica això no és cert. Hi haurà àrees blanques on no hi hagi cobertura, però tenir estacions base desplegades a tot arreu és l'objectiu final. Ara, la pregunta és, com saber si tenim accés a la xarxa o si som prou a prop d'una estació base per tenir accés a Internet mòbil.

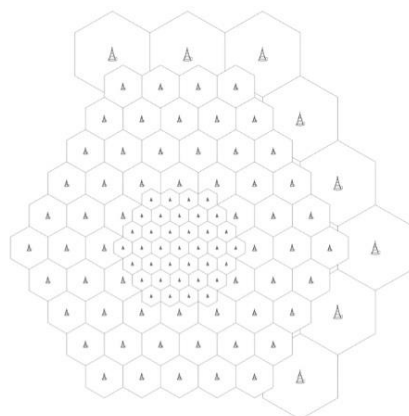
Per solucionar aquest problema, cada estació base transmet periòdicament un senyal anomenat *beacon channel*. Aquest *beacon channel* permet indicar la presència de la xarxa i oferir les característiques d'aquesta, entre les quals es troba la identitat de l'operador. Així, els terminals tractaran d'escoltar l'estació base de l'operador al que pertanyen, i no a la d'uns altres. Tots els terminals mesuren la potència amb la qual reben aquest *beacon channel*. A la següent il·lustració, hi ha un exemple on la transmissió del *beacon channel* se simbolitza per uns arcs concèntrics.



Il·lustració 16. Terminals estimen la potència amb la qual reben el *beacon channel*. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Quan un terminal es troba a prop d'una estació base, el senyal rebut és fort i, això equival a tenir més barres de cobertura en la pantalla. A mesura que el terminal s'allunya de l'estació base, la força amb la qual rep el senyal disminueix, és a dir, la pantalla del terminal mostrarà menys barres de cobertura. En el darrer cas, quan el terminal no detecta cap senyal, aquest mostra el missatge "sense xarxa" i, lògicament no mostrarà cap barra de cobertura.

Tornant de nou al desplegament d'estacions base, depenent de si es tracta d'un entorn urbà o d'un entorn rural, aquestes es desplegaran amb relativa regularitat per proporcionar cobertura. Posant per cas la ciutat de Barcelona, i tot l'àrea metropolitana, les estacions base estaran més densament disposades en el primer cas, ja que a la ciutat de Barcelona hi ha major densitat de població. Per tant, en entorns urbans es parlarà de micra cel·les, mentre que en entorns rurals (baixa densitat d'usuaris) el disseny serà de macro cel·les. Què vol dir això? Que l'operador, quan tingui geogràficament a molts clients (subscriptors) per atendre, haurà de desplegar una gran quantitat d'estacions base, tal que la capacitat demandada pels usuaris sigui absorbida per la xarxa de l'operador. Evidentment, l'àrea de cobertura d'una estació base, denominada cel·la, variarà segons es tracti d'una zona urbana, suburbana o rural (arribant fins a un radi màxim de 10 quilòmetres).



Il·lustració 17. Divisió del territori en cel·les. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

El concepte de cel·la consisteix a dividir el territori en “cel·les” hexagonals, on cadascuna és servida per una estació base. Aquesta divisió en cel·les no és perceptible per a l'usuari, és a dir, quan un usuari passa d'una cel·la a una altra, idealment és imperceptible o almenys aquest és l'objectiu. La capacitat de la cel·la, s'expressa en [Mbit/s] i no depèn de la mida de la cel·la.

- Entorns urbans (alta densitat d'usuaris): les estacions base són més densament desplegades per solucionar el problema de capacitat. L'operador ha de desplegar suficients estacions base perquè la capacitat en [Mbit/s/Km²] sigui superior al tràfic generat pels clients.
- Entorns rurals (baixa densitat d'usuaris): en aquest cas l'operador intentarà simplement garantir la cobertura. És a dir, l'operador haurà de desplegar suficients estacions base perquè, en qualsevol punt del territori, un terminal estigui sota l'abast d'una estació base i pugui connectar-se.

Per sintetitzar el punt 2.2 d'Arquitectura i principis generals, una xarxa cel·lular està composta d'un conjunt d'estacions base desplegades en un territori més o menys ampli i, aquestes estan connectades a una xarxa fixa. No acostumen fer servir enllaços via satèl·lit per connectar estacions base a la resta de la xarxa. Normalment, no hi ha salts successius en una xarxa cel·lular, és a dir, el terminal transmet a l'estació base i l'estació base es connecta a través d'un enllaç cablejat (cada vegada més freqüent amb fibres òptiques) o radioenllaç a la xarxa fixa de l'operador mòbil.

Important remarcar en una xarxa mòbil, el territori es divideix en cel·les per assegurar que un terminal estigui sempre dins de l'abast d'una estació base i augmentar la capacitat de la xarxa alhora.

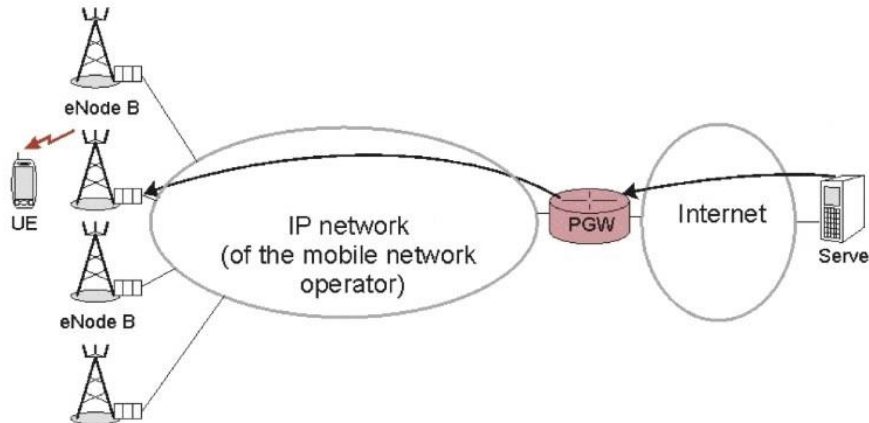
D'altra banda, en entorns urbans densament poblats les àrees de les cel·les són més petites bàsicament per dues raons. Per proporcionar una gran capacitat en [Mbit/s/km²] i per minimitzar les potències de transmissió, atès que qualsevol terminal estarà més a prop de l'estació base. Cal matisar que els costos depenen de la quantitat d'emplaçaments (sites) on l'operador instal·la i manté el hardware. Per tant, serà més costós per a l'operador dissenyar cel·les petites.

Pel que fa al *beacon channel* és transmès per l'estació base i és utilitzat pel terminal per obtenir una indicació del nivell de cobertura. L'objectiu del *beacon channel* és notificar la presència de la xarxa i de les seves característiques sense necessitat que el terminal transmeti. Si considerem un terminal que no detecta cap *beacon channel*, això vol dir, que cap xarxa cobreix l'àrea on es troba l'usuari. No obstant, si un terminal no detecta el *beacon channel* del seu operador, però sí detecta el *beacon channel* d'un altre operador, el terminal només podrà accedir a un servei reduït (trucades d'emergència).

2.3 Nodes amb pla de dades (SGW, PGW).

Quan consultem un servidor o una pàgina web a través dels nostres telèfons mòbils, per on passen els paquets que arriben als nostres terminals? La resposta a aquesta pregunta serà tractada en aquest apartat.

Internet, com a xarxa, no pot gestionar la mobilitat. Des dels inicis, cada paquet està destinat a una direcció IP, i una direcció IP generalment està vinculada a una ubicació física. La solució adoptada per les xarxes 4G consisteix a convergir els paquets IP destinats als subscriptors mòbils a una única porta d'enllaç de xarxa anomenada PGW, de l'anglès *Packet Gateway*. Això vol dir que quan consultem un servidor, el paquet que constitueix per exemple, una part d'una pàgina web, serà transmès a través d'Internet fins al P-Gateway del nostre operador de telefonia mòbil. I després, el P-Gateway s'encarregarà d'enviar el paquet a l'estació base fent servir la pròpia xarxa IP de l'operador. Per últim, el eNodeB lliurarà el paquet al terminal a través del canal ràdio.



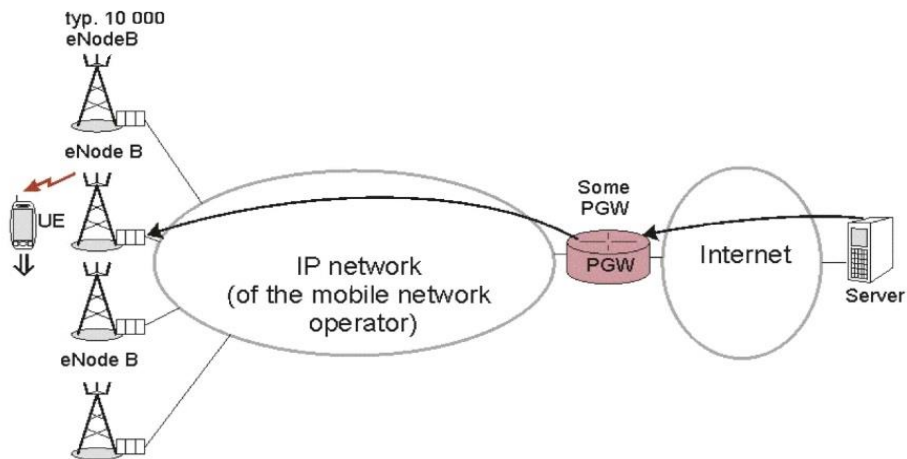
Il·lustració 18. Representació del PGW entre la xarxa de l'operador i Internet. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Per tant, la funció del P-Gateway és la d'encaminar les dades cap al terminal i també, d'ocupar-se d'un cert nombre de funcions de seguretat. Al tractar-se d'una porta d'entrada, aquesta ha d'estar protegida contra atacs des de l'exterior.

Si pensem en el sentit oposat de la comunicació, quan enviem una sol·licitud des dels nostres terminals, succeeix el mateix. El paquet IP parteix del terminal cap al eNodeB. Seguidament el eNodeB l'envia al P-Gateway, i del P-Gateway fins al servidor.

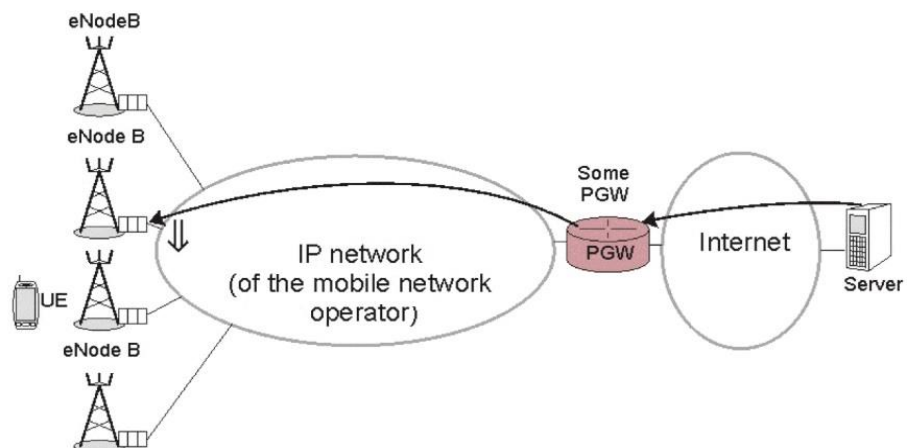
Si tenim una xarxa amb una gran quantitat de subscriptors, com succeeix a la Xina, és habitual trobar diversos PGW perquè només un PGW no té la capacitat suficient per administrar tots els paquets. Sovint, diversos PGW també poden ser necessaris per disposar de redundància i garantir la fiabilitat. No obstant això, els P-Gateway estan limitats en nombre. Pensem, per exemple, en el nombre de eNodeBs que pot albergar la xarxa espanyola o la xarxa francesa, que típicament arriben al voltant de 100.000 eNodeBs. Però, d'altra banda, només hi ha uns quants PGW a la xarxa 4G.

Imaginem-nos l'escenari on un terminal està rebent dades, quan aquest s'està movent.



Il·lustració 19. Necessitat d'un Gateway intermediari. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

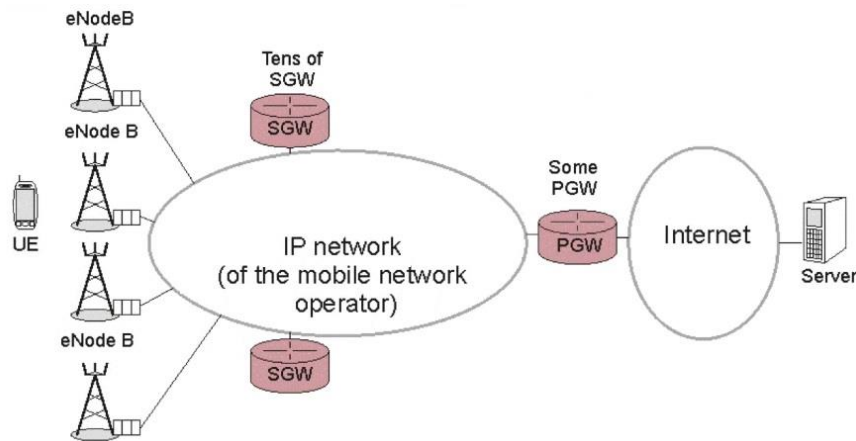
Podem veure que caldrà notificar al P-Gateway perquè encamini les dades al nou eNodeB on el terminal ha acampat, i no al anterior eNodeB on el subscriptor estava abans.



Il·lustració 20. UE acampa en un altre eNodeB. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Aquest redreçament requereix de l'intercanvi de missatges de senyalització. Per evitar canvis de ruta freqüents a nivell de P-Gateway, s'utilitza un equip que actua d'intermediari anomenat SGW, de l'anglès *Serving Gateway*.

El *Serving Gateway* dona servei a una zona geogràfica determinada, generalment, distribuïts per regions. Per tant, ara tindrem un salt addicional: del Server-PGW, del PGW-SGW, i del SGW-eNodeB.



Il·lustració 21. Gateways regionals o SWG. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Encara que sembli més complex, l'avantatge és que quan un terminal s'està movent, sovint roman sota el mateix S-Gateway. És a dir, el S-Gateway és l'únic equip que ha d'administrar aquesta mobilitat (redreçament). A més a més, el S-Gateway permet no només la recopilació de dades enviades pels terminals a diversos eNodeBs, sinó també de la distribució de dades provinents de servidors cap als eNodeBs on es troben els terminals.

El *Serving Gateway* i el *Packet Gateway* són dos elements molt importants del nucli de xarxa 4G (EPC). Si pensem en els paquets IP que componen la seqüència de dades, per exemple, d'un vídeo que veiem en el nostre smartphone, aquests passen pel PGW (que és l'entrada) i pel SGW (vinculat al lloc o regió on estem ubicats).

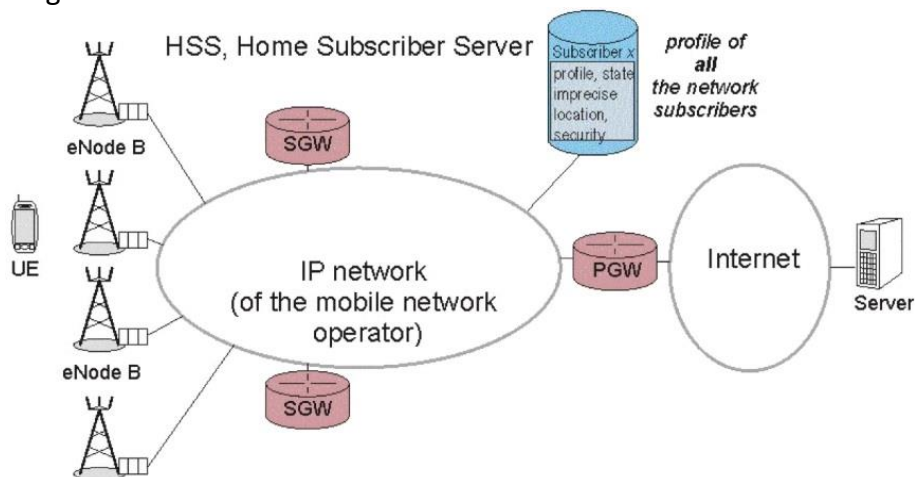
Resumint el punt 2.3 d'Arquitectura i principis generals, podem dir que l'element SGW és una porta d'enllaç que ofereix servei a un àrea geogràfica determinada i reenvia paquets de dades enviades cap als terminals o des dels terminals. El PGW és una porta d'enllaç que permet que la xarxa 4G d'un operador estigui interconnectada a Internet (altres xarxes). Per tant, quan fem servir la xarxa 4G (segons l'arquitectura estàndard), tots els paquets de dades enviades cap a o des del nostre terminal sempre hauran de passar per un SGW i un PGW.

2.4 Nodes del pla de control (HSS, MME)

Podem fer servir els nostres terminals lliurement a qualsevol xarxa? Com es controla l'accés a la xarxa? Hi ha algun equip que s'encarregui de fer això? Aquest apartat d'Arquitectura i principis generals donarà resposta a aquestes qüestions.

Cal recordar, que no només a la xarxa viatgen els paquets IP de dades corresponents, per exemple, a la transmissió de vídeo que estem veient en un determinat moment. També existeixen tota una sèrie de funcions o mecanismes de control. Per exemple, es verifica que el subscriptor estigui autoritzat per fer servir la xarxa abans que tingui accés. És a dir, abans que les dades puguin ser transmises per un terminal, hi ha uns procediments d'accés i control. Si un terminal no està autoritzat perquè, per exemple, l'usuari no ha pagat la factura, l'accés serà rebutjat.

Aquests procediments de control requereixen l'ús d'una base de dades. En la terminologia 4G, aquesta base de dades s'anomena HSS, de l'anglès *Home Subscriber Server*. No obstant, a les terminologies 2G i 3G es va anomenar HLR, de l'anglès Home Location Register.



Il·lustració 22. Base de dades HSS a una xarxa 4G. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

En el HSS trobem el perfil de tots els subscriptors de la xarxa, és a dir, la llista de tots els subscriptors amb les respectives identitats, els seus drets quan a serveis als que estan subscriptos i les seves ubicacions. També hi ha dades de seguretat que permeten el control d'accés, tot i que la ubicació del subscriptor sol ser bastant imprecisa. Aquests elements es veuran amb més detall en altres apartats.

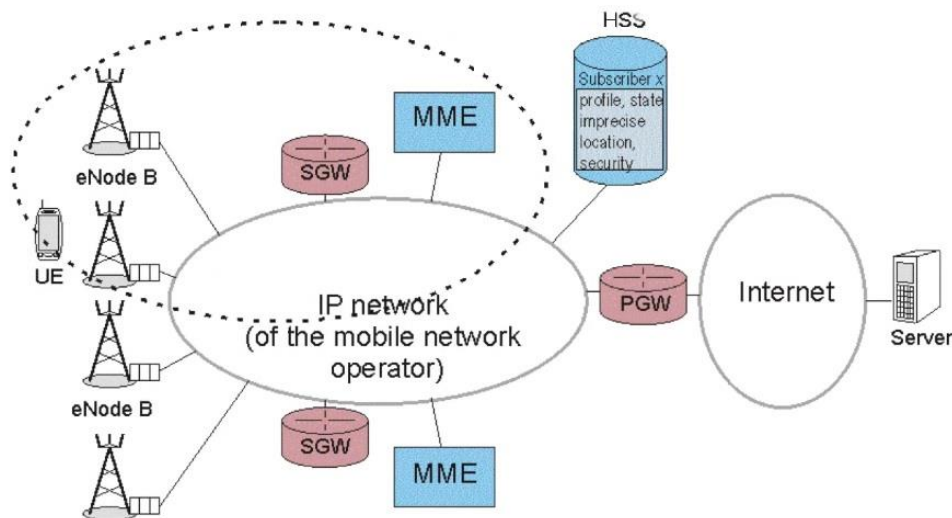
Per verificar el perfil d'un subscriptor o tenir una idea de la seva ubicació, es necessita una senyalització. S'entén per senyalització, el conjunt de missatges intercanviats per gestionar l'accés a la xarxa, per fer seguiment dels terminals quan es mouen, etc. Però en cap cas, la senyalització conté dades d'usuari (no tracta les dades quan un usuari està veient un vídeo o el contingut d'una pàgina web). La senyalització només és informació de control, d'utilitat per a l'operador. Per tant, important remarcar que el HSS només intercanvia missatges de senyalització. És a dir, només s'encarrega del control i cap paquet de dades passa pel HSS.

En aquest Treball, els elements específics per al control que es vagin presentant en els següents capítols es representaran en les il·lustracions de color blau.

Tornant de nou a l'apartat que ens correspon, si un terminal intenta accedir a la xarxa d'un operador que no sigui el seu, el terminal enviarà un missatge que serà reenviat al HSS i es verificarà l'accés. Si no és a la llista de subscriptors, l'accés serà denegat. Pensem que pot haver desenes de milions de subscriptors a la xarxa, això vol dir, que hi ha desenes de milions de terminals. Per tant, cada vegada que un usuari es mogui o faci quelcom en el seu terminal i, sabent que l'accés està controlat, caldrà enviar una sol·licitud al HSS.

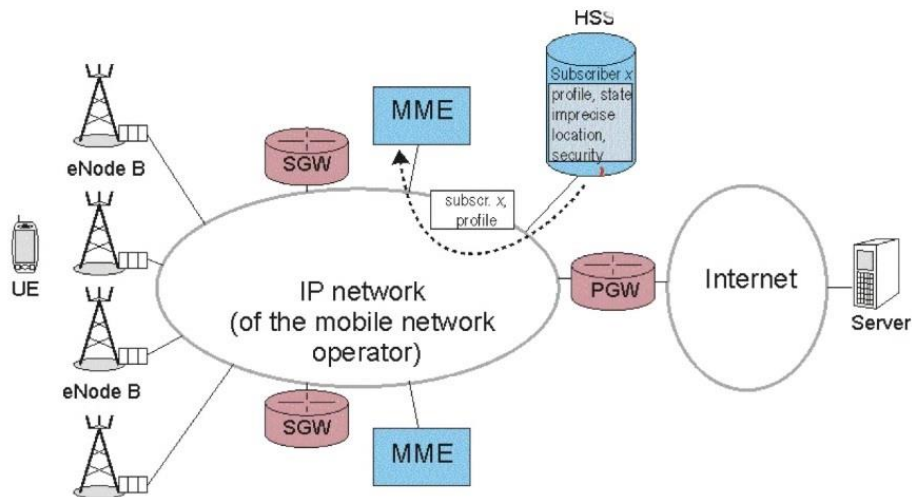
Els HSS, encara que són potents corren el risc de saturar-se, havent de gestionar tot aquest conjunt de sol·licituds de control simultàniament. Per si no fos poc, molts intercanvis de senyalització de les gestions esporàdiques fa necessari la naturalesa de les transmissions, que es veurà més endavant.

Com a part de la solució, es presenta el MME, de l'anglès *Mobility Management Entity*. L'entitat de gestió de mobilitat o MME administra una regió molt gran i es connectarà a través de la xarxa de l'operador a diversos eNodeBs. L'objectiu del MME és controlar la mobilitat, controlar els diferents terminals.



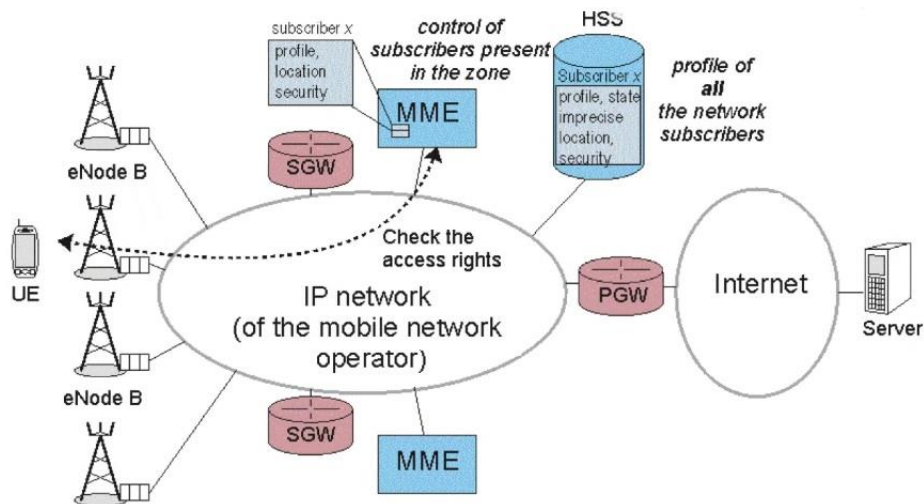
Il·lustració 23. Mobility Management Entity en una xarxa 4G. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Quan encenem el terminal, enviarà una sol·licitud al eNodeB i, aquest enviarà una sol·licitud al MME. Just aquest moment, s'anomena *attachment* (annexió) a la xarxa. Immediatament després, el MME verifica si reconeix al subscriptor. En general, no se sap si el terminal s'encén per primer cop. Per tant, el HSS transmetrà al MME el perfil del subscriptor, és a dir, tots els seus drets d'accés i els serveis als quals està subscript. A partir d'ara, per a tots els futurs accessos, cada vegada que calgui fer una verificació, el MME podrà comprovar localment el perfil del subscriptor.



Il·lustració 24. Transferència del perfil i dades de seguretat des del HSS al MME. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

En certa manera, és equivalent a la memòria cau (cache memory) d'un programari. Es podria dir, que el MME és el node que inspecciona localment o regionalment els subscriptors presents, verificant els drets d'accés.



Il·lustració 25. Els intercanvis de senyalització es realitzen entre el terminal i el MME. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Cada operador de telefonia pot tenir diversos MME a la seva xarxa. De la mateixa manera que succeeix amb el HSS, el MME només intercanvia missatges de senyalització i són màquines relativament potents, ja que poden gestionar al voltant de deu milions de subscriptors. A continuació s'enumeren les funcions principals del MME:

- Es comunica amb les diverses estacions base (eNodeBs) per establir, per exemple, funcions de configuració.
- També es comunica amb el HSS per obtenir els perfils i la informació de seguretat dels subscriptors presents de l'àrea que administra.
- Emmagatzema els perfils i dades de seguretat.
- Gestiona els mecanismes de control relacionats amb l'accés a la xarxa, la seguretat i la mobilitat dels terminals presents de la seva àrea.

- També manté un coneixement de la ubicació dels terminals de la seva àrea, però d'una manera relativament imprecisa.
- El MME selecciona el P-Gateway i el S-Gateway quan el terminal es connecta a la xarxa de l'operador, i a Internet.
- Les dades intercanviades entre el terminal i els servidors de la xarxa d'Internet viatjaran a través d'aquest P-Gateway i S-Gateway.
- Assegura l'accessibilitat o no accessibilitat del terminal.
- Està involucrat en el que es denomina entrega o transferència. És a dir, la possibilitat de mantenir activa una sessió quan l'usuari es mou i canvia de cel·la (handover).

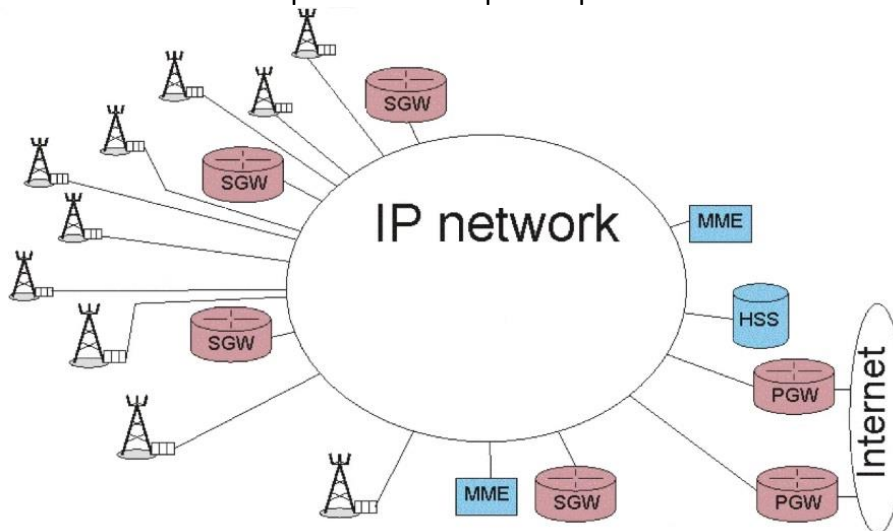
Per tant, com podem veure, els MME són equips amb bastant importància dins del nucli de la xarxa 4G (EPC).

Resumint el concepte general, quan un usuari encén el seu terminal i es connecta a una xarxa 4G, el perfil de subscriptor emmagatzemat en el HSS és transferit al MME. El perfil del subscriptor (serveis subscrits) s'emmagatzema en el HSS perquè si estigués emmagatzemat a la targeta SIM, l'operador hauria de modificar-lo cada vegada que canviï la subscripció. Una opció que és possible, ja que modificar el contingut de la targeta SIM es pot fer a través d'un canal ràdio. No obstant, és una opció amb certa complexitat i conduiria a molts defectes de seguretat. Per tant, el perfil de subscriptor se sol emmagatzemar en el HSS i, aquest es transfereix al MME on es troba el subscriptor, generalment quan s'encén el terminal.

2.5 Síntesi de l'arquitectura i les interfícies (S1, S5/S8, S6a, S11, X2).

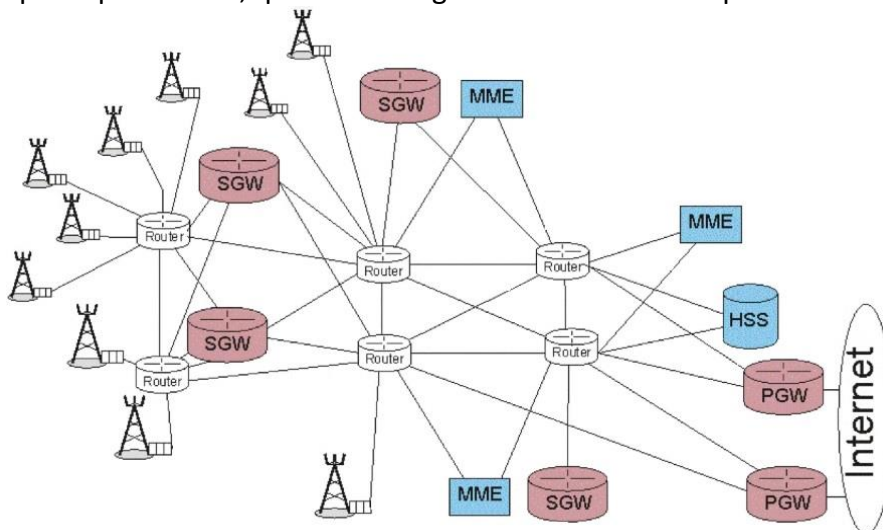
Quina és l'arquitectura de la xarxa 4G? En els apartats anteriors hem vist els elements principals, però podem preguntar-nos si tots aquests elements estan connectats entre si i, si es comuniquen entre ells. El punt 2.5 del capítol *Arquitectura i principis generals* donarà resposta a la qüestió plantejada.

Pel que hem vist fins ara, una xarxa 4G està formada per un conjunt de eNodeBs, uns quants *Serving Gateways (SGW)*, alguns *Mobility Management Entities (MME)*, d'uns pocs *Packet Gateways (PGW)*, i d'un sol *Home Subscriber Server (HSS)*. Tots aquests nodes estan connectats a la xarxa IP de l'operador de telefonia mòbil, per tant, tots els equips de la xarxa 4G tenen implementada la pila de protocol IP.



Il·lustració 26. Equips de xarxa fan córrer la pila de protocol de la família IP. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

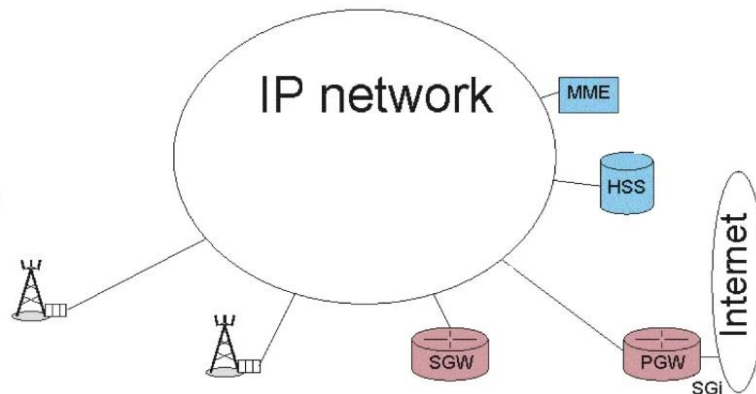
La xarxa IP de l'operador es compon d'un conjunt de routers interconnectats, de manera que els equips es poden comunicar encara que no estiguin connectats entre si. Aquest és el principi del protocol IP, que s'encarrega de la retransmissió per salts successius.



Il·lustració 27. Equips poden comunicar-se entre si a través de la xarxa IP. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Conseqüentment, ara es poden definir les interfícies lògiques entre nodes, encara que no estiguin físicament connectats. Per fer-ho, simplifiquem la xarxa i només es mostrarà els elements essencials. És a dir, una topologia de xarxa la qual es tracta d'una xarxa IP de l'operador i els nodes 4G connectats a aquesta. Les interfícies definides poden ser entre dos eNodeBs, entre un eNodeB i un S-Gateway, etc. Cada interfície haurà d'estar especificada perquè per sobre de la capa IP, hi hauran protocols de comunicació especialitzats en gestió de la mobilitat o en l'intercanvi de dades que tinguin en compte la mobilitat.

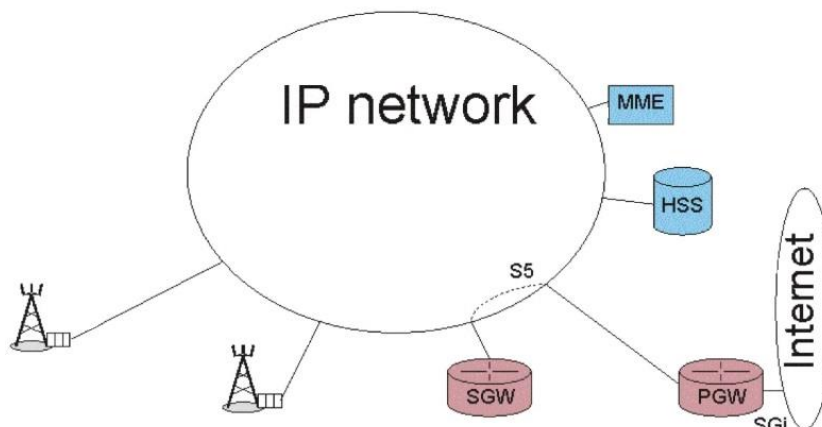
La primera interfície que veurem s'anomena interfície SG-I. "I" vol dir Internet i, és la interfície entre el P-Gateway i la xarxa IP externa que es pot interpretar com Internet.



Il·lustració 28. Interfície SG-I entre el PGW i Internet. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

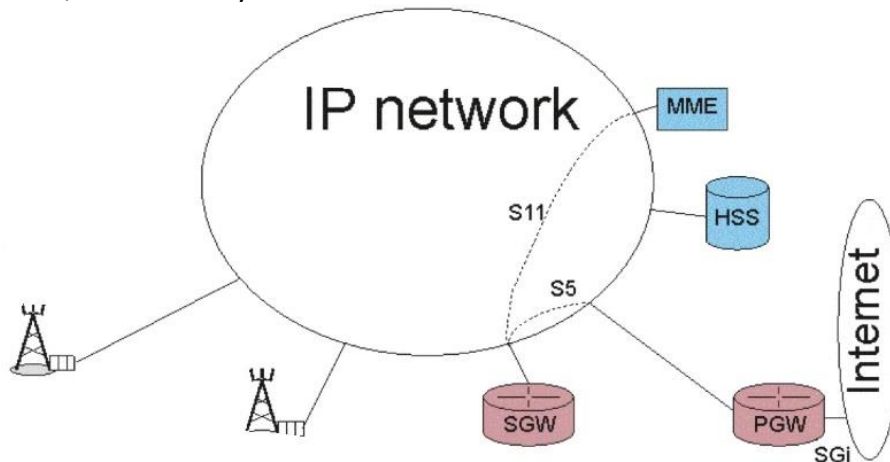
Cada interfície està numerada i, en aquest Treball s'utilitzen aquests nombres perquè són nombres d'interfícies que habitualment els operadors fan servir i convé recordar-los.

La interfície S5 es troba entre el S-Gateway i el P-Gateway de la mateixa xarxa 4G i s'utilitza per intercanviar dades d'usuari i alguns missatges de senyalització.



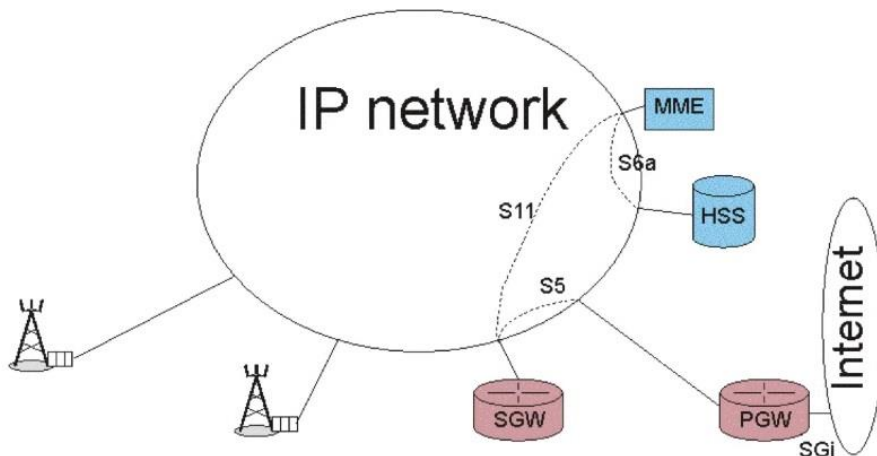
Il·lustració 29. Interfície S5 entre el SGW i el PGW. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

També existeix la interfície entre el S-Gateway i el MME, ja que el MME és l'equip que s'encarrega bàsicament del control d'accés, però també ha de controlar certes funcionalitats, el S-Gateway.



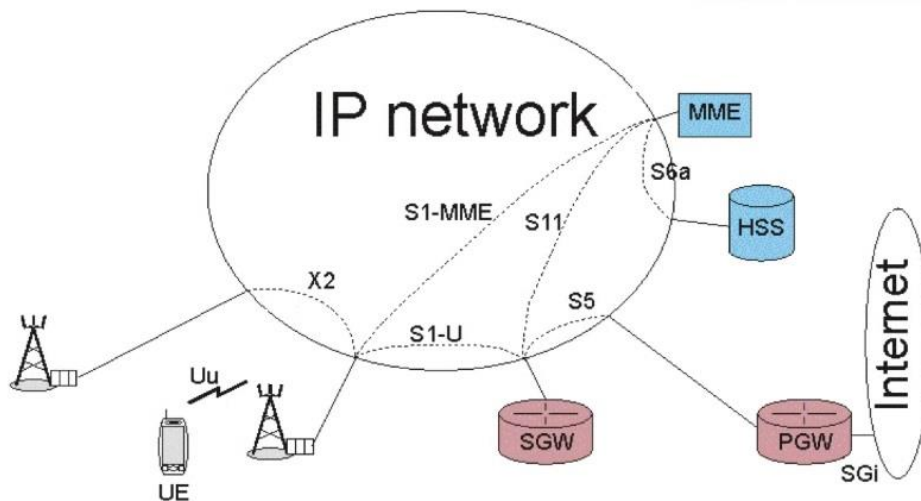
Il·lustració 30. Interfície S11 entre el SGW i el MME. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

La interfície S11 entre el MME i el S-Gateway només s'utilitza per intercanviar missatges de senyalització. També tenim la interfície entre el MME i el HSS anomenada S6a, on només s'intercanvien missatges de senyalització, com succeïa a la interfície S11.



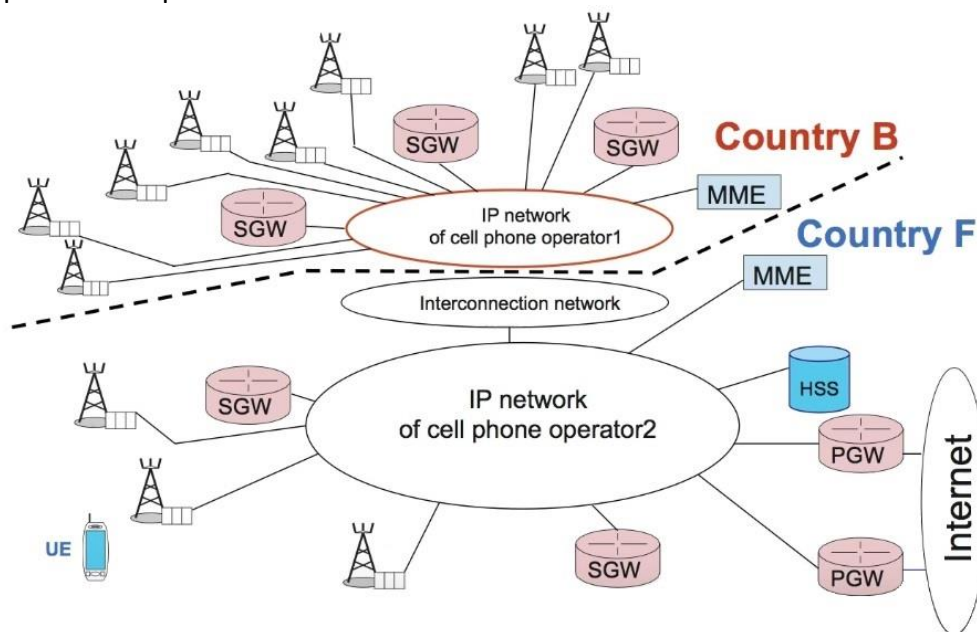
Il·lustració 31. Interfície S6a entre el MME i el HSS. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

La interfície entre el eNodeB i el MME s'anomena S1-MME. De nou, només s'utilitza per a intercanvi de senyalització. Entre el eNodeB i el SGW hi ha la interfície S1-U, però en aquesta només es transporta dades d'usuari, és a dir, no hi ha intercanvi de senyalització. D'altra banda, trobem la interfície X2, que és la interfície que es troba entre dos eNodeB i, es transporten tant les senyalitzacions com les dades d'usuari. Per últim, cal mencionar la interfície amb més rellevància respecte les anteriors, ja que és la interfície entre el terminal (UE) i el eNodeB, anomenada Uu encarregada de la transmissió en el canal ràdio. Aquí novament les dades de usuari i els missatges de senyalització són transportats.



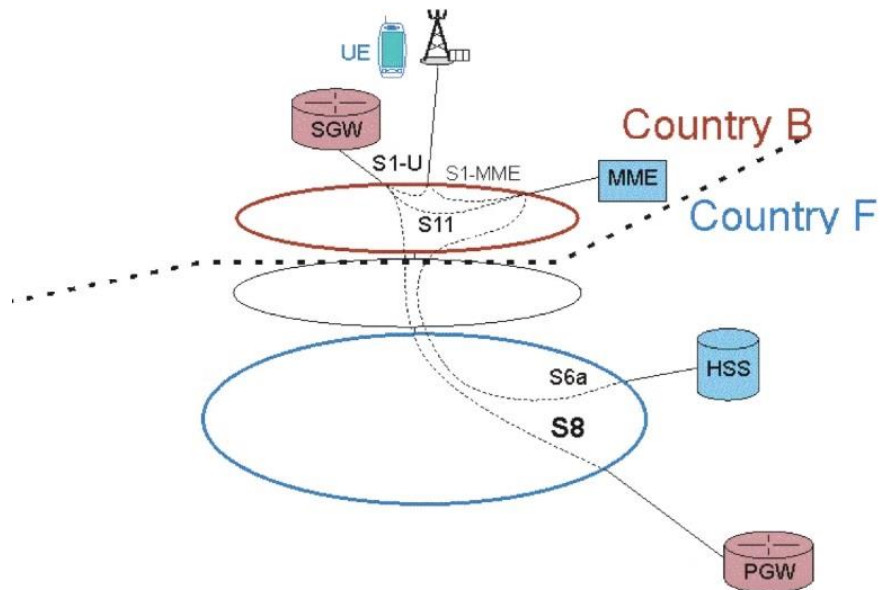
Il·lustració 32. Resta de interfícies S1-U, X2 i Uu. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Ara ens centrarem en la interconnexió de diverses xarxes mòbils, també conegut com "el principi del roaming internacional". Per entendre-ho, posarem d'exemple el següent cas: Si un usuari, d'un país "F" vol comunicar-se amb un servidor del país "B", llavors el terminal serà atès per un eNodeB local, un S-Gateway local i un MME local. Per tant, dins de la mateixa xarxa de l'operador tenim les mateixes interfícies que acabem de veure. Aquestes interfícies no canvien entre la xarxa d'un operador del país "F" i la xarxa de l'operador del país "B".



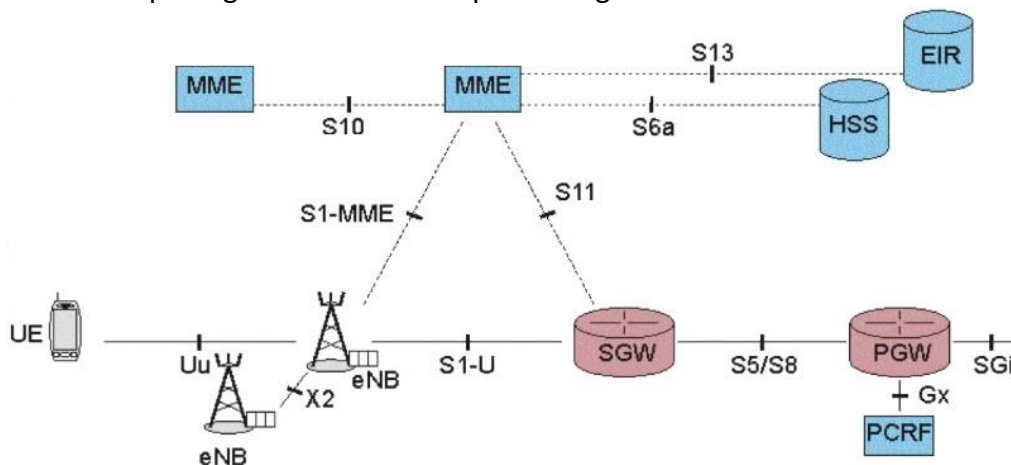
Il·lustració 33. Interconnexió de nuclis de diferents xarxes. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

No obstant, una possible implementació és la comunicació del S-Gateway amb el P-Gateway de la mateixa xarxa a través de la interfície S5. Però quan es connecten EPCs de xarxes diferents, la interfície ja no serà la S5. En aquest cas la interfície s'anomena S8 i connecta el S-Gateway i el P-Gateway de xarxes diferents com es mostra a la il·lustració 34.



Il·lustració 34. Interfície S8 entre el SGW i el PGW de xarxes diferents. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Encara que no es mostrarà amb profunditat cadascuna de les interfícies, és interessant veure la representació de tots els nodes d'una xarxa 4G. Hi ha d'altres equips en els quals no ens centrarem, com el EIR, del anglès *Equipment Identity Register*. Aquest EIR és una base de dades que registra el terminals que han sigut sostrets.



Il·lustració 35. Equips i interfícies d'una xarxa 4G. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

La interfície entre el MME i el EIR es denomina S13. També existeix l'equip PCRF, de l'anglès *Policy and Charging Rules Function*, que s'encarrega de gestionar la qualitat de servei i connecta el P-Gateway amb el PCRF mitjançant la interfície Gx.

No obstant, en aquest Treball només es consideraran els nodes bàsics d'una xarxa LTE, l'arquitectura de la qual es resumeix en: els eNodeBs que cobreixen el territori, els MME i el HSS que gestionen la funció de control, i els SGW i PGW a través dels quals s'encaminen les dades d'usuari.

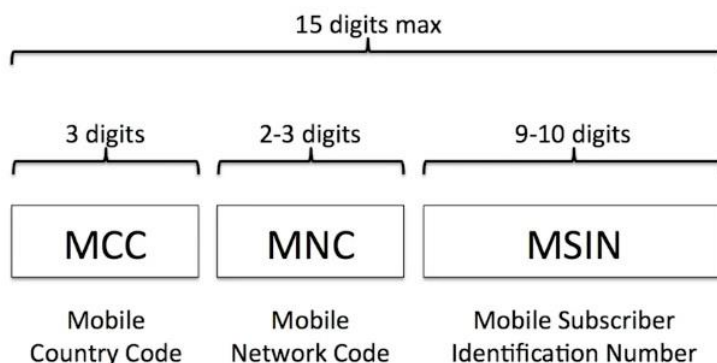
3. Procediments de seguretat.

3.0 Connexió de xarxa i funcions de seguretat.

Què succeeix quan encenem el nostre telèfon mòbil? Com estan organitzats els mecanismes de seguretat? El primer apartat (*Network attachment and security functions*) del capítol 3 donarà resposta a aquestes qüestions.

Sovint, quan fem una portabilitat o ens donem d'alta en un operador de telefonia mòbil, aquest ens proporciona un smartphone. No obstant, però, l'operador també ha de proporcionar un servei de comunicacions en forma de targeta SIM (nano SIM, micra SIM, SIM) perquè el terminal funcioni correctament. És a dir, la SIM ha d'estar inserida permanentment en el terminal. Òbviament, és necessari identificar cada SIM o cada subscripció de manera unívoca fent servir una identitat anomenada IMSI o *International Mobile Subscriber Identity*.

Per garantir que dos subscriptors aleatoris, en tot el món, no tinguin el mateix IMSI, l'estructura ha de ser jeràrquica. El IMSI comença per 3 dígits que indiquen el codi MCC o *Mobile Country Code*, i correspon al país on l'usuari s'ha subscrit, que generalment és on viu. Seguidament el MNC o *Mobile Network Code*, que és el codi de xarxa d'un país determinat i està format entre 2 i 3 dígits. Per últim, un nombre assignat per l'operador, tenint en compte que dos subscriptors del mateix operador mai tinguin el mateix nombre. El resultat és una identitat de 15 dígits com a màxim, el qual és unívoca a tot el món. Per tant, els dígits del començament del IMSI indiquen a quin país i operador pertany el subscriptor.



Il·lustració 36. IMSI (International Mobile Subscriber Identity). X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Per exemple, el [MCC per a Espanya és 214. El MNC d'Orange pot ser 03/09/11.](#)

Per tant, un subscriptor d'Orange a Espanya pot tenir el següent IMSI:

IMSI: 214 09 1234567890

El IMSI d'un subscriptor mai canvia, tret que canviï d'operador i, es fa servir quan ens mognem a través de la xarxa. Com les xarxes 4G permeten que el terminal es connecti a Internet, tots els equips connectats a Internet han de tenir una direcció IP per poder enviar i rebre dades. En la majoria dels casos, l'adreça IP no està assignada estàticament.

L'adreça IP s'assigna durant l'encès del terminal, procés anomenat *attachment*. Un operador pot proporcionar diversos tipus de serveis, com per exemple, un accés públic o professional. Durant el procediment d'annexió o *attachment procedure* el terminal indica el tipus de servei que desitja, especialment especificant l'APN o *Access Network Name*, que indica a la xarxa què PGW farà servir.

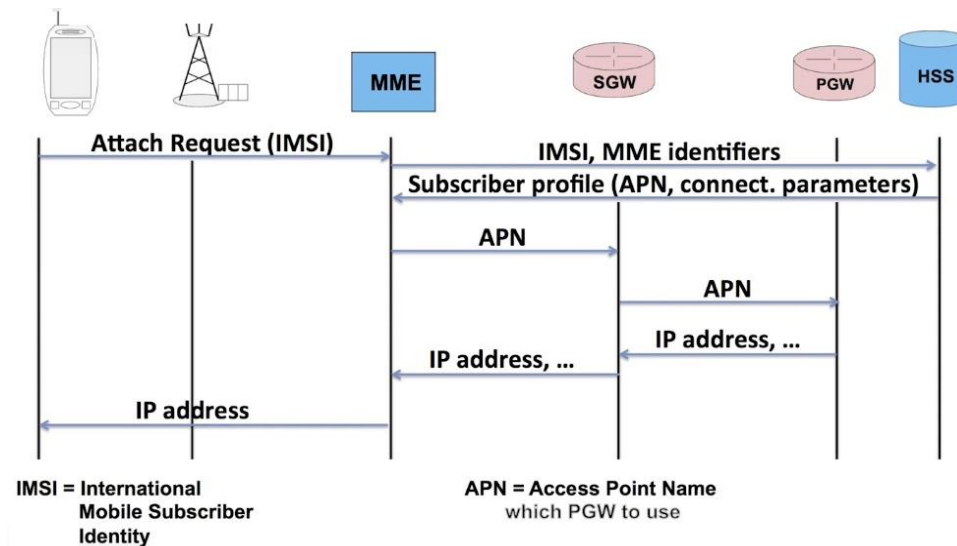
A continuació es presenta un exemple senzill de com funciona el procediment d'annexió o *attachment procedure*:

1. Quan encenem el terminal, aquest llegeix la targeta SIM per saber el codi de país i el nom del nostre operador. (Assumint que ens trobem en el país on ens hem subscrit).
2. El terminal busca la xarxa del nostre operador, escoltant els *beacon channels* dels sistemes circumdants.
3. El codi de l'operador és transmès a cada beacon channel. Tan aviat com la xarxa es trobi disponible, el terminal enviarà un missatge de sol·licitud de connexió que contingui el seu IMSI.
4. El eNodeB rep el missatge i, aquest el transmet al MME, el qual verifica si el perfil del subscriptor és a la base de dades. No obstant, però, si és la primera vegada que encenem el terminal, el MME verificarà amb el HSS si el subscriptor és conegut i si aquest té accés a la xarxa.
5. El HSS busca el subscriptor a la seva base de dades i transfereix el seu perfil al MME (com vam veure al capítol anterior). El missatge inclou el APN i paràmetres de connexió.
6. Una vegada que el MME ha emmagatzemat el perfil, informa al HSS.

Encara no hem parlat sobre l'adreçament IP, però pel que se sap, una adreça IP està vinculada a una ubicació. En el cas que ens ocupa, les adreces IP a les xarxes 4G, estan vinculades a la del PGW. L'elecció va ser pels dissenyadors que definien la xarxa 4G, d'una banda, per permetre l'assignació dinàmica d'adreces IP i, d'altra banda, deixar aquesta assignació al PGW.

7. El MME envia un missatge al SGW, que reenvia al PGW. El PGW és l'equip que pot assignar una adreça IP.
8. Aquesta adreça IP és enviada del PGW al SGW. Seguidament, el SGW l'envia al MME, per a què finalment la faci arribar al terminal.

Des del moment que un terminal té una adreça IP, aquest pot funcionar. A continuació es mostra en la següent il·lustració (il·lustració 37), un esquema on es pot veure els diferents missatges que s'intercanvien els dispositius implicats en el procediment d'annexió o *attachment procedure*.



Il·lustració 37. Procediment d'annexió o *attachment procedure*. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Tot i així, quins són els possibles problemes? En cas que manipuléssim, per exemple, el nostre terminal per a què envii el IMSI pel d'un altre terminal, podríem utilitzar la xarxa a costa d'un altre usuari. Per tant, la xarxa ha de verificar que, quan un terminal accedeix a la xarxa, correspongui a una subscripció vàlida. És a dir, a una targeta SIM realment emesa per l'operador.

Això es coneix com a mecanisme d'autenticació. Si una persona amb males intencions decideix crear un receptor configurat a la freqüència de l'estació base, tal que pugui escoltar el que la base transmet, podria arribar a aprendre la informació que s'intercanvia. Perquè això sigui previngut s'ha d'activar un mecanisme d'encryptació, i un mecanisme que permeti al destinatari d'un missatge controlar la integritat d'aquest.

Per tant, quan un terminal activa un servei, cal que s'identifiqui. Per defecte, l'identificador utilitzat és el IMSI. Però si un interceptor escolta els intercanvis a la banda de ràdio i detecta un IMSI, pot saber que un subscriptor es troba a prop. Per tant, cal evitar enviar el IMSI. Altrament, es fa servir una identitat temporal que es renova regularment.

Els mecanismes que es veuran en els apartats següents són:

- Autenticació, per evitar l'ús fraudulent de la xarxa.
- Encryptació, per evitar escoltes d'intercanvis de missatges.
- Integritat, per evitar modificació de missatges.
- Assignació d'una entitat temporal, per evitar seguiment i localització d'un terminal.

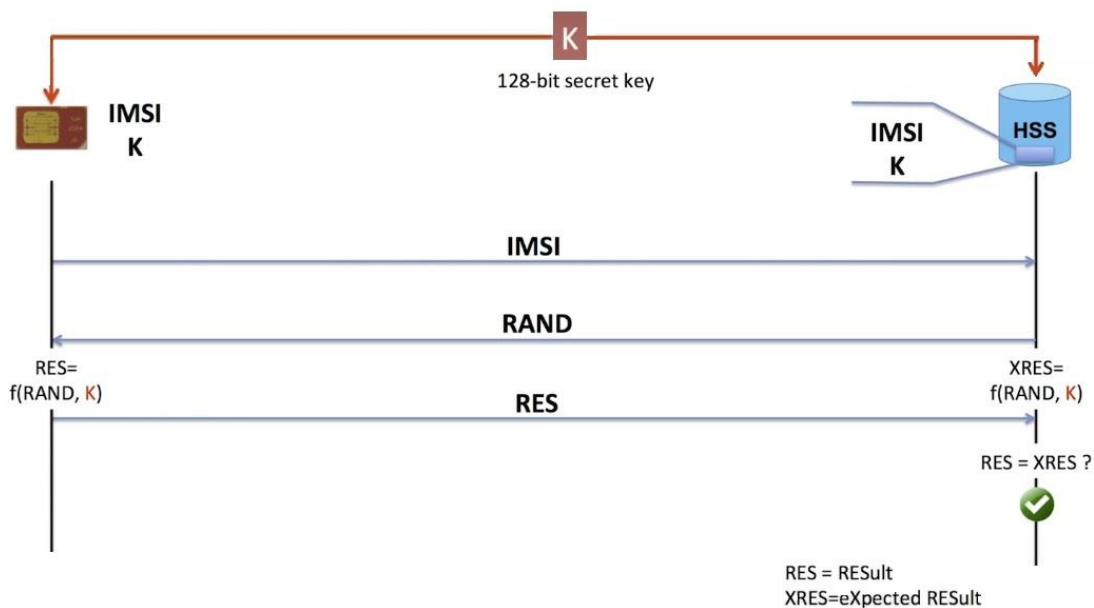
Tots aquests mecanismes comporten a mirar novament, a l'apartat final d'aquest capítol, el *attachment procedure* per veure com s'implementen els mecanismes de seguretat.

3.1 Autenticació

Com pot la xarxa verificar que un terminal que es connecti doni la seva identitat vàlida? Dit d'una altra manera, com pot la xarxa verificar que el IMSI no ha estat modificat? L'apartat 3.1 de *Procediments de seguretat* tractarà d'explicar aquests aspectes.

Com sabem de l'apartat anterior, cada subscripció és identificada per un IMSI, únic al món. No obstant, a part d'estar identificada per un IMSI, per cada subscripció també hi ha una clau secreta K , que s'emmagatzema tant a la SIM com en el HSS. Aquesta clau K té una longitud de 128 bits, és a dir, aproximadament $3 \cdot 10^{38}$ valors possibles. Per tant, pràcticament no existeix la possibilitat de tenir dues targetes SIM amb la mateixa clau K .

Quan un UE es connecta a la xarxa, aquest envia el seu IMSI. Per poder autenticar al subscriptor, la xarxa verifica la presència de la clau secreta de la targeta SIM, sense transmetre aquesta clau al canal ràdio. El mètode es basa en una funció criptogràfica, un nombre aleatori RAND codificat en una gran quantitat de bits. Tant el HSS com la targeta SIM fan aquest càlcul utilitzant la mateixa funció criptogràfica, anomenada f en la figura següent (il·lustració 38).



Il·lustració 38. Missatges d'autenticació. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

La funció f pren com a entrada el nombre aleatori RAND i la clau secreta K . Aquesta funció f dona un resultat calculat pel terminal i l'envia al HSS. Tot seguit, el HSS compara el RES amb el resultat esperat, és a dir, el XRES calculat. Si el RES és igual a XRES, llavors el HSS interpreta que el terminal es troba en possessió de secret compartit.

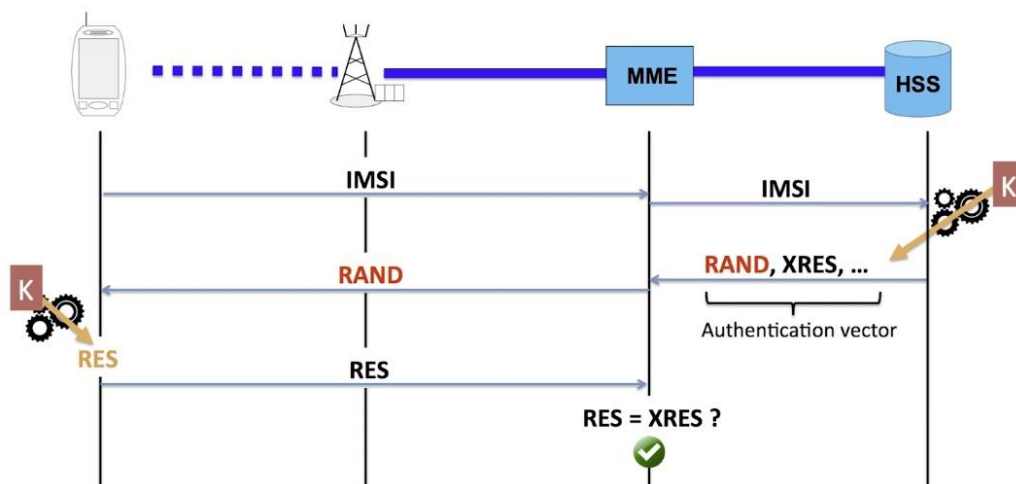
Si realment el subscriptor és el que el terminal afirma ser, el UE estarà autoritzat per comunicar-se amb la xarxa mòbil. Si hagués alguna diferència entre RES i XRES, el terminal no tindrà accés a la xarxa. Aquesta funció criptogràfica va ser escollida específicament perquè és fàcil de calcular, fent servir el RAND i la clau K .

En el 4G, el nombre aleatori RAND i la clau K són de 128 bits, però el resultat de la funció f és un nombre de 32 a 128 bits. Encara que un interceptor conegui el nombre aleatori i el resultat, no podrà determinar el valor de la clau. És a dir, si algú està escoltant els valors RAND i RES, no podrà deduir el valor de la clau K. Important remarcar, que és el HSS el node que s'encarrega de generar el nombre aleatori i de determinar el XRES. Tots dos extrems de la cadena (HSS i SIM) estan sota el control de l'operador i, és l'operador qui pot definir la seva pròpia funció criptogràfica de forma totalment autònoma, sempre i quan les grandàries s'ajustin a les especificacions.

No obstant, a la pràctica es té en compte un tercer element que s'encarrega de fer el rol d'autenticar. Realment, el HSS només necessita proporcionar el nombre aleatori RAND i el resultat esperat XRES. Per tant, és responsabilitat d'un tercer verificar la correspondència. Amb altres paraules, el terminal mai interactua directament amb el HSS. És el MME l'element que fa el rol d'autenticar.

Tenint en compte aquestes consideracions, a continuació es detalla un exemple de com es du a terme el procediment d'autenticació:

1. El terminal és el dispositiu que inicia el procediment enviant el IMSI al MME a través del eNodeB. Una vegada que el MME rep el IMSI, contacta amb el HSS.
2. El HSS genera un nombre aleatori RAND i el resultat esperat XRES, però només el nombre aleatori és el que es fa arribar al terminal.
3. El HSS envia aquests elements (RAND, XRES) al MME.
4. El MME envia només el nombre aleatori RAND al terminal a través del eNodeB i espera a rebre resposta.
5. El terminal envia el resultat RES al MME a través del eNodeB, i si el resultat RES del terminal correspon a la resposta esperada XRES, el MME autoritzarà al terminal a tenir accés a la xarxa.



Il·lustració 39. Elements que intervenen en el procediment d'autenticació. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

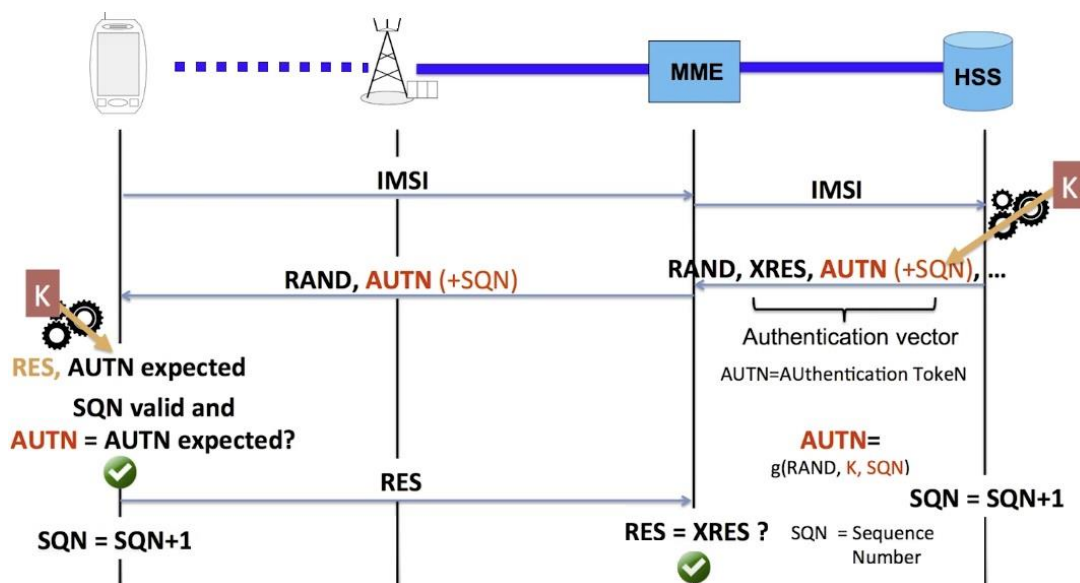
Com es pot veure a la il·lustració anterior, el parell de valors (RAND, XRES) constitueixen la base del que es denomina vector d'autenticació (*authentication vector*), però també conté altres elements que es veuran més endavant.

Per descomptat, una vegada que el vector d'autenticació s'ha utilitzat, no es pot fer servir per segon cop. Realment, no hi ha res que impedeixi que un "hacker" faci servir un simulador d'estació base i es faci passar per una xarxa real. Amb el procediment que hem vist fins ara, el terminal no té proves que el nombre aleatori RAND rebut i de la resposta RES no hagi estat processada per una xarxa pirata. Aquest és el motiu pel qual a les xarxes 4G hi ha una autenticació mútua. És a dir, la xarxa autentica al terminal i el terminal autentica a la xarxa.

Com funciona aquesta autenticació mútua?

El HSS continua sent l'element que genera un nombre aleatori RAND, un algoritme criptogràfic "g" i calcula un resultat que s'anomenarà, en aquest cas, *authentication token* o testimoni d'autenticació i, s'abreujarà amb AUNT. El que cal tenir present és que l'algorisme d'autenticació de la xarxa "g" és diferent de l'algorisme d'autenticació del terminal "f". El token AUNT és, per tant, diferent al resultat RES del terminal.

Per tant, quan el HSS rep el IMSI, aquest transmetrà el token AUNT i el nombre aleatori RAND al MME. Seguidament, el MME enviarà en un mateix missatge el nombre aleatori RAND i el token d'autenticació AUNT al terminal al través del eNodeB. Per la seva part, el terminal farà els seus propis càlculs i procedirà a verificar si obté el mateix valor que el token AUNT rebut. Si és el cas, la xarxa serà autenticada pel terminal i els intercanvis continuaran com hem vist anteriorment. Però si apliquem aquest procediment exactament així, podria haver vulnerabilitats. Per exemple, un hacker que estigui escoltant la xarxa podria anotar el nombre aleatori RAND i el token AUNT. Per tant, dues autenticacions successives han de conduir a resultats diferents i fa necessari, un nou paràmetre d'entrada anomenat SQN (*Sequence Number*) fet servir per numerar nombres de seqüència. Bàsicament serveix per incrementar el valor del SQN per cada nova autenticació i, una part del token d'autenticació AUNT conté informació sobre el nombre SQN.



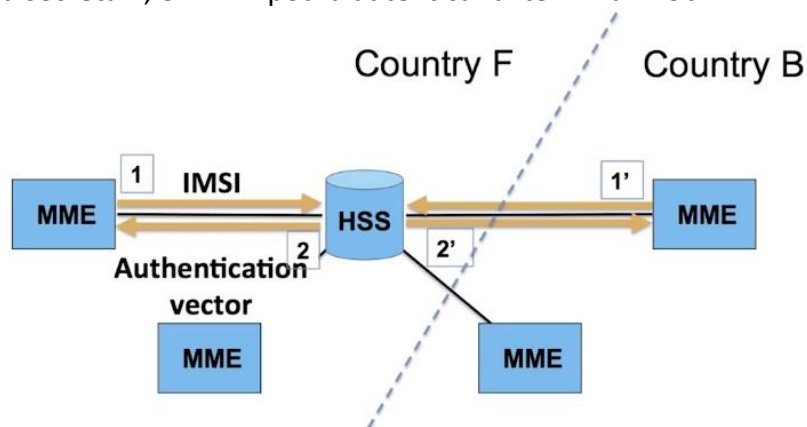
Il·lustració 40. Autenticació mútua. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Lavors, quan es rep el token d'autenticació AUNT, el terminal verificarà que el SQN no tingui el mateix valor que la vegada anterior, és a dir, que el SQN sigui vàlid. En cas que el SQN no sigui vàlid o si el token d'autenticació AUNT no és l'esperat, el terminal no accedirà a la xarxa. Però, si tot va bé, el terminal calcula el valor RES i l'envia al MME i, aquest comprova que el resultat RES sigui el mateix que l'esperat XRES. Després d'aquests intercanvis, el terminal i la xarxa s'autentiquen mútuament. Per descomptat, el SQN ha d'anar incrementant-se. Pel que fa al HSS, un nou vector d'autenticació tindrà un nou valor de SQN.

Com es pot deduir, l'ús de vectors d'autenticació és important perquè permet una gran flexibilitat en el mecanisme d'autenticació i en la mateixa xarxa.

Després de tot aquest procediment d'autenticació mútua, el que cal tenir clar és que el HSS mai es comunica directament amb el terminal mòbil. Simplement el HSS rep una sol·licitud d'autenticació i, aquest respon amb vectors d'autenticació. D'altra banda, tots els intercanvis de protocol entre el MME i el terminal mòbil són ocults per al HSS, ja que no li concerneixen.

Un altre punt important és la gestió de situacions d'itinerància. Un MME estranger, és a dir, pertanyent a un altre país, pot sol·licitar al HSS els vectors d'autenticació. Sense tenir accés a la clau secreta K , el MME podrà autenticar al terminal mòbil.



Il·lustració 41. Esquema representatiu del vector autenticació des de HSS cap a MME. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Pel que podem resumir de l'autenticació és el següent:

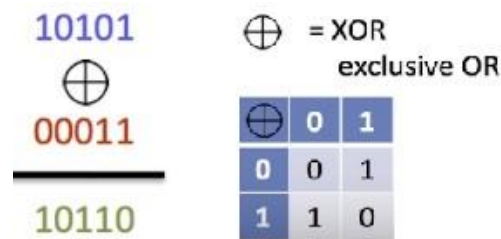
- A les xarxes 4G, l'autenticació es basa en una clau secreta K , funcions criptogràfiques i nombres aleatoris.
- La clau secreta K s'emmagatzema en la targeta SIM i en el HSS.
- La clau secreta K mai es transmet a la xarxa pel canal ràdio.
- La targeta SIM i el HSS fan els mateixos càlculs.
- L'autenticació només és vàlida quan tots dos extrems (HSS i SIM) troben els mateixos resultats.
- L'autenticació és mútua: El UE autenticarà a la xarxa, i la xarxa autenticarà al terminal.

3.2 Xifrat i desxifrat

Pot haver algú que sigui a prop de nostres i pugui escoltar/interceptar les nostres comunicacions? La resposta, evidentment és no. En aquest apartat 3.2 de *Procediments de seguretat* es veurà el mecanisme que garanteix la confidencialitat dels intercanvis.

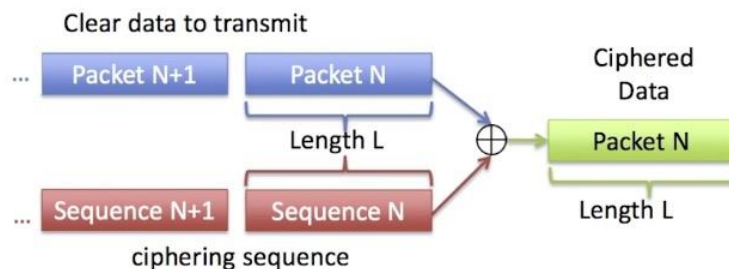
Es tracta del xifrat, també denominat, especialment, com encriptació. A les xarxes, el xifrat es basa en una operació matemàtica molt simple, una XOR. En altres paraules, es tracta d'una OR exclusiva entre el text sense xifrar (clear text) i una seqüència generada per l'emissor.

Aquesta operació funciona bit a bit, pel que agafarà un bit de cada seqüència i donarà un bit com a sortida. Si els dos bits són iguals, el resultat és zero. A la següent il·lustració es mostra un exemple de càlcul XOR.



Il·lustració 42. Exemple càlcul XOR. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Aquesta operació a part de ser senzilla, és molt simple d'implementar en hardware. En el següent exemple es mostra les dades transparents o sense xifrar (clear data) en color blau i la seqüència de xifrat en vermell.

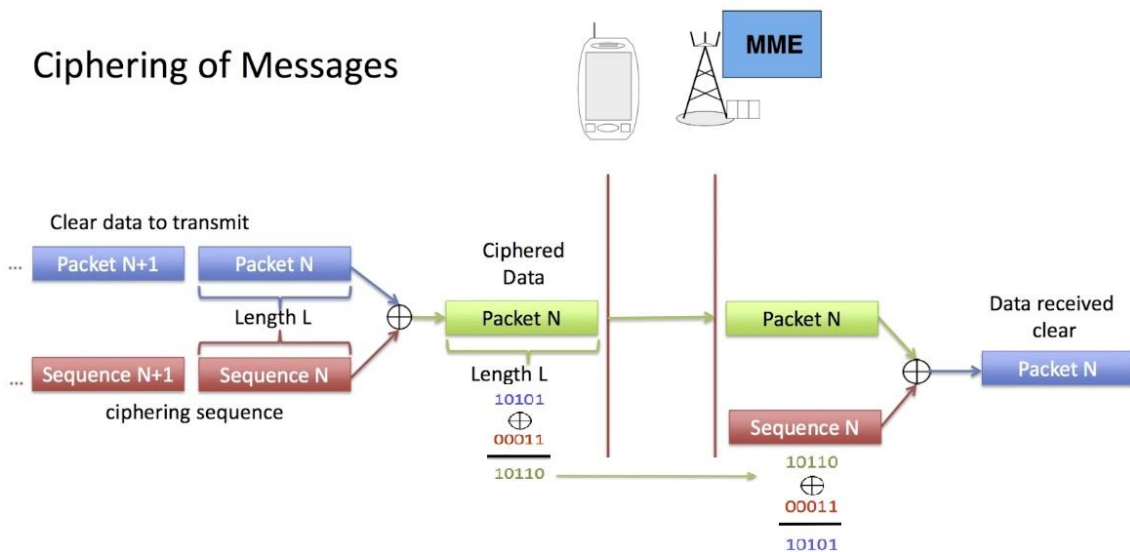


Il·lustració 42. Dades xifrades amb l'operació matemàtica XOR. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Com es pot veure, la seqüència ha de tenir la mateixa longitud en bits que les dades d'entrada. Per obtenir el text sense xifrar (clear text) de les dades xifrades en color verd, només cal repetir l'operació amb la seqüència de xifrat. No obstant, però, hi ha una restricció: la seqüència de xifrat ha de ser diferent cada vegada.

Si féssim servir la mateixa seqüència diverses vegades, perdríem per complet totes les propietats de seguretat. Per aquest motiu, quan es té un gran volum de dades per transmetre, el que es fa és dividir aquestes dades en paquets i xifrar-los amb diferents seqüències.

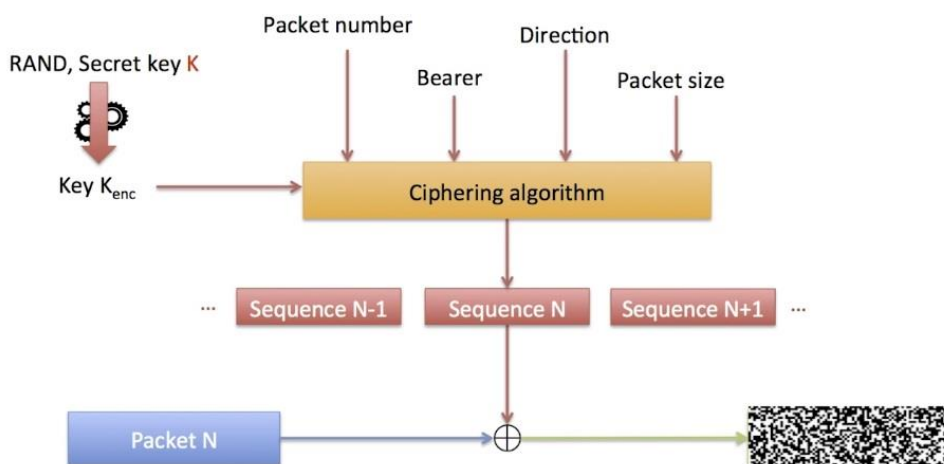
Ciphering of Messages



Il·lustració 43. Xifrat de missatges en una transmissió. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

El receptor ha de posseir la mateixa seqüència de xifrat per poder obtenir el text sense xifrar (clear text). Però, com podem obtenir una seqüència de xifrat d'una grandària gairebé il·limitada? Simplement es fa servir un algoritme, basat en uns pocs paràmetres d'entrada, que genera seqüències adaptades al xifrat de dades.

El procés comença amb una clau de xifrat bàsica, relativament estable i es conserva, per exemple, durant una sessió web o durant tota una comunicació. A més, aquesta clau és compartida, anomenada Key K_{enc} (veure il·lustració 44) i és la base per crear un nombre quasi il·limitat de seqüències de xifrat. La clau de xifrat es calcula a partir del nombre aleatori RAND utilitzat per a l'autenticació i de la clau secreta K . És essencial utilitzar funcions especialitzades que garanteixin que la sèrie de seqüències produïda sigui el més semblant als valors aleatoris.



Il·lustració 44. Representació esquemàtica de l'algoritme de xifrat. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

A causa que aquests són algoritmes deterministes, si tots els paràmetres d'entrada fossin els mateixos, la funció produiria la mateixa seqüència de xifrat que a la sortida.

Per tant, el que es fa és afegir elements només coneguts pel remitent i el receptor, que canvien amb totes les noves dades enviades.

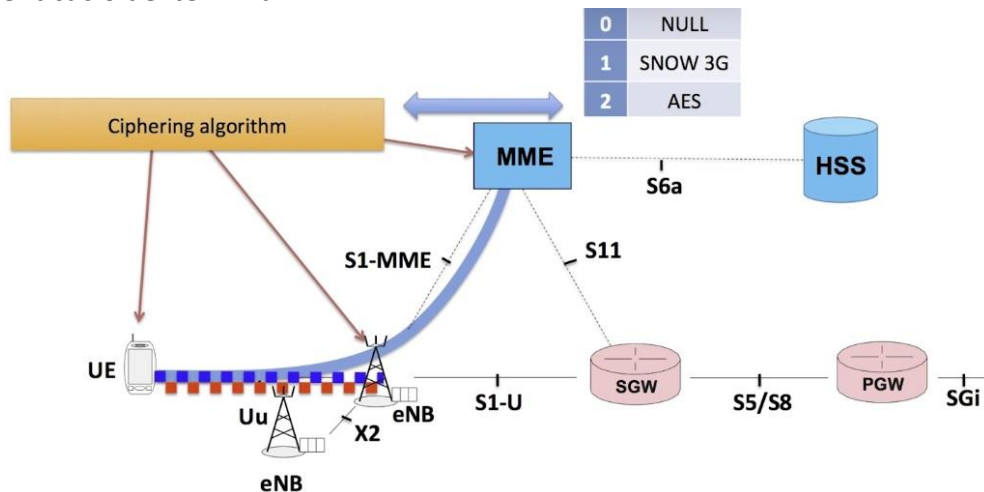
Per exemple, es numera cada paquet transmès i s'integra el nombre de paquet i la quantitat de dades a xifrar en el paràmetre d'entrada de l'algoritme utilitzat per calcular la seqüència de xifrat. També es col·loca un indicador de direcció (uplink o downlink) i un nombre de portador.

L'algoritme de xifrat s'executa tant en el terminal mòbil com en el eNodeB i és, un algoritme estandarditzat. Per tant, això vol dir, que un operador no pot definir el seu propi algoritme de xifrat. Totes les transmissions ràdio estan xifrades, ja siguin dades d'usuari o de senyalització. A més, les dades intercanviades entre el MME i el terminal mòbil es xifren per tots dos costats.

Quant als algoritmes de xifrat, hi ha més d'un. A continuació s'enumera els tres algoritmes de xifrat que són estandarditzats actualment a la xarxa LTE.

- NULL: no xifra les dades. Està prohibit i només es fa servir en períodes de prova de la xarxa.
- SNOW 3G: algoritme present en les xarxes de tercera generació 3G.
- AES: ofereix garanties de seguretat més fortes en aquests moments.

Cadascun dels canals que s'il·lustren a continuació poden utilitzar un algoritme de xifrat diferent. Els algoritmes de xifrat i les claus de xifrat es negocien durant la fase d'autenticació del terminal.



Il·lustració 45. Possibles algoritmes de xifrat a una xarxa LTE. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Per fer un exemple, il·lustrem les diferents etapes de xifrat per a un paquet IP que conté dades d'usuari procedent d'Internet.

Considerem un paquet IP que arriba al PGW, seguidament s'encamina a través de la xarxa central o EPC on, la confidencialitat està garantida pels mecanismes clàssics d'Internet abans d'arribar al eNodeB. Llavors, el eNodeB codifica aquest paquet abans de enviar-ho a l'enllaç ràdio.

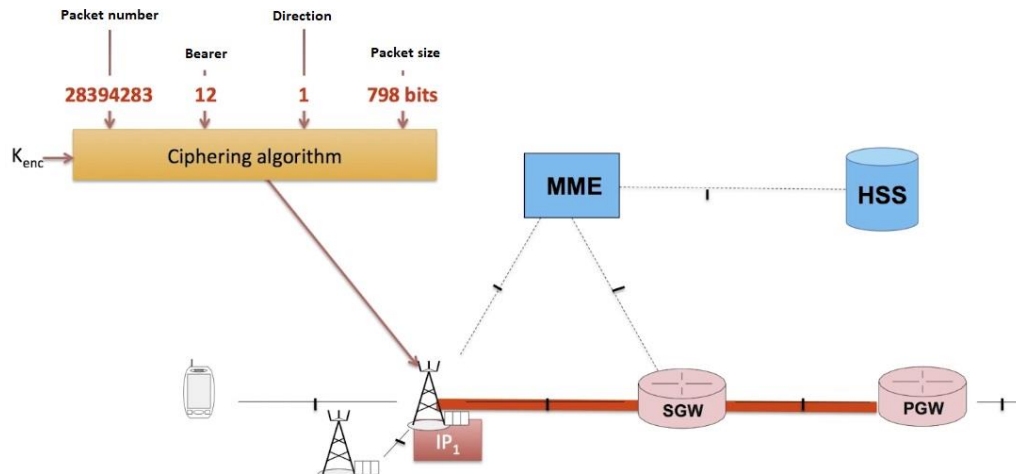
Podem imaginar que els següents valors s'utilitzen per generar la clau utilitzada per encriptar:

Packet number = 28394283: nombre de comptador de paquets entre el eNodeB i el terminal.

Bearer = 12: referència de portador.

Direction = 1: enllaç de paquet ascendent o descendent.

Packet size = 798 bits: grandària de les dades per encriptar.



Il·lustració 46. Valors de paràmetres d'entrada per generar la clau utilitzada per encriptar. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

També cal especificar la clau de xifrat negociada anteriorment entre el terminal mòbil i el eNodeB durant la fase d'autenticació. Després de la recepció, el terminal utilitza els mateixos paràmetres per desxifrar el frame. El següent paquet IP seguirà la mateixa ruta, però en aquest cas el comptador de frame augmentarà en 1 i, per tant, encara que s'utilitzés el mateix secret compartit (shared secret), es faria servir una seqüència de xifrat completament nova.

Per tant, podem resumir que el xifrat:

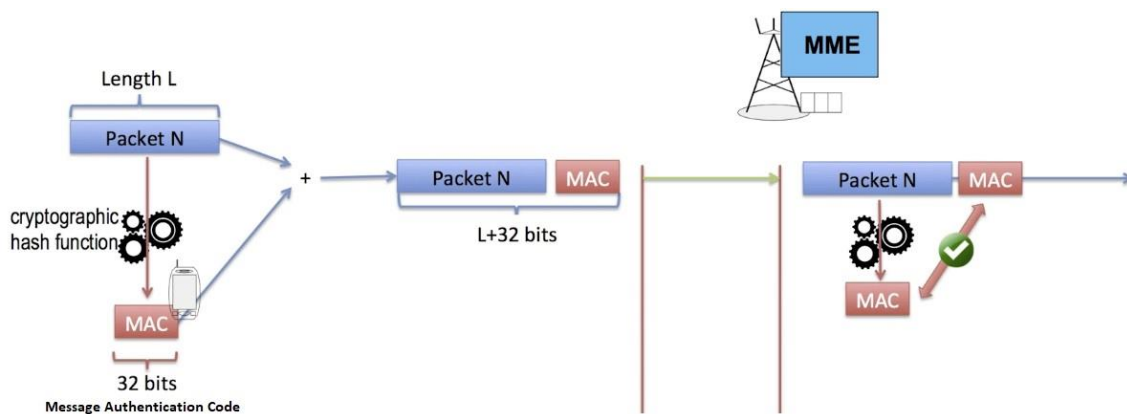
- També s'anomena encriptació i es basa en una clau de xifrat estable (K_{enc}) generada amb una clau secreta K i un nombre aleatori $RAND$ utilitzat durant l'autenticació.
- La seqüència de xifrat s'especifica a cada paquet amb la clau K_{enc} i paràmetres que inclouen un comptador de paquets.
- El xifrat es basa en una operació XOR (OR exclusiva) entre la seqüència d'entrada i la seqüència de xifrat, bit a bit. On la seqüència de xifrat és generada per l'emissor i el receptor.
- Xifrar i desxifrar són la mateixa operació.

3.3 Control de la integritat

Quan rebem un missatge en el nostre terminal, com podem estar segurs que aquest missatge prové de la nostra xarxa i no d'algú que intenti enviar-nos informació? Podria aquest missatge haver estat modificat? En aquest apartat, 3.3 de *Control de la integritat* es pretén veure els mecanismes emprats per garantir la integritat de les dades.

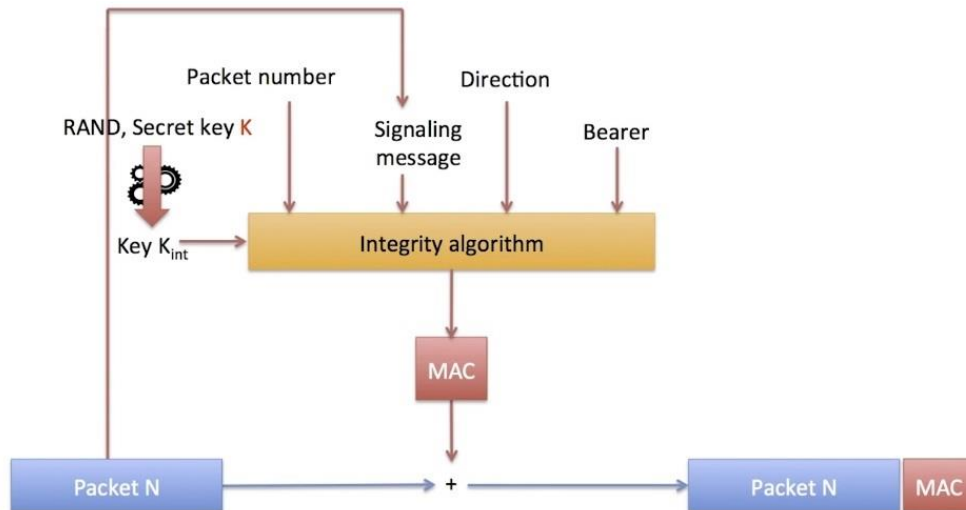
Es basa en un principi molt simple: a cada trama de dades, s'afegeix un codi de diversos bytes d'informació. Aquest codi es calcula gràcies a les funcions matemàtiques denominades *Cryptographic Hash Functions*, les quals tenen algunes propietats especials. Coneixent el resultat de la funció, no es pot reconstruir les dades d'entrada. A més, la grandària de les dades de sortida és sempre la mateixa i no depèn de la grandària de les dades d'entrada. El codi afegit a cada trama s'anomena *Message Authentication Code* o MAC. Cal anar amb compte, perquè a les xarxes també es fa servir l'abreviatura MAC per referir-se al *Medium Access Control*. No obstant, l'autenticació MAC no té res a veure amb la capa MAC o amb els ordinadors MAC.

A l'enllaç ràdio, el remitent afegeix aquest petit codi d'autenticació de missatge o MAC a les dades útils de cada trama. La grandària del MAC escollit per a la xarxa LTE és de 32 bits. El receptor, per la seva part, torna a calcular el MAC de les dades i compara aquest codi amb el MAC contingut a la trama. Si els dos són iguals, el receptor té la garantia que ningú ha modificat les dades i que provenen del vertader remitent. Això és el control d'integritat.



Il·lustració 47. Ús del MAC per a la protecció enfront de les modificacions. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

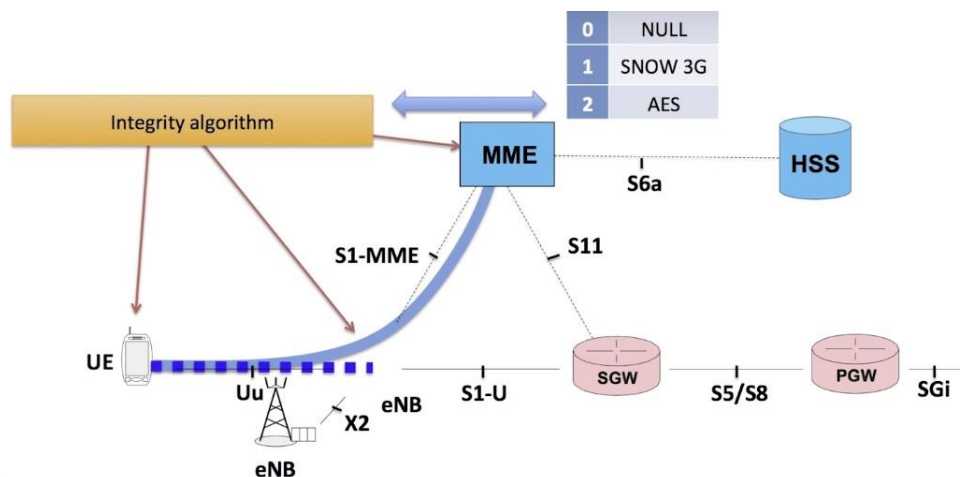
El control d'integritat s'utilitza per a missatges de senyalització perquè són crítics. Com a exemple, imaginem-nos una comana de handover amb l'ordre de canvi de cel·la. Si es modifica, el terminal podria enviar-se a una cel·la incorrecta i deixar de funcionar i causar perturbacions a la xarxa. Els dissenyadors de les xarxes 4G van decidir no activar el control d'integritat per a les dades d'usuari, ja que aquestes dades no són creades per la xarxa. És preferible activar la integritat extrem a extrem, és a dir, en l'aplicació del terminal i en el servidor de l'aplicació. L'emissor i el receptor tenen la mateixa funció Hash i també tenen la mateixa clau Kint (clau d'integritat) que van negociar durant la fase d'autenticació, i que es va generar en part pel nombre aleatori RAND i la clau secreta K.



Il·lustració 48. Representació esquemàtica de l'algoritme d'integritat. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Com succeïa en l'algoritme de xifrat, la seqüència MAC ha de ser diferent cada vegada, fins i tot quan el mateix missatge es transmet dues vegades. També hi ha un comptador de paquets, que s'incrementa amb cada nova transmissió, la direcció (uplink, downlink) i la identitat del portador.

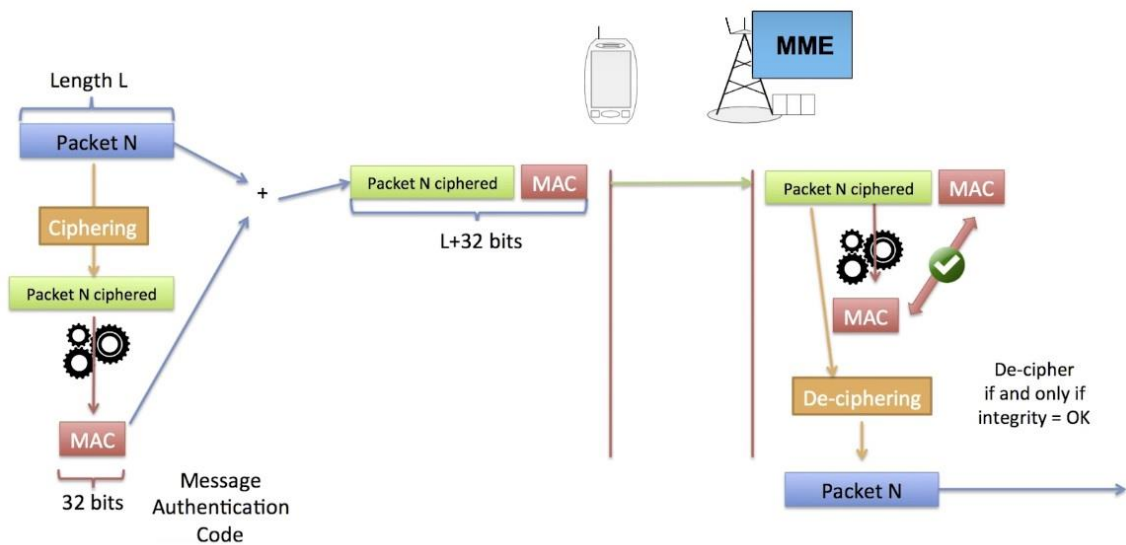
Certs missatges de senyalització s'intercanvien entre el terminal i el eNodeB. D'altres, passen a través del eNodeB, però s'intercanvien entre el terminal i el MME. Per tant, els mecanismes d'integritat s'implementen en el terminal mòbil, eNodeB i en el MME. Quant als algoritmes, hi ha tres que són estandarditzats per garantir la integritat, i segueixen la mateixa lògica que els algoritmes de xifrat: NULL per a la fase de proves, SNOW 3G per a compatibilitat amb el 3G, i el AES.



Il·lustració 49. Algoritme d'integritat en els UE, eNodeB i MME. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

A continuació es veurà com es combinen el xifrat i el control de la integritat. Per a una sessió determinada, tenim una clau de xifrat constant i una clau d'integritat constant.

Primerament, el remitent xifra el paquet i després afegeix el codi MAC calculat. El receptor fa el contrari: verifica la correspondència del codi MAC i després desxifra.



Il·lustració 50. Integritat i xifrat en la transmissió d'un paquet. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Resumint els aspectes més destacats de l'apartat control de la integritat:

- Es proporciona control d'integritat per a missatges de senyalització en xarxes 4G.
- S'afegeix un codi d'autenticació curt, anomenat MAC, a cada missatge.
- El codi MAC és calculat tant per l'emissor com pel receptor amb una clau d'integritat generada amb la clau secreta K i el nombre aleatori RAND usats per a l'autenticació.
- La integritat es considera garantida si tots dos codis són iguals.

3.4 Jerarquia de claus

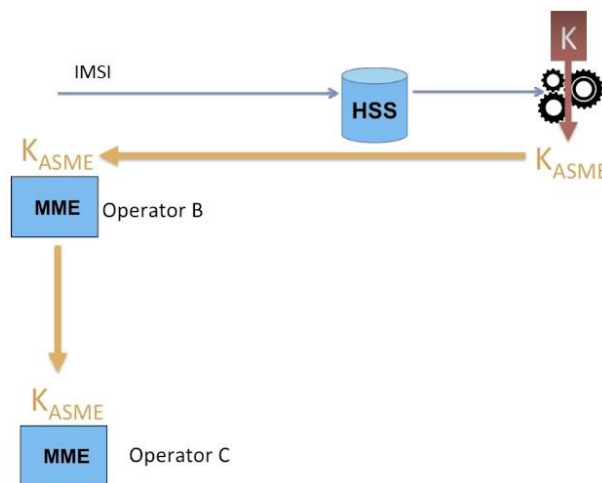
A l'apartat anterior, 3.3 *Control de la integritat*, vam veure la necessitat de diverses claus separades que s'havien de distribuir en alguns elements de la xarxa LTE per als algoritmes de xifrat i integritat. Però, com es distribueixen aquestes claus a la xarxa? En aquest apartat es pretén veure com es generen aquestes claus i com es distribueixen.

Fent memòria, tota la seguretat d'una xarxa 4G es basa en el principi que només hi ha un únic secret compartit entre el HSS i la targeta SIM. Aquesta clau secreta mai ha d'abandonar aquestes dues entitats. No obstant, es necessita una primera clau per garantir el xifrat de dades d'usuari entre el UE i el eNodeB. Una segona clau per xifrar dades de senyalització en el mateix enllaç, i una tercera clau per xifrar missatges entre el UE i el MME.

Per garantir la integritat dels missatges de senyalització, es necessita una clau per protegir els intercanvis entre el UE i el eNodeB, i una segona clau entre el UE i el MME. Per tant, això vol dir que cal distribuir aquestes claus en diversos nodes de la xarxa.

Gràcies als protocols de senyalització entre la SIM, el eNodeB, el MME i el HSS, la xarxa i el terminal generen totes les claus necessàries del secret compartit K, el qual mai abandona el HSS o la targeta SIM. A causa que la generació de totes les claus sol·licitades requereix l'ús o el coneixement de la clau secreta K, es podria pensar que seria el HSS l'element que les genera i les distribueix. No obstant, això plantejaria un problema d'escalabilitat, ja que hi ha desenes de milions de terminals i cada vegada que hi hagués un canvi de eNodeB o d'un MME, el HSS hauria de connectar-se per generar noves claus. Per poder evitar-ho, el HSS delega la generació de claus al MME, ja que aquest és el que administra els UE. En cas que un subscriptor estigués a l'estranger, el MME estaria a una xarxa diferent a la del HSS.

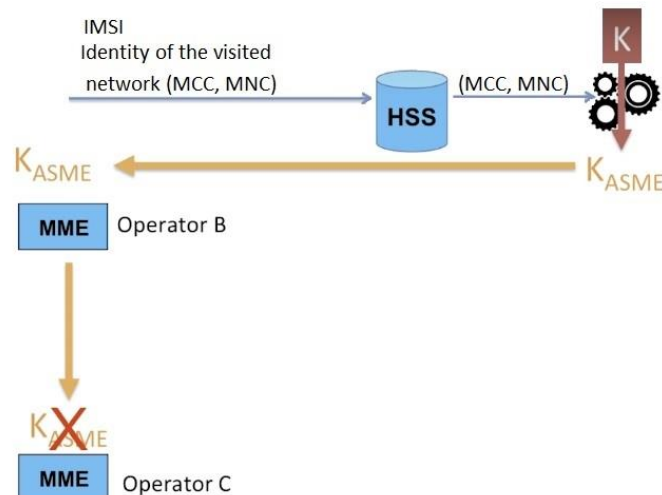
Durant els primers intercanvis, el HSS genera una clau anomenada K-ASME, de l'anglès *Key-Access Security Management Identity*. Seguidament, aquesta clau s'envia al MME, és a dir, a l'entitat responsable del terminal mòbil. És aquesta clau la que permet al MME generar la resta de les claus necessàries.



Il·lustració 51. Representació de la propagació de la clau K-ASME. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

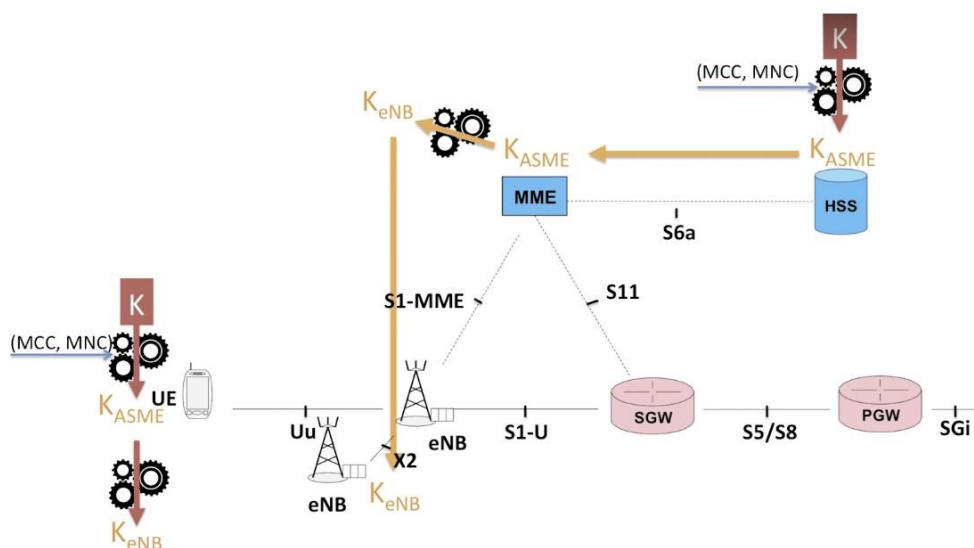
No obstant, el HSS del subscriptor només té confiança en la xarxa que ha aixecat interès per ell, perquè és la manera d'evitar una situació en la qual el subscriptor pugui ser transferit a una altra xarxa sense autorització explícita. Aquest és el motiu pel qual el HSS genera la clau K-ASME, tenint en compte la identitat de la xarxa que sol·licita la clau.

D'altra banda, la identitat d'un operador, com ja havíem vist, està definida per el MCC/MNC. Per tant, això fa que sigui impossible per a una altra xarxa mòbil utilitzar aquesta clau K-ASME. Si per algun motiu el subscriptor desitgés fer servir altra xarxa, seria necessàriament després de l'autorització explícita del seu propi HSS.



Il·lustració 52. K-ASME enviada al MME pertanyent a la xarxa que sol·licita la clau. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

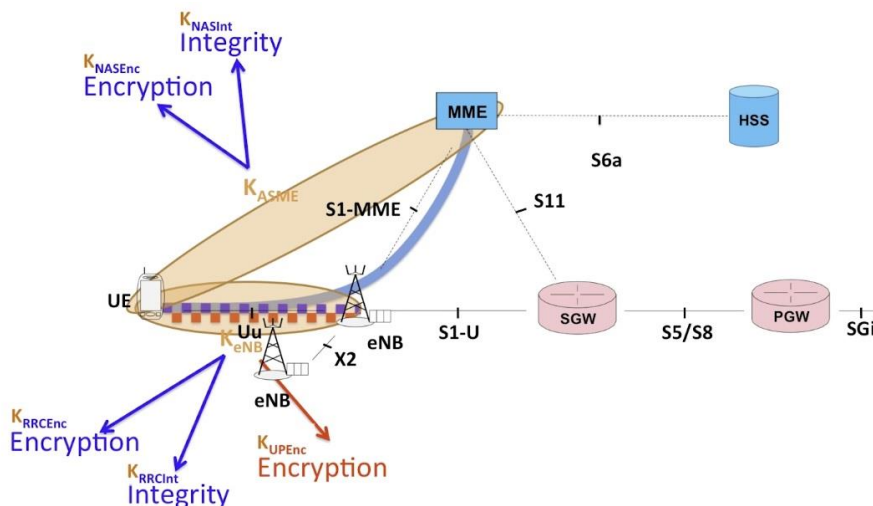
Després que hi hagi hagut els intercanvis amb el terminal mòbil, el MME generarà una altra clau, anomenada K-eNodeB, basada en la clau K-ASME. Aquesta és una clau que se li dona al eNodeB actual al qual es connecta el terminal mòbil. Pel que fa al terminal mòbil, la targeta SIM d'aquest genera la clau K-ASME, i tot seguit dedueix la clau K-eNodeB.



Il·lustració 53. Representació de com estan distribuïdes les claus a la xarxa. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

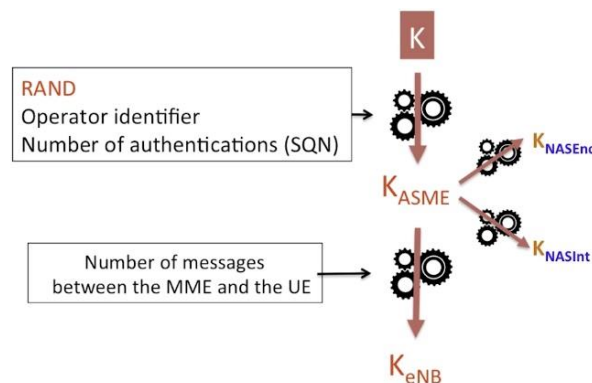
Aquestes claus (K -ASME i K -eNodeB) no s'utilitzen directament per protegir intercanvis, sinó que es fan servir com a base per generar el conjunt de claus necessàries per a la integritat i el xifrat dels intercanvis. És a dir, es generen diverses claus a partir de la clau K -ASME: la clau de xifrat i la clau per a la integritat entre el MME i el terminal mòbil.

Important destacar que l'abreviatura NAS, de l'anglès *Non Access Stratum* indica que aquestes claus es troben en el terminal mòbil i en el MME. D'altres abreviatures com el RRC, indica que aquestes claus són per a la protecció dels missatges de senyalització entre el terminal mòbil i el eNodeB, mentre que l'abreviatura UP o *User Plane* indica que aquestes claus són per a paquets de dades. En següents capítols veurem amb més detall aquestes abreviatures.



Il·lustració 54. Claus NAS, RRC i UP a una xarxa 4G.

No obstant, quin és el mecanisme amb el qual podem derivar aquestes claus i construir aquesta jerarquia? Realment, és una jerarquia basada en l'ús de funcions hash criptogràfiques. Una funció com aquesta pren com a paràmetres una clau secreta i les dades per produir el resultat. A causa que la sortida és de grandària fixa i, gràcies a les propietats de les funcions hash criptogràfiques, la sortida en si pot tractar-se com una clau. Després, la clau K -ASME es calcula fent servir la clau secreta K , prenent com a entrada el nombre aleatori RAND, identificant l'operador i el nombre SQN. Al seu torn, la clau K -ASME s'utilitza com a secret compartit per generar la clau K -eNodeB, i així successivament per generar tota la jerarquia que protegeix els intercanvis entre el terminal i la xarxa.



Il·lustració 55. Parts que intervenen en la generació de K -ASME i K -eNodeB. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Resumint els aspectes més destacats de la jerarquia de claus:

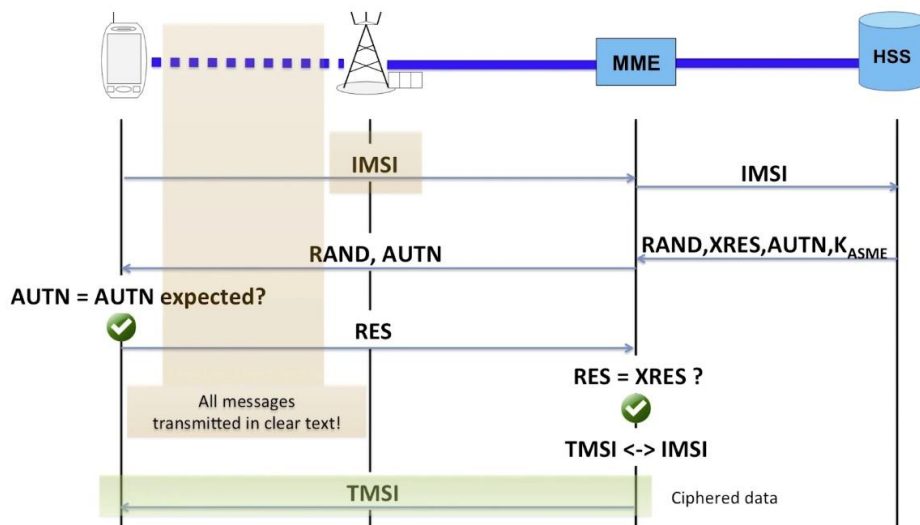
- No es pot transmetre una clau de xifrat des d'un MME d'un operador a un MME d'altre operador, encara que així sembli que minimitzessim el nombre de sol·licituds enviades al HSS. L'objectiu de la jerarquia de claus és generar claus per a un node determinat que no pugui ser reutilitzat per nodes d'altres xarxes.
- La clau K-ASME, que s'utilitza per assegurar intercanvis entre el UE i la xarxa (visitada), és calculada mitjançant el HSS a partir del: nombre aleatori RAND utilitzat per a l'autenticació, de la identitat de la xarxa (visitada) i de la clau secreta K. Aquesta clau no és reutilitzada quan l'usuari es mou a una altra xarxa, però sí ha de romandre constant quan l'usuari canvia de eNodeB, ja que s'utilitza per deduir la clau d'encriptació per als intercanvis UE-MME, entre d'altres.
- La clau K-eNodeB, utilitzada per calcular les claus de xifrat per als intercanvis entre el UE i el eNodeB, és una clau calculada a partir de la clau K-ASME. Per tant, la clau K-eNodeB canvia cada vegada que el UE passa a un altre eNodeB. És a dir, ha de ser específica per a cada subscriptor i renovar-se.
- La clau K-eNodeB és calculada pel UE i pel MME. El PGW i el SGW no estan involucrats en el càlcul de les claus que s'utilitzen per a la seguretat entre el UE i la xarxa. Com la clau K-eNodeB canvia cada vegada que el UE canvia a un altre eNodeB, si fos calculada pel HSS caldria una sol·licitud de HSS cada vegada que un UE canvia a un altre eNodeB i conseqüentment sobrecarregaria el HSS.
- El eNodeB no calcula la clau K-eNodeB perquè llavors el eNodeB hauria de conèixer la clau K-ASME. No obstant, el K-ASME mai surt del MME. Per tant, el MME calcula la clau K-eNodeB.

3.5 Identitat temporal

Podria algú rastrejar els nostres moviments escoltant els intercanvis de senyalització al canal ràdio?

El IMSI, com vam veure anteriorment, és un identificador permanent unívoc en el món, i abans de qualsevol comunicació, el terminal mòbil s'autentica a la xarxa. Si recordem d'apartats anteriors, el xifrat no s'activa durant els primers intercanvis, i en cas que s'utilitzés el IMSI per a la identificació sistemàtica seria molt senzill per a algú rastrejar els nostres moviments. La solució consisteix a establir un mecanisme que limiti l'ús del IMSI a un mínim estricte.

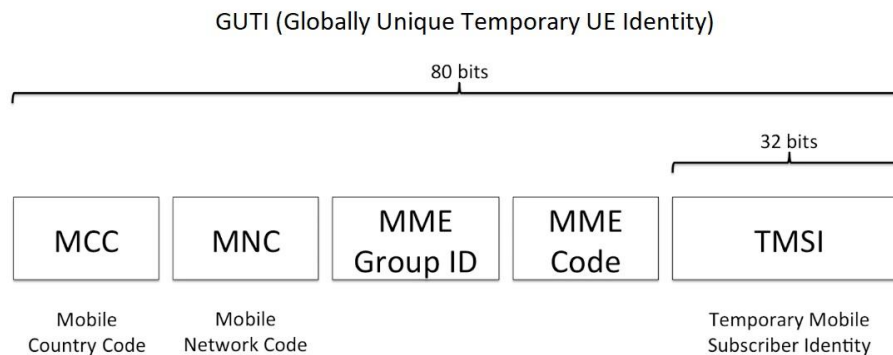
Durant la primera identificació, el terminal no li queda més remei que utilitzar el IMSI. D'altra banda, quan la identificació ha tingut èxit i s'hagi activat el xifrat de l'enllaç ràdio, la xarxa assigna un identificador temporal que s'utilitza després sistemàticament. Aquest identificador temporal s'anomena TMSI, de l'anglès *Temporary Mobile Subscriber Identity*. A causa que el TMSI només s'assigna una vegada que s'hagi activat el xifrat, per a un hacker resultaria impossible establir el vincle entre aquest i el IMSI del subscriptor. Per tant, el TMSI s'utilitzarà com a identificador per a totes les comunicacions posteriors, el que garanteix que un atacant ja no pugui identificar al subscriptor.



Il·lustració 56. Detall dels missatges intercanviats en el procés d'autenticació, incloent el TMSI. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

El MME actual del terminal mòbil assigna de manera independent el TMSI: aquest pot canviar-se amb més o menys freqüència, depenent de les polítiques de l'operador. Per exemple, es pot mantenir sempre que un UE romangui en la mateixa cel·la o que canviï cada vegada que un UE iniciï una nova sessió. No obstant, el TMSI canvia amb cada canvi de MME.

El TMSI és un identificador molt curt, de 4 bytes amb un significat local per a un MME. El mateix valor pot ser utilitzat per dos MME, per a dos UE diferents. Per tant, cal una estructura que s'anomena GUTI, de l'anglès *Globally Unique Temporary Identity*. Aquest GUTI permet a la xarxa localitzar el MME que ha assignat el TMSI. A continuació es mostra l'estructura del GUTI.



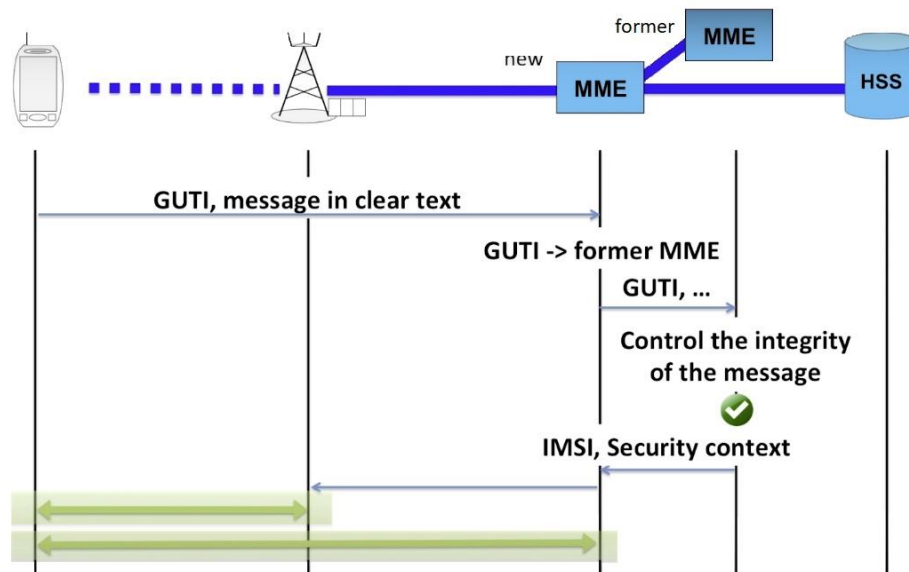
Il·lustració 57. Estructura del GUTI. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

El GUTI conté el TMSI, així com l'identificador únic del MME que assignà el TMSI. A més a més, aquest identificador està compost per la identitat de l'operador (MCC i MNC) i un codi MME assignat per l'operador. De fet, els MME treballen com un grup, motiu pel qual tenim una identitat de grup MME i un codi MME que pertany al grup.

En tot moment, un GUTI identifica a un subscriptor de manera unívoca en el món, conservant la possibilitat de canviar el GUTI d'un subscriptor. És a dir, el GUTI és com un pseudònim per al UE. No obstant, però, tenen tendència a canviar. Quan el terminal realitza una sol·licitud a la xarxa per connectar-se, aquest envia el primer missatge utilitzant el GUTI com a identificador. El MME és l'únic element que pot fer la correspondència i trobar el IMSI del subscriptor i el context de seguretat. D'aquesta forma, el MME pot verificar la integritat del missatge. Això serveix com a prova que el terminal mòbil és qui anuncia ser i està autènticat. El MME pot activar el xifrat a l'enllaç ràdio, configurar les claus necessàries en el eNodeB i protegir així totes les comunicacions des del primer missatge transmès.

És important observar que el HSS no es connecta durant aquest procediment, el que limita significativament la càrrega en aquest punt de la xarxa central. Aquest procediment també funciona encara que el terminal mòbil es mogui. Per exemple, si un terminal passa a estar servit per un nou MME, el nou MME seria l'element que rebria la sol·licitud d'autenticació.

Observant el GUTI a la següent il·lustració (il·lustració 58), es pot trobar la identitat de l'antic MME, és a dir, del MME que assignà el TMSI al UE abans que aquest canviés de MME. Per tant, l'antic MME pot retransmetre el missatge, i després de la seva validació, recuperar el IMSI del subscriptor juntament amb el context de seguretat. Realment, el nou MME pot activar el xifrat i la integritat, sense necessitat d'haver de passar per un cicle d'autenticació complet. Novament, això evitaria contactar al HSS.



Il·lustració 58. Procediment d'autenticació quan el UE és servit per un nou MME. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

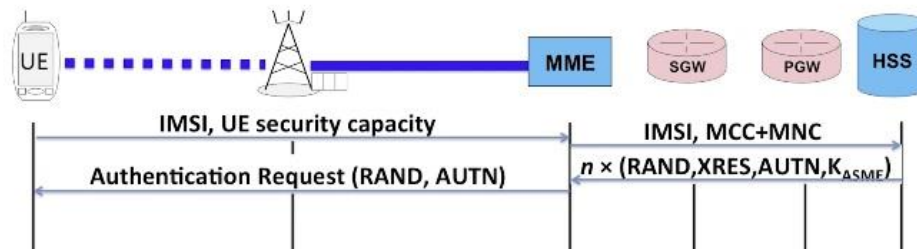
Per acabar aquest apartat, s'enumeren algunes de les consideracions més importants pel que fa a la integritat temporal:

- Per evitar que un hacker rastregi la ubicació d'un UE, s'assigna una identitat temporal al UE anomenada TMSI.
- El TMSI és escollit pel MME que controla al UE i és transferit només després de l'activació del xifrat, el qual pot renovar-se amb freqüència. A més, el TMSI s'utilitza per crear una identitat temporal global única anomenada GUTI.
- L'ús del GUTI és necessari per recuperar el IMSI del UE en cas que canviï de MME.
- El GUTI es construeix concatenant el TMSI, la identitat del MME a la xarxa i la identitat de la xarxa (codi de país i codi d'operador).

3.6 Procediments de seguretat executats durant l'annexió (attachment)

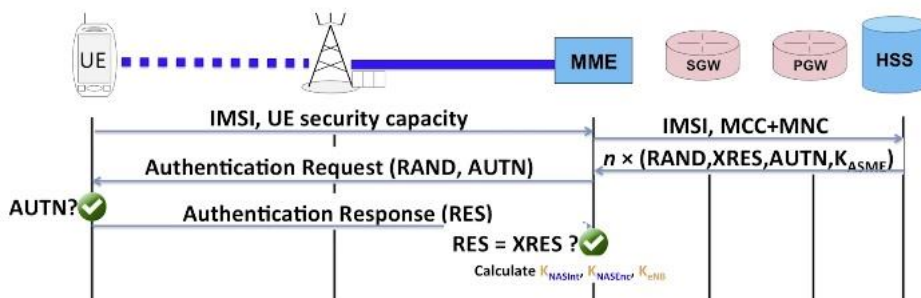
Després d'haver vist els aspectes més destacats dels procediments de seguretat, com s'executen aquests durant l'annexió (attachment)? En aquest apartat es pretén veure amb més detall el procediment d'annexió (attachment).

En primer lloc, el terminal mòbil envia una sol·licitud d'annexió (attach) a la xarxa, en la qual inclou el IMSI del subscriptor i les seves capacitats en termes de seguretat. Després de rebre aquesta sol·licitud, el MME necessita un vector d'autenticació per autenticar el terminal. Per tant, el MME envia una sol·licitud al HSS indicant el IMSI del subscriptor i la xarxa a la qual desitja adherir-se. Tenint en compte que la xarxa s'identifica pel codi de país (MCC) i pel codi de l'operador (MNC), tenim dues situacions: si el subscriptor es troba a la seva xarxa habitual, els codis de país i d'operador seran els mateixos que els que figuren al IMSI. Però si el subscriptor es trobés a l'estranger, el MCC i el MNC serien els de la xarxa visitada. Seguidament, el HSS generarà diversos vectors d'autenticació i els enviarà al MME, com es mostra a continuació.



Il·lustració 59. Vectors d'autenticació enviats pel HSS. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Quan el MME rep aquests vectors, només utilitza un d'ells. És a partir d'ara quan comença el procediment d'autenticació del terminal. El terminal autenticarà la xarxa gràcies al token d'autenticació AUTN, i envia la resposta RES. Immediatament el MME verifica que el RES enviat pel terminal correspongui al XRES que té en el seu vector d'autenticació. Veure il·lustració següent.

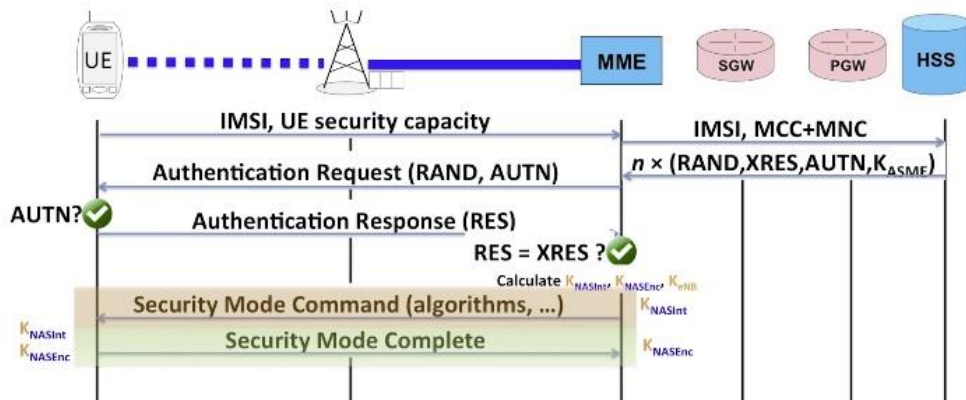


Il·lustració 60. El MME verifica que la resposta RES correspongui a XRES. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Una vegada finalitzada l'autenticació, el MME calcula diverses claus: K_{NASEnc} , K_{NASInt} per a xifrat i integritat, respectivament. També genera la clau K-eNodeB.

La xarxa i el terminal intercanvien diversos missatges per activar correctament el xifrat i la integritat. Els procediments estan dissenyats per evitar acabar en situacions problemàtiques, on d'una banda hi ha un algorisme xifrant missatges, i de l'altra els rep sense intentar desxifrar-los.

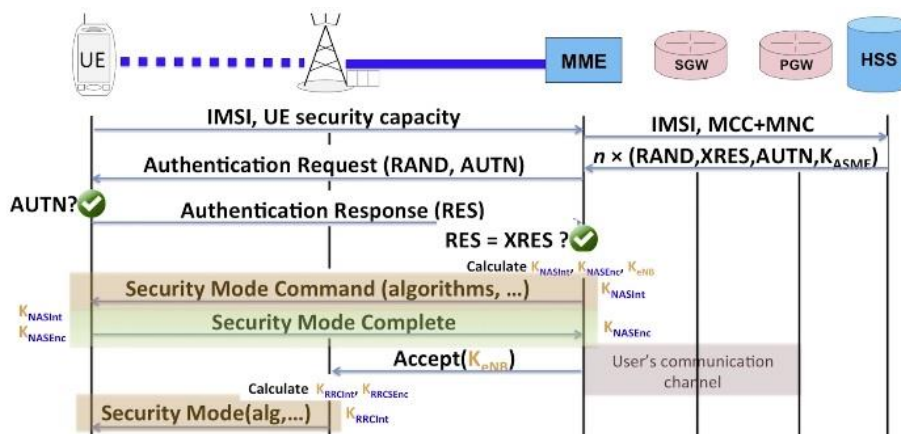
Arribat a aquest punt, el MME activa el xifrat del terminal amb la comana Mode de Seguretat, la qual indica els algorismes de xifrat i integritat que s'utilitzaran per a la resta de comunicacions amb el MME. No obstant, aquest missatge no està xifrat. Seguint aquesta comana, el terminal activa el xifrat i la integritat de les dades amb els algorismes indicats, i respon al MME, però aquesta vegada es xifra i es firma. És a dir, incloent el MAC (codi d'autenticació de missatge).



Il·lustració 61. Comana Mode de Seguretat enviat pel MME al terminal. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

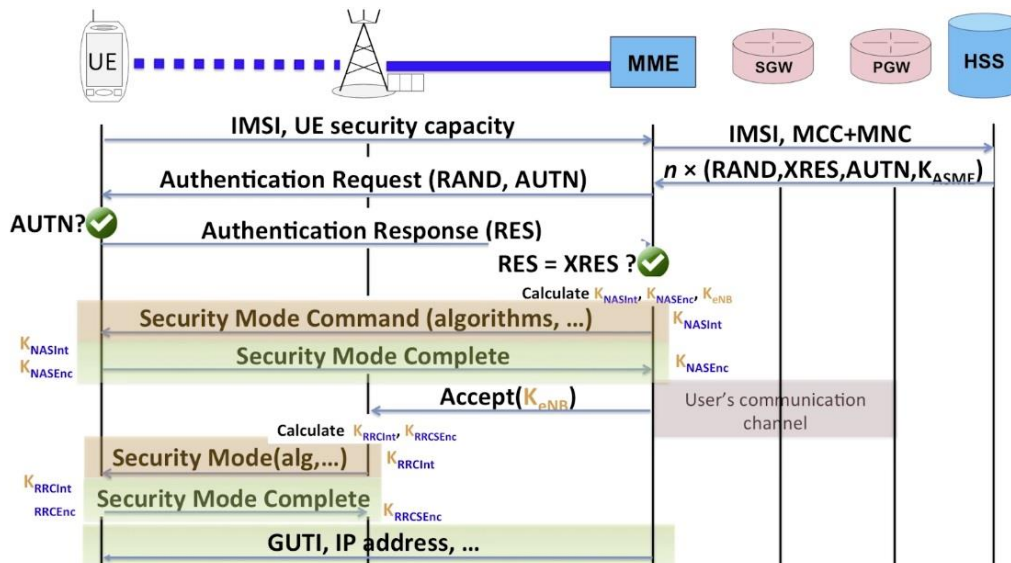
Una vegada que el MME hagi rebut el missatge de Mode de Seguretat, assignarà els recursos necessaris entre el PGW i el SGW perquè el SGW pugui retransmetre les dades d'usuari. I justament després, el MME enviarà un missatge al eNodeB per informar-li que l'usuari ha sigut autenticat, per tant, també lliurarà la clau K-eNodeB.

Quan el eNodeB hagi rebut la clau K-eNodeB, calcularà la clau d'integritat K_{RCCInt} i la clau de xifrat K_{RRCenc} . L'element que activa el xifrat del canal ràdio és, precisament el eNodeB, de la mateixa manera que el MME activà el xifrat entre ell mateix i el terminal. El eNodeB envia la comana Mode de Seguretat amb els algorismes d'enciptació i integritat per fer servir el canal ràdio. Una vegada més, aquest missatge està firmat, però no xifrat.



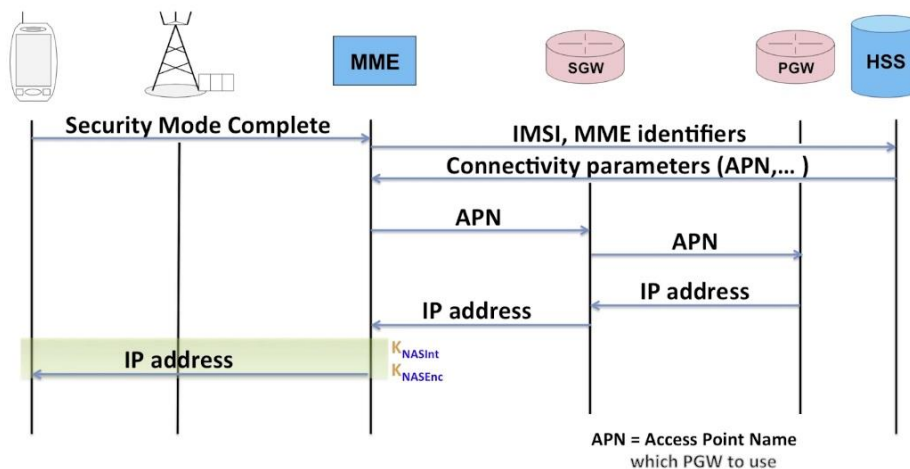
Il·lustració 62. Comana Mode Seguretat enviat pel eNodeB sense xifrat. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

No obstant, la confirmació, per part del terminal, del Mode de Seguretat Complet està xifrada i signada. Finalment, el MME envia els paràmetres de connectivitat al terminal amb tota seguretat. Aquests paràmetres contenen, entre d'altres, el seu GUTI i la direcció IP.



Il·lustració 63. Confirmació Mode de Seguretat Complet del terminal (xifrat). Paràmetres de connectivitat enviats pel MME. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Com s'assigna la direcció IP del terminal mòbil? Després de la resposta del terminal, que activa el xifrat entre aquest i el MME, el MME s'encarrega d'escollir el SGW i el PGW. Abans, però, demana al HSS que proporcioni el perfil del subscriptor. El HSS respon i també proporciona els paràmetres de connectivitat per a l'usuari. El paràmetre principal és el APN (Nom del Punt d'Accés), que indica el nom simbòlic del PGW. Seguidament, el MME selecciona el SGW i li envia un missatge. Llavors, el SGW contacta amb el PGW identificat, el qual assigna una direcció IP. La resposta es transmet des del SGW al MME, i el MME és l'element que envia aquesta informació al terminal mòbil a través del eNodeB. A partir d'aquest moment el terminal mòbil pot accedir a Internet.



Il·lustració 64. Missatges intercanviats en l'assignació de direcció IP. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

A partir d'aquest moment el terminal mòbil pot accedir a Internet.

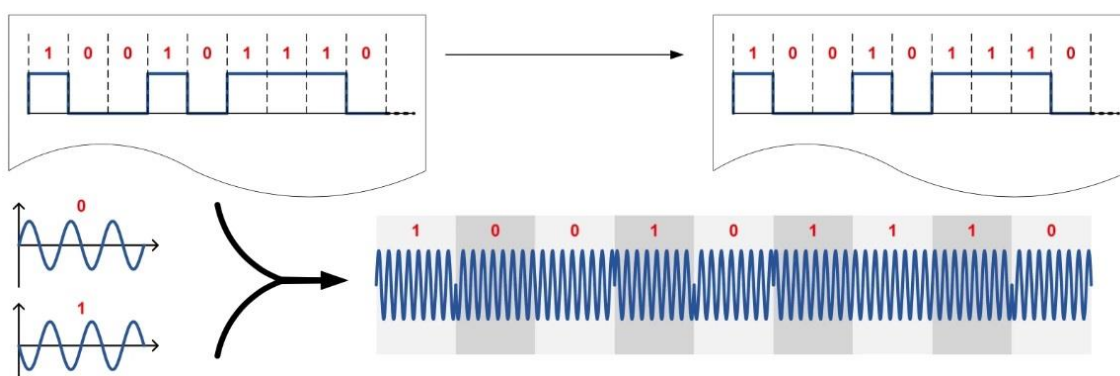
4. Interfície Ràdio

En aquest capítol ens centrarem en la interfície ràdio del LTE. Veurem com es transmet la informació per ràdio entre els eNodeB i els UE. Hi ha una part física de les transmissions que indueix a restriccions que cal contemplar. També es necessita compartir l'ample de banda entre els usuaris de la mateixa cel·la i la interfície amb la xarxa central. Per tant, per poder gestionar-ho, la interfície ràdio està estructurada en diverses capes. Cada apartat d'aquest capítol presentarà cadascuna d'aquestes capes.

4.0 Transmissió ràdio

Començant per la primera capa, aquesta correspon a la capa física o *physical layer*. L'objectiu d'aquesta capa és transferir missatges binaris entre dos punts, és a dir, entre un eNodeB i un UE. Per a això, el LTE utilitza modulacions i tècniques de correcció d'errors. A continuació es pretén donar els conceptes més significatius.

La primera pregunta que ens plantegem: què és una modulació? Com sabem, el concepte de ràdio depèn de les ones electromagnètiques per transmetre informació. Aquestes ones poden viatjar grans distàncies a velocitats properes a la de la llum, no obstant, però, estan subjectes a perturbacions. Per exemple, l'amplitud pot veure's modificada i el senyal pot patir un retard temporal o la introducció de soroll additiu, etc. Però mentre que aquestes perturbacions romanguin limitades, el receptor podrà detectar i recuperar el senyal. Per tant, el concepte de modulació es podria definir com una tècnica de transmissió que consisteix a fer servir una portadora d'alta freqüència per transmetre un missatge adequat-lo al canal. Per fer-ho, modifiquem la portadora d'acord amb la informació continguda en el missatge per transmetre. Si el receptor pot reconèixer aquestes modificacions, podrà recuperar el missatge.

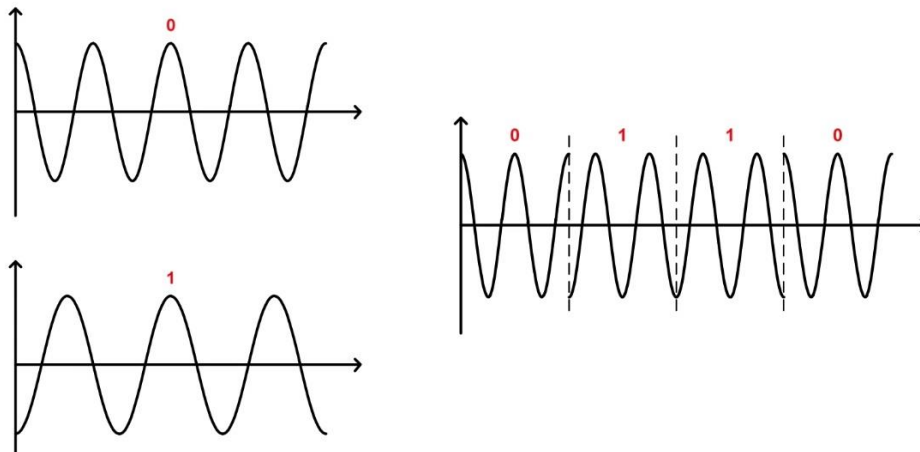


Il·lustració 65. Imatge que il·lustra el concepte de modulació. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Segons l'estàndard LTE defineix diversos tipus de modulacions. No obstant, tenint en compte l'extensió del Treball, només es veuran dos d'elles per entendre les seves diferències i quan fer servir cadascuna.

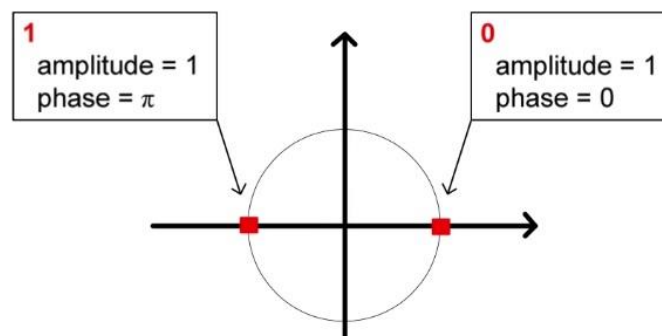
Al LTE, la modulació més simple és la modulació BPSK o *Binary Phase Shift Key-ing*. Com el seu nom indica, opera en la fase de la portadora. Per transmetre un "0" no es modifica el senyal, però per transmetre un "1" es modifica la fase per un factor π radians. És a dir, prenem el valor oposat del senyal.

A la gràfica següent es representa el senyal modulat quan transporta la informació (0,1,1,0). Com es pot veure, la fase es modifica cada vegada que la informació canvia, i roman constant si la informació no canvia.



Il·lustració 66. Exemple de senyal modulat amb BPSK. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

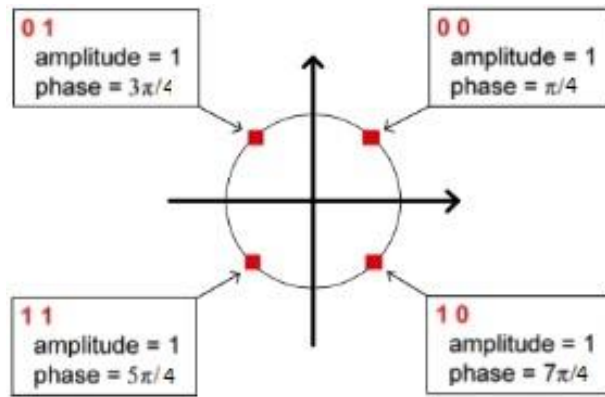
A continuació es representa els estats que el senyal modulat pot prendre. Si ens fixem en el cercle, el mòdul representa l'amplitud, mentre que l'argument representa la fase.



Il·lustració 67. Constel·lació d'un senyal modulat amb BPSK. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Altres modulacions, com la QPSK o *Quaternary Phase Shift Key-ing* tenen més de dos estats de fase. Concretament, quatre estats de fase. Per tant, aquesta modulació agrupa 2 bits per símbol, és a dir, pot transmetre 2 bits a la vegada.

Per exemple, es pot prendre la següent convenció: la fase $\pi/4$ s'utilitza per transmetre els bits (0,0). La fase $3\pi/4$ correspon als bits (0,1). La fase $5\pi/4$ per transmetre els bits (1,1). I per últim, la fase $7\pi/4$ correspondria als bits (1,0). Veure (il·lustració 68).



Il·lustració 68. Constel·lació d'un senyal modulad amb QPSK. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

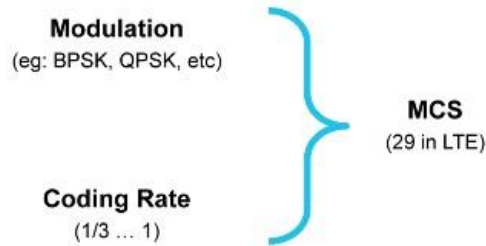
Anomenem “símbol” al període de temps durant el qual la informació transmesa roman constant. I com es pot observar, a la modulació QPSK podem transmetre 2 bits per símbol, mentre que a la modulació BPSK es transmet un únic bit per símbol. Això vol dir, que la taxa de transmissió de la QPSK és el doble que la de la BPSK. No obstant, no tot són avantatges, ja que el fet de tenir més símbols a la modulació QPSK respecte de la BPSK, implica que aquests estiguin més junts els uns amb els altres. Tenint en compte el soroll, la rotació de fase dels símbols, etc., aquests deriven de la seva posició inicial i la probabilitat de creuar els llindars de decisió a la QPSK serà més gran que a la BPSK. Dit amb altres paraules, la probabilitat d'error de símbol a la modulació QPSK serà més gran que a la BPSK.

Què pot passar si les pertorbacions són considerables? En el pitjor dels casos, els símbols es superposarien, el que implicaria que el receptor no pogués recuperar la informació correctament. Per tant, per fer ús d'una modulació de manera eficient, es necessita fer una estimació del canal per veure les característiques d'aquest (lentament variant en el temps, variant en el temps, si és sorollós, etc.). Hi ha, doncs, un compromís entre la velocitat de transmissió i la taxa d'error, tenint en compte que les condicions del canal varien amb el temps. Aquesta és la raó per la qual l'estàndard LTE adapta les modulacions en temps real. És el que s'anomena modulacions adaptatives. Per exemple, un eNodeB pot fer servir simultàniament una modulació eficient com una 64QAM (6 bits/símbol) per comunicar-se amb un UE que estigui a prop, i fer servir també una modulació més robusta com la QPSK (2 bits/símbol) amb un UE les condicions de propagació de les quals sigui menys favorables.

D'altra banda, els errors són bastant freqüents en les transmissions ràdio. El LTE, com qualsevol altre sistema de comunicació digital, fa ús de la correcció d'errors (basat en una codificació matemàtica). La idea és afegir informació redundant a la informació útil que s'envia, amb la finalitat d'augmentar les possibilitats de reconstruir el missatge en recepció. Es podria profunditzar i veure el codi Huffman o Viterbi, ja que són conceptes vistos en les assignatures de Sistemes de Comunicació I i II, però l'extensió del Treball ja de per sí és considerable. Per tant, ens hem de quedar que el FEC o *Forward Error Correction* és bastant efectiu, tot i que fer-lo servir ocupa ample de banda. Simplement, per afegir un paràmetre del FEC, s'anomena taxa de codificació, d'una paraula codi, a la raó entre els bits útils i els bits totals transmesos.

Pel que fa l'estàndard LTE aquesta taxa de codificació està compresa entre 1/3 (per a una correcció extensa) i quasi 1 (gairebé cap correcció).

Fins ara hem vist que el LTE pot utilitzar diferents modulacions i diferents taxes de codificació, depenent de les condicions de propagació. La combinació d'una modulació i d'una taxa de codificació donada, es denomina MCS o *Modulation Coding Scheme*. Atès que les condicions del canal canvien contínuament, i que són independentment per a cada terminal mòbil, el LTE ha d'adaptar el MCS de cada mòbil en temps real.



Il·lustració 69. MCS possibles a l'estàndard LTE. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Les modulacions majoritàriament utilitzades són: QPSK, 16QAM i 64QAM. El que implica que el ample de banda sigui adaptatiu: 1,4MHz, 3MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz i 20MHz. Com la interfície ràdio està basada en OFDM o *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* per fer front a les interferències, pèrdues per multicamí i l'atenuació selectiva, l'ample de banda es divideix en subportadores de 15KHz, ortogonals entre si.

Una altra de les característiques físiques del LTE són les bandes de freqüència més utilitzades.

- Amèrica: 700MHz, 1700AWS i 2600MHz.
- Europa: 800MHz, 1800MHz i 2600MHz.
- Àsia: 1800MHz i 2600MHz.
- Àfrica: 1800MHz, 2100MHz i 2600MHz.

Segons el document del 3GPP TS 36.101 versió 14.3.0 del Release 14 de LTE Advanced Pro és pot obtenir informació detallada de les bandes de freqüència.

Altre aspecte destacat és l'eficiència espectral. L'eficiència espectral és la relació que existeix entre la taxa de transmissió d'una tecnologia mòbil i el seu ample de banda. És un paràmetre que permet saber si una banda de freqüència està ben aprofitada o no.

Es calcula mitjançant la següent equació:

$$E[\text{bits/s/Hz}] = \frac{R}{BW}$$

On:

- E representa l'eficiència espectral mesurada en bits/s/Hz
- R és la taxa de bits mesurada en bits/s.
- BW és l'ample de banda, mesurat en Hz.

A la següent il·lustració es mostra una comparativa d'eficiències espectrals entre les diferents tecnologies que coexisteixen avui dia.

Tecnología	Tasa de Transmisión	Ancho de Banda	Eficiencia Espectral
GSM	9.6 Kbps	200 KHz	0.05 bits/s/Hz
UMTS R99	2 Mbps	5 MHz	0.4 bits/s/Hz
HSDPA	14 Mbps	5 MHz	3 bits/s/Hz
LTE	100 Mbps	20 MHz	5 bits/s/Hz
LTE MIMO 4x4	320 Mbps	20 MHz	16 bits/s/Hz
LTE Advanced	3 Gbps	100 MHz	30 bits/s/Hz

Il·lustració 69. Comparativa d'eficiències espectrals per tecnologia. Xavier Marichal "Long Term Evolution", Telecapp Academy (Course Slides), 2018.

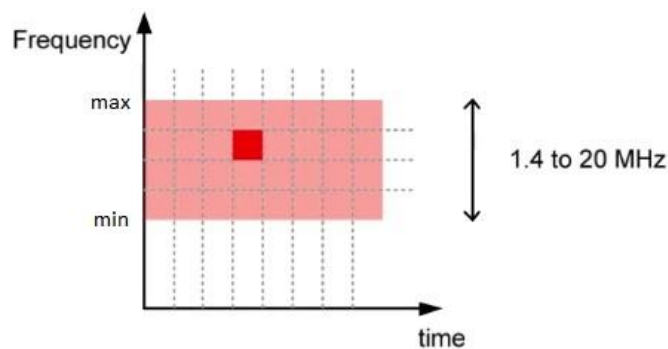
Ara bé, aquests són valors d'eficiència espectral de pic. És a dir, no s'ha de prendre de manera dogmàtica, ja que a la pràctica l'usuari no experimentarà les prestacions associades a l'eficiència espectral de pic, sinó més bé a una eficiència espectral mitjana. Realment, les taxes de transmissió que experimenta l'usuari no necessàriament han d'arribar als valors teòrics descrits, perquè això dependrà de múltiples factors com: l'electrònica dels equips, condicions climàtiques, quantitat d'usuaris, entre d'altres paràmetres.

El que es pot concloure, veient l'equació anterior, és que teòricament a mesura que l'eficiència espectral sigui més gran, la tecnologia és més eficient. Per tant, si volguéssim incrementar l'eficiència espectral, podríem (matemàticament parlant) trobar la manera d'augmentar la taxa de transmissió sense necessitat d'augmentar l'ample de banda. O, fins i tot, mantenir la taxa de transmissió actual reduint l'ample de banda. Aquestes serien les dues maneres d'aconseguir incrementar l'eficiència espectral (E).

4.1 Blocs de Recursos i Subtrames

Com poden operar múltiples usuaris en la mateixa freqüència? Per entendre-ho podem posar el símil següent. El concepte de la ràdio és exactament igual que quan ens trobem amb un grup de persones en una reunió. Si tothom parla alhora, ningú pot entendre res. Anàlogament, quan diversos equips transmeten al mateix temps, és probable que hi hagi interferència. Per tant, sorgeix la necessitat que tots els sistemes de ràdio hagin de trobar una solució per compartir els recursos entre els usuaris. El que es pretén en aquest apartat és veure com el LTE soluciona això i, finalment, obtenir una visió global de la cadena de transmissió.

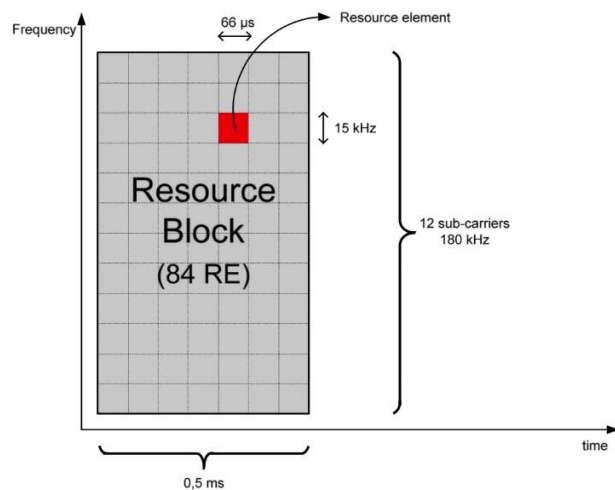
Els recursos ràdio són escassos i costosos. Tenint en compte que els usuaris no necessiten comunicar-se contínuament, és preferible assignar recursos a aquells usuaris només quan ho necessitin. L'estàndard LTE opera en una banda de l'espectre radioelèctric comprès entre una freqüència mínima i màxima, els amplex de banda dels quals poden variar entre els 1,4MHz i 20MHz. Aquest ample de banda es divideix en subportadores, on cadascuna d'aquestes es pot assignar a un usuari diferent.



Il·lustració 70. Ample de banda dividit en subportadores. Cada casella representa un recurs assignat a un usuari. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Aquestes freqüències es tornen a assignar periòdicament, en funció de l'evolució de les necessitats dels usuaris. És a dir, LTE comparteix els recursos tant en freqüència com en temps.

Tal com vam veure a l'apartat anterior, la informació més petita produïda per una modulació és un símbol. Cada símbol constitueix un "Element de Recurs" o *Resource Element*, i cada *Resource Element* ocupa 15KHz d'espai de freqüència i de durada 66µs. A causa que és tan petit, és complicat assignar aquests recursos d'un en un. Per tant, el que es fa és agrupar aquests *Resource Elements* en el que s'anomena "Bloc de Recursos" o *Resource Blocks*. Cada *Resource Block* dura 0,5ms i està conformat per 84 *Resource Elements* repartits en 12 subportadores. Veure il·lustració 71.



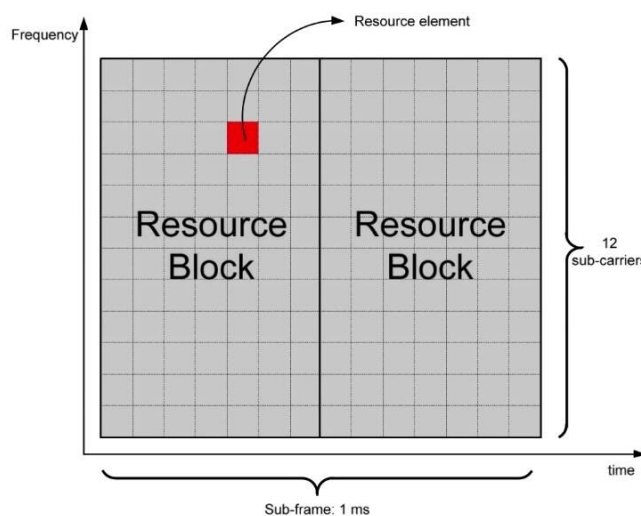
Il·lustració 71. Resource Block format per 84 Resource Elements. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Un *Resource Block* ocupa 180KHz, i la quantitat de *Resource Blocks* disponibles pot variar entre 6 (quan s'opera en un ample de banda de 1,4MHz) i 100 (quan es treballa amb un ample de banda de 20MHz).

Available Bandwidth	1.4 MHz	5 MHz	10 MHz	20 MHz
Nb RBs	6	25	50	100

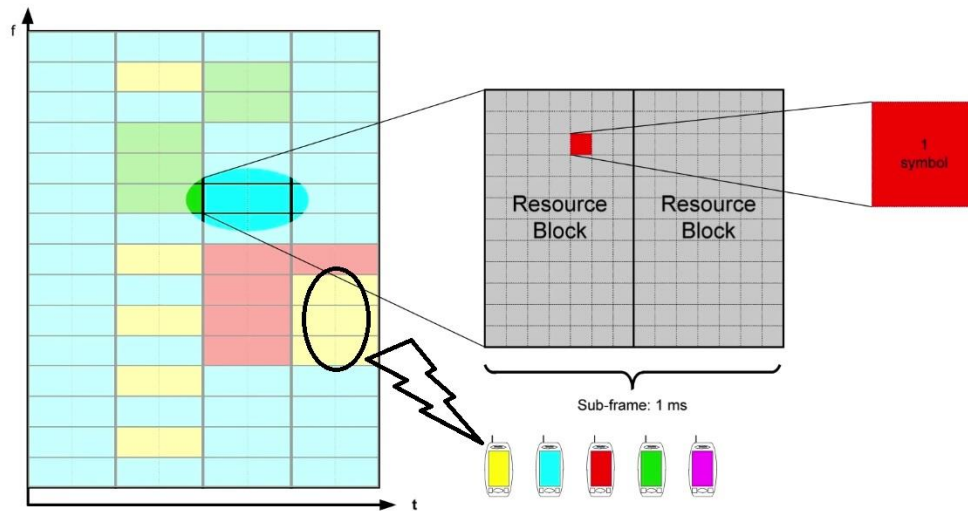
Il·lustració 72. Nombre de Resource Blocks en funció de l'ample de banda. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Cada mil·lisegon, el LTE reassigna els *Resource Blocks* als usuaris que necessiten comunicar-se. Com cada *Resource Block* dura mig mil·lisegon, això vol dir que els *Resource Blocks* s'assignen de dos en dos. El patró format pels *Resource Blocks* durant un període d'1ms es denomina subtrama o *sub-frame*. Important remarcar aquest període d'1ms, ja que tots els mecanismes d'assignació del LTE estan basats en aquest període d'1ms o múltiples d'aquest.



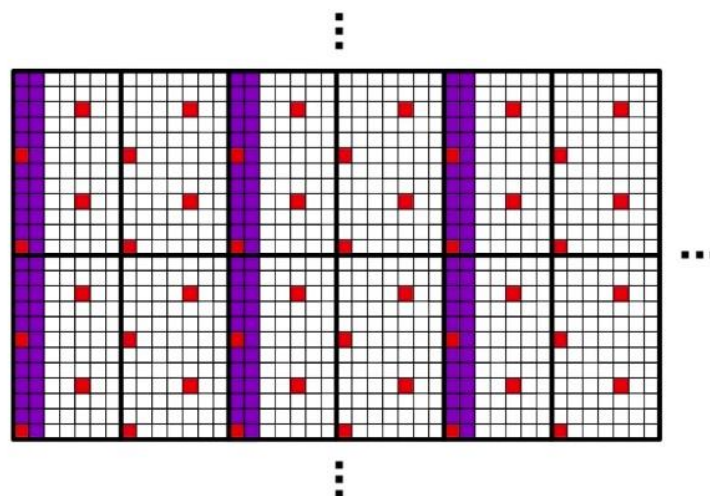
Il·lustració 73. Sub-frame format per 2 Resource Blocks. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

En resum, l'espectre disponible es talla en *Resource Blocks* que s'assignen cada mil·lisegon. A la il·lustració següent, els 3 blocs marcats de color groc representen que estan assignats al terminal groc.



Il·lustració 74. Resource Element / Resource Block / Sub-frame. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Pel que hem vist fins ara, cada *Resource Block* conté 84 *Resource Elements*, on cadascun d'aquests transporta un símbol. No obstant, en els *Resource Blocks*, alguns *Resource Elements* estan reservats per al control intern del LTE. A la següent gràfica (il·lustració 75) s'observa que alguns d'aquests *Resource Elements* són acolorits en porpra o vermell.



Il·lustració 75. Resource Elements reservats (acolorits en porpra o vermell). C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Més endavant tornarem a parlar dels canals físics. De moment, cal tenir present que només els *Resource Elements* de color blanc es poden fer servir per transmetre missatges.

Pel que fa al Bloc de Transport o *Transport Block*, quan un dispositiu necessita transmetre dades se li proporciona un o diversos *Resource Blocks* per al següent 1ms. Si aquest recurs assignat no fos suficient, se li assignaran recursos addicionals en les següents subtrames o sub-frames. Aquesta assignació és administrada pel eNodeB, on es detallarà en següents apartats.

La quantitat de dades que un dispositiu pot enviar durant un sub-frame determinat es denomina *Transport Block*, i la seva grandària depèn de la quantitat de *Resource Blocks* disponibles per a aquest usuari. També depèn de la modulació o, amb més precisió, del MCS utilitzat amb aquest usuari. Òbviament, com més eficient sigui la modulació, més gran serà el *Transport Block*.

A la taula següent es proporciona la grandària, en bits, dels *Transport Blocks*, en funció del MCS fet servir i de la quantitat de *Resource Blocks* assignats. Com es pot veure, són moltes les combinacions possibles, però només farem algunes observacions.

MCS Index	Number of Resource Block Pairs											
	1	2	3	4	5	6	...	25	...	50	...	100
0	16	32	56	88	120	152	..	680	...	1 384	...	2 792
1	24	56	88	144	176	208		904		1 800		3 624
2	32	72	144	176	208	256		1 096		2 216		4 584
3	40	104	176	208	256	328		1 416		2 856		5 736
4	56	120	208	256	328	408		1 800		3 624		7 224
5	72	144	224	328	424	504		2 216		4 392		8 760
6	328	176	256	392	504	600		2 600		5 160		10 296
7	104	224	328	472	584	712		3 112		6 200		12 216
8	120	256	392	536	680	808		3 496		6 968		14 112
9,10	136	296	456	616	776	936		4 008		7 992		15 840
...												
16,17	280	600	904	1 224	1 544	1 800		7 736		15 264		30 576
...												
23	488	1 000	1 480	1 992	2 472	2 984		12 576		25 456		51 024
24	520	1 064	1 608	2 152	2 664	3 240		13 536		27 376		55 056
25	552	1 128	1 736	2 280	2 856	3 496		14 112		28 336		57 336
26	584	1 192	1 800	2 408	2 984	3 624		15 264		30 576		61 664
27	616	1 256	1 864	2 536	3 112	3 752		15 840		31 704		63 776
28	712	1 480	2 216	2 984	3 752	4 392		18 336		36 696		75 376

Il·lustració 76. Grandària dels Transport Blocks (en bits). 3GPP Technical Specification 36.213 “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)”, www.3gpp.org

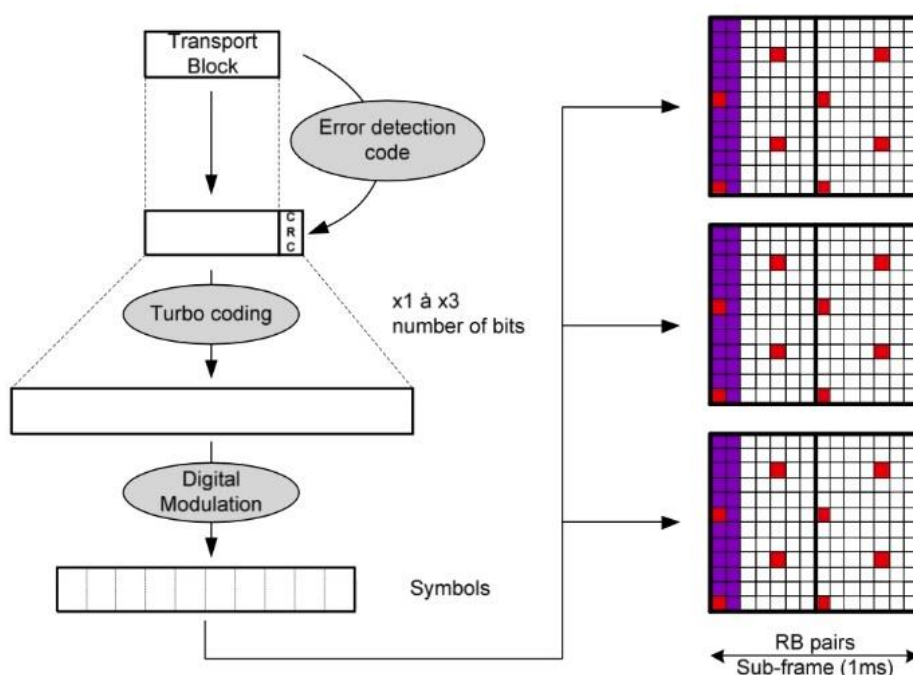
En primer lloc, és fàcil traslladar la grandària del *Resource Block* a rendiment (capacitat). De fet, hi ha 1000 sub-frames per segon. Llavors, només cal multiplicar les xifres d'aquesta taula per un factor 1000 per obtenir el rendiment. A la taula anterior es pot observar que el rendiment màxim assolible és de 75Mbit/s.

En segon lloc, la grandària dels *Transport Blocks* varia àmpliament, oscil·lant entre els 16 bits (quan només s'utilitza un sol *Resource Block* i un MCS de 0) fins als 75Kbits (quan s'utilitzen tots els *Resource Blocks* amb un MCS de 28).

Per últim, podem veure que la mateixa grandària del *Transport Block* pot trobar-se en diverses cel·les. Per exemple, el valor de 256 bits (de color verd a la taula anterior). És una propietat interessant si la modulació canvia després que es generés un *Transport Block*. Imaginem que ens han assignat 2 *Resource Blocks* per transmetre un *Transport Block* de 256 bits utilitzant un MCS de 8. Si les condicions empitjoren i ara cal fer servir un MCS de 4, podem mantenir el mateix *Transport Block* de 256 bits i només hauríem perdut 4 *Resource Blocks* en lloc de 2.

Per concloure:

- El LTE comparteix recursos per temps i freqüència.
- Un *Resource Element* correspon a un símbol, on la quantitat de bits codificats sobre aquest símbol depèn de la modulació utilitzada.
- Per facilitar l'assignació, el LTE defineix els *Resource Blocks*, que són grups de 84 *Resource Elements*.
- La quantitat de *Resource Blocks* no pot obtenir-se mitjançant un simple càlcul. Va ser decidit pel 3GPP (organització que estandarditza els sistemes 4G). Per tant, cal fer servir la taula *Resource Element / Resource Block*.
- Cada mil·lisegon el eNodeB defineix la grandària del *Transport Block* per a cada dispositiu en l'actual sub-frame.
- La visió global de la cadena de transmissió és:



Il·lustració 77. Cadena de transmissió (simplificat). C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Primer s'omple un *Transport Block* de la grandària que ens hagi assignat el eNodeB. S'afegeix un verificació de redundància cíclica o CRC, perquè el receptor verifiqui si les dades rebudes són correctes. El paquet passa a través de l'etapa de codificació que afegeix redundància per permetre la correcció d'errors. El flux de bits es modula mitjançant una modulació digital per produir símbols. Aquests símbols s'inserten en un dels *Resource Blocks* que ens hagi sigut assignat en el sub-frame actual. Aquest procediment es repeteix cada mil·lisegon.

4.2 Assignació de Paquets

Fins ara hem vist que els recursos s'assignen dinàmicament, però com informa el eNodeB al terminal de quins recursos estan dedicats al corresponent UE? El que es pretén en aquest apartat és estudiar els principis d'assignació en LTE i veure els intercanvis de senyalització subjacents per comprendre, finalment, com s'informa a un terminal que immediatament rebrà dades i com pot sol·licitar un UE al eNodeB un recurs per enviar dades.

Hi ha tres regles principals sobre l'assignació en LTE.

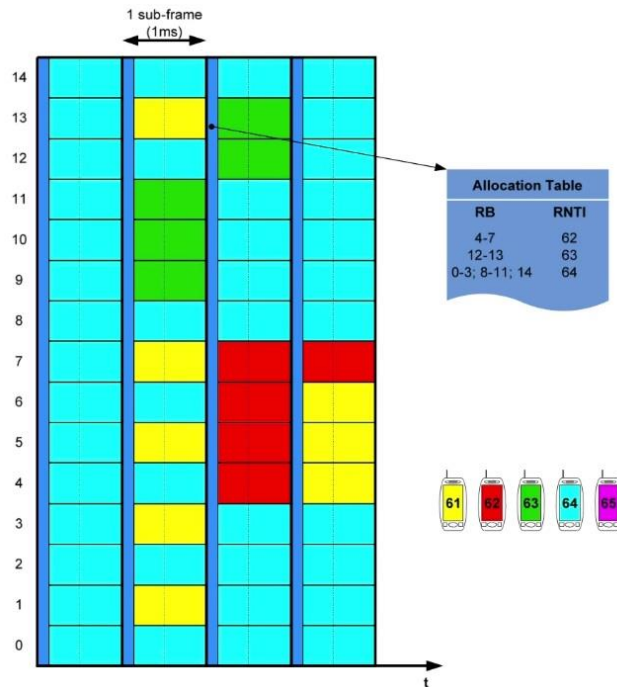
- La primera és que tot està centralitzat pel eNodeB (tant per al canal descendent com per al canal ascendent). És a dir, un terminal no pot transmetre si prèviament no se li ha donat permís.
- En segon lloc, com s'havia explicat anteriorment, els recursos només s'assignen quan hi ha una necessitat real de transmetre dades.
- Per últim, a cada *sub-frame* (cada mil·lisegon) el eNodeB publica una taula d'assignació per informar als terminals de l'assignació de recursos tant per a l'enllaç ascendent com per al descendent.

Pel que fa a l'adreçament, es necessiten adreces per identificar els terminals. No obstant, no es poden utilitzar els identificadors que hem vist fins ara (IMSI, GUTI, etc.), ja que aquests són únics dins la xarxa i no són adequats per als requeriments de la interfície ràdio. En aquest cas, el rang geogràfic està limitat a una única cel·la, atès que cada eNodeB gestiona la seva planificació de forma independent. Realment aquestes adreces s'utilitzen amb freqüència, per tant, es necessita que siguin el més curtes possibles. Com el eNodeB publica la taula d'assignació cada mil·lisegon o cada *sub-frame*, també introdueix un nou identificador anomenat RNTI, de l'anglès *Radio Network Temporary Identifier*.

Aquest RNTI és administrat pel eNodeB i només té validesa dins de la seva cel·la. Per tant, quan un terminal arriba a una cel·la, el eNodeB li assigna un nou RNTI (identificador codificat amb 16 bits). Aquest és un identificador molt més curt que d'altres, tot i així, permet $2^{16} = 65536$ terminals per cel·la.

Quant a l'enllaç descendent (downlink), les dades són transmeses cap al terminal. Com hem vist, el eNodeB pot fer servir un o diversos *Resource Blocks* per *sub-frame* per a comunicar-se amb un UE determinat. Al començament del *sub-frame*, el eNodeB publica una mena de mapa del *sub-frame* perquè els terminals sàpiguen quins *Resource Blocks* contenen les dades que estan destinats a ells. Això és el que s'anomena Taula d'Assignació o *Allocation Table*.

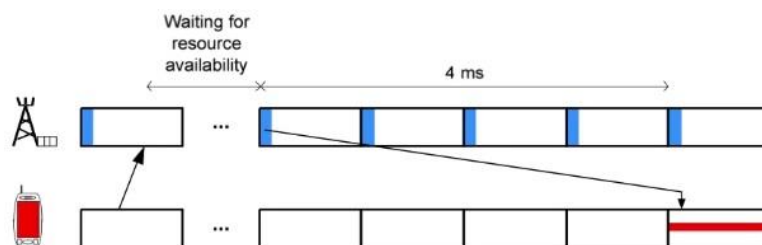
A continuació es pot veure un exemple d'assignació de recursos per part del eNodeB, on per a un *sub-frame* donat, el *Allocation Table* es publica en un espai de color blau.



Il·lustració 78. Exemple d'assignació de recursos per un eNodeB. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Com podem veure, els *Resource Blocks* 12 i 13 estan assignats al terminal amb RNTI 63. De la mateixa manera, els *Resource Blocks* de 4 a 7 s'assignen al terminal amb RNTI 62. Un dels avantatges és l'estalvi d'energia, ja que si un terminal nota que no se li envien dades en aquest *sub-frame*, pot passar al mode d'espera fins al següent *sub-frame*. Fins i tot, el terminal pot evitar el desaprofitament d'energia per la descodificació de dades no destinats a ell i centrar-se només en els seus propis *Resource Blocks*.

Quant a l'enllaç ascendent (uplink), és el terminal qui necessita enviar dades. Es fa servir el mateix principi que a l'enllaç descendent, és a dir, els recursos són assignats pel eNodeB (una taula d'assignació o *Allocation Table* es publica al mateix temps que la taula per a l'enllaç descendent). No obstant, hi ha algunes diferències a causa que el eNodeB no sap quan els terminals necessiten transmetre. Per tant, abans de transmetre, els terminals primer han de fer una sol·licitud al eNodeB. Pot semblar paradoxal, perquè per transmetre, el terminal ha de transmetre una sol·licitud.

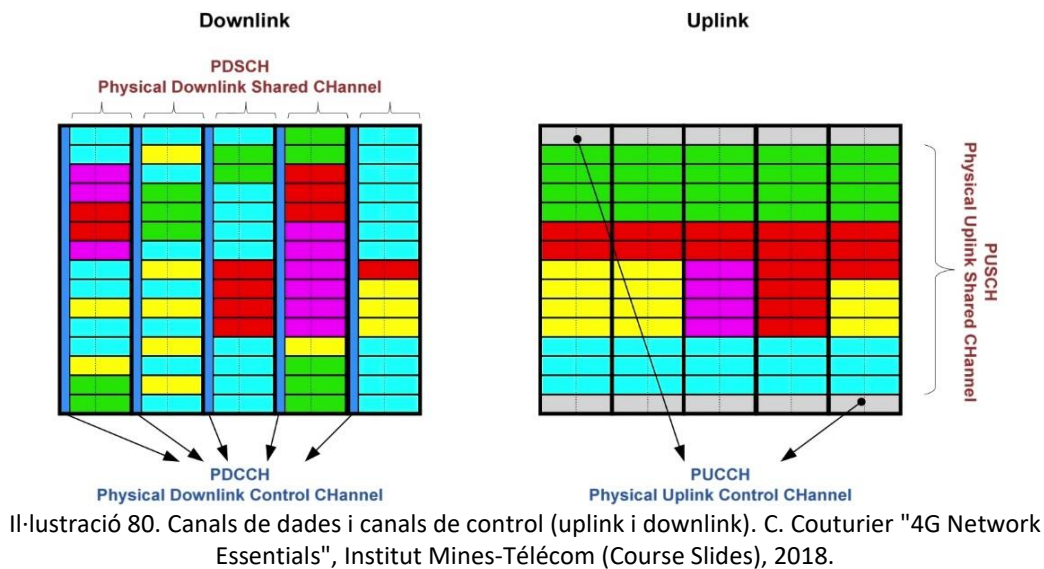


Il·lustració 79. Temps de reacció del terminal (anticipació de 4ms). C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

De moment només cal considerar que el terminal pot enviar aquesta sol·licitud. En resposta, el eNodeB li assigna un recurs en el següent *Allocation Table*. Quan el terminal rep aquesta informació, llavors, prepara un *Transport Block*, el codifica, el modula, etc.

(il·lustració 77). No obstant, el terminal encara no està preparat per enviar el seu missatge immediatament. És per això, que el *Allocation Table* publicada pel eNodeB per a l'enllaç ascendent, és en realitat per al quart *sub-frame* següent. És a dir, d'aquí a 4 mil·lisegons.

La següent gràfica mostra els *frame patterns* del LTE per als enllaços ascendent i descendent. Ambdós casos estan reservats per transmetre dades de control i dades d'usuari per separat.



A l'enllaç descendent, el canal de control es mostra de color blau. En particular, transporta les *Allocation Tables* de l'enllaç ascendent descendent, i utilitza els primers *Resource Elements* de cada *sub-frame*. Si recordem la il·lustració 75 de l'apartat anterior, es tracta dels *Resource Elements* de color porpra. La resta constitueix el canal de dades que s'utilitza per transferir les dades d'usuari.

A l'enllaç ascendent, el canal de control es mostra de color gris. Aquest està compost per *Resource Blocks* situats a cada extrem de la banda. Com s'havia explicat anteriorment, els terminals poden transmetre una sol·licitud a l'estació base, quan en realitat no tenen cap recurs per fer-ho. Doncs bé, per a aquest canal (uplink), el LTE especifica un mecanisme d'accés especial que atorga els drets de transmetre, al seu torn, a cada terminal de la cel·la. De fet, l'estàndard defineix nombrosos canals amb els acrònims PDSCH, PDCCH, PUCCH i PUSCH, que no veurem. Pel que fa a aquest Treball, només diferenciem entre canal de dades i canal de control.

Resumint:

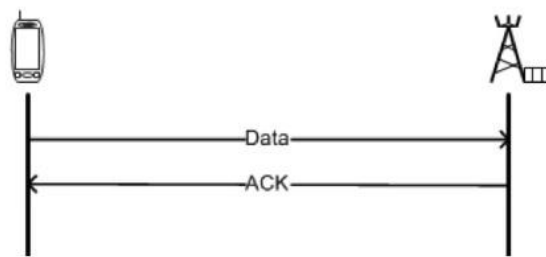
- L'assignació de recursos és gestionada pel eNodeB tant per a l'enllaç ascendent com per a l'enllaç descendent.
- Els recursos només s'assignen quan hi ha necessitat de transmetre.
- Els intercanvis d'assignació es realitzen en canals de control dedicats.
- A l'enllaç ascendent, el terminal ha de realitzar prèviament una sol·licitud en el canal de control, abans que se li assignin recursos, els quals podrà fer servir 4 *sub-frames* posteriors.

4.3 Fiabilitat de la transmissió

Com sabem, la ràdio és propensa a pertorbacions. Una taxa d'error de bit de 10^{-6} es pot considerar acceptable per a un sistema de comunicació digital. Per exemple, si tinguéssim una taxa de bit de 70Mbit/s, tindríem, de mitjana, 70 bits erronis per unitat de temps. A l'apartat 4.0 *Transmissió ràdio* havíem vist que la codificació s'utilitza a la capa física per corregir alguns d'aquests errors, però, com podem manejar aquells que no hagin estat corregits? Aquesta és una de les funcions de la capa MAC o *Media Access Control*. Una altra de les funcions de la capa MAC és la multiplexació, funció que permet que diversos serveis es comuniquin amb el mateix terminal al mateix temps.

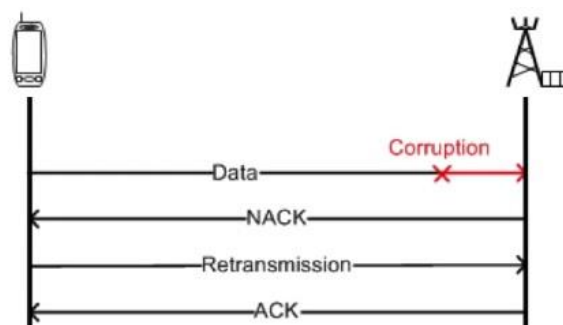
L'estàndard LTE fa servir codis de detecció d'errors, anomenats CRC, de l'anglès *Cyclic Redundancy Check*. Aquests codis són calculats per l'emissor i annexats al final del missatge. El receptor, per la seva part, fa el mateix càlcul. Si tots dos obtenen el mateix resultat, les dades són correctes. No obstant, hi ha tres casos possibles:

- Cas 1: Si el missatge és correcte, el receptor confirma la recepció amb un missatge anomenat acknowledgement o ACK. (Veure il·lustració 81). Aquest missatge s'envia en el canal de control, que havíem vist a l'apartat anterior.



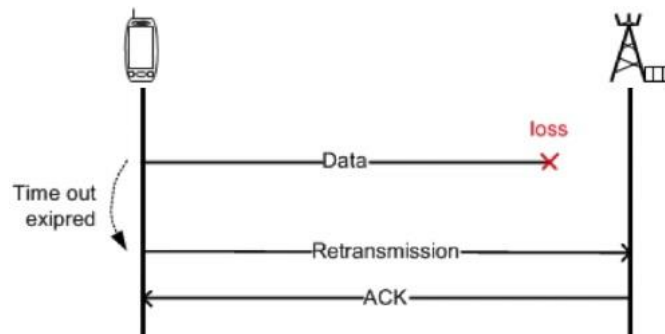
Il·lustració 81. El terminal envia i espera ARQ. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

- Cas 2: Les dades enviades per l'emissor es corrompen durant la transmissió. En aquest cas, el receptor informa al transmissor amb un missatge de no confirmació "non-acknowledgement" o NACK. Tot seguit, el transmissor reenvia el missatge, i continua fent-ho fins que rep un justificant de recepció o acknowledgement positiu. (Veure il·lustració 82).



Il·lustració 82. El terminal retransmet les dades fins rebre confirmació. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

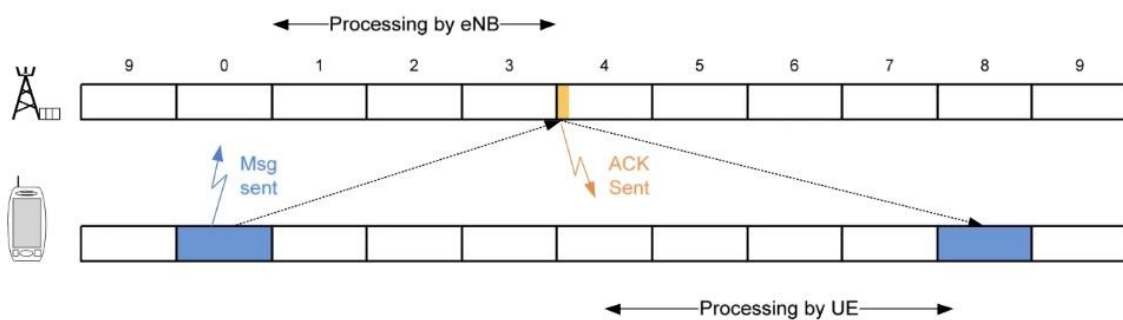
- Cas 3: L'emissor envia un missatge, però no rep cap justificant de resposta. Per tant, el acknowledgement s'ha perdut. En aquest cas, si l'emissor que havia enviat el missatge no rep cap reconeixement després d'un cert temps, enviarà les dades novament.



Il·lustració 83. Retransmissió per dades no confirmades. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Si el missatge encara no s'hagués rebut, després d'un nombre limitat d'intents, la capa MAC desisteix. És a dir, per a la capa MAC aquestes dades seran considerades com a noves. Aquest mecanisme se sol dir "Envia i Espera" perquè l'emissor envia les dades i espera la resposta. Es tracta del ARQ o *Automatic Repeat reQuest*, ja que retransmet automàticament si no rep cap acknowledgement.

Processar un missatge o un ACK pot trigar cert temps. Es per aquest motiu que la norma estableix que el destinatari envii el seu ACK 4 *sub-frames* després de rebre el missatge. De la mateixa manera, després de rebre l'ACK, el transmissor esperarà 4 *sub-frames* abans de repetir el missatge o d'enviar un de nou.

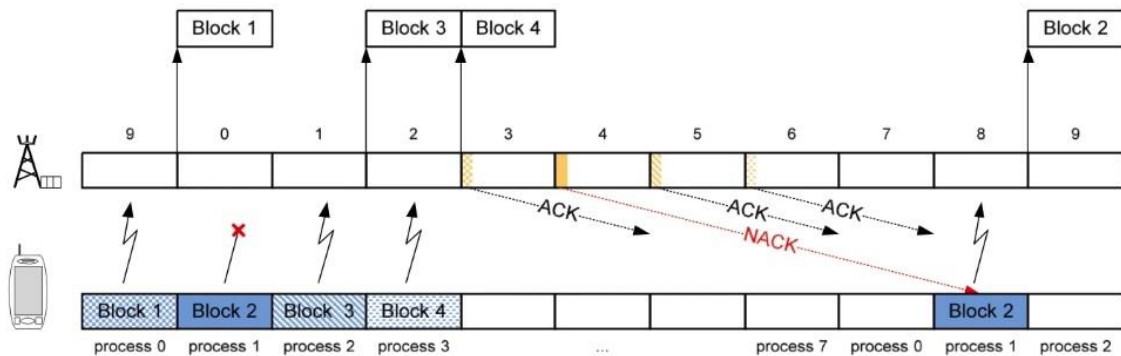


Il·lustració 84. Retard fixe de 8ms: 4ms pel receptor i 4ms per l'emissor. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Com es pot deduir de la il·lustració anterior, el cicle total dura 8 *sub-frames* o 8 mil·lisegons. Durant aquest temps, el transmissor no transmet.

Per optimitzar el consum de recursos, l'estàndard LTE, realment, executa 8 processos "Envia i Espera" en paral·lel. Mentre el primer procés es troba bloquejat, esperant la seva confirmació, altre procés pot transmetre dades. I així successivament, fins que tinguem 8 processos en paral·lel. Aquesta optimització es denomina *Parallel Send and*

Wait. No obstant, el problema amb el *Parallel Send and Wait* és que pot causar la desseqüenciació. Anem a veure-ho en el següent exemple.



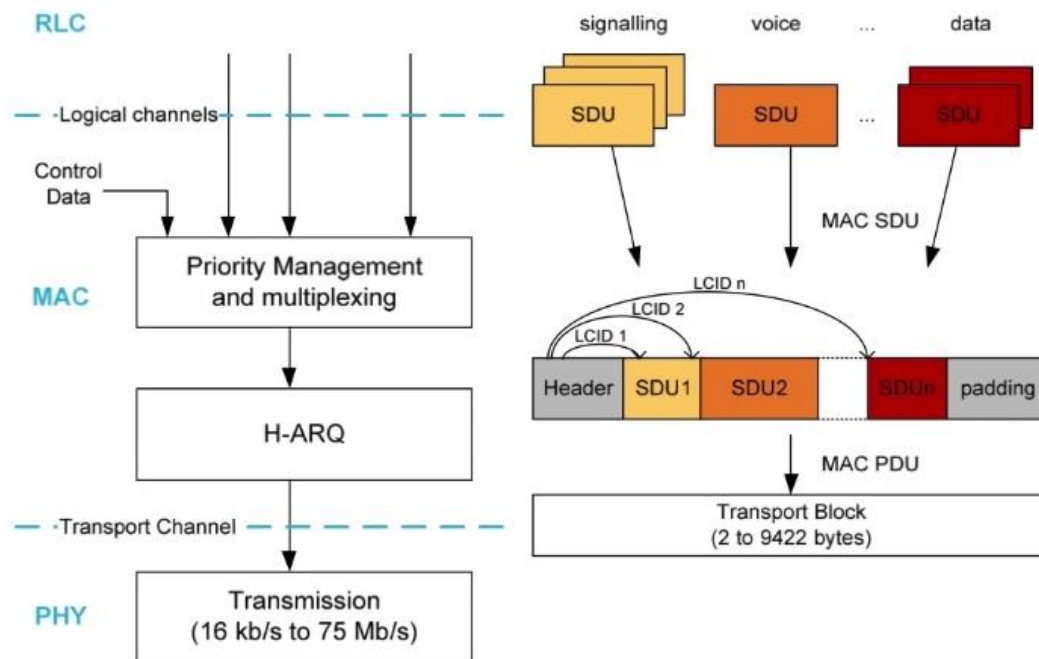
Il·lustració 85. De-sequencing. Les pèrdues de cada procés són independents. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

En aquest exemple, els blocs 1, 3 i 4 són rebuts correctament, però no succeeix el mateix amb el bloc 2. És a dir, el bloc 2 es reenvia 8 *sub-frames* més tard. Per tant, la seqüència entregada per la capa MAC al nivell superior serà el bloc 1, el bloc 3, el bloc 4 i finalment el bloc 2. Com podem veure, la capa MAC no s'encarrega de la re-sequenciació.

En el següent apartat es veurà que aquesta és la funció de la qual s'encarrega la capa RLC, que es troba justament per sobre de la capa MAC.

Pel que fa a la documentació del LTE, és més freqüent veure el terme HARQ, en compte d'ARQ. Encara que no és massa important, farem una ullada a aquesta petita diferència. La idea és que per augmentar les capacitats de correcció d'errors, el receptor emmagatzemi tots els missatges erronis. Aquesta acumulació fa augmentar la redundància, i per tant, la possibilitat d'obtenir les dades correctament. HARQ vol dir *Hybrid ARQ* perquè la capa MAC col·labora amb la capa física per fer-li saber que les dades que processa són en realitat repeticions del mateix *Block Transport*.

Altres de les funcions de la capa MAC és la multiplexació. Fem servir el nostre terminal mòbil per a converses de veu, així com per rebre correus electrònics o navegar per pàgines web, però només hi ha un canal de comunicació entre la estació base i el nostre terminal. Tot aquest tràfic de dades ha de barrejar-se, i és el que anomenem multiplexació.



Il·lustració 86. Dades de capa superior (MAC-SDU). Sortida de la capa MAC (MAC-PDU). C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Abans de continuar, convé introduir el vocabulari següent. En el model per capes clàssic d'una xarxa, les dades en la part superior d'una capa es denomina SDU o *Service Data Unit*. I les dades en la part inferior es denomina PDU o *Protocol Data Units*. En el cas que ens ocupa, la capa MAC rep les MAC-SDU i produeix MAC-PDU.

Les dades manejades per la capa MAC són proporcionats per la capa superior RLC, i es proporcionen a través de cues de missatges, anomenats canals lògics. Alguns d'ells, corresponen a diferents nivells de servei. A la il·lustració 86, per exemple, hi ha un canal dedicat a la senyalització (control intern del LTE), altre a la veu, i l'últim a dades generals.

A la sortida de la capa MAC, les MAC-PDUs són els blocs de transport o *Transport Blocks* que seran transmesos per la capa física. Per formar els *Transport Blocks*, la capa MAC assembla les SDU dels diferents canals lògics, el que es coneix com multiplexació, ja que hi ha diverses transmissions entrants i només una sortida. Per ajudar al receptor a descompondre o desmultiplexar, la capa MAC afegeix capçaleres que indiquen on comença cada missatge i a quin canal lògic pertany.

El camp de "Padding" també es pot afegir per garantir que la grandària de les MAC-PDU siguin exactament de la mateixa grandària que els *Transport Blocks* transmesos.

El resum:

- A més d'assignar recursos, la capa MAC garanteix la fiabilitat de la transmissió utilitzant HARQ.
- Assegura les retransmissions en cas d'error.
- La capa MAC també pot combinar dades de diferents canals lògics en el mateix bloc de transport o *Transport Block*.
- Si no hi hagués transmissions paral·leles, el "Envia i Espera" impediria en conseqüència que els dispositius poguessin transmetre durant 7 *sub-frames* després de la transmissió d'un *Transport Block*. Les transmissions paral·leles evita aquest efecte, pel que es pot considerar que permet augmentar el rendiment fins a 8 vegades.
- Les transmissions paral·leles poden causar que les dades s'entreguin en un altre ordre que el de la transmissió. És a dir, entrega fora d'ordre.
- El mecanisme HARQ és implementat de forma idèntica tant en els eNodeBs com en els UE.
- A l'enllaç descendent (downlink), un *Transport Block* només s'envia a un terminal. Per tant, no pot contenir dades enviades a diferents terminals.

4.4 Protocol RLC

Com he vist, la capa MAC permet que diverses aplicacions puguin compartir la mateixa connexió de ràdio. Però, i si aquestes aplicacions no tenen els mateixos requisits en termes de latència o fiabilitat? O, en altres paraules, diferents QoS, de l'anglès *Quality of Service*. És a dir, diferents requisits de qualitat de servei.

En el LTE, la funció de la capa RLC o *Radio Link Control* és proporcionar aquestes característiques RLC, la qual es troba justament damunt de la capa MAC. Per veure com funciona, primer cal definir què s'entén per qualitat de servei o QoS. El QoS és la capacitat que té la xarxa per donar a les aplicacions un servei que es correspongui amb les seves necessitats, basades en diferents criteris com poden ser: el retard, el rendiment, la taxa d'error, etc.

Pe entendre-ho, hi ha d'haver un compromís en el QoS. Per exemple, és possible augmentar la fiabilitat, retransmetent missatges perduts. Però, per descomptat, augmenta la demora. Aquest equilibri, depèn de l'aplicació. Per a una comunicació de veu, és preferible tenir un petit retard, fins i tot si tenim algunes pèrdues. Mentre que, per a transaccions bancàries, no pot haver errors i la demora no és tan important.

Com vam veure a l'apartat anterior, la capa MAC presenta algunes limitacions. Per exemple, després d'un cert nombre de fallides, la capa MAC deixa de retransmetre missatges. També vam veure que el *Hybrid ARQ* pot introduir l'eliminació de seqüències en els missatges. A més a més, la capa MAC no s'ocupa de la segmentació dels missatges. És a dir, la capa MAC no talla els missatges en blocs més petits per tal que es puguin inserir en *Transport Blocks*.

Pel que fa a la capa RLC, aquesta sí ofereix serveis per augmentar la fiabilitat dels intercanvis, reordenar missatges i administrar la segmentació. No obstant, això es fa a expenses de la latència que introdueix. És per aquest motiu, que aquests serveis són opcionals. Podria utilitzar-se per a certs fluxos de dades i desactivar-los per a uns altres.

El protocol RLC proposa tres modes:

1. El més simple és el TM o *Transparent Mode*. En aquest cas, el protocol RLC no fa res. És a dir, com no hi ha segmentació, aquest mode està reservat per a missatges curts (principalment per transportar missatges de senyalització de LTE).
2. El segon mode és el UM o *Un-acknowledgement Mode*. Aquest mode s'encarrega de tornar a seqüenciar els blocs rebuts, així com de segmentar i concatenar missatges segon les necessitats de la capa MAC. L'impacte d'aquest mode en la latència és baix, però no millora la fiabilitat. Per tant, està adaptat a aplicacions en temps real, com la comunicació de veu o vídeo.

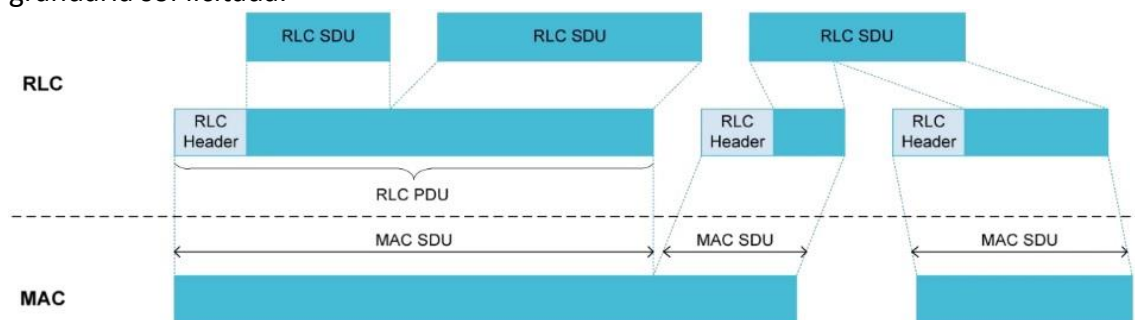
- El tercer mode és el AM o *Acknowledged Mode*. Aquest ofereix els mateixos serveis que el mode UM i afegeix un sistema per retransmetre paquets perduts, augmentat així la fiabilitat. Però, per descomptat, això es fa en detriment de la latència. Per tant, s'adapta millor a aplicacions com la transferència d'arxius i navegació web.

En termes d'arquitectura, diverses instàncies d'RLC poden executar-se en paral·lel per a un enllaç donat. Per exemple, una comunicació de veu sobre IP pot fer servir una instància d'RLC en mode UM, mentre els arxius s'estan transferint amb una altra instància en mode AM.

Com es va dir anteriorment, la capa MAC recull paquets en ambdues instàncies, depenent de les prioritats parametritzades i dels objectius de rendiment.

Com funciona el mode UM o *Un-acknowledgement Mode*?

Quan la capa RLC rep un paquet de la capa superior, el guarda en un buffer mentre espera que la capa MAC sol·liciti una MAC-SDU. Quan la capa MAC sol·licita una MAC-SDU, especifica la grandària de la MAC-SDU que està esperant. Després, la capa RLC s'encarrega d'assemblar els paquets emmagatzemats per a fer un RLC-PDU de la grandària sol·licitada.



Il·lustració 87. Exemple de diferents MAC-SDU formades per diversos RLC-PDU. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

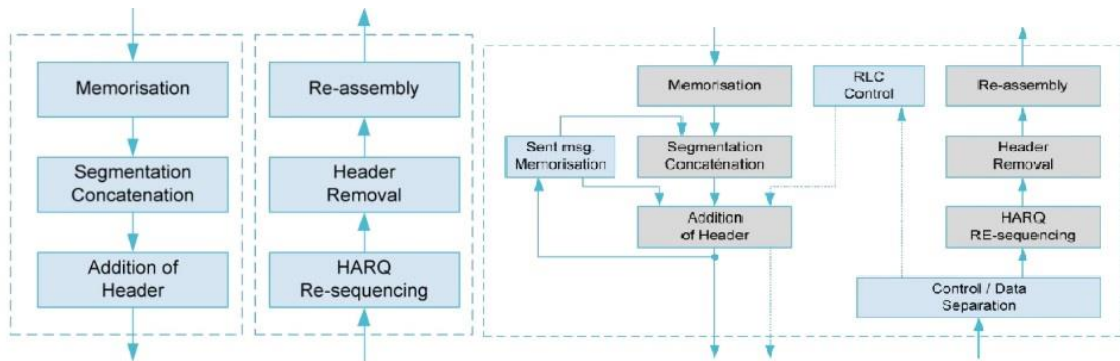
Per fer això, pot concatenar paquets o dividir-los per aconseguir la grandària especificada. La capa RLC també afegeix capçaleres per indicar al receptor on trobar els diferents fragments i a quina instància d'RLC pertanyen. A més a més, aquestes capçaleres contenen nombres de seqüència que permeten col·locar blocs en l'ordre correcte si són de-seqüenciats pel mecanisme *Hybrid ARQ*.

Pel que hem pogut veure de la il·lustració 87, la capa MAC pot reagrupar-se en la mateixa SDU del bloc de transport de diferents instàncies d'RLC. En segon lloc, al tractar de recuperar la seqüència correcta de missatges, el protocol RLC en mode UM pot romandre bloquejat si un segment intermedi no arribés mai. Per evitar-ho, després d'un cert temps el protocol RLC considerarà, eventualment, aquest paquet com a perdut i passarà al següent.

Com funciona el mode AM o *Acknowledged Mode*?

El mode AM funciona de la mateixa manera que el mode UM. Però, el mode AM afegeix la repetició de missatges perduts. Per fer-ho, el protocol RLC memoritza les MAC-SDUs que entrega a la capa MAC, de manera que pot reenviar-les si fos necessari.

Regularment, demana al destinatari que envii l'estat dels missatges que ha rebut. Quant al receptor, aquest respon a la sol·licitud enviant un missatge de senyalització RLC, que es transfereix al canal de dades. Fins ara, tots els intercanvis de control es feien en canals de control dedicats. No obstant, però, ara la resposta del destinatari ha de separar-se del flux de dades i fer-la arribar al controlador RLC. El controlador pot esborrar de la seva memòria els missatges que s'hagin rebut correctament, i reenviar aquells que no s'hagin entregat al destinatari.



Il·lustració 88. Diagrama que mostra les similituds i diferències entre els modes UM(esq.) i AM (dreta). C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Per tant, per al mode AM ha de ser el mateix cos qui gestioni la transmissió i la part de recepció, mentre que en el mode UM aquests processos són independents.

En resum, la capa RLC es troba per damunt de la capa MAC, i s'ocupa de:

- Re-seqüenciar els blocs detinguts pel mecanisme HARQ.
- Gestionar la concatenació i la segmentació de les dades per adaptar-se a la grandària sol·licitada per la capa MAC.
- La retransmissió de blocs perduts.
- QoS o *Quality of Service*. La qualitat de servei és un compromís, especialment entre la fiabilitat i el retard.
- El protocol RLC defineix 3 modes: *Transparent Mode*, *Un-Acknowledged Mode*, i *Acknowledged Mode*.

A més a més:

- En el Mode TM no hi ha segmentació. Es fa servir per transmetre ràpidament missatges curts de senyalització.
- El mode UM permet la segmentació i re-seqüenciació. No retransmet dades, per tant, és prou ràpid i està adaptat a aplicacions en temps real com VoIP.
- Les aplicacions basades en l'intercanvi d'arxius solen ser tolerants respecte el retard, però requereixen fiabilitat. Preferiblement fan servir el mode AM.
- Tant el terminal com el eNodeB poden utilitzar els diferents modes en paral·lel.
- Quan la capa MAC agrupa RLC-PDU, especifica en les seves capçaleres a quin canal lògic pertany (a quina sessió de RLC).

4.5 Accés aleatori

Anteriorment hem vist que per emetre una sol·licitud de transmissió, els terminals primer deuen registrar-se amb el eNodeB. En aquest apartat, *4.5 d'Accés Aleatori*, es pretén precisament, veure com es registra els UEs quan aquests ingressen a una nova cel·la. No oblidem mai que a una xarxa cal definir unes regles, ja que com sabem, diversos usuaris comparteixen el mateix canal (evitant interferències).

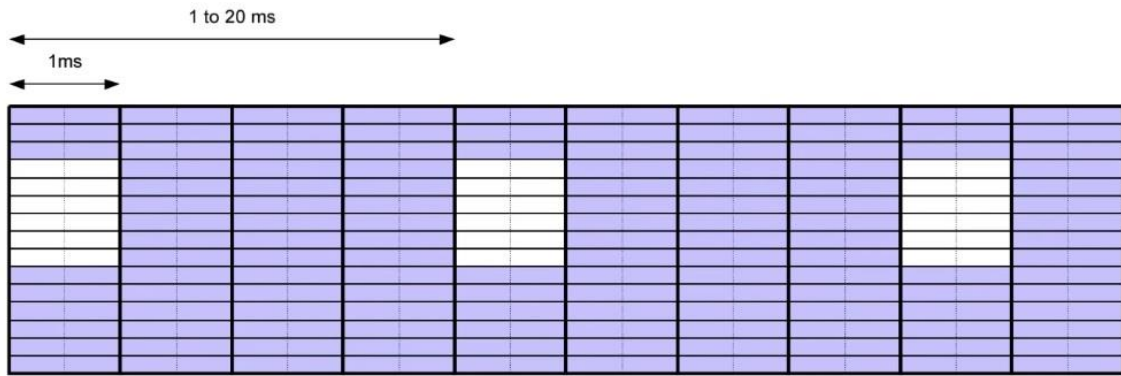
Aquestes regles s'anomenen "protocols d'accés", i serveixen per definir qui pot transmetre, quan i com. Hi ha dos grups de protocols d'accés.

- Protocols "d'accés basats en la contenció": s'especula que les probabilitats de col·lisió són molt petites. Tots els dispositius poden transmetre quan ho desitgin. A causa que existeix la possibilitat d'haver interferències, fan servir missatges de reconeixement ACK per tal de saber si el missatge va ser rebut o no. Per exemple, l'estàndard Wi-Fi funciona així.
- Protocols "d'accés basats en reserves": aquest grup de protocols divideix el recurs o recursos en petits elements que s'assignen als remitents. Per exemple, cada usuari tindrà dret a un torn per transmetre durant 1ms. Aquesta assignació pot ser estàtica, quan es defineix a l'inici. O dinàmica, és a dir, es pot modificar segons les necessitats. El LTE pertany a aquest grup.

Com hem vist d'apartats anteriors d'aquest capítol, els recursos estan dividits en temps i freqüència, els quals s'assignen dinàmicament. A l'enllaç descendent no hi ha problema, perquè totes les transmissions són realitzades pel eNodeB. No obstant, a l'enllaç ascendent, els terminals han d'enviar primer una sol·licitud abans que se'ls assigni recursos. Aquestes sol·licituds van en el canal de control de l'enllaç ascendent, on cada terminal té dret a un torn per transmetre. Això suposa que els terminals estan registrats amb l'estació base. Per a això, els terminals han de ser capaços de transmetre una vegada per donar-se a conèixer.

La solució a l'estàndard LTE és introduir una mica de contenció dins de l'enllaç ascendent, ja que a l'enllaç ascendent, es reserva un grup de recursos perquè els nous terminals puguin indicar la seva presència. Aquest grup de recursos constitueix un nou canal físic anomenant PRACH, de l'anglès *Physical Random Access Channel*, el qual es compon de 6 parells de blocs de recursos adjacents i ocorre entre 1 i 20 mil·lisesegons (depenent dels paràmetres del eNodeB). (Veure il·lustració 89). L'accés a aquest canal es realitza mitjançant una tècnica d'accés particular anomenada CDMA o *Code Division Multiple Access*.

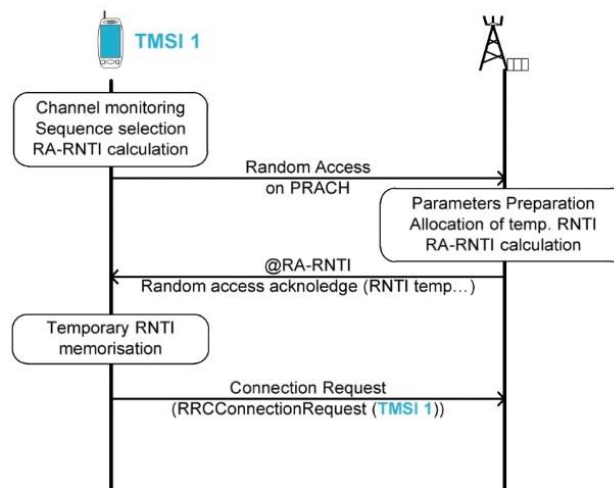
En CDMA, els transmissors codifiquen les seves transmissions amb seqüències, les propietats matemàtiques de les quals són tals que si 2 dispositius transmeten simultàniament amb diferents seqüències, el receptor encara pot distingir entre les dues transmissions. Altre detall sobre aquest canal és: en el mil·lisesegon assignat, només es transmet un símbol, i aquest símbol fa servir 6 *Resource Blocks*. Per tant, quan el terminal transmet en aquest canal, realment envia només un símbol.



Il·lustració 89. Canal PRACH configurable cada 1 a 20ms, amb 6 RB d'amplada 1ms. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Encara que el terminal no transmeti dades, l'estació base pot identificar la seqüència particular utilitzada pel terminal, i associar aquest terminal a aquesta seqüència. Hi ha 64 seqüències disponibles, per tant, podria haver fins a 64 sol·licituds simultànies.

Primerament, anem a veure què succeeix quan un nou terminal ingressa a una cel·la. Com ja sabem, per poder assignar recursos, el eNodeB proporciona a cada terminal un RNTI. És a dir, quan el terminal arriba a la cel·la, escolta al eNodeB per identificar quan està programat el canal d'accés aleatori. Després escull a l'atzar una de les 64 seqüències i transmet en el canal d'accés aleatori, utilitzant aquesta seqüència en el moment determinat. El eNodeB detecta aquesta transmissió i la seqüència, no obstant, encara no coneix la identitat del terminal. Per tant, farà servir aquesta seqüència per identificar temporalment el terminal, i després li assignarà un RNTI. Però arribats a aquest punt, el RNTI només és conegut pel eNodeB, i no el pot fer servir com una direcció per enviar un missatge al terminal. En canvi, farà servir altra identificador, anomenat RA-RNTI o *Random Access RNTI*. Aquest identificador es calcula utilitzant la seqüència ja utilitzada pel terminal mòbil. Llavors, el terminal, igual que el eNodeB, pot calcular aquest RA-RNTI. Ara sí que el eNodeB transmet un missatge al terminal per enviar alguns paràmetres, inclòs el RNTI assignat, i utilitzarà el RA-RNTI com a direcció de destí d'aquest missatge. (Veure il·lustració 90).



Il·lustració 90. Missatges intercanviats quan arriba un nou UE. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

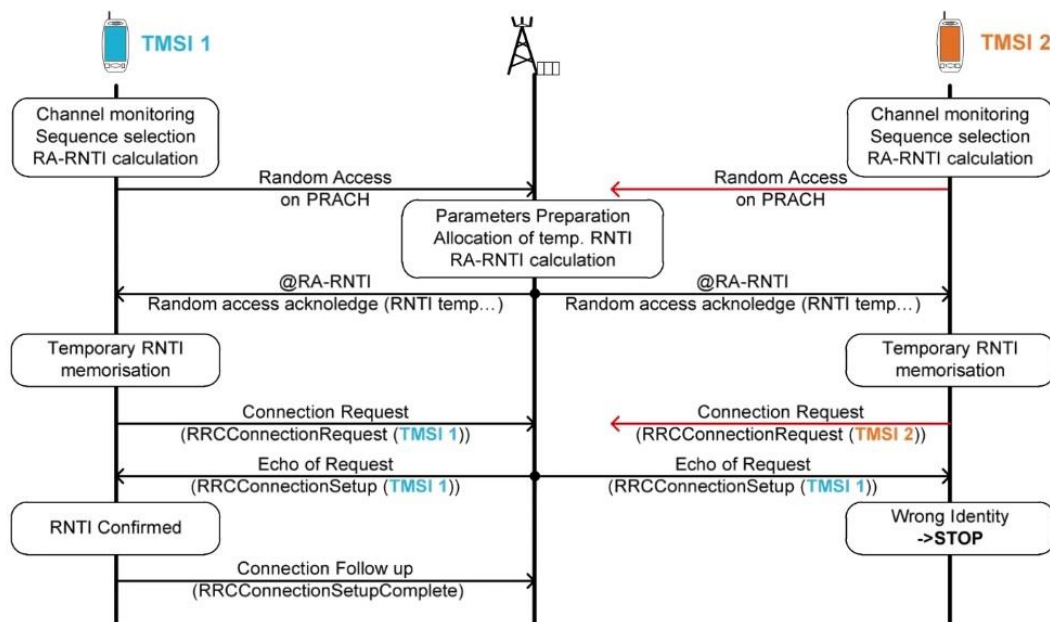
El eNodeB també assigna un recurs a aquest terminal perquè pugui enviar una sol·licitud de connexió. Quan el terminal rep aquest missatge, pot transmetre la seva sol·licitud de transmissió en el recurs assignat utilitzant el RNTI donat. La resta d'aquest procediment es veurà més endavant.

Anem a veure ara què passaria si 2 terminals intenten accedir al canal amb la mateixa seqüència. Primerament, cada terminal passa pel procediment d'accés aleatori creient que són els únics. El eNodeB tindrà en compte una sol·licitud, pensant que és la única, i realitzarà el procediment que acabem de veure: assignarà un RNTI i assignarà un recurs de transmissió, i enviarà aquesta informació al terminal mòbil. Seguidament, els 2 terminals rebran aquest missatge creient que és per a ells, i cadascun transmetrà una sol·licitud de connexió i serà quan es produeixi una interferència.

Pel que fa a aquesta interferència, hi ha dos casos possibles:

- En el primer cas, l'estació base no pot descodificar cap dels missatges i no respondrà. Els terminals, per la seva part, repetiran el procediment més tard.
- En el segon cas, l'estació base pot descodificar un dels missatges creient que es tracta d'un sol usuari i continua el procediment.

Com podem veure, en el segon cas d'interferència és un problema, ja que no sabem quin dels dos terminals s'ha registrat. Per resoldre aquest problema, l'estàndard dicta que el eNodeB ha d'enviar al UE un eco de la sol·licitud de connexió. Com la sol·licitud de connexió conté la identitat del terminal, aquest podrà comparar la seva identitat amb la d'aquesta còpia. Si es tracta de la seva pròpia identitat, continua el procediment de connexió. En cas contrari, detindrà el procediment i començarà de nou més tard.



Il·lustració 91. 2 UEs intentant accedir al canal amb la mateixa seqüència. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

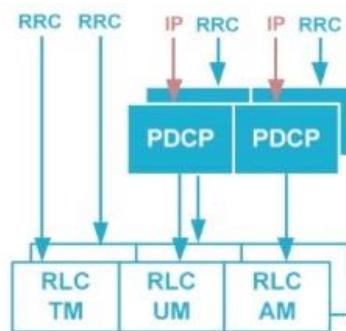
Quant als aspectes més destacats de l'accés aleatori:

- El LTE és un protocol basat en reserves.
- L'assignació de recursos (dividits en *Resource Blocks*) es gestionada pel eNodeB de forma dinàmica.
- Els terminals tenen dret a fer servir el canal de control per enviar les seves sol·licituds de transmissió.
- Perquè un terminal pugui registrar-se en una nova cel·la, han d'utilitzar el canal d'accés aleatori (Random Access Channel) en el uplink.
- Per resoldre ambigüitats resultants de col·lisió, s'utilitza un protocol.
- Una col·lisió ocorre quan diversos usuaris transmeten simultàniament. Per definició, això només ocorre per als protocols basats en la contenció.
- Els protocols basats en reserves defineixen regles per accedir al canal i evitar així les col·lisions.
- El canal d'accés aleatori es defineix en el canal ascendent, per tant, el eNodeB no fa servir aquest canal.
- Perquè un UE sigui conegut pel eNodeB, el terminal transmet en el canal d'accés aleatori, però aquest canal no permet la transmissió d'informació (excepte el nombre de seqüència utilitzat per transmetre). Per tant, el terminal comunicarà el seu IMSI al eNodeB més tard, en el canal de dades. És a dir, quan el eNodeB li hagi assignat un recurs a aquest efecte.
- El *Random Access RNTI* es calcula a partir del nombre de la seqüència utilitzada per transmetre en el canal d'accés aleatori. Si dos terminals fan servir la mateixa seqüència i transmeten en el mateix *sub-frame* d'1ms, tindran un RA-RNTI idèntic. Per tant, el procés de connexió fallarà almenys en un dels dos.
- Si les sol·licituds d'accés de dos terminals diferents col·lisionen, l'estació base ho resol reenviant al terminal un eco de la sol·licitud de connexió.

4.6 PDCP i visió global

Fins ara ens hem centrat en el que succeeix entre el eNodeB i el UE. Pel que fa a aquest apartat veurem com la interfície ràdio està connectada a la xarxa central o EPC, i per tant, a la resta del món (Internet) a través del protocol IP. Finalment donarem una ullada per crear una vista global de la interfície ràdio.

Aquest és el paper fonamental del protocol PDCP o *Packet Data Convergence Protocol*, que es basa en la part superior de la pila de protocols de la interfície ràdio, i s'implementa sobre cada instància d'RLC, excepte aquelles instàncies que treballin en mode transparent (TM). Proporciona la interfície amb el nucli de la xarxa, en altres paraules, el protocol IP per a les dades d'usuari i amb RRC per a missatges de senyalització.



Il·lustració 92. Una instància de PDCP per instància RLC, excepte per al mode TM. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

El protocol PDCP proporciona tres tipus de serveis.

- **Compressió de capçaleres:** Com sabem, les aplicacions depenen de les piles de protocols i cada protocol afegeix la seva pròpia capçalera. Per exemple, les dades de veu de VoIP solen tenir una longitud de 30 bytes. Aquestes dades són encapsulades en RTP o *Real-Time Protocol*, el qual afegeix una capçalera de 12 bytes de longitud. Al seu torn, a la capa de transport es fa servir UDP o *User Data Protocol*, que afegeix 8 bytes. I finalment, a la capa de xarxa, si es fes servir IPv6, aquest afegiria una capçalera de 40 bytes. Per tant, estem transmetent el doble de dades de protocol que de dades útils. A causa que les dades de protocol canvien molt poc d'un paquet a un altre, existeix la possibilitat de compressió. Per fer-ho, l'estàndard LTE fa servir un protocol d'Internet estandarditzat anomenat ROHC o *Robust Header Compression*. No és coincidència que el LTE reutilitzi els protocols d'Internet. De fet, un dels objectius del LTE és reutilitzar, quan sigui possible, els estàndards existents, especialment per als nuclis de la seva xarxa.
- **Evitar la pèrdua de paquets:** Una altra funció del PDCP és la d'evitar la pèrdua de paquets o la des-seqüenciació que pot ocórrer durant els traspassos. Com vam veure, l'RLC gestiona les retransmissions i les noves seqüències, però només dins de la cel·la. El protocol PDCP, quan l'usuari es canvia de cel·la, l'antic eNodeB pot informar al nou eNodeB sobre l'estat actual de les transmissions i pot reenviar les dades que esperen ser transmises.

- **Seguretat:** L'última funció del PDCP és sobre seguretat. Òbviament, l'enllaç ràdio és particularment vulnerable en termes de seguretat, per tant, PDCP permet la codificació de dades per garantir la confidencialitat. A més a més, ofereix un sistema de control d'integritat per verificar que les dades de senyalització no s'hagin modificat durant la transmissió.

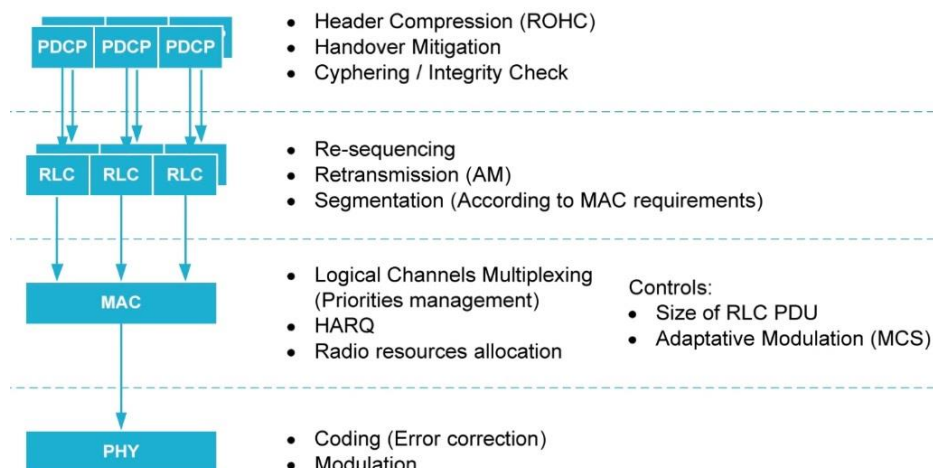
No obstant, no totes les funcions de PDCP es fan servir en tots els casos. A la següent il·lustració hi ha un resum de les funcionalitats del protocol PDCP.

	Control Plane (RRC)		Data Plane (IP)	
	UM	AM	UM	AM
Header Compression (ROHC)	NO (not IP)	NO (not IP)	YES	YES
Loss Prevention (Handover)	NO	YES	NO	YES
Cyphering	YES (optional)	YES (optional)	YES (optional)	YES (optional)
Integrity Check	YES	YES	NO	NO

Il·lustració 93. Taula de funcionalitats del PDCP. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Per exemple, la compressió de capçalera només funciona per a dades encapsulades en IP. Per tant, no es pot implementar per a missatges de control RRC. Pel que fa a la prevenció de pèrdues relacionades amb el traspàs només funciona per a les instàncies d'RLC que treballin en AM. Quant al xifrat, sempre és possible, encara que és opcional (altament recomanable). Finalment, el control d'integritat només és possible per als missatges de control, ja que és aquí on radica la importància. Si el sistema considerés un missatge de control danyat, aquest representaria un defecte de seguretat directe per al LTE. En cas que les aplicacions necessitessin control d'integritat, poden implementar-ho per si mateixes.

Per tancar aquest capítol, el següent diagrama (il·lustració 94) presenta una vista sintetitzada de la pila de protocols de la interfície ràdio.



Il·lustració 94. Vista sintetitzada de la pila de protocols de la interfície ràdio. C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

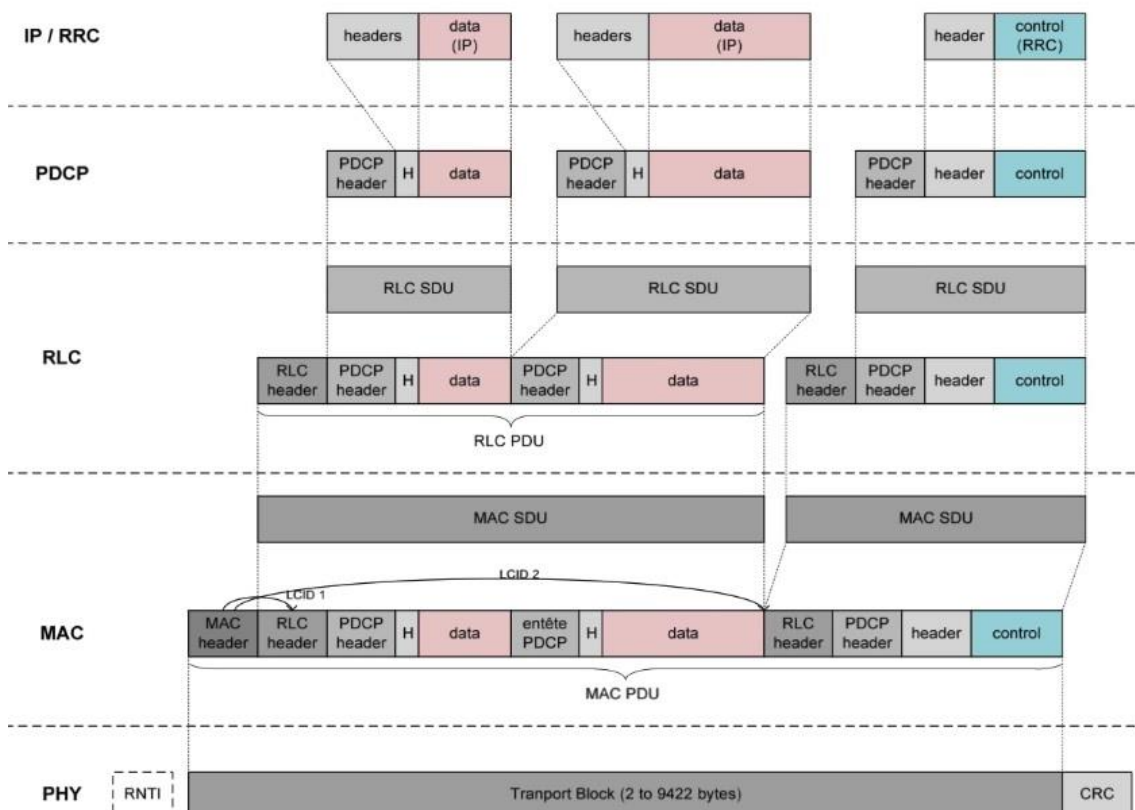
Anant d'a baix cap amunt, el que primer veiem és la capa física. Aquesta capa s'encarrega de la correcció d'errors i de la modulació.

Immediatament la capa superior, és a dir, la capa MAC, controla independentment per a cada terminal l'elecció de la modulació utilitzada per la capa física. Això defineix la capacitat de transmissió. Quant al eNodeB, la capa MAC assegura l'assignació de recursos per als dos enllaços (uplink i downlink). També s'ocupa de la fiabilitat de transmissió de baix nivell amb un mecanisme de repetició anomenat HARQ, i construeix els *Transport Blocks* multiplexant les dades de diferents canals lògics.

La capa RLC proposa serveis opcionals de seqüenciació, segmentació i retransmissió. Diverses instàncies d'RLC s'executen en paral·lel, corresponents a diferents aplicacions i a diferents nivells de servei.

Finalment, la capa PDCP implementa la interfície amb la xarxa central o EPC, sota el protocol IP per a dades útils i RRC per a missatges de senyalització. També proposa serveis opcionals de compressió de capçaleres, mitigació de traspàs i seguretat.

L'última il·lustració (il·lustració 95) d'aquest capítol pretén representar la ruta o camí seguit pels paquets de dades.



Il·lustració 95. Diagrama de referència de la ruta seguida pels paquets. Dades d'usuari (color rosa). Missatges RRC (color blau). C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Assenyalant el més important d'aquest diagrama de referència:

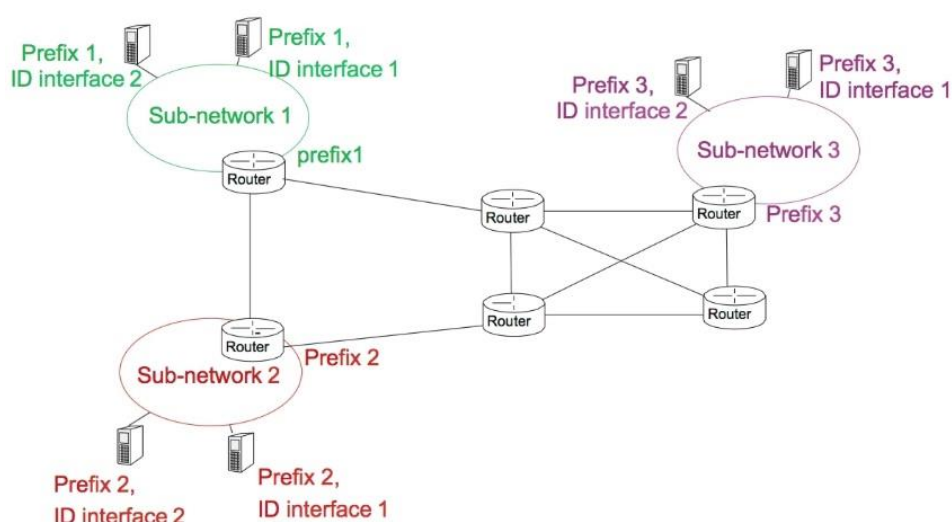
- En el nivell PDCP veiem la compressió de la capçalera que s'aplica als missatges IP i no a RRC.
- En el nivell RLC, els dos missatges de color rosa pertanyen a la mateixa instància d'RLC, és a dir, han sigut concatenats en el mateix RLC-PDU. No obstant, aquest no és el cas per al missatge de control.
- En el nivell MAC, es fusiona la MAC-PDU de les dues instàncies d'RLC, i s'afegeix capçaleres per crear un *Transport Block* que s'entregarà a la capa física.
- A la capa física, el RNTI no es transmet amb les dades, però es proporciona implícitament a través de la taula d'assignació.

5. Gestió de flux de dades

5.0 Principi d'encapsulació i túnels

Per definició de xarxa mòbil, podem trobar-nos a qualsevol lloc d'aquesta. Però, com es poden transmetre els paquets de dades al nostre terminal? És a dir, a la cel·la on estem. Per poder donar resposta a aquesta pregunta, cal tornar de nou a les xarxes IP.

Una xarxa IP és, en primer lloc, una interconnexió de diferents subxarxes. O millor dit, un conjunt de dispositius que estan interconnectats mitjançant alguna tecnologia de nivell 2 (nivell d'enllaç dins de la capa OSI), i que per tant, no necessiten d'un router per poder comunicar-se. No obstant, a la següent il·lustració, les diferents subxarxes estan connectades amb routers, ja que aquests tenen implementada la funcionalitat de switching.



Il·lustració 96. Interconnexió de diferents subxarxes. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

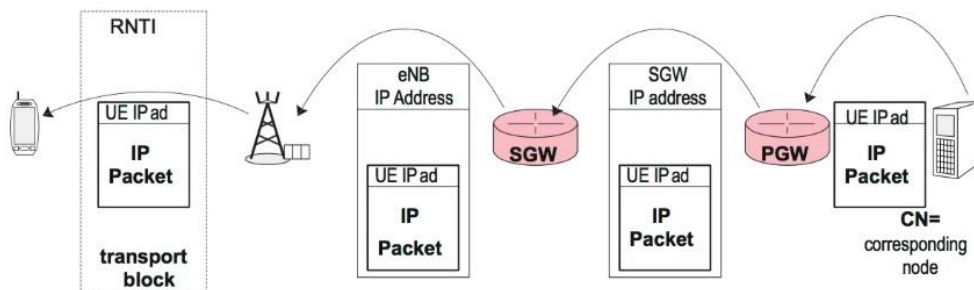
Com es pot extreure de l'escenari anterior, una subxarxa es caracteritza per un prefix. Cada dispositiu o màquina ha d'estar necessàriament dins d'una subxarxa i la seva adreça ha d'estar composta per un prefix, que és específic d'aquesta subxarxa, i un identificador o ID d'interfície. Cada paquet IP que es transfereixi d'una màquina a una altra, tindrà una direcció IP origen i una direcció IP destí. Ambdues adreces contenen el prefix i la ID d'interfície. Dins d'una xarxa interconnectada, com pot ser Internet, només es fa servir el prefix per a l'encaminament. A l'exemple anterior, el prefix 2 s'analitzaria per encaminar el paquet cap a la subxarxa correcta.

Si considerem les xarxes mòbils, tenim un problema quan es mou un terminal, des d'una subxarxa, com per exemple, d'una subxarxa 2 a una subxarxa 1. Els dissenyadors de xarxes mòbils, quan van estandarditzar les xarxes 4G van decidir associar un prefix al PGW o Packet Gateway.

Lavors, quan consultem un servidor, per exemple, veiem un vídeo en el nostre smartphone fent servir la xarxa 4G del nostre operador, els paquets IP creats pel servidor contenen la direcció de destí del nostre terminal mòbil, que és la direcció IP del UE el qual inclou un prefix específic al PGW. Aquest paquet IP simplement s'encamina cap al PGW.

Tenint en compte que el que es vol és transmetre el paquet al terminal correcte, primerament es transmetrà al SGW o Serving Gateway, col·locant-ho en un altre paquet IP. Per tant, aquest paquet IP tindrà l'adreça IP del Serving Gateway com a adreça de destinació. És a dir, el paquet IP s'encamina des del PGW al SGW encapsulant el paquet IP (posar un paquet IP dins d'un altre paquet IP).

Es fa servir la mateixa encapsulació entre el SGW i el eNodeB. És a dir, en aquest cas tindrem l'adreça del eNodeB com a adreça de destinació. (Veure il·lustració 97).

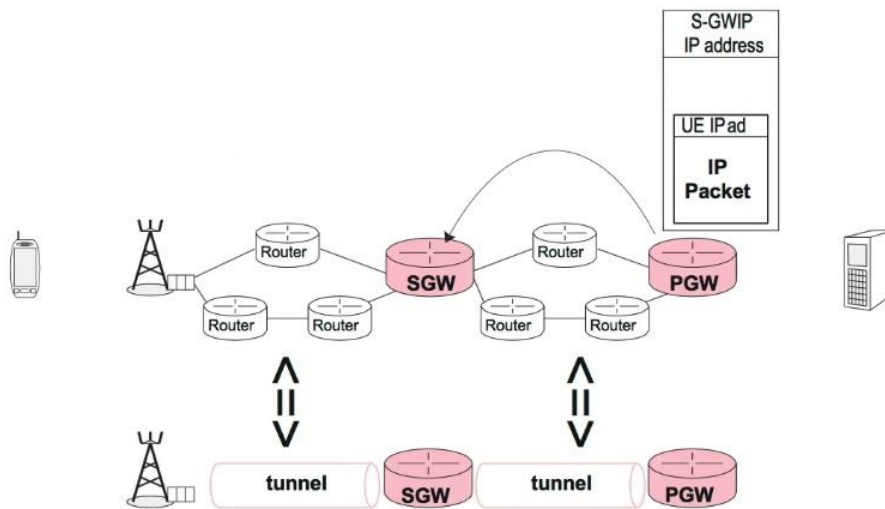


Il·lustració 97. Principi d'encapsulació en una xarxa 4G. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Pel que fa a la interfície ràdio, el paquet IP de l'usuari es col·loca en un bloc de transport o *Transport Block*, i aquest és enviat a un RNTI específic. És a dir, enviat a un identificador temporal de la xarxa de ràdio que correspon al terminal mòbil.

Veient de nou el que succeeix dins del nucli d'una xarxa 4G, entre el SGW i el PGW tenim una xarxa IP composta per diferents encaminadors. Independentment de la interconnexió entre aquests encaminadors, el paquet IP està destinat a l'adreça IP que proporciona l'adreça del SGW, el que significa que aquest paquet s'encamina cap al SGW. Per tant, cada paquet que surt del PGW s'enviarà cap al SGW. Dit d'una altra manera, tenim un mecanisme que actua com un túnel entre el PGW i el SGW.

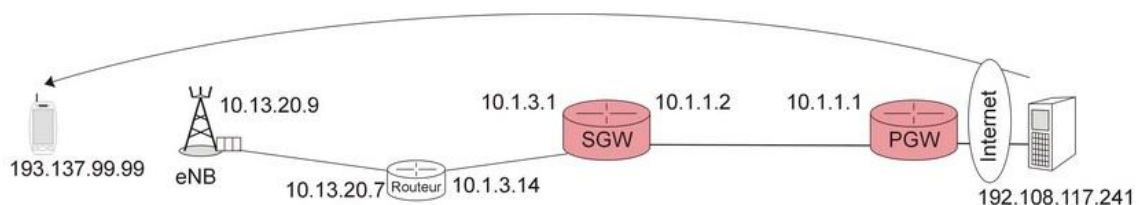
A aquest principi se li diu "tunneling" o tunelització i és el mateix principi que es fa servir entre el SGW i el eNodeB; tenim per tant, un segon túnel. I després, una transmissió en la interfície ràdio.



Il·lustració 98. Els paquets surten del PGW i arriben al SGW com si hagués un túnel establert entre el PGW i el SGW. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Podem resumir que els paquets IP que s'han de transmetre a un terminal mòbil, s'encaminaran sistemàticament al PGW. Després, aquests paquets IP, dins la xarxa central o EPC, es col·loquen en altres paquets IP, l'operació del qual es coneix com encapsulació. Per tant, són paquets que es van transmetent *hop-by-hop* fins arribar al terminal com si estiguessin en un túnel, des del PGW al SGW, i del SGW al eNodeB.

Per sintetitzar, anem a veure el següent exemple. Considerarem la configuració de la il·lustració 99, format per un UE, eNodeB, SGW i PGW d'un operador mòbil, amb els seus routers intermedis. El terminal mòbil, és a dir, el UE, té l'adreça IP 193.137.99.99 i rep dades d'un servidor amb l'adreça 192.108.117.241. Com a incís, dir que en aquest Treball considerarem que els terminals tenen adreces públiques. No obstant, a la pràctica es fan servir adreces privades.



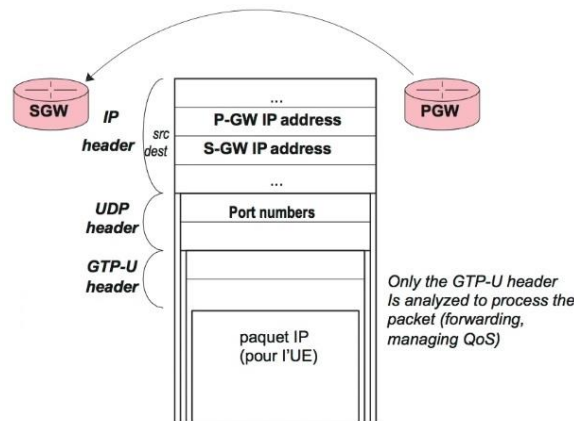
Il·lustració 99. Escenari d'exemple d'una xarxa 4G. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Ens podem preguntar, quina serà l'adreça de destí en el paquet IP generat pel servidor? El servidor envia el paquet IP al terminal, llavors el servidor utilitza l'adreça IP del terminal com a adreça de destí. En aquest cas, hi ha una traducció d'adreces de xarxa o NAT, de l'anglès *Network Address Translation* realitzat pel PGW. Encara que el NAT afegeix certa complexitat, no canvia els protocols ni el processament de les xarxes mòbils.

D'altra banda, com una xarxa 4G es basa en el mecanisme d'encapsulació i en el principi de túnel, el paquet IP serà col·locat dins d'un altre paquet IP. Per tant, s'annexen dos túnels: PGW-SGW i SGW-eNodeB. Encara que alguns fabricants d'infraestructura de xarxa proposen un túnel directe entre el PGW-eNodeB, com succeeix a les xarxes 2G-3G, aquesta no és una solució estàndard.

Quan parlem d'un protocol, estem parlant de les capçaleres corresponents a aquest protocol. Per tant, el paquets IP inclouen una adreça origen i una adreça destí, i pel que fa a la capçalera UDP inclou els números de port.

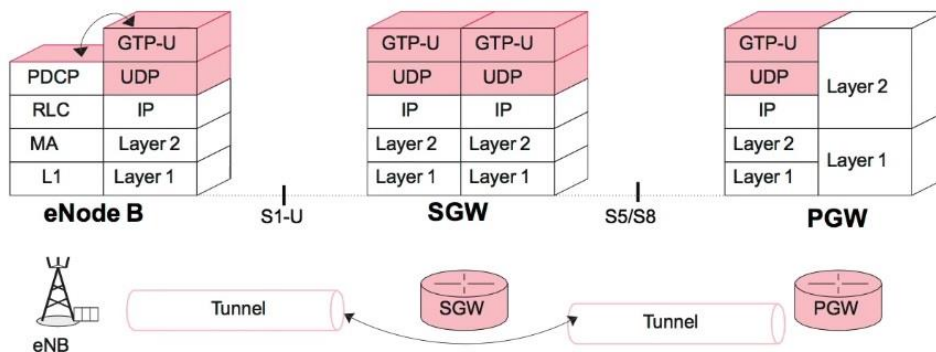
A priori podríem posar directament el paquet IP d'usuari dins del datagrama IP, però com hi ha variacions de protocol IP (IPv4, IPv6) volem mantenir la possibilitat d'evolució i permetre el transport d'altres protocols. Per poder fer això, es va desenvolupar un protocol addicional anomenat GTP, del anglès *GPRS Tunneling Protocol*. La idea essencial d'aquest protocol és afegir un format que permeti un processament consistent per a tots els protocols d'usuari, ja sigui IPv4, IPv6 o qualsevol altre. Per tant, tenim diferents nivells d'encapçalats. A continuació es pot veure a la il·lustració 101 l'encapçalat addicional en la capa GTP.



Il·lustració 101. Lloc que ocupa el GTP a la pila de protocols. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Al següent apartat s'explicarà què hi ha a la capçalera GTP. No obstant, si ara ens fixem a la pila de protocols, sobre la capa IP tenim UDP, i per sobre de la capa UDP tenim la capa GTP.

D'altra banda, s'entén per paquets d'usuari aquells paquets, per exemple, que contenen una seqüència de vídeo en cas que estiguem veient un vídeo en el nostre smartphone. Per tant, s'especifica GTP-U, on "U" vol dir *user plane* o pla d'usuari. Si considerem tot de nou, tenim la pila de protocols que aviem vist anteriorment entre el SGW i el PGW. I tenim la mateixa pila de protocols entre el SGW i el eNodeB.



Il·lustració 102. Vista de la pila de protocols entre els nodes del nucli de xarxa. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

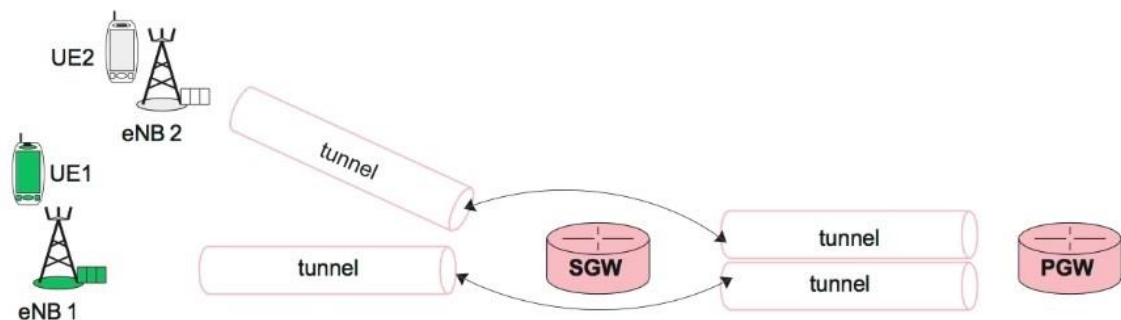
Observant la pila de protocols de la il·lustració anterior, GTP-U és per sobre d'UDP, al seu torn aquest per sobre d'IP, al seu torn IP per sobre de les capes físiques i d'enllaç de dades. Per tant, trobem GTP-U a la interfície S1-U, així com a la interfície S5/S8.

Resumint, el paquets IP d'usuari es col·loquen en paquets GTP-U, que al seu torn són col·locats en datagrames UDP que són transportats en paquets IP. És a dir, la pila de protocols entre el PGW-SGW i el SGW-eNodeB inclou IP/UDP/GTP-U/IP.

5.2 Identificació i gestió de túnels

Com podem transmetre de manera eficient i ràpida els paquets que poden arribar des de diferents PGW i que estan destinats a diferents terminals? És evident que existeix la possibilitat que hàgim d'enviar-los a diferents eNodeBs, llavors, com podem gestionar i dirigir ràpidament aquests paquets cap al eNodeB correcte?

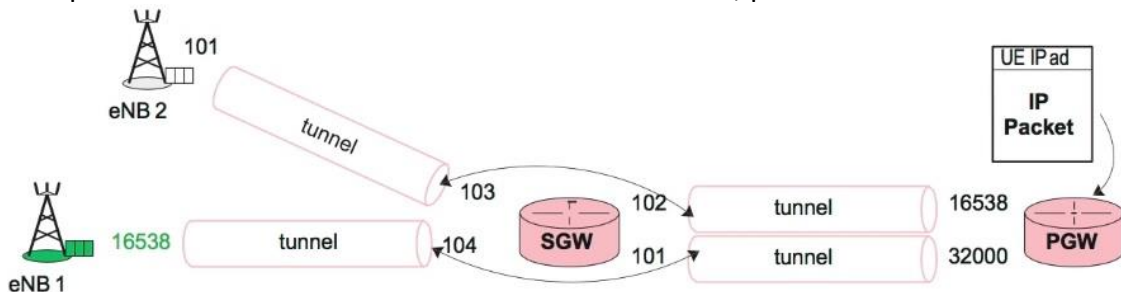
Cal recordar que tenim milions d'usuaris i que no tots estan en el mateix eNodeB. Hi ha milers o desenes de milers de eNodeBs, i que no tots són atesos pel mateix SGW. Però només sol haver-hi un, dos o tres PGW. En el major dels casos fins a 10 PGW, com succeeix a la Xina. Per tant, és necessari tenir la capacitat de gestionar diferents túnels. En el següent exemple (veure il·lustració 103), es pot apreciar que entre el PGW i el SGW hi ha dos túnels.



Il·lustració 103. Dos túnels entre el PGW i el SGW. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Com s'observa, els paquets destinats al UE2 haurien de ser reenviats pel SGW a través del túnel superior, el que conduiria al eNodeB2. De la mateixa manera, els paquets destinats al UE1 haurien de reenviar-se a través del túnel inferior perquè siguin conduïts cap al eNodeB1. Per tant, el processament dels paquets provinents del PGW hauria de ser específic del túnel al llarg del qual s'envien. Sorgeix la necessitat d'un processament molt ràpid i la possibilitat de fer servir diversos túnels per als usuaris.

Es podria dir que el SGW té una certa quantitat de túnels que poden provenir d'altres nodes, on s'enumera el punt final de cada túnel amb un nombre únic. En el següent exemple s'enumeren amb els nombres 101-102-103-104, per als 4 túnels.

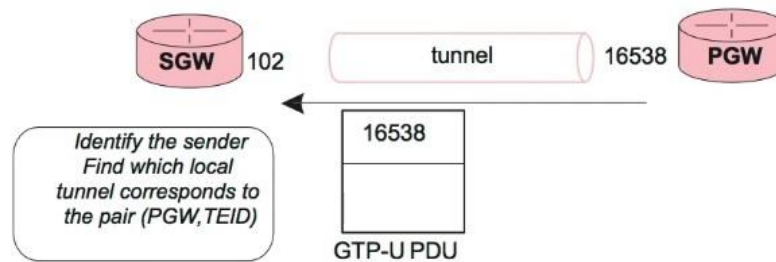


Il·lustració 104. Numeració dels extrems de cada túnel. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Aquests nombres s'anomenen TEID o *Tunnel Endpoint Identifier*. Per tant, cada túnel té dos identificadors perquè cada túnel té dos extrems.

Considerant el túnel inferior entre el SGW i el PGW, des del punt de vista del SGW, el TEID és 101. Però des del punt de vista del PGW és el 32000. Encara que la numeració utilitzada per cada node és única, no hi ha res que impedeixi que dos nodes diferents utilitzin el mateix node. El TEID està codificat amb 32 bits o 4 bytes, i ha de ser col·locat a cada paquet per facilitar el processament.

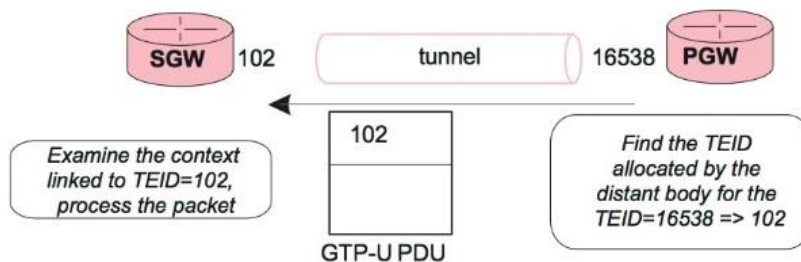
La primera solució que veurem és col·locar el TEID assignat pel transmissor a la capçalera GTP. Si prenem per cas, un paquet que arriba al PGW, aquest paquet és col·locat dins d'un altre paquet, i en el nivell GTP es col·locarà el nombre de túnel a la capçalera. Si tenim el nombre 16538, l'entitat receptora (SGW) haurà d'identificar d'on prové el paquet, ja que s'ha fet servir la identificació del remitent.



Il·lustració 105. Solució 1: posar el TEID assignat per l'emissor, a la capçalera GTP. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Com cada emissor té el seu propi sistema d'identificació, el SGW necessita trobar el remitent del paquet i l'identificador del túnel local corresponent a aquest parell. El processament és complicat perquè el receptor ha de conèixer el TEID utilitzat pel node de l'altre extrem del túnel. És a dir, cal analitzar el TEID i l'adreça origen. Això fa que aquest no sigui un bon mètode.

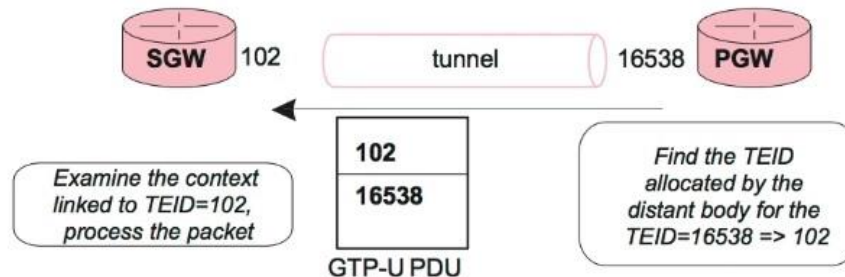
Pel que fa a la segona possibilitat, es tracta de posar el TEID assignat pel receptor a la capçalera. És a dir, un procés administrat pel remitent. Si el remitent desitja enviar un paquet en un túnel identificat localment com 16538, ha de trobar el TEID corresponent assignat pel SGW.



Il·lustració 106. Solució 2: posar el TEID assignat pel receptor, a la capçalera GTP. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

L'avantatge d'aquesta solució és que el receptor no ha de fer cap conversió. És a dir, rep el paquet pel túnel amb TEID 102 i el pot processar directament. Per tant, hi ha unicitat. Encara que el TEID 102 fou assignat pel SGW, només hi haurà un valor 102 per a un túnel determinat que arribi al SGW. Aquesta segona solució pot augmentar la complexitat del transmissor, però una considerable simplificació pel receptor.

La tercera possibilitat tracta de posar els dos TEID: 102 i 16538. A causa que es posen els dos TEID, en el camp destinatari es podria posar: 102. Per tant, es tindria un processament simple en el receptor, encara que la capçalera sigui una mica més llarga. L'avantatge en aquest cas és que si un dels nodes vol canviar el valor dels TEID el algun moment determinat, pot fer-ho sense necessitat de processament addicional.



Il·lustració 107. Solució 3: posar ambdós TEIDs a la capçalera GTP. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Si el PGW vol canviar el TEID de 16538 a 33 per alguna raó, només necessita reemplaçar el 33 a la capçalera. El receptor, és a dir, el SGW, tindrà constància que l'altre extrem del túnel ha canviat el seu TEID, i emmagatzemarà aquest nou valor per al túnel. Aquesta solució no es retinguda per al protocol GTP. Com es veurà en el següent apartat, s'utilitza en un protocol entre el eNodeB i el MME.

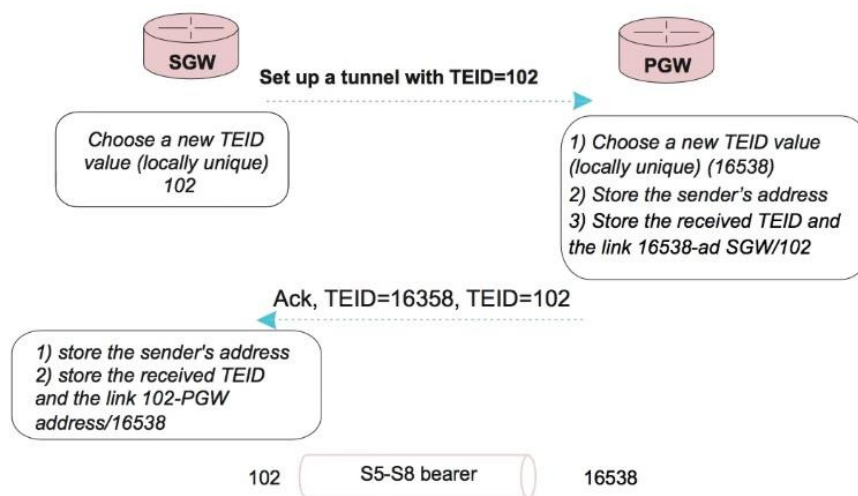
Per concloure aquest apartat:

- Cada extrem de cada túnel s'identifica mitjançant un TEID o *Tunnel Endpoint Identifier*.
- El TEID està codificat amb 32 bits. Codificar el TEID amb 3 o 8 bits no garanteix la singularitat. Amb 32 bits es pot aconseguir 2^{32} túnels diferents que arribin a un node.
- El TEID és assignat pel node que correspon a cada extrem del túnel i és localment únic.
- Quan un paquet s'envia a través d'un túnel, el TEID assignat pel receptor es col·loca a la capçalera GTP per l'emissor. Si un paquet es enviat en un túnel des del SGW al PGW, el TEID que es col·locarà en la capçalera GTP és l'assignat pel PGW.

5.3 Transmissió de paquets en un túnel

Una vegada que hem vist la importància del TEID o l'ID del punt final del túnel, com podem establir un túnel i assegurar-nos que ambdós punts finals coneixen ambdós TEID? Com es processen els paquets una vegada que s'ha establert el túnel?

Si considerem la inicialització d'un túnel, el SGW, per exemple, escollirà un nou i únic valor de TEID: 102. Una vegada escollit el valor del TEID, enviarà una sol·licitud per establir un túnel, dient "nou túnel amb TEID 102". El PGW escollirà un nou valor de TEID que serà únic per a ell, en aquest exemple, TEID 16538 i emmagatzemarà l'adreça del remitent (l'adreça del SGW) i també emmagatzemarà el valor del TEID rebut. Finalment crearà un enllaç entre 16538 i 102. (Veure il·lustració 108).

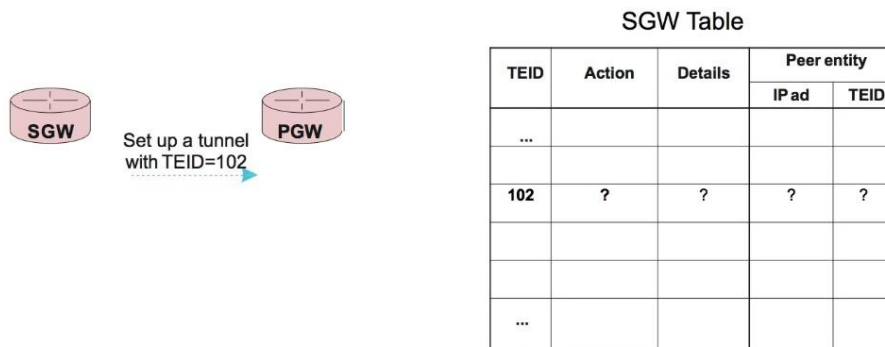


Il·lustració 108. Inicialització d'un túnel entre el SGW i el PGW. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

El PGW enviarà un missatge de justificant de recepció o *acknowledgement* (ACK) amb tots dos TEID. D'aquesta manera, el SGW coneix la correspondència entre el seu ID túnel i l'ID del túnel assignat pel PGW. Al final d'aquest intercanvi, s'ha establert un túnel amb un extrem amb TEID de 102, i en l'altre extrem 16538. Per tant, al finalitzar aquest intercanvi de missatges de control (protocol GTP-C), cada extrem coneix el TEID assignat pel node oposat.

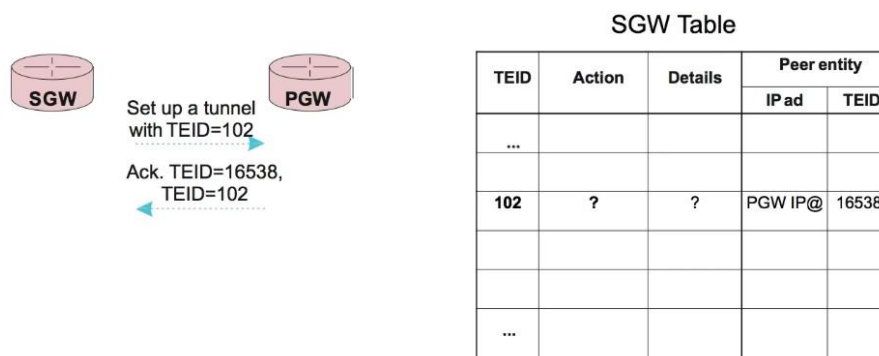
Si indaguem una mica més per veure quin processament es realitza en el SGW, veiem que el processament és relativament simple una vegada que s'ha configurat una taula. La següent explicació és vàlida per il·lustrar el principi, encara que la implementació real en el SGW no sigui exactament així. No obstant, ajuda a comprendre realment com s'administra els TEID i com s'annexen dos túnels.

A la taula SGW tenim els valors TEID, les accions que es duran a terme, detalls d'aquestes accions i per últim, quin és el túnel del node parell. Com a exemple, quan un SGW estableix un túnel, indica TEID 102. Pel que crearem una entrada en la fila 102 de la taula SGW. (Veure il·lustració 109).



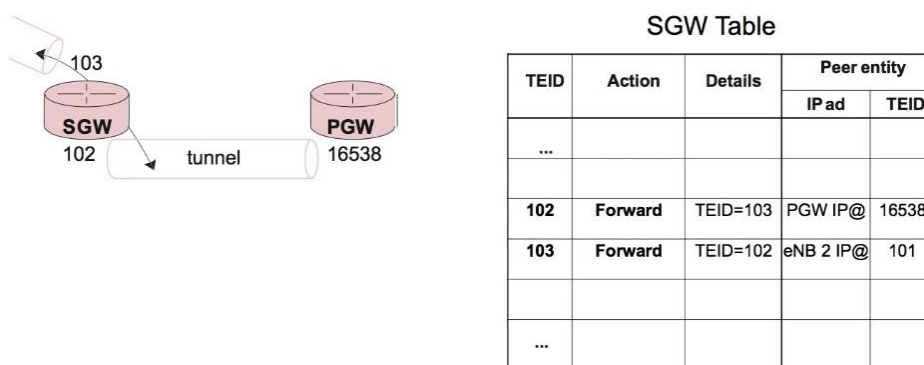
Il·lustració 109. SGW estableix el túnel indicant TEID 102. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Com el SGW coneix l'adreça IP del PGW, una vegada que el PGW ha respost, el SGW sap que el PGW ha assignat el valor 16538 per al túnel i per al TEID d'aquest túnel. Aquest TEID s'emmagatzema en la fila 102.



Il·lustració 110. SGW actualitza la seva taula quan rep l'ACK del PGW. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Una vegada que el SGW ha rebut l'ACK del PGW, es diu que el túnel ha estat establert. Ara podem tenir un túnel entre el SGW i el eNodeB. Aquest túnel, per exemple, s'estableix fent servir el valor 103 com a TEID: l'adreça corresponent serà l'adreça del eNodeB (eNodeB2 en l'exemple) i el TEID 101.



Il·lustració 111. SGW actualitza la taula per incorporar el túnel amb TEID 103. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Com veiem, el TEID 101 és l'escollit pel eNodeB2. Cada paquet que arriba al túnel 103, haurà de ser reenviat al túnel 102. L'acció de retransmissió s'anomena *Forwarding* o

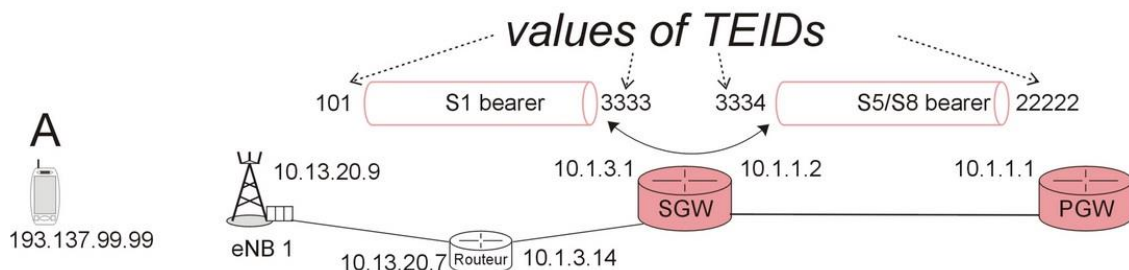
reenviament. Si ens fixem a la taula, la columna detalls indica que reenviem paquets del túnel 103 al túnel 102.

La lectura que cal fer és la següent. Si mirem el processament, el paquet que arriba per exemple, des del eNodeB2, contindrà el TEID 103. EL SGW processa el paquet veient que l'ha de reenviar al túnel 102. A qui correspon el túnel 102? Correspon al túnel 16538, és a dir, correspon al PGW el túnel del qual és 16538.

Llavors, cada paquet que es rep amb TEID 103, el SGW el reenvia al PGW amb TEID 16538. Els principis que regeixen els túnels i el seu ús per als paquets d'enllaç ascendent també són vàlids per als paquets de l'enllaç descendent.

Hem vist com els paquets, pel que fa al pla d'usuari, són processats pels nodes d'una xarxa 4G: cada paquet rebut per un node, que travessa un túnel, inclou el TEID local d'aquest túnel. Com el TEID és únic, és possible definir una taula de cerca en el node on el TEID és l'entrada i indicar com es processa el paquet. D'aquesta manera, processar un paquet és molt simple i és possible administrar una gran quantitat de túnels. A més, es pot associar a un nivell de qualitat de serveis a un túnel. L'associació d'un túnel de dades i un nivell de qualitat de servei es denomina *Data Bearer* o Portador de Dades.

Per sintetitzar aquest apartat, considerarem la xarxa de la il·lustració següent. Suposem que els túnels especificats en la il·lustració ja estan establerts. L'usuari del terminal A visita un servidor. Aquest servidor envia un paquet IP al terminal 193.127.99.99. Aquest paquet és reenviat pel PGW.



Il·lustració 112. Suposem que la xarxa està limitada als nodes que es troben presents. Només els túnels especificats estan establerts. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

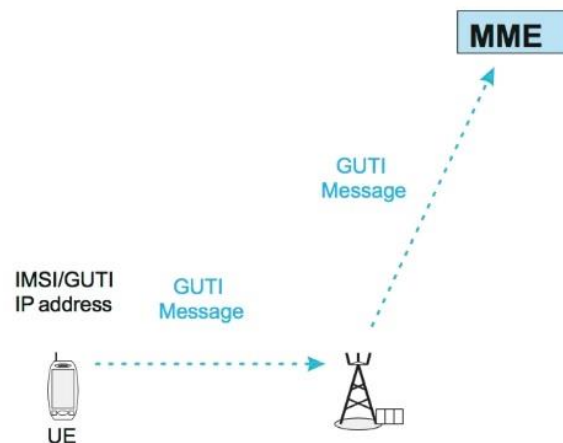
Si estudiem el valor del o dels TEID(s) a la capçalera GTP-U del paquet IP enviat pel PGW, podem dir que només hi ha un TEID el valor del qual és 3334. De fet, la capçalera GTP-U conté només una identitat de túnel (d'acord amb les especificacions del protocol). El principi es basa en identificar la identitat del túnel assignat pel destinatari del paquet. El paquet considerat s'envia des del PGW al SGW, i com el valor del TEID assignat pel SGW per a aquest túnel és el 3334, això vol dir que el paquet només conté un TEID i el seu valor és el 3334.

Una vegada que el paquet és rebut pel SGW, anem a veure com reenvia el paquet aquest node. Només hi haurà un TEID amb valor 101, ja que el valor del TEID assignat pel eNodeB1 és el 101. És a dir, ara el paquet és enviat des del SGW cap al eNodeB1.

5.4 Connexió S1-AP

En una xarxa mòbil, com pot ser la xarxa d'un operador, normalment hi ha un parell de MMEs i al voltant de 20 milions de terminals o UE. Per tant, un MME sol gestionar uns 10 milions de subscriptors. No obstant, com pot un MME gestionar els diferents estats i activitats de diversos milions de terminals al mateix temps? El que veurem en aquest apartat és com estructurar els intercanvis d'una manera senzilla per facilitar aquests intercanvis entre un MME i els milions d'UE que administra.

Per entendre-ho, es representa un sol terminal (UE) amb una estació base (eNodeB) i un MME.



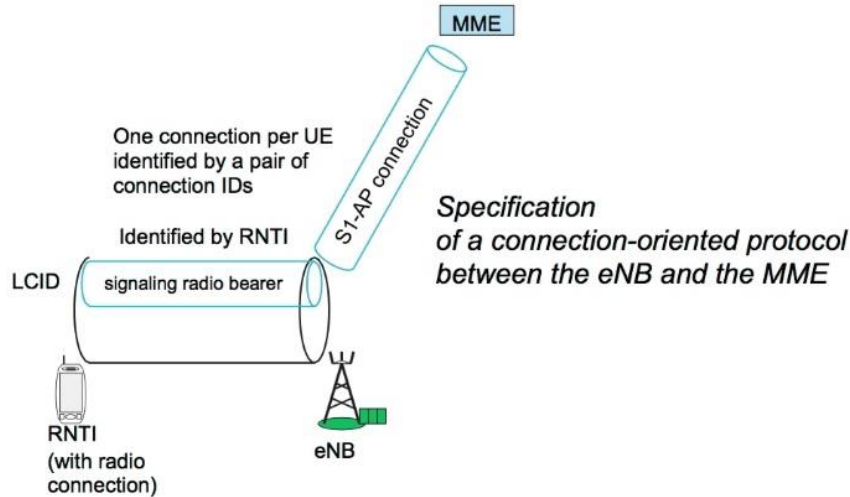
Il·lustració 113. Gestió del diàleg entre el UE i el MME. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Podríem pensar que cada missatge transmès per un terminal té una identitat. Llavors, quan un MME rep el missatge, sap de quin terminal prové. Una identitat de terminal que no canvia és el IMSI o *International Mobile Subscriber Identity*, però hi hauria un problema de confidencialitat si el IMSI s'envia a la interfície ràdio, ja que si algú està escoltant pot identificar qui és a la cel·la. Una altra opció seria fer servir el GUTI o *Globally Unique Temporary Identity*, però aquest GUTI es renova per raons de seguretat. Si el GUTI canvia, el MME hauria de recordar que es tracta del mateix terminal, pel que administrar-ho seria una mica complicat.

Per tant, necessitem una altra solució. En termes de transmissió de ràdio, cada terminal amb una connexió de ràdio s'identifica mitjançant un RNTI o *Radio Network Temporary Identifier*, que és assignat pel eNodeB. Recordem que dins d'una connexió ràdio pot haver-hi missatges de dades i missatges de control, per exemple: el canvi de la clau de seguretat o una sol·licitud d'associació a la xarxa. Ara només considerarem els missatges de control, és a dir, els missatges de senyalització intercanviats entre el UE i el MME.

Cada missatge de senyalització, des d'un terminal donat, és transportat en un canal lògic que s'identifica mitjançant un LCID o *Logical Channel Identifier*. Per tant, una portadora de senyalització s'identifica per a cada terminal per un RNTI+LCID.

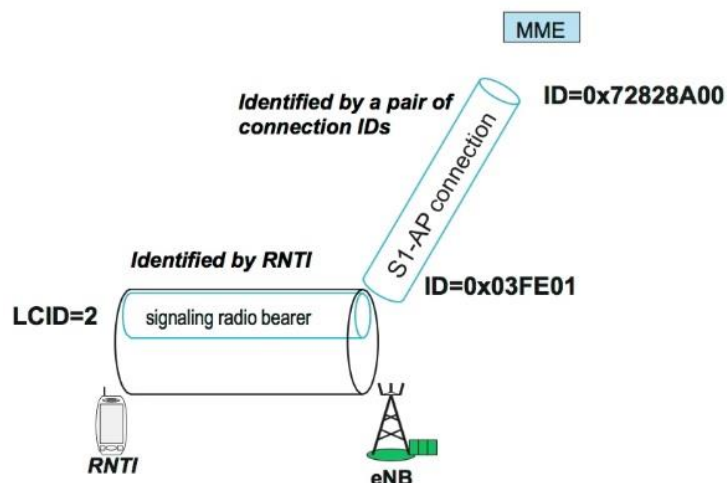
Es defineix entre el eNodeB i el MME un protocol anomenat S1-AP o Protocol d'Aplicació en la interfície S1. La solució per administrar múltiples diàlegs és reutilitzar el mateix principi de túnel que hem vist anteriorment, però d'una manera lleugerament diferent: el protocol S1-AP està orientat a connexió i hi haurà tantes connexions com terminals estiguin connectats.



Il·lustració 114. Connexió S1-AP en una xarxa 4G. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

És a dir, tenim una connexió per UE i, de la mateixa manera que fèiem servir identificadors de túnel a cada extrem d'aquest, aquí també s'utilitzen identificadors de connexió: un identificador a cada extrem. Per tant, associarem la portadora de senyalització i la connexió S1-AP. Associació que es realitza a nivell del eNodeB.

En el següent exemple imaginem que hi ha un terminal, un eNodeB, un MME, una connexió ràdio establerta i una connexió S1-AP que suposem que s'ha establert.

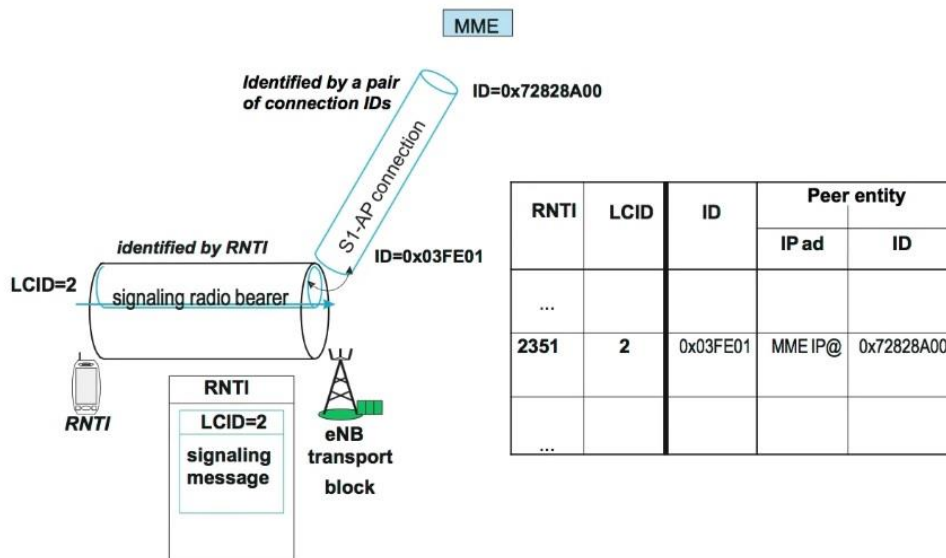


Il·lustració 115. Exemple de transmissió d'un missatge de senyalització del UE al MME. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Cada connexió es referencia a cada extrem mitjançant un identificador. Aquí, prenem com a exemple on hem donat l'identificador hexadecimal 03FE01 al costat del eNodeB. Quan el terminal envia un missatge, per exemple, una sol·licitud específic a la xarxa,

aquest missatge inclou, en la capçalera, el valor del LCID en un bloc de ràdio associat amb un RNTI corresponent al telèfon cel·lular.

El eNodeB té a la memòria una taula de cerca: cada RNTI i LCID està associat amb l'identificador de connexió local i amb l'identificador de connexió de l'entitat, en aquest cas, del MME, i de l'adreça IP d'aquesta.



Il·lustració 116. Identificador de connexió local (ID) associat al RNTI i al LCID. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Quan el missatge de senyalització es retransmès pel eNodeB, inclourà l'identificador de connexió del costat del MME i també l'identificador de connexió del costat del eNodeB.

En comparació amb el que hem vist en la presentació sobre túnels, aquí es va escollir establir ambdós identificadors sistemàticament a cada missatge, a fi de mantenir fàcilment la referència d'una connexió quan un terminal s'està movent a una nova cel·la.

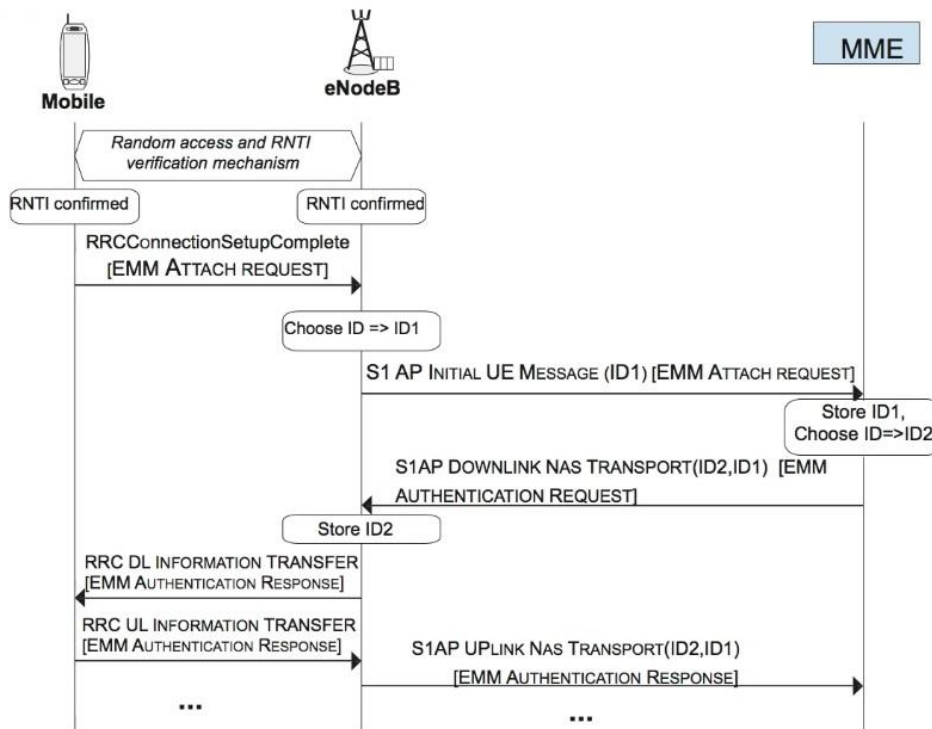
En resum:

- Per cada UE actiu a la xarxa, s'estableix una connexió específica entre el eNodeB, que serveix al UE i al MME.
- Hi ha tantes connexions com quantitat de terminals controlats pel MME.
- Cada connexió es referencia per un parell d'identificadors de connexió (un a cada extrem de la connexió).
- El protocol S1-AP opera entre el eNodeB i el MME. S1 perquè la interfície es troba entre el eNodeB i la xarxa central. Per tant, el protocol S1-AP s'estableix a la interfície S1-MME.
- El protocol S1-AP és un protocol orientat a connexió i hi ha tantes connexions entre un eNodeB i un MME com terminals connectats hagi a la cel·la. És a dir, per cada terminal connectat a la xarxa a través d'un eNodeB, hi ha una connexió.
- Quan molts eNodeBs estan connectats al mateix MME, diversos terminals poden enviar sol·licituds en molt poc temps dins de la mateixa cel·la. Per diferenciar els missatges enviats per diferents terminals, el RNTI del subscriptor s'especifica en el canal ràdio i correspon a un parell d'identitats de connexió en la interfície S1.

5.5 Establint una connexió S1-AP

Hem vist que per a cada terminal que intercanvia senyalització amb l'estació base (eNodeB), hi ha una connexió S1-AP que permet un intercanvi directe de senyalització entre el terminal i el MME. En aquest apartat veurem com s'estableix la connexió S1-AP.

Partim de la base que ambdós RNTI estan confirmats i prenem com a exemple l'annexió a la xarxa (attachment). El missatge enviat pel terminal mòbil és una Sol·licitud de Connexió EMM o *EMM Attach Request*, que es col·locarà en un missatge RRC anomenat Configuració de Connexió RRC Completa o *RRC Connection Setup Complete*. Aquest missatge està associat a un RNTI i un LCID, i l'estació base (eNodeB) escollirà la identitat de la connexió local S1-AP. Per exemple, el eNodeB escull la identitat ID1 i envia un *S1-AP Initial UE Message* amb valor ID1. A causa del mecanisme d'encapsulació, aquest missatge conté el *EMM Attach Request*, és a dir, el missatge emès pel terminal. (Veure il·lustració 117).



Il·lustració 117. Exemple d'establiment de connexió S1-AP. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

El MME emmagatzema el valor rebut, escull la seva pròpia identitat de connexió i memoritza l'enllaç entre els dos ID. Seguidament, el MME envia un missatge denominat *S1-AP Downlink NAS Transport* (terme del qual veurem al següent apartat) amb les dues identitats de connexió i la resposta a la sol·licitud de connexió, que en aquest cas és una sol·licitud d'autenticació per verificar que el terminal en realitat té la clau secreta correcta.

A continuació, el que fa el eNodeB és: emmagatzemar l'ID2 (escollit pel MME) i també l'enllaç entre l'ID1 i l'ID2. Per descomptat, també retransmet el missatge al terminal. Per als següents missatges es procedirà de la mateixa manera. És a dir, una resposta del terminal, com pot ser una resposta d'autenticació, es col·locarà en un missatge RRC, el

qual arriba al eNodeB, i el eNodeB afegirà l'ID1 i l'ID2, ja que ara sí coneix les identitats de connexió associades amb aquest terminal.

A causa que aquestes identitats de connexió estan numerades en 3 o 4 bytes, és possible una gran quantitat de connexions simultànies. El MME pot administrar aquestes connexions simultànies sense preocupar-se per la identitat precisa del GUTI, que pot variar de quan en quan per a un terminal.

No obstant, cal tenir present que S1-AP també té altres funcionalitats. El protocol S1-AP permet:

- Intercanviar missatges de configuració general entre el eNodeB i el MME.
- Al MME que envii missatges a un eNodeB per activar certes funcions relacionades amb la connexió de túnel.
- Al eNodeB indicar al MME els canvis d'estat d'un terminal.
- Transportar missatges intercanviats entre un terminal i el MME, on tots els intercanvis vinculats a un cert terminal, també estan vinculats a un identificador de connexió.

5.6 Non Access Stratum i Visió Global de la pila de protocols

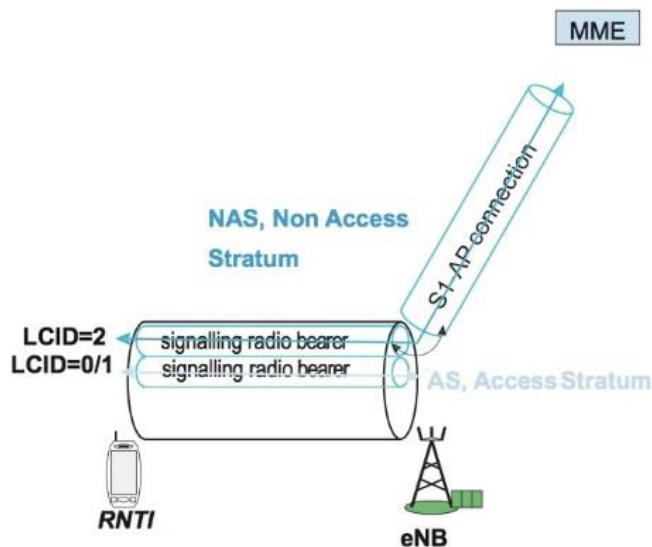
Com sabem, l'objectiu de l'arquitectura 4G consisteix a separar les diverses funcions. Primer, el control de la part ràdio entre el eNodeB i el terminal. En segon lloc, l'administració de seguretat i mobilitat en el MME. No obstant, com es permet que un MME gestioni només la part de seguretat i mobilitat? Com es permet que un eNodeB es centri només en les funcions de connexió ràdio? Aquest apartat intentarà donar resposta a aquestes qüestions.

Primer hem de tenir en compte el que és el pla de control. El pla de control es pot definir com allò que conté tots els protocols, mecanismes i missatges que permeten la configuració dels commutadors, encaminadors o enllaços per permetre el lliurament efectiu d'un servei de comunicació. Per exemple, el mecanisme d'annexió a la xarxa (attachment) es troba en el pla de control, així com tots els intercanvis de seguretat que són necessaris perquè la xarxa funcioni correctament, encara que no transporten dades d'usuari. En un sentit general, es podria dir que el pla de control consisteix en intercanvis de senyalització. Llavors, el diàleg entre un terminal (UE) i un MME està únicament en el pla de control, ja que el MME no transmetria cap paquet de dades d'usuari; només s'encarregaria de controlar missatges.

En el pla de control es pot diferenciar la gestió de mobilitat i la de seguretat, que és atesa pel MME. D'altra banda, també es pot diferenciar entre l'assignació de recursos ràdio i l'establiment de connexions ràdio, intercanviats entre el UE i el eNodeB. Aquests missatges i protocols poden estar estretament vinculats amb la tecnologia emprada en la interfície ràdio.

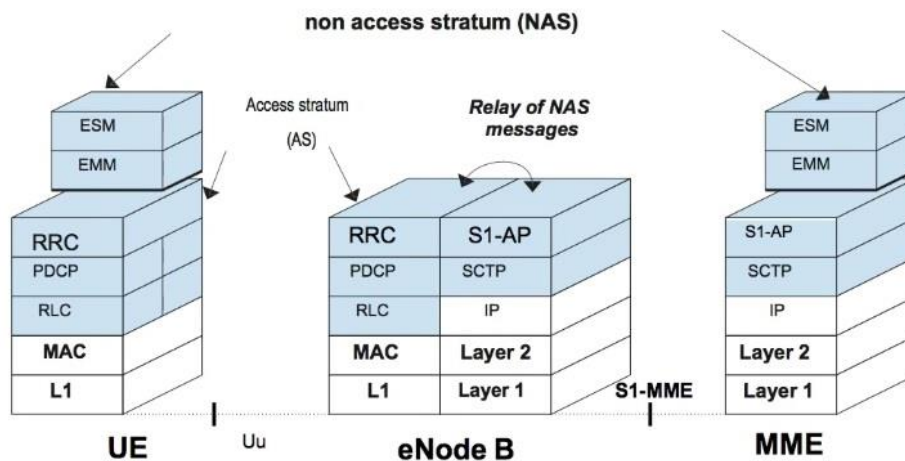
Vam veure que entre el terminal i el eNodeB hi ha una connexió de ràdio, i que el terminal està identificat pel RNTI o *Radio Network Temporary Identifier*. També vam veure el LCID o *Logical Channel Identifier*, que s'utilitza per distingir entre les dades d'usuari i les de senyalització. Per ser més exactes, s'utilitzen diferents valors: un per als missatges de senyalització enviats pel terminal al MME, i altres dos per als missatges intercanviats amb el eNodeB. "0" per a missatges urgents i "1" per a missatges no urgents.

Pel que fa a la connexió S1-AP, hem vist les nocions bàsiques: els missatges enviats pel terminal al MME es transmeten per la connexió ràdio i després per la connexió S1-AP. Per descomptat, el mateix ocorre en sentit oposats, és a dir, des del MME cap al terminal. Tots aquests missatges formen el *Non Access Stratum* o NAS, els quals són reenviats pel eNodeB, però el seu contingut mai és analitzat per aquest node. El que significa que pot canviar completament els missatges NAS, sense necessitat de canviar cap línia de codi (data files) en el eNodeB. D'altra banda, els missatges AS o *Access Stratum* inclou tots els missatges relacionats amb la tecnologia ràdio, per a l'establiment i l'administració de la connexió ràdio, intercanviats entre el terminal i el eNodeB. Per exemple, la modificació d'una portadora ràdio seria un missatge AS.



Il·lustració 118. Non Access Stratum (NAS) vs. Access Stratum (AS). X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Si ara ens fixem en la pila de protocols (veure il·lustració 119), aquí representem l'UE, el eNodeB i el MME.



Il·lustració 119. AS, NAS i S1-AP en la pila de protocols. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

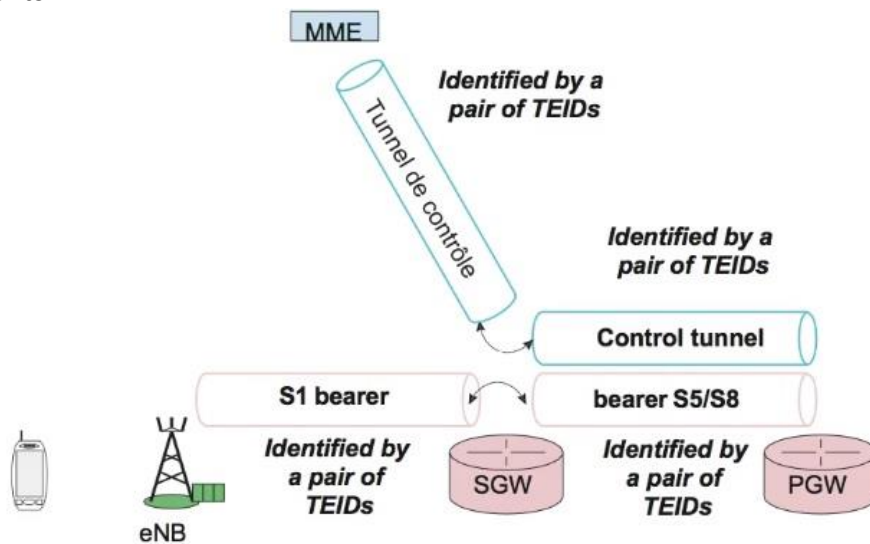
Entre el eNodeB i el MME tenim una xarxa IP, per tant, es donen la capa 1 (física), la capa 2 (MAC) i el protocol IP com a protocol de xarxa. Segons les especificacions de les xarxes 4G, van decidir utilitzar un protocol de transport que no fos ni el TCP ni el UDP. Com sabem, UDP no garanteix fiabilitat i TCP és massa complex. El que volem és intercanviar missatges de senyalització de manera fiable, i el protocol que satisfà aquestes necessitats és el protocol SCTP o *Stream Control Transmission Protocol*, el qual proporciona fiabilitat i evita retransmissions innecessàries per part de la capa superior.

Per què es fa servir aquest protocol? Sovint els eNodeBs tenen sortida mitjançant un enllaç de fibra òptica. No obstant, a vegades els eNodeBs es poden connectar amb enllaços microones, els quals no són necessàriament molt fiables. Llavors, fer servir un protocol que empra la retransmissió de missatges perduts és una bona idea.

Per sobre de SCTP, tenim el protocol S1-AP, que està orientat a connexió i hi ha tantes connexions com terminals gestionats pel MME. Si ens fixem en el costat de la interfície ràdio, veiem algunes coses amb les quals estem familiaritzats: la capa física anomenada capa 1, la capa 2 o *Medium Access Control* (MAC), el *Radio Link Control* o RLC. Per sobre tenim el *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP), i més amunt, el RRC per establir connexions de ràdio. Tots els missatges d'RRC s'intercanvien entre el UE i el eNodeB.

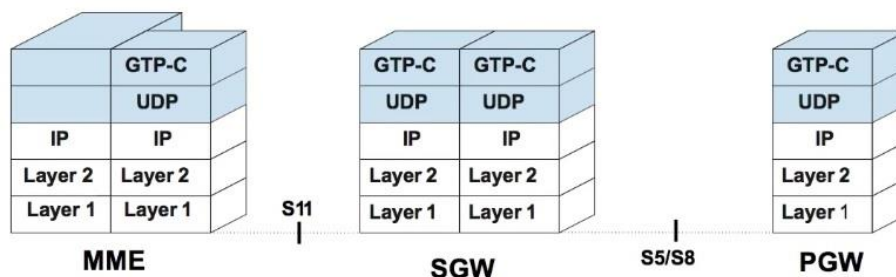
Els missatges NAS són enviats pel terminal al MME, o del MME al UE, els quals són transportats en missatges RRC. Tenim dos protocols NAS: el EMM o *Evolved Mobility Management* i el ESM o *Evolved Session Management*.

Fixem-nos ara en el pla d'usuari. Les dades es transporten en túnels, també anomenats portadors o *bearers*. Com hi ha d'haver un mínim de control per configurar aquests túnels, caldrà configurar túnels de control, on cada túnel de control s'identifica amb un parell de TEIDs, de la mateixa manera que els túnels de dades. No obstant, aquí els valors són diferents.



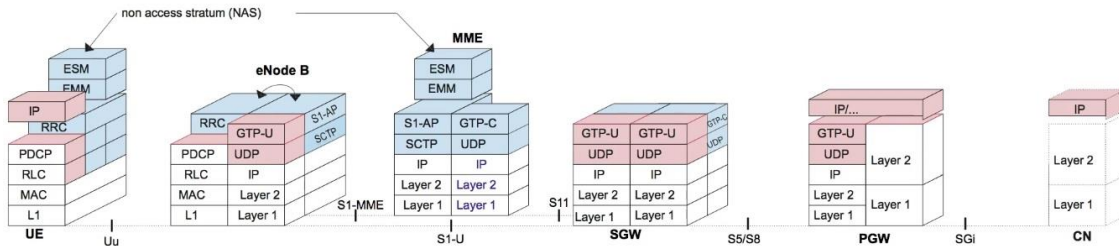
Il·lustració 120. Túnels de control i túnels de dades a una xarxa 4G. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Existeixen túnels de control entre el SGW i el PGW, i entre el MME i el SGW. Aquests túnels de control s'utilitzen per a intercanvis de GTP-C o *GPRS Tunnel Protocol in the Control Plane*. Aquests són tots els missatges necessaris per configurar, mantenir i alliberar túnels de dades. Tenim la pila de protocols, que ja hem vist, per al pla d'usuari. Ara, per al pla de control tenim IP, a sobre tenim UDP i GTP-C, ja sigui entre el SGW-PGW o entre SGW-MME.



Il·lustració 121. Lloc que ocupa el GTP-C a la pila de protocols. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Si tractem de tornar enrere, obtenim una visió global. La següent il·lustració simbolitza tot el que hem vist fins ara. No només el pla de control, sinó també el pla d'usuari.



Il·lustració 122. Visió global de la pila de protocols. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Una visió general del conjunt de protocols entre UE, el eNodeB, el MME, el SGW, el PGW i un node corresponent a un host extern. S'ha fet servir el color blau per representar el pla de control, i de color rosa per al pla d'usuari.

A continuació, els aspectes més destacats:

- Els missatges NAS o *Non Access Stratum*, són aquells que s'intercanvien entre el eNodeB i el MME, però que de fet són enviats pel eNodeB.
- Els missatges de control AS o *Access Stratum*, els missatges de control NAS i el paquets de dades es transporten en diferents canals lògics, diferents LCID, a través de la interfície ràdio.
- Els missatges AS són processats pel eNodeB.
- Els missatges NAS són reenviats pel eNodeB al MME en les connexions S1-AP.
- Els missatges de dades s'envien a través de túnels.
- El pla de control es refereix a tots els protocols, mecanismes i missatges necessaris per proporcionar un servei de comunicacions real dins d'una xarxa.
- Quan visitem un servidor web amb el nostre smartphone, el paquet que transporta la comanda HTTP GET forma part del pla d'usuari de la xarxa central o EPC, ja que quan hi ha un diàleg entre un terminal i un servidor extern els paquets intercanviats es transporten sense que el seu contingut sigui analitzat per la xarxa EPC. Es consideren dades d'usuari.
- A la interfície S1-MME, que es troba entre el eNodeB-MME, s'intercanvien paquets IP que contenen missatges de control. El MME és un dispositiu que només opera en el pla de control, per aquest motiu cap dada d'usuari passa pel MME.

6. Gestió de la naturalesa esporàdica del flux de dades

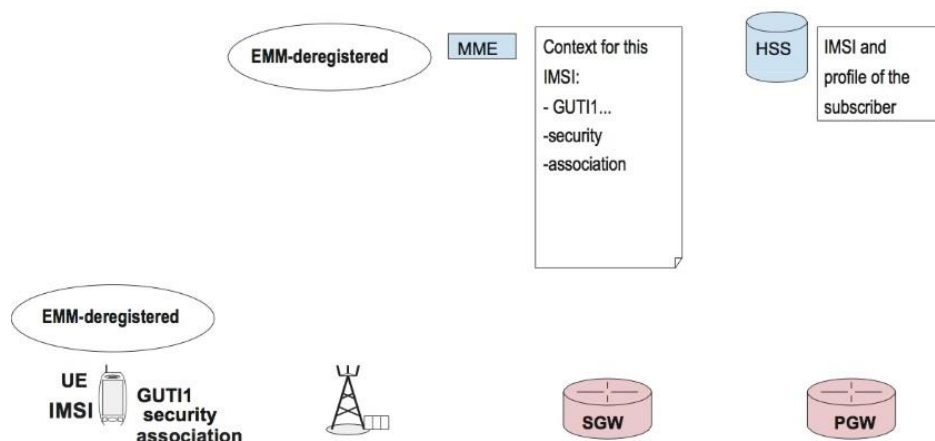
6.0 Procediments de connexió i desconnexió

Què succeeix quan encenem o apaguem el nostre terminal 4G?

Un terminal 4G té una connectivitat IP permanent sempre que, per exemple, no activem el mode avió. Tan aviat com s'encengui, el terminal sol·licitarà l'establiment de portadores per als diversos túnels per a la connectivitat IP. La portadora per defecte, es manté independentment de com es fa servir el terminal.

Per establir la connectivitat, el terminal envia un missatge de sol·licitud de connectivitat EPS. En realitat, com veurem, aquest missatge s'inclou en el missatge *attachment*. És a dir, l'*attachment* i l'establiment de la connectivitat es realitzen al mateix temps.

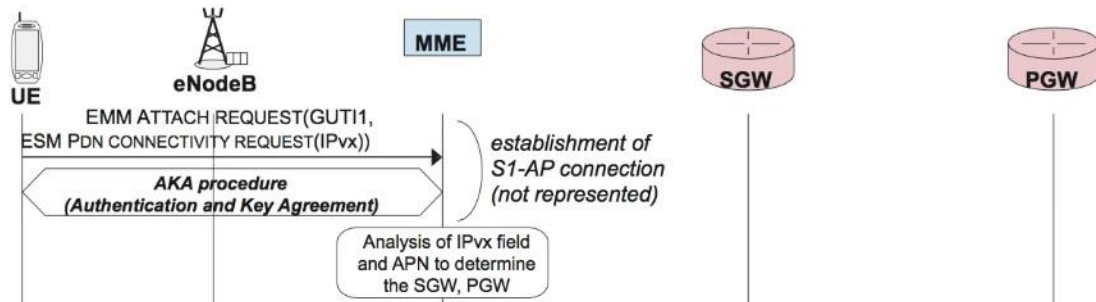
Primerament considerarem un terminal apagat. És important que la xarxa sàpiga si es pot arribar a un terminal o no. Per tant, tenim la noció "d'estat", que es memoritza per a cada terminal. Aquest estat és denominat EMM *deregistered* o EMM no registrat, quan l'*attachment* encara no s'ha realitzat, el que significa que el cel·lular no és accessible (podria estar apagat o en mode avió). Podem imaginar que el terminal ja s'ha utilitzat i que ja té una associació de seguretat i una identitat temporal, GUTI1. El MME memoritza l'estat del terminal i els elements de context.



Il·lustració 123. Initial State (UE Powered Up, GUTI1 stored in the SIM Card). X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

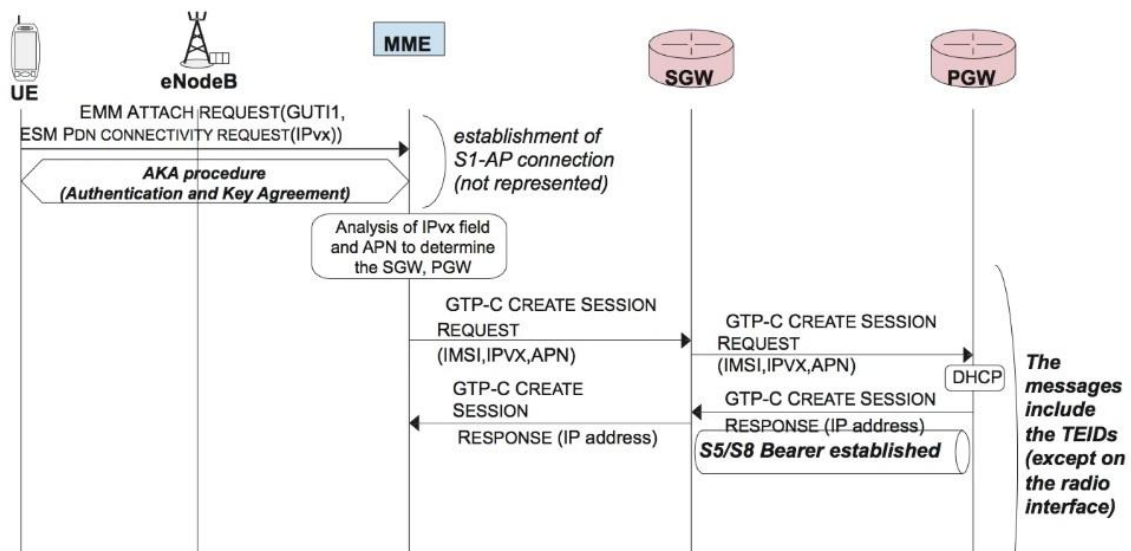
Per a connectar-nos a una xarxa i sol·licitar una connexió, tindrem els següents missatges: el terminal envia un EMM Attach Request amb GUTI1, i posa en el mateix missatge un missatge de sol·licitud de connectivitat ESM PDN, amb un significat diferent. Concretament, el UE sol·licita connectivitat a la xarxa IP externa, on indicarà en el missatge el tipus de de connectivitat que vol (IPv4 o IPv6).

Dins d'aquest procediment tindrem l'establiment de la connexió S1-AP que ja hem vist, per tant, suposarem que el terminal es comunica amb el MME. Per descomptat, tots els missatges passen pel eNodeB. El que farà el MME serà: analitzar el tipus de connectivitat sol·licitada (IPv4 o IPv6), trobar el APN o *Access Point Name* predeterminat, el qual està emmagatzemat en el perfil del subscriptor, i seleccionar el Serving Gateway i el P-Gateway.



Il·lustració 124. EMM Attach Request i sol·licitud de connectivitat ESM PDN enviat pel terminal. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

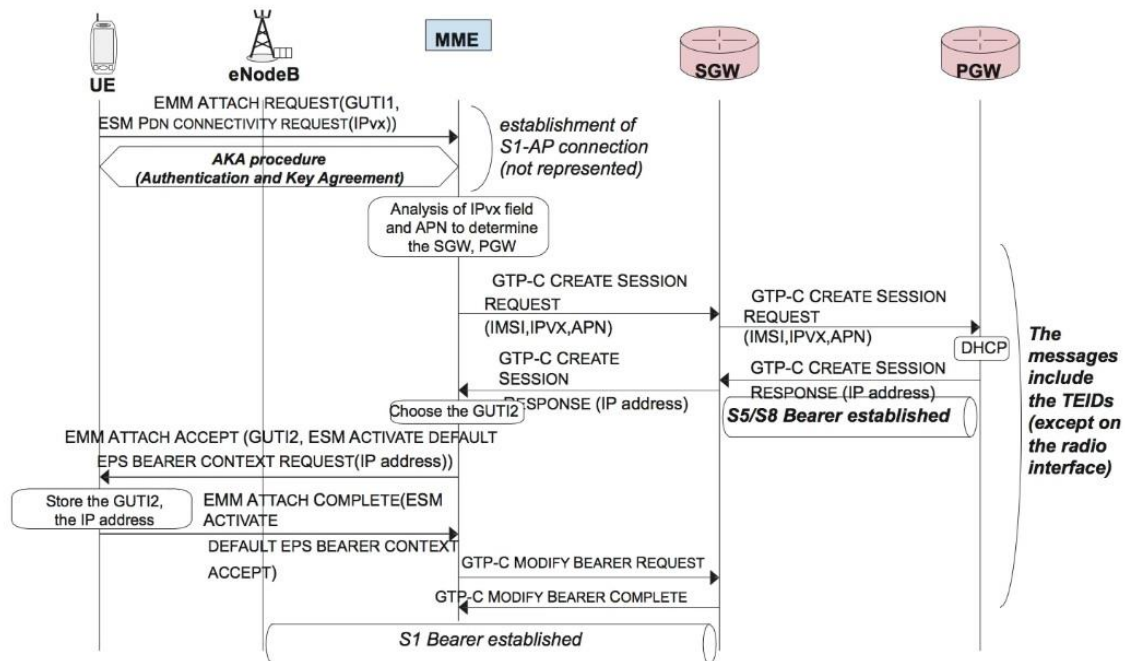
El MME immediatament crea un túnel de control amb el SGW utilitzant el missatge *Create Session Request*. A l'interior d'aquest missatge s'indica: el subscriptor IMSI, els tipus d'IP sol·licitada i el APN. Per tant, el SGW passa la sol·licitud al PGW i aquí podem intuir que hi ha un mecanisme de tipus DHCP, de l'anglès *Dynamic Host Configuration Protocol*, que serveix per assignar automàticament l'adreça IP. Per tant, els missatges que veiem a continuació i els següents inclouen els TEID per establir els túnels.



Il·lustració 125. Create Session Request enviat pel node MME. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

El PGW indica l'adreça IP en resposta a la sol·licitud d'un túnel. Tan aviat com es rebí aquest missatge, els dos equips coneixeran els TEID de l'extrem oposat i s'establirà la portadora S5/S8.

El SGW envia una resposta. Encara que transporta l'adreça IP assignada, aquesta adreça IP és memoritzada pel MME, el qual renova la identitat temporal escollint un GUTI diferent i enviarà els següents missatges: primer un missatge *EMM Attach Accept* amb el GUTI per al terminal. Això vol dir OK i que la xarxa el té en compte. I en segon lloc, un *ESM Activate Default* que activa el missatge de sol·licitud de context de portadora EPS per defecte amb l'adreça IP, en resposta a la sol·licitud anterior. El terminal emmagatzema l'adreça IP i el GUTI, i després confirmarà indicant que l'*attachment* ha sigut un èxit, així com l'establiment de context. És a dir, que l'adreça IP ha sigut emmagatzemada. (Veure il·lustració 126).

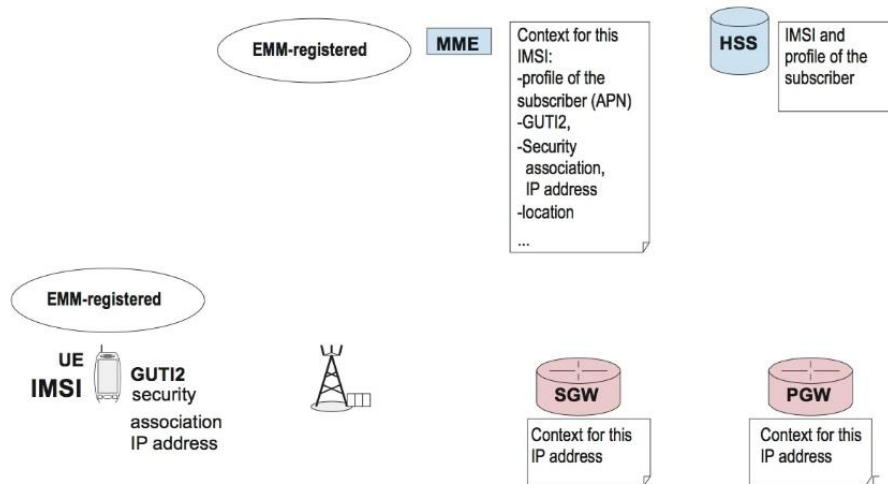


Il·lustració 126. Missatges EMM Attach Accept i EMM Attach Complete entre el MME i el UE. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Finalment, el MME indicarà al SGW que ha d'establir la portadora S1: el túnel de dades entre el eNodeB i el Serving Gateway.

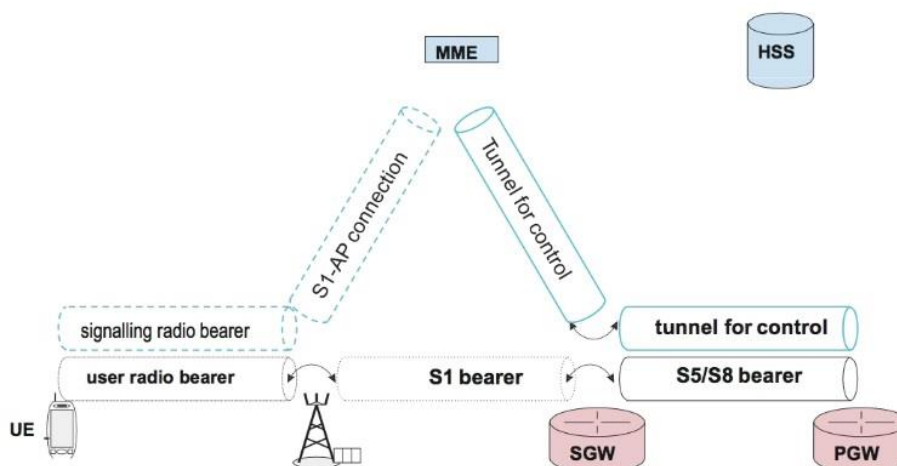
Al finalitzar el procediment, tenim un terminal en l'estat registrat d'EMM o *EMM Registered State*, el que vol dir que s'ha tingut en compte i el terminal té una associació de seguretat i una adreça IP. El context o contingut és actualitzat pel MME, que conserva l'adreça IP i l'associació de seguretat corresponent al terminal.

El SGW i el PGW també tenen elements de context o de contingut, ja que necessiten emmagatzemar els TEIDs.



Il·lustració 127. Continguts emmagatzemats en diversos nodes. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

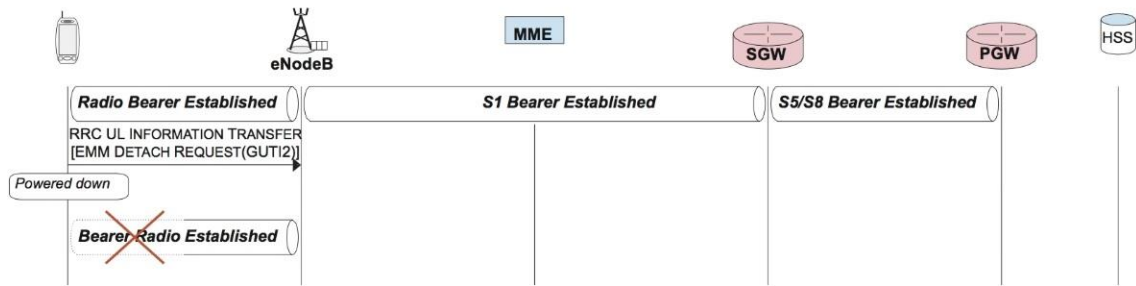
Per tant, després de tot això s'estableixen túnels i connexions, el diagrama del qual és el següent: la portadora ràdio i la portadora de senyalització entre el UE i el eNodeB, la connexió S1-AP, el túnel de control, només un túnel de dades anomenat portador entre el eNodeB i el SGW, i entre el SGW i el PGW altra portadora i un túnel per al control.



Il·lustració 128. Túnel i connexions establerts. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

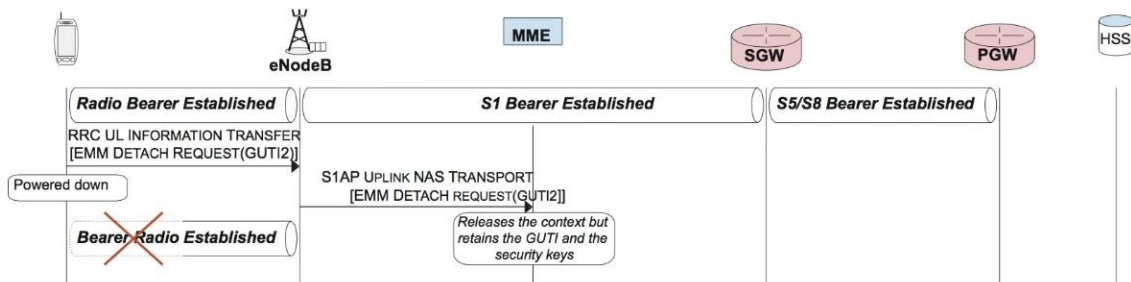
També cal revisar el procediment de desconnexió o *detach procedure*, ja que si per exemple activem el mode avió o simplement apaguem el terminal, aquest realitzarà una sol·licitud de separació. Totes les connexions i túnels seran alliberats. No obstant el MME, així com el terminal amb la seva targeta SIM, mantindran les associacions de seguretat i el GUTI a la memòria.

El procediment funciona de la següent manera: a la il·lustració següent (veure il·lustració 129) es mostra el conjunt de portadores establertes. El terminal envia una sol·licitud de desconnexió indicant el seu GUTI, i tant aviat com hi hagi un justificant de recepció o *acknowledgement* al canal ràdio, el terminal estarà segur que l'estació base ha tingut en compte el missatge. Per tant, podrà apagar-se.



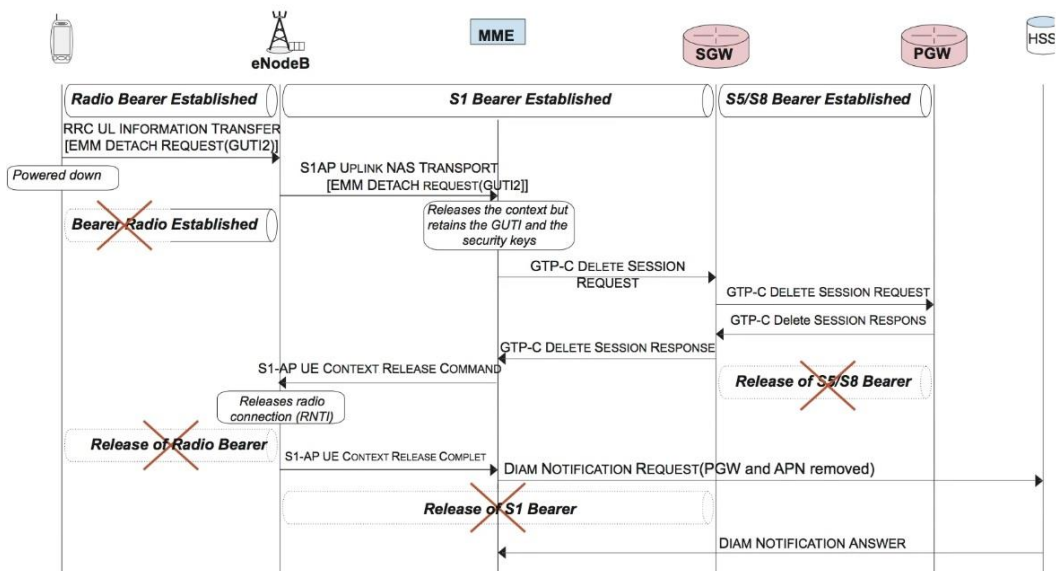
Il·lustració 129. UE envia sol·licitud de desconnexió indicant el seu GUTI. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

En aquest punt, la portadora ràdio ja s'ha alliberat, és a dir, ja no hi ha una connexió ràdio. No obstant, tots els recursos de la xarxa han de ser alliberats. Per tant, a continuació el eNodeB envia un missatge al MME indicant la desconnexió (veure il·lustració 130). El MME el que fa per a aquest subscriptor, identificat pel seu GUTI, és agafar les dades i alliberar la part de context o de contingut relacionada amb la portadora que s'havia establert. No obstant, el MME retindrà el GUTI i les claus de seguretat.



Il·lustració 130. eNodeB envia sol·licitud de desconnexió al MME indicant el GUTI del subscriptor. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Seguidament, el MME notifica al SGW: li demana que esborri tot de la seva memòria amb un *DELETE SESSION REQUEST*. És a dir, el TEID dels diversos túnels. A més, el SGW també envia aquest missatge de sol·licitud d'eliminació de sessió per alliberar la portadora S5/S8.



Il·lustració 131. Procediment de desconnexió complet (detach procedure). X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Quan el SGW rep la resposta del PGW, és a dir, quan s'ha alliberat el context o el contingut, notifica al MME que sol·liciti al eNodeB perquè alliberi la portadora entre el SGW i el eNodeB. Per tant, totes les portadores han sigut alliberades, i finalment el MME notifica al HSS que el subscriptor ja no és accessible.

Pel que fa als aspectes més destacats d'aquest apartat:

- Quan s'encén un terminal 4G (amb una subscripció vàlida), el terminal realitza un *network attachment* per notificar que ara se li pot trobar, i envia una sol·licitud de connectivitat per recuperar una adreça IP.
- En el 4G hi ha 2 procediments diferents: el *network attachment*, que consisteix a transferir el perfil del subscriptor del HSS al MME, establir una associació de seguretat i tenir el terminal sota el control del node MME. I la sol·licitud de connectivitat és l'altre procediment, que consisteix a sol·licitar accés a la xarxa de dades IP, el que implica tenir una adreça IP (mecanismes DHCP). Aquests 2 procediments es fusionen i s'executen en encendre's el terminal.
- L'estat EMM-Deregistered correspon a un terminal no connectat a la xarxa (per exemple, apagat). O simplement pot tractar-se d'un terminal que no té accés perquè la xarxa ha rebutjat la connexió.
- L'estat EMM-Registered correspon a un terminal connectat correctament a la xarxa amb un adreça IP i amb una associació de seguretat vàlida.

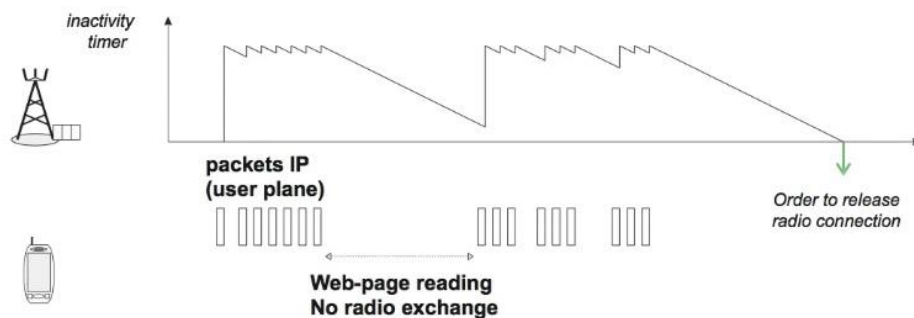
6.1 Conceptes d'estats ECM Connected i ECM Idle

Com ja sabem, quan encenem el nostre terminal s'estableix una connexió ràdio. No obstant, si no el fem servir es mantenen les connexions? Alternativament, si volem mantenir una connexió ràdio, consumirà massa energia? En aquest apartat es pretén donar resposta a aquestes qüestions.

En l'encès, hem vist que s'estableix una portadora predeterminada. Però, un paquet que arriba des de la xarxa s'ha d'encaminar el més ràpid possible, de la mateixa manera que un paquet creat per alguna aplicació en execució cal transmetre'l també el més ràpid possible.

Quan fem servir el terminal, ens podem moure, el que implica que una connexió ràdio activa requereix que les mesures de senyal de diferents estacions base s'enviïn regularment per detectar si el terminal s'està allunyat d'una estació base o apropant-se a una altre. Si no fem servir el nostre terminal, el manteniment d'aquesta connexió ràdio requereix intercanvis regulars de mesures i verificacions per garantir que el terminal encara està cobert per la mateixa cel·la. Tot això implica la despesa de molta energia i les bateries no durarien massa temps. A més a més, per cada connexió ràdio s'ha d'assignar un RNTI, els quals tenen 16 bits de longitud, el que fa que hi hagi més de 65.000 disponibles. Per tant, cal evitar mantenir la connexió ràdio tot el temps.

El que es fa és implementar un temps d'espera quan la connexió ràdio està inactiva. Sempre que es faci servir el terminal, és a dir, mentre que s'estigui transmetent les dades d'usuari, la connexió romandrà i s'establirà el temporitzador d'inactivitat.

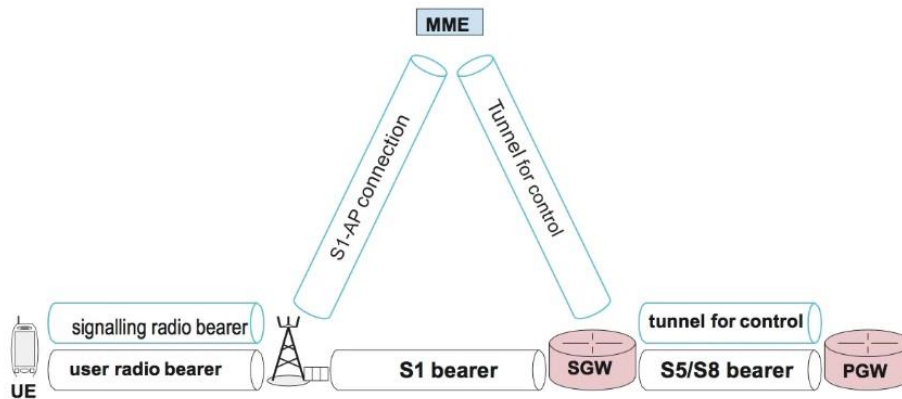


Il·lustració 132. Radio Inactivity Timer. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

De la il·lustració anterior, el temporitzador realitza un compte enrere, però l'usuari, per exemple, carrega una pàgina web. És a dir, hi ha activat una vegada més. El temporitzador es reinicia i quan el valor arriba a 0 (quan cap aplicació envia missatge durant un període de temps definit) s'allibera la connexió ràdio.

Aquest temporitzador es col·loca en el eNodeB i s'inicia al final d'un intercanvi. Al final del temps d'espera, s'allibera la connexió RRC i el UE perd el seu RNTI.

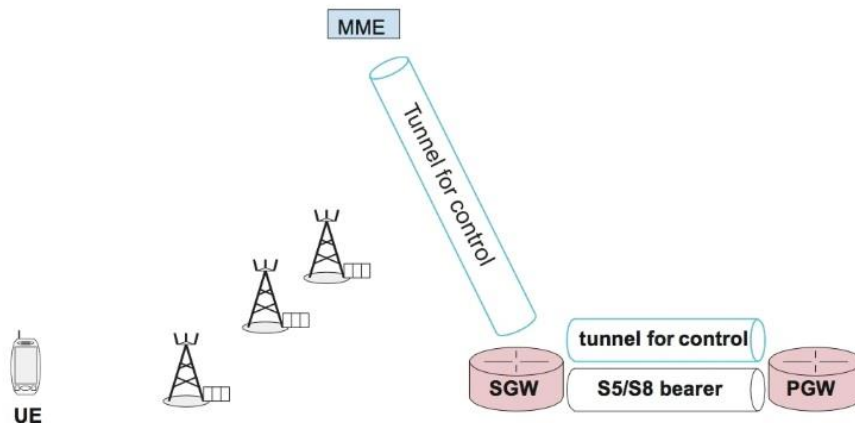
Si ens fixem a la xarxa, viem totes les connexions i túnels (veure il·lustració 133). Si hi ha activitat ràdio, la connexió i tots els túnels es mantenen. Si no hi ha activitat, s'allibera la connexió ràdio.



Il·lustració 133. Estat dels túnels i connexions quan hi ha connectivitat. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

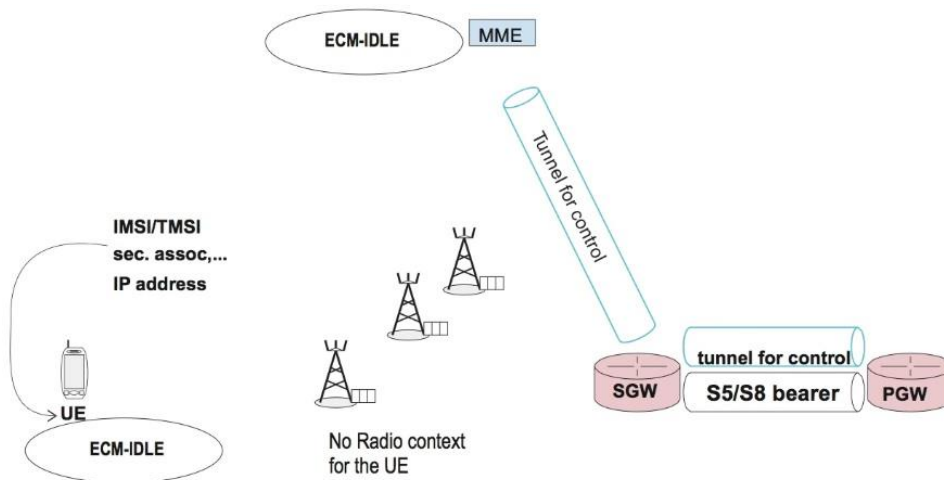
No obstant, si alliberem la connexió ràdio, això vol dir que la xarxa perd el coneixement de la cel·la del UE. Per tant, el terminal pot moure's o canviar d'estacions base sense que la xarxa estigui necessàriament assabentada. Aquest concepte es veurà en el capítol següent.

Podem dir que la xarxa no sap amb precisió sota quin eNodeB es troba ubicat el terminal. No hi ha cap motiu per mantenir una portadora S1 entre el eNodeB i el SGW. Llavors, quan alliberem la connexió ràdio, alliberem la portadora S1 i la connexió S1-AP alhora, el que es coneix com *ECM State*.



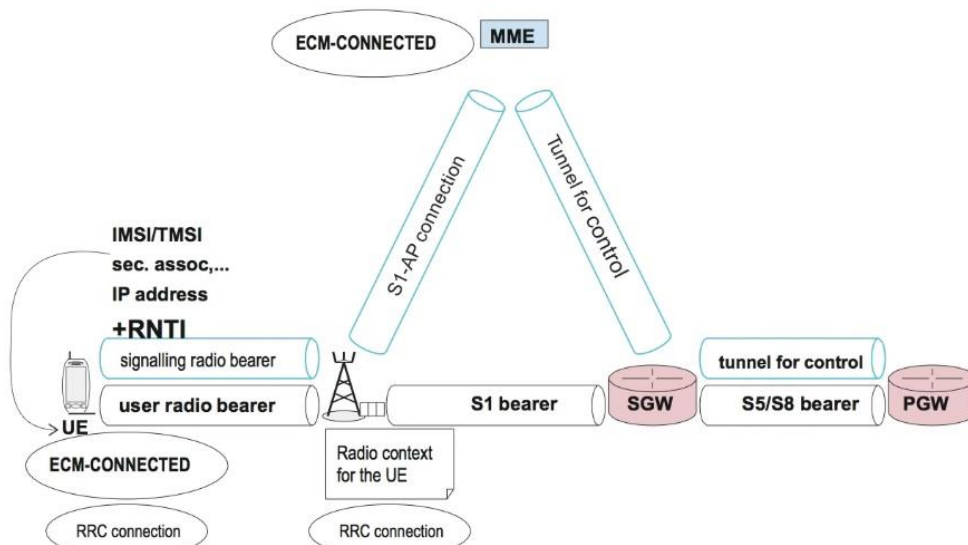
Il·lustració 134. Alliberació connexió ràdio: s'anul·la el túnel de dades S1-U i la connexió S1-AP al mateix temps. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Pel que la a l'estat d'ECM inactiu o ECM Idle State, no hi ha una connexió ràdio: la xarxa no està assabentada de la ubicació precisa del terminal. Per tant, el terminal roman connectat a la xarxa (manté l'adreça IP), però no està realment connectat a la xarxa d'accés ràdio. (Veure il·lustració 135).



Il·lustració 135. Concepte d'ECM-Idle State. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

D'altra banda, durant l'estat ECM-Connected la connexió ràdio està activa: s'assigna un RNTI i hi ha portadores de senyalització i d'usuari. Les portadores i túnels sempre es mantenen entre el SGW, el PGW i el MME. A més a més, un temporitzador és gestionat pel eNodeB. En ca d'inactivitat del UE, s'alliberen les portadores ràdio, la connexió S1-AP i la portadora S1. Per tant, existeixen commutacions freqüents entre els estats ECM-Connected i ECM-Idle.



Il·lustració 136. Concepte d'ECM-Connected State. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

En resum:

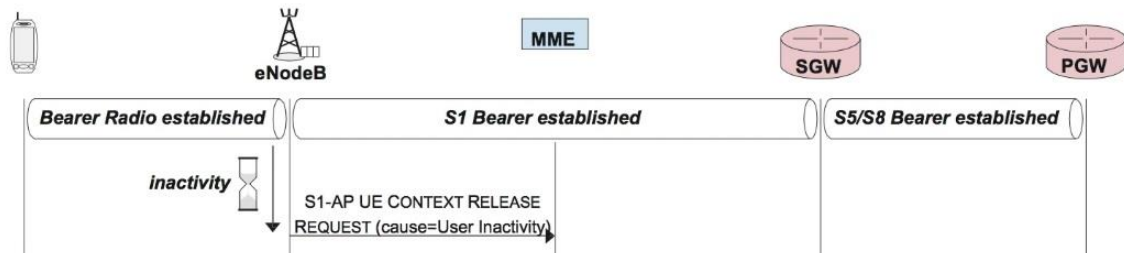
- La connexió ràdio entre el terminal i el eNodeB es manté sempre que les dades siguin transmèses des del o cap al terminal. És a dir, sempre que s'intercanviïn dades entre el terminal i la xarxa, ja sigui en el canal ascendent o en el canal descendent.
- La xarxa allibera la connexió ràdio entre el terminal i el eNodeB, si no hi ha dades intercanviades en el canal ràdio durant un temps mínim, paràmetre del qual és escollit per l'operador (entre uns pocs segons fins a desenes de segons).

6.2 Passar al mode d'espera després d'un llarg període d'inactivitat

Què succeeix si no fem servir les funcions ràdio del nostre terminal durant un període perllongat, per exemple, perquè no estem carregant una pàgina web o perquè no tenim una aplicació que envii o rebi dades de la xarxa? La resposta la sabem de l'apartat anterior: canviem d'estat ECM-Connected (amb una connexió ràdio) a l'estat ECM-Idle (on no hi ha connexió ràdio).

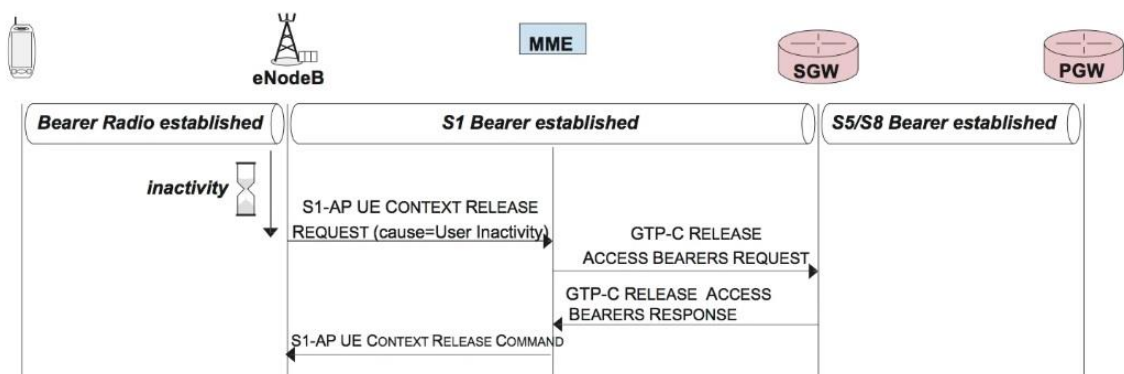
Per tant, l'estat inicial del que parlem: el terminal té un conjunt de túnels i connexions establertes, inclosa la connexió ràdio, on l'estat és ECM-Connected i el MME memoritza l'estat de connexió d'ECM, respecte del terminal.

A continuació es mostra el procediment d'alliberació (veure il·lustració 137). Primerament es mostren les portadores que han estat establertes. El terminal es troba inactiu, és a dir, no hi ha hagut una transmissió de paquets d'usuari durant un temps determinat. Al final d'aquest període de temps (típicament 10, 20 o 30 segons), el eNodeB envia un missatge S1-AP sol·licitant l'alliberació del context o del contingut.



Il·lustració 137. S1-AP UE CONTEXT RELEASE REQUEST enviat pel eNodeB. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

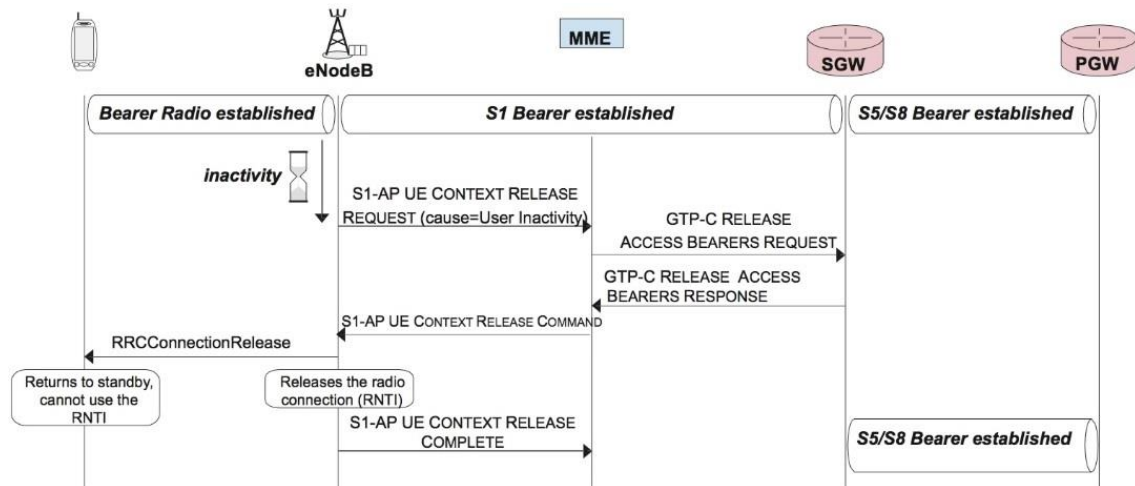
Quan el eNodeB envia aquest missatge, indica el motiu pel qual sol·licita aquesta alliberació: inactivitat d'usuari. Seguidament, el MME envia un missatge de control GTP, sol·licitat l'alliberació del túnel entre el SGW i el eNodeB. El SGW processa la sol·licitud i respon positivament al MME, el que significa que l'alliberació s'ha realitzat. Per tant, el MME informa al eNodeB que l'alliberació s'ha de realitzar per la seva part.



Il·lustració 138. Missatge de sol·licitud d'alliberació del túnel enviat pel MME. Confirmació per part del SGW. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

El eNodeB informa al terminal que la connexió s'ha alliberat, per tant, el terminal torna al mode d'espera o *standby mode*. Des del punt de vista ràdio, el terminal es troba inactiu. És a dir, el RNTI ja no està assignat, pel que ja no pot fer servir el RNTI i el eNodeB allibera la connexió ràdio i el RNTI.

Per últim, el eNodeB respon al MME per indicar-li que l'alliberació s'ha dut a terme completament. Al final d'aquest procediment, el terminal i el MME d'aquest terminal tornen a l'estat ECM-Idle. D'altra banda, el terminal manté la seva adreça IP, pel que roman en l'estat EMM-Registered.



Il·lustració 139. Procediment d'alliberació després d'un període d'inactivitat.

Llavors, tenim dos tipus d'estats: estats ECM i estats EMM.

- Pel que fa a l'estat EMM-Deregistered, el terminal no existeix des del punt de vista de la xarxa, per tant, es troba necessàriament en estat ECM-Idle. És a dir, està desconnectat de la xarxa i no té una adreça IP.
- EMM-Registered i ECM-Connected, el terminal està connectat a la xarxa: té una adreça IP i un RNTI, la seva ubicació és coneguda a nivell de cel·la pel MME i tots els túnels i connexions estan establerts.
- EMM-Registered i ECM-Idle. Des del punt de vista d'aplicació i del usuari, encara es troba connectat. Sembla que el terminal estigui connectat a la xarxa: té la seva adreça IP, però no té un RNTI assignat, i no hi ha cap túnel o connexió que condueixi des del eNodeB. No obstant, es manté el túnel entre el SGW i el PGW, i el túnel entre el SGW i el MME. Això és així perquè un SGW administra un àrea gran i la probabilitat de canviar de SGW dins d'un període de diversos minuts és relativament baix. A més a més, en aquest estat (EMM-Registered i ECM-Idle) no es coneix la ubicació precisa de la cel·la del UE. La xarxa no es preocupa per saber exactament en quina cel·la es troba el terminal.

Per tant, el que tenim és el següent: quan un terminal cel·lular està completament absent de la xarxa, no està associat a un SGW ni a cap PGW. Quan es connecta a la xarxa, canvia a l'estat EMM-Registered i ECM-Connected, on existeix una connexió RRCx i tots els túnels estan establerts. Quan el temporitzador d'inactivitat finalitza, el seu estat canvia a ECM-Idle, però romandrà en l'estat EMM-Registered. En altres paraules, conservarà la seva adreça IP.

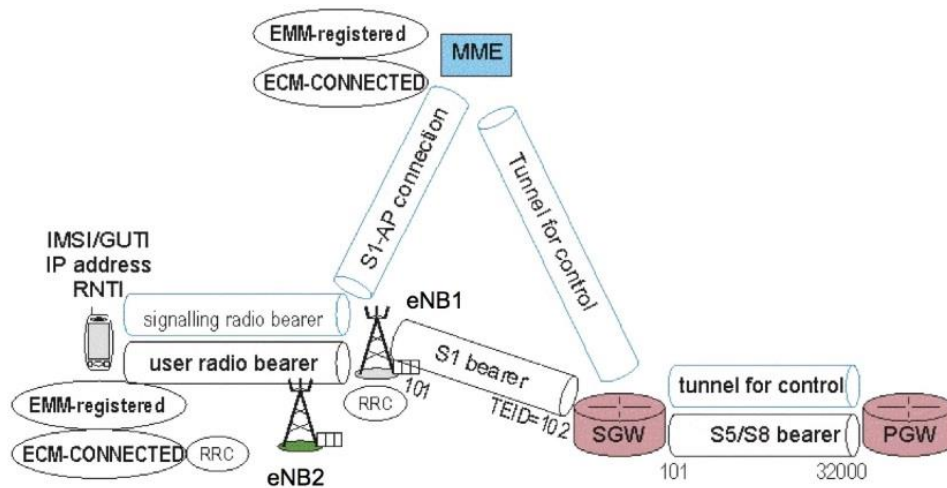
Recordar:

- L'estat del terminal una vegada que el procediment d'alliberació ha terminat és: EMM-Registered i ECM-Idle. El terminal ha de romandre connectat i present a la xarxa (EMM-Registered). Però com no hi ha una connexió ràdio, ni una portadora S1 ni cap connexió S1-AP, es trobarà en l'estat ECM-Idle.
- Una vegada que el procediment d'alliberació ha finalitzat, el terminal té una adreça IP, però hauria de reactivar la connectivitat si vol intercanviar paquets IP. L'objectiu del procediment d'alliberació és suspendre la connectivitat ràdio, però mantenint les capes superiors (aplicació, transport, xarxa) en una situació estable.

6.3 UE-Triggered Service Request

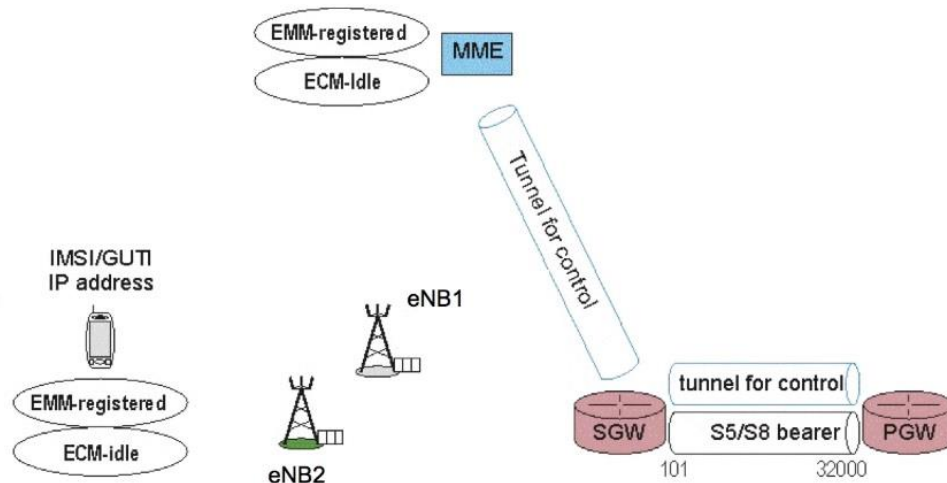
Com hem vist a l'apartat anterior, després d'un cert temps d'inactivitat, s'alliberen les connexions ràdio i alguns túnels. No obstant, podem fer servir el nostre terminal una vegada que s'hagi alliberat la connexió ràdio? O, si tenim una aplicació en execució, pot el nostre terminal enviar dades ràpidament després d'un llarg període d'inactivitat?

Considerant el següent escenari (veure il·lustració 140), un terminal s'ha encès, tots els túnels estan establerts, el que vol dir que al final del procediment de connexió, el terminal es troba en l'estat EMM-Registered i ECM-Connected.



Il·lustració 140. UE annexat a una cel·la i actiu. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

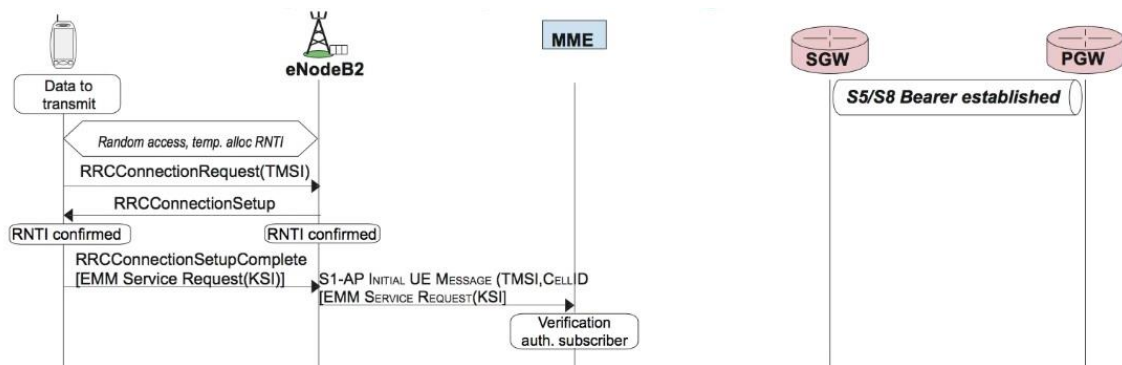
Els TEIDs utilitzats per les portadores de dades són 101 (costat del eNodeB), 102 (costat del SGW), novament 101 per al túnel entre el SGW i el PGW. I 32000 (costat del PGW). Suposant que l'usuari no ha manipulat el terminal, en un temps determinat tornarà al mode *standby* i s'alliberaran els túnels, especialment el túnel S1.



Il·lustració 141. UE inactiu durant uns minuts. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Si l'usuari es mou i entra sota la cel·la del eNodeB2 marcada de color verd a la il·lustració anterior, què succeirà quan l'usuari vulgui carregar una pàgina web? Caldrà un procediment per restablir les connexions i els túnels el més ràpid possible.

El primer pas consisteix a restablir els túnels per poder transmetre dades, ja que prèviament ha estat tot alliberat. Per exemple, una aplicació envia una sol·licitud a un servidor web, per tant, cal fer el procediment d'accés aleatori a la interfície ràdio, s'assigna un RNTI, i després d'un diàleg es confirma el RNTI. A continuació, el terminal envia un missatge anomenat *EMM Service Request* per sol·licitar connectivitat de nou per transmetre dades. Aquest missatge es transmet en un missatge *RRC Connection Setup Complete* i és rebut pel eNodeB2 (veure il·lustració 142).

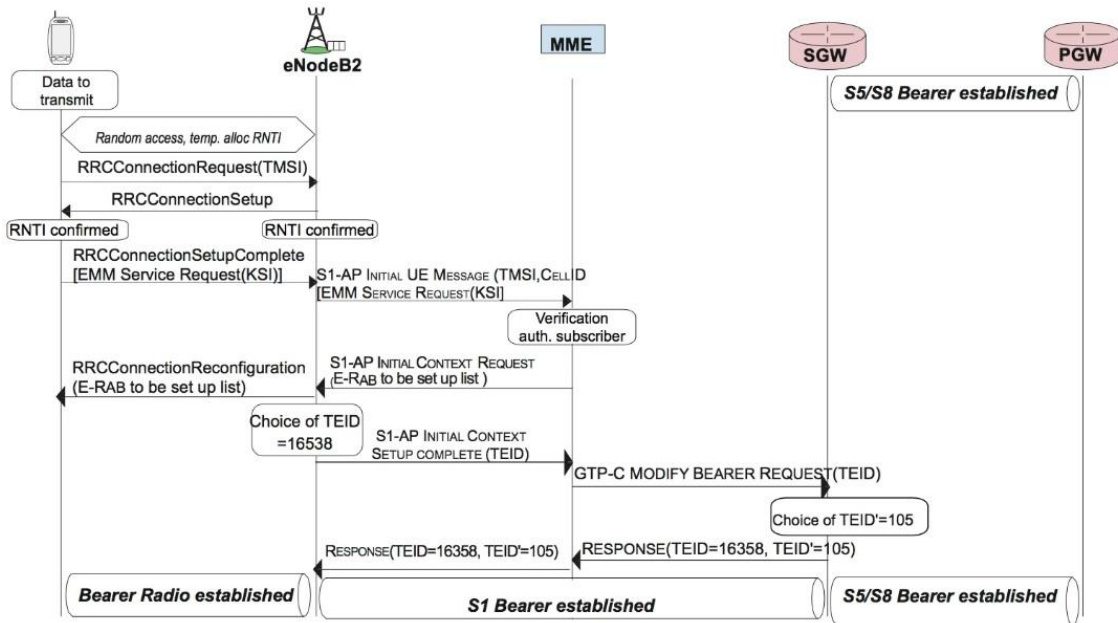


Il·lustració 142. Confirmació del RNTI i sol·licitud de connectivitat EMM Service Request.

El eNodeB, per la seva banda, restablirà la connexió S1-AP. Al mateix temps, enviarà un missatge de EMM Service Request amb KSI (dades relacionades amb les claus de seguretat). El MME comprova si el subscriptor està autoritzat i sol·licita el restabliment de diverses portadores ràdio, és a dir, diverses connexions ràdio amb la gestió de la qualitat del servei (en cas que hi hagués).

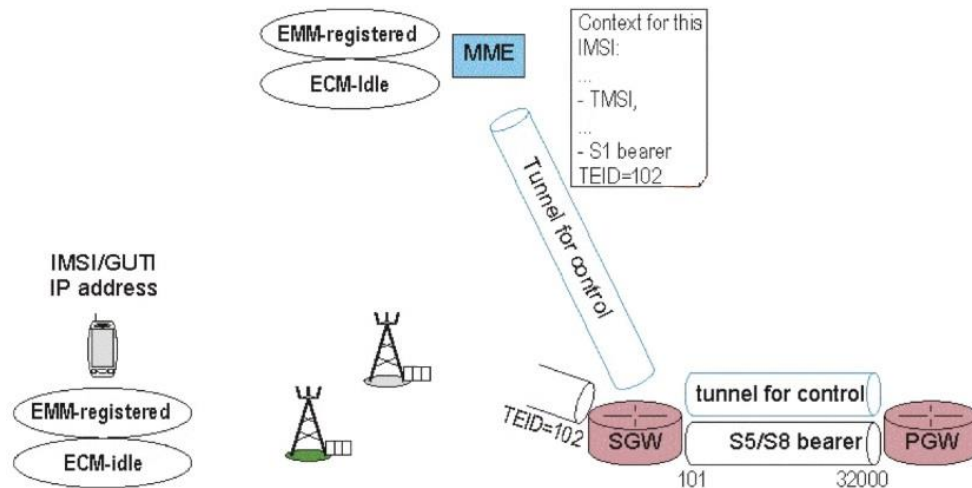
El eNodeB2 selecciona un valor per al TEID, per exemple 16538. Abans, el eNodeB1 havia escollit el valor 101, però aquest eNodeB2 no ho sap, pel que el valor és completament diferent. Aquest valor (16538) s'envia en el missatge *S1-AP Initial Context Set Up Complete* i el MME reenvia un missatge de modificació de sol·licitud de portadora GTP-C amb el TEID per sol·licitar l'establiment del túnel entre el eNodeB i el SGW.

El SGW escull un TEID, el qual ha de ser enviat novament al eNodeB2. Per tant, hi ha d'haver un missatge del SGW al MME, i del MME al eNodeB2. Aquests missatges fan que el procediment sigui més llarg, fins i tot si el temps addicional és petit (diverses desenes de mil·lisegons), l'efecte no és insignificant. A la següent il·lustració (veure il·lustració 143) es pot observar la sol·licitud de servei complet.



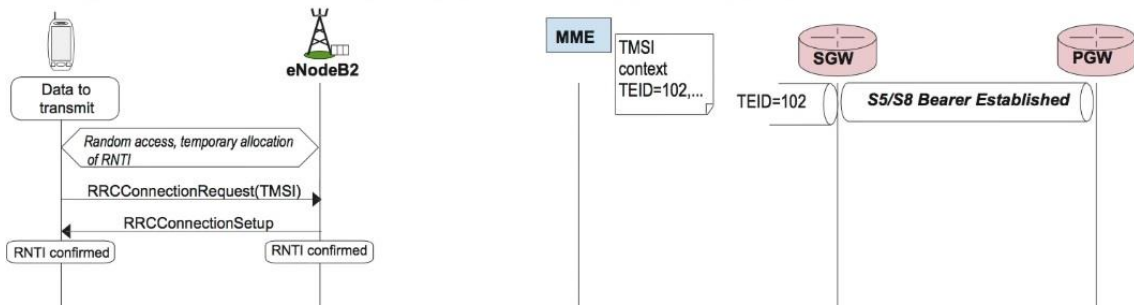
Il·lustració 143. Service Request: Gestió simplista del túnel S1. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Per tant, es tracta de ser més rigorosos a l'hora d'establir diverses portadores. Quan observem l'escenari, atès que tots els missatges relacionats amb l'establiment del túnel inicial passen pel MME, aquest node pot memoritzar el TEID utilitzat pel SGW per al túnel S1. Llavors, aquest valor es memoritza i quan s'allibera la connexió a causa de la inactivitat ràdio, no s'allibera completament el túnel S1. Es reté el valor del TEID del costat del SGW. (Veure il·lustració 144). Això vol dir, que quan un terminal cel·lular reaparegui en una altra cel·la, aquest TEID serà reutilitzat per al nou túnel.



Il·lustració 144. Alliberació parcial del túnel S1.

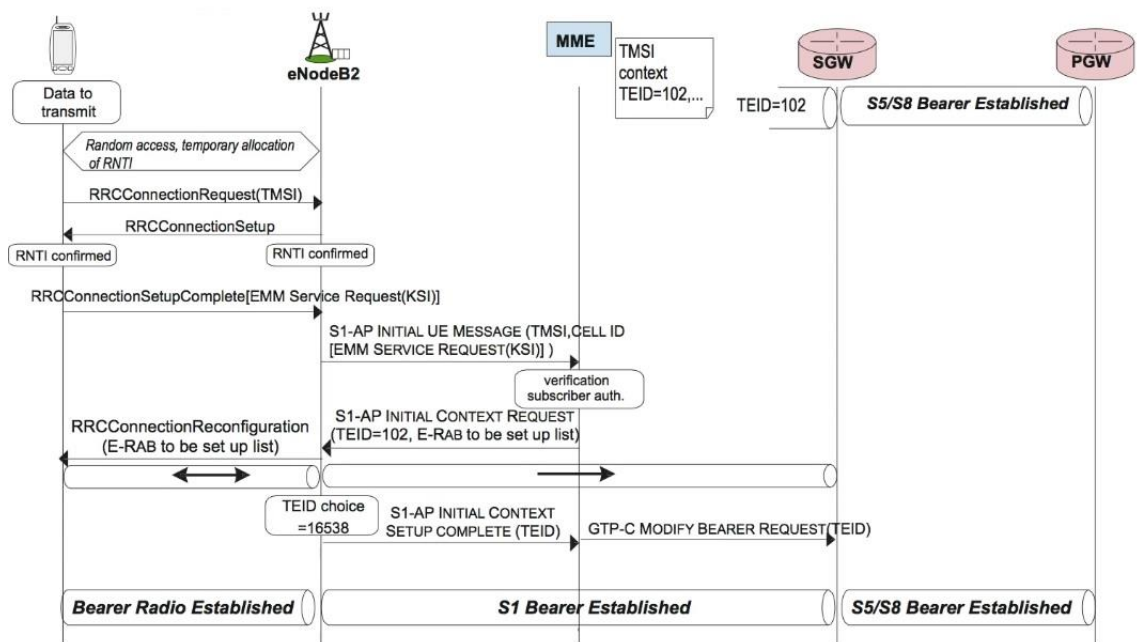
Per tant, quan es restableixi el túnel s'evitarà els intercanvis de missatges entre el MME i el SGW. Anem a veure com funciona. El començament del procediment és el mateix. A la següent il·lustració (veure il·lustració 145) s'indica que el MME guarda a la memòria algunes coses com el TEID, el valor del qual es considera assignat encara pel SGW, entre d'altres.



Il·lustració 145. El node MME emmagatzema el TEID utilitzat a la portadora anterior. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

El terminal té dades per transmetre: cal llavors l'accés aleatori, l'assignació d'un RNTI com abans, l'establiment d'una connexió ràdio, la confirmació del RNTI, l'enviament d'una sol·licitud de servei de dades de seguretat i, com anteriorment, l'establiment de la connexió S1-AP (una nova connexió entre el eNodeB i el MME).

El MME verifica que el subscriptor està autoritzat i pot respondre directament enviant el TEID 102 al eNodeB. D'aquesta forma, el eNodeB té un túnel que s'ha establert en l'enllaç ascendent, perquè coneix el TEID utilitzat pel SGW. A continuació pot enviar dades fàcilment utilitzant el TEID del destinatari.



Il·lustració 146. UE-Triggered Service Request Procedure. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

La connexió ràdio es restableix i el eNodeB escull el seu TEID (d'acord amb el seu propi sistema de referència). Després envia un missatge S1-AP Set Up Complete amb el valor del TEID, que serà emmagatzemat pel SGW.

Al final d'aquest intercanvi, el túnel S1 i la portadora S1 estan completament restablerts. Podem veure, a partir d'aquí, que les dades a transmetre podrien enviar-se per la connexió ràdio i pel túnel S1. Llavors, tindríem un procediment que permetria restablir

ràpidament la connexió. Tot i així, aquest procediment prendrà unes desenes de mil·lisegons (fins a 100ms).

Resumint els aspectes més destacats:

- Després de la inactivitat ràdio, la interfície S1 només s'allibera parcialment. Els valors TEID són emmagatzemats pel MME.
- Es defineix un procediment anomenat UE-Triggered Service Request o sol·licitud de servei d'engegada del UE, per restablir el més ràpid possible les interfícies i les connexions.
- Considerant un terminal connectat correctament a la xarxa amb un llarg període d'inactivitat ràdio (sense transmissió), si de sobte una aplicació té dades per transmetre en un moment (t), el terminal estableix una connexió ràdio i inicia un procediment de sol·licitud de servei actiu pel UE per sol·licitar el restabliment de la connexió S1-AP i el túnel S1.
- Després d'un llarg període d'inactivitat, el dispositiu torna a l'estat ECM-Idle. L'adreça IP es manté, però s'allibera la connexió ràdio, la connexió S1-AP i el túnel S1. Per tant, és impossible transmetre dades d'immediat. L'objectiu del procediment *UE-Triggered Service Request* és restablir totes les connexions i túnels per permetre la transmissió.

Considerem un ordinador portàtil amb un *pendrive* 4G connectat a la xarxa LTE, i que aquest no ha estat utilitzat durant diversos minuts. Si la xarxa no està sobrecarregada i enviem una sol·licitud de ping a una màquina IP (protocol ICMP), es mostra la captura següent:

```
Pinging 173.194.67.94 with 32 bytes of data :
Reply from 173.194.67.94 : bytes=32 time=422 ms TTL=44
Reply from 173.194.67.94 : bytes=32 time=57 ms TTL=44
Reply from 173.194.67.94 : bytes=32 time=70 ms TTL=44
Reply from 173.194.67.94 : bytes=32 time=49 ms TTL=44

Ping statistics for 173.194.67.94 :
Packets: Sent= 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss)
Approximate round trip times in milli-seconds:
Minimum = 49ms, Maximum = 422ms, Average= 150 ms
-----
```

Il·lustració 147. Captura d'un ping realitzat fent servir una xarxa LTE. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

- La transmissió ràdio es realitza en un *Transport Block* en un *sub-frame* d'1ms. Per tant, es requereix almenys 1ms per transmetre un paquet IP en LTE (es requereix un retard major a causa del procediment de sol·licitud de recursos).
- El primer ping s'envia mentre que el dispositiu mòbil es troba en estat ECM-Idle. El procediment UE-Triggered Service Request cal realitzar-se abans de transmetre un paquet, motiu pel qual la demora per al primer ping és més gran que per a la resta.

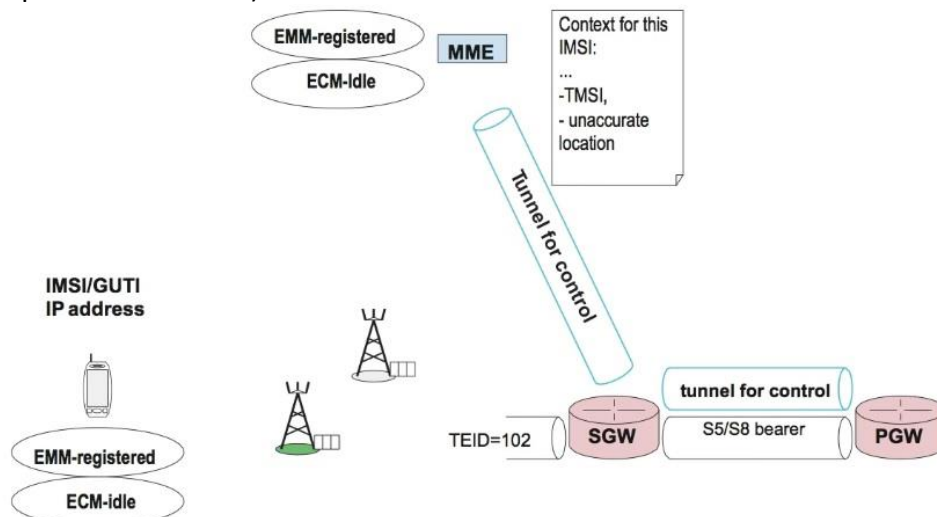
6.4 Network-Triggered Service Request

Si no fem servir el nostre terminal durant uns quants segons, aquest tornarà al mode *standby* pel que fa a la connexió ràdio. No obstant, si després de diversos minuts, un servidor vol enviar-nos un paquet, pot fer-ho encara que la nostra connexió ràdio no sigui activa? Aquesta és la pregunta que s'intentarà respondre en aquest apartat.

Com sabem d'apartats anteriors, quan un terminal cel·lular està connectat a la xarxa, té una adreça IP i el seu estat és EMM-Registered. Si es trobés inactiu, el seu estat seria ECM-Idle. I quan un usuari vol fer quelcom amb el seu terminal, desencadena la transmissió d'un paquet des del terminal cap a la xarxa, realitzant un *UE-Triggered Service Request*, amb la finalitat d'obtenir el restabliment de la connexió ràdio, la connexió S1-AP, i en tercer lloc la interfície S1 entre el eNodeB i el SGW.

Hi ha un altre procediment anomenat *Network-Triggered Service Request*, que s'utilitza perquè la xarxa LTE pugui restablir la connexió quan arribi un paquet IP procedent de la xarxa externa. Per exemple, si fem servir veu sobre IP, generalment s'està utilitzant el protocol SIP o *Session Initiation Protocol* que defineix un missatge per trucar al terminal. També podem tenir aplicacions que generen regularment missatges per ser enviats per un servidor. Per tant, és necessari aquest procediment de reconexió on la iniciativa prové de la xarxa externa. Al final del procediment, ja sigui *UE-Triggered Service Request* o *Network-Triggered Service Request*, el terminal es trobarà en l'estat EMM-Registered i ECM-Connected.

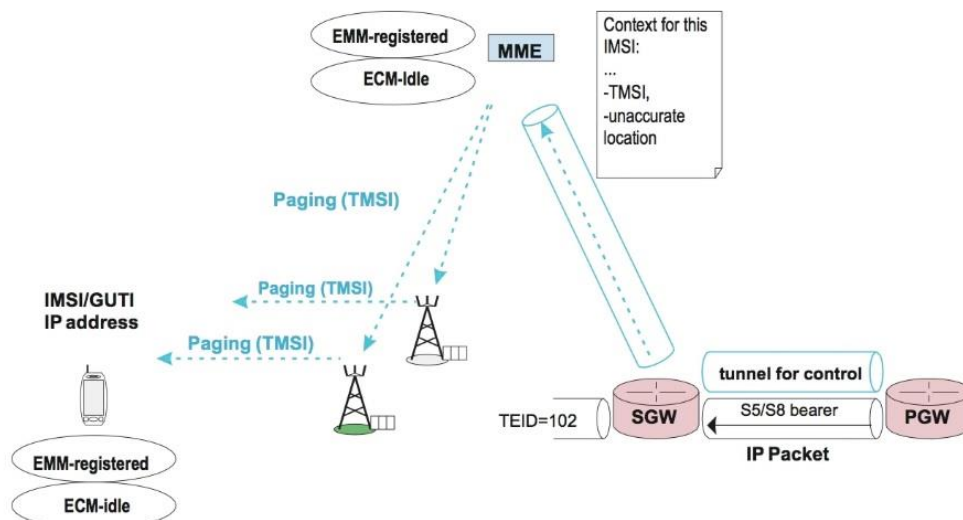
Considerem l'estat inicial, amb els túnels indicats a la il·lustració 148: els túnels entre el SGW i el PGW, i entre el SGW i el MME es mantenen, així com l'extrem del túnel S1 (costat del SGW). El terminal es troba inactiu respecte de l'estat ECM. Per tant, encara està connectat a la xarxa, i les identitats temporals associades són assignades (referent al GUTI que inclou el TMSI).



Il·lustració 148. Estat inicial: paquet IP enviat per un servidor al UE, el qual és rebut pel PGW. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

El fet que un servidor de la xarxa externa envii un paquet IP, desencadena el mecanisme. El paquet de dades és rebut pel PGW, el qual té un túnel de dades. Per tant, envia el paquet al SGW. Quant al SGW, fins i tot si coneix el TEID, no té un túnel que estigui realment actiu. Llavors, sol·licitarà al MME que restableixi la connexió.

No obstant, no sabem exactament a quin eNodeB es troba el terminal. El que es fa és enviar un missatge anomenat missatge de localització o *Paging Message* a totes les cel·les on es pot trobar el terminal. Aquest missatge de paginació conté el TMSI o *Temporary Mobile Subscriber Identity*. En qualsevol cas, el terminal està escoltant contínuament la xarxa (el que s'envia), i si alguna vegada veu el seu TMSI acompanyat d'algun *Paging Message*, es reactivarà. És a dir, el terminal, estigui on estigui, respondrà a la cerca.

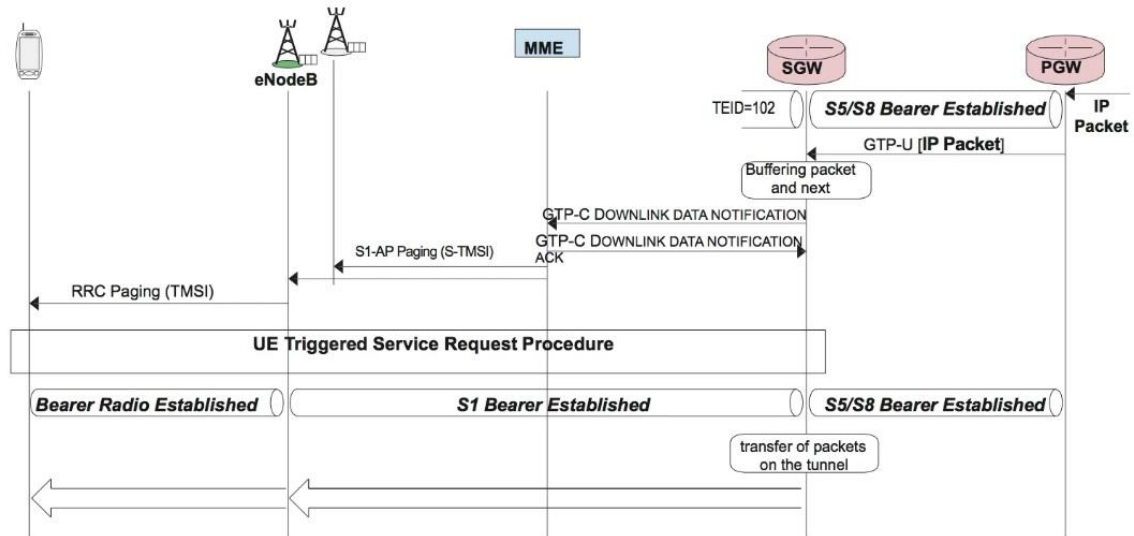


Il·lustració 149. Principi general de processament quan un paquet arriba d'una xarxa externa i el terminal es troba en mode standby. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

Anem a veure la taula de seqüències: el paquet IP prové de la xarxa externa. Tenim la interfície establerta entre el SGW i el PGW, i també el TEID (costat SGW). Per exemple, 102, que encara està reservat per al túnel S1. El PGW transmet el paquet IP al SGW, però aquest paquet no es pot entregar immediatament. Per tant, estarà en un buffer, i si hi ha més paquets, aquests es posaran en una cua (s'aniran emmagatzemant en el buffer). El SGW demana al MME que reactivi la connexió enviant un *Downlink Data Notification*.

A continuació, com el MME coneix la ubicació general del UE, envia un missatge anomenat S1-AP Paging, amb el TMSI del UE a cada cel·la on potencialment es pot ubicar al subscriptor. El eNodeB transmet aquest missatge a la interfície ràdio, pel que hi haurà tants missatges com eNodeBs als que el MME hagi enviat els missatges S1-AP Paging.

Si considerem la cel·la on es troba el UE, el terminal reaccionarà al S1-AP Paging i durà a terme el procediment *UE-Triggered Service Request*, el que causarà el restabliment de la connexió ràdio, la interfície ràdio corresponent i la interfície S1 entre el eNodeB i el SGW. Per descomptat, la interfície entre el SGW i el PGW es manté.



Il·lustració 150. Network-Triggered Service Request Procedure. X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

En aquest període de temps, alguns paquets poden continuar arribant al SGW, per tant, s'aniran emmagatzemant en el buffer i tant aviat com sigui possible, transferirà aquests paquets a les interfícies restablertes.

Depenent de l'estratègia de l'operador, pot haver una capacitat de memòria major o menor en el SGW. Podria ser que l'operador decideixi no emmagatzemar paquets en cua, pensant "si hi ha un protocol més alt com el TCP que s'ocupi del mecanisme de recuperació". Si l'operador desitja oferir un servei d'alta qualitat, és millor emmagatzemar els paquets entre el moment que es rep el primer paquet i el moment que les interfícies han sigut restablertes.

Quant als aspectes més destacats:

- Quan és fa servir el procediment *Network-Triggered Service Request*? Quan l'UE es troba en els estats EMM-Registered i ECM-Idle i quan un paquet ha d'enviar-se al UE.
- El principal problema és arribar al UE perquè es desconeix la seva ubicació exacta.
- Com funciona el procediment? Primer el MME localitza o pagina el UE en un conjunt de cel·les. I després, el UE activa el procediment de sol·licitud de servei o UE-Triggered Service Request.

7. Dimensionament i planificació ràdio

En els capítols previs s'ha destacat els aspectes més importants d'una xarxa LTE per entendre el seu funcionament. No obstant, el present capítol té per objecte abastar el disseny topològic, tenint en compte la xarxa d'accés i la infraestructura necessària per al desplegament de la xarxa que es proposarà.

El disseny de xarxa d'accés està basat en càlculs de cobertura i capacitat que ens poden oferir cada eNodeB independentment de la quantitat de subscriptors que es desitgi atendre. Aquets càlculs seran comparats amb les demandes de serveis i de capacitats actuals en el mercat, aconseguint d'aquesta manera calcular el nombre de eNodeBs necessaris.

7.0 Banda de freqüència i model de propagació

La capa física del LTE està pensada perquè operi a la part superior de la banda UHF. Per sobre dels 700MHz i fins els 3,5GHz. L'estàndard defineix fins a 40 possibles bandes d'operació treballant ja sigui en mode de duplexació per divisió de freqüència (FDD) o bé en duplexació per divisió de temps (TDD). A la següent il·lustració (veure il·lustració 151) es mostren les bandes de freqüències sobre les quals treballa LTE, tant en FDD com en TDD.

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive	Duplex Mode
	F _{UL low} – F _{UL high}	F _{DL low} – F _{DL high}	
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	FDD
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894MHz	FDD
6	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz	FDD
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz – 1784.9 MHz	1844.9 MHz – 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz – 1452.9 MHz	1475.9 MHz – 1500.9 MHz	FDD
12	698 MHz – 716 MHz	728 MHz – 746 MHz	FDD
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
...			
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	FDD
...			
33	1900 MHz – 1920 MHz	1900 MHz – 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz – 1910 MHz	1850 MHz – 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz – 1990 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz – 1930 MHz	1910 MHz – 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD

Il·lustració 151. Bandes de freqüència LTE. 3GPP TS 136 101 V9.4.0 (2010-06), "User Equipment (UE) radio transmission and reception".

És important destacar, que donada una banda d'operació, no existeix un valor fix de freqüència portadora, sinó un rang de possibles valors amb una separació entre ells igual al valor del Channel Raster (la separació mínima entre possibles freqüències portadores és de 100KHz).

La següent Il·lustració (veure il·lustració 152), s'indica algunes restriccions que tenen els canals respecte als amplex de banda:

E-UTRA Operating Band	Downlink			Uplink		
	F _{DL_low} [MHz]	N _{oms-DL}	Range of N _{DL}	F _{UL_low} [MHz]	N _{oms-UL}	Range of N _{UL}
1	2110	0	0 – 599	1920	18000	18000 – 18599
2	1930	600	600 – 1199	1850	18600	18600 – 19199
3	1805	1200	1200 – 1949	1710	19200	19200 – 19949
4	2110	1950	1950 – 2399	1710	19950	19950 – 20399
5	869	2400	2400 – 2649	824	20400	20400 – 20649
6	875	2650	2650 – 2749	830	20650	20650 – 20749
7	2620	2750	2750 – 3449	2500	20750	20750 – 21449
8	925	3450	3450 – 3799	880	21450	21450 – 21799
9	1844.9	3800	3800 – 4149	1749.9	21800	21800 – 22149
10	2110	4150	4150 – 4749	1710	22150	22150 – 22749
11	1475.9	4750	4750 – 4999	1427.9	22750	22750 – 22999
12	728	5000	5000 – 5179	698	23000	23000 – 23179
13	746	5180	5180 – 5279	777	23180	23180 – 23279
14	758	5280	5280 – 5379	788	23280	23280 – 23379
...						
17	734	5730	5730 – 5849	704	23730	23730 – 23849
...						
33	1900	36000	36000 – 36199	1900	36000	36000 – 36199
34	2010	36200	36200 – 36349	2010	36200	36200 – 36349
35	1850	36350	36350 – 36949	1850	36350	36350 – 36949
36	1930	36950	36950 – 37549	1930	36950	36950 – 37549
37	1910	37550	37550 – 37749	1910	37550	37550 – 37749
38	2570	37750	37750 – 38249	2570	37750	37750 – 38249
39	1880	38250	38250 – 38649	1880	38250	38250 – 38649
40	2300	38650	38650 – 39649	2300	38650	38650 – 39649

NOTE: The channel numbers that designate carrier frequencies so close to the operating band edges that the carrier extends beyond the operating band edge shall not be used. This implies that the first 7, 15, 25, 50, 75 and 100 channel numbers at the lower operating band edge and the last 6, 14, 24, 49, 74 and 99 channel numbers at the upper operating band edge shall not be used for channel bandwidths of 1.4, 3, 5, 10, 15 and 20 MHz respectively.

Il·lustració 152. Canals LTE. 3GPP TS 136 101 V9.4.0 (2010-06), "User Equipment (UE) radio transmission and reception".

Aquestes restriccions sorgeixen del fet d'ubicar la portadora dels canals extrems. Per tant, cal garantir que el canal ocupi una porció del ample de banda assignat i que el seu espectre no interfereixi als canals adjacents. Per exemple, si tenim un canal de 10MHz d'ample de banda, la seva portadora en l'extrem inferior ha d'estar separada de la freqüència mínima almenys en 5MHz, que és la meitat de l'ample de banda. A causa que el Channel Raster és de 0.1MHz, implica que $5\text{MHz}/0.1\text{MHz}=50$. Això vol dir, que els primers 50 canals (del 0 al 49) no es poden utilitzar. En general, la quantitat de canals que no es poden utilitzar ve expressat per: $\frac{BW[\text{MHz}]}{2} / 0.1$. El mateix procediment s'aplica per a l'extrem superior.

A la següent il·lustració podem observar amb més detall els amplex de banda permesos d'acord amb les bandes:

E-UTRA band / channel bandwidth						
E-UTRA Band	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
1			Yes	Yes	Yes	Yes
2	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes ^[1]	Yes ^[1]
3	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes ^[1]	Yes ^[1]
4	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
5	Yes	Yes	Yes	Yes ^[1]		
6			Yes	Yes ^[1]		
7			Yes	Yes	Yes	Yes ^[1]
8	Yes	Yes	Yes	Yes ^[1]		
9			Yes	Yes	Yes ^[1]	Yes ^[1]
10			Yes	Yes	Yes	Yes
11			Yes	Yes ^[1]		
12	Yes	Yes	Yes ^[1]	Yes ^[1]		
13			Yes ^[1]	Yes ^[1]		
14			Yes ^[1]	Yes ^[1]		
...						
17			Yes ^[1]	Yes ^[1]		
18			Yes	Yes ^[1]	Yes ^[1]	
19			Yes	Yes ^[1]	Yes ^[1]	
20			Yes	Yes ^[1]	Yes ^[1]	Yes ^[1]
21			Yes	Yes ^[1]	Yes ^[1]	
...						
33			Yes	Yes	Yes	Yes
34			Yes	Yes	Yes	
35	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
36	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
37			Yes	Yes	Yes	Yes
38			Yes	Yes	Yes	Yes
39			Yes	Yes	Yes	Yes
40			Yes	Yes	Yes	Yes

NOTE 1: bandwidth for which a relaxation of the specified UE receiver sensitivity requirement (Clause 7.3) is allowed.

Il·lustració 153. Ample de banda permès per bandes del LTE. 3GPP TS 136 101 V9.4.0 (2010-06), “User Equipment (UE) radio transmission and reception”.

La telefonia mòbil de quarta generació o 4G LTE pot utilitzar diferents freqüències segons la legislació de cada país. A Espanya, les bandes LTE possibles són les següents.

Leyenda

Sin uso		En uso		En pruebas	
Frecuencia (MHz)	Banda LTE	Frecuencias subida (MHz)	Frecuencias bajada (MHz)		
800	20	832-862	791-821		
1500	32	-	1452-1492		
1800	3	1710-1785	1805-1880		
2600	7	2500-2570	2620-2690		

Il·lustració 154. Freqüències i bandes LTE a Espanya.

- **Banda 800MHz:** coneguda com a dividend digital, aquesta banda abasta des dels 791MHz fins als 862MHz. Fins al 31 de març de 2015 es va fer servir per a serveis de radiodifusió de televisió, però una vegada traslladats els canals de la TDT a freqüències més baixes, s'utilitza per al LTE des de l'1 d'abril de 2015, la qual constitueix la banda 20 del LTE. Segons el Registre Públic de Concessions de Telecomunicacions, els operadors poden fer-la servir fins al 25/04/2031.

Així queda la concessió de la banda de 800 per operadors.

Bloque	Subida	Bajada	Operador	Concesión	Caducidad
2x5 MHz	832-837MHz	791-796MHz	Orange	01/04/2015	25/04/2031
2x5 MHz	837-842MHz	796-801MHz	Orange	01/04/2015	25/04/2031
2x5 MHz	842-847MHz	801-806MHz	Vodafone	01/04/2015	25/04/2031
2x5 MHz	847-852MHz	806-811MHz	Vodafone	01/04/2015	25/04/2031
2x5 MHz	852-857MHz	811-816MHz	Movistar	01/04/2015	25/04/2031
2x5 MHz	857-862MHz	816-821MHz	Movistar	01/04/2015	25/04/2031

Il·lustració 155. Concessió de la banda de 800 per operadors. Registre Públic de Concessions de Telecomunicacions.

- **Banda 1500MHz:** les freqüències que fins al moment estaven destinades a la radiodifusió digital DAB o *Digital Audio Broadcasting*, passen a mans dels operadors de telecomunicacions com a complement per donar servei 4G únicament en enllaç descendent (downlink). Característica del LTE-Advanced. Aquesta banda sortirà a subhasta pública pròximament.

Frecuencias	Ancho	Uso
1452-1492 MHz	40 MHz	Descarga

Il·lustració 156. Banda 32 del LTE (1500MHz).

- **Banda 1800MHz:** utilitzada originalment per a la tecnologia GSM, des de juliol de 2013 s'utilitza també per a la telefonia de quarta generació LTE. Aquesta banda constitueix la banda 3 del LTE. Segons el Registre Públic de Concessions de Telecomunicacions, els operadors poden fer-la servir fins al 31/12/2030.

Bloque	Subida	Bajada	Operador	Concesión	Caducidad
2x20 MHz	1710,1-1730,1 MHz	1805,1-1825,1 MHz	Movistar	24/07/1998	31/12/2030
2x20 MHz	1730,1-1750,1 MHz	1825,1-1845,1 MHz	Vodafone	24/07/1998	31/12/2030
2x5 MHz	1750,1-1755,1 MHz	1845,1-1850,1 MHz	Yoigo	15/06/2011	31/12/2030
2x5 MHz	1755,1-1760,1 MHz	1850,1-1855,1 MHz	Yoigo	15/06/2011	31/12/2030
2x4,8 MHz	1760,1-1764,9 MHz	1855,1-1859,9 MHz	Yoigo	15/06/2011	31/12/2030
2x20 MHz	1764,9-1784,9 MHz	1859,9-1879,9 MHz	Orange	24/07/1998	31/12/2030

Il·lustració 157. Concessió de la banda de 1800 per operadors. Registre Públic de Concessions de Telecomunicacions.

- **Banda 2600MHz:** S'utilitza per a la tecnologia mòbil de quarta generació LTE, en aquells llocs on la banda de 1800 no és suficient per estar molt saturada. Segons el Registre Públic de Concessions de Telecomunicacions, els operadors poden fer-la servir fins al 31/12/2030.

Bloque	Subida	Bajada	Cobertura	Operador	Concesión	Caducidad
2x10 MHz	2500-2510MHz	2620-2630MHz	Estatal	Movistar	10/10/2011	31/12/2030
2x10 MHz	2510-2520MHz	2630-2640MHz	Estatal	Movistar	10/10/2011	31/12/2030
2x10 MHz	2520-2530MHz	2640-2650MHz	Estatal	Orange	10/10/2011	31/12/2030
2x10 MHz	2530-2540MHz	2650-2660MHz	Estatal	Orange	10/10/2011	31/12/2030
2x5 MHz	2540-2545MHz	2660-2665MHz	Estatal	Vodafone	10/10/2011	31/12/2030
2x5 MHz	2545-2550MHz	2665-2670MHz	Estatal	Vodafone	10/10/2011	31/12/2030
2x5 MHz	2550-2555MHz	2670-2675MHz	Estatal	Vodafone	10/10/2011	31/12/2030

Il·lustració 158. Concessió de la banda 2600 per operadors en mode FDD. Registre Públic de Concessions de Telecomunicacions.

En el disseny es farà servir la nomenclatura (*Banda, N_{DL}, BW*) per identificar el canal sobre el qual es treballarà. Concretament es treballarà a la banda 3 del LTE, amb un identificador de freqüència (canal) lògic igual a 1300 i un ample de banda igual a 20MHz. Per tant, l'identificador resultant és el (3, 1300, 20) per a l'enllaç descendent.

Model de propagació

Per al càlcul del model de propagació, es farà servir el model a gran escala: Cost 231-Hata, el qual defineix les pèrdues de propagació mitjançant les equacions següents:

$$L_p = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_{BS} - a_{UE} + (44.9 - 6.55 \log h_{BS}) \log d + C$$

$$a_{UE} = (1.1 \log f - 0.7)h_{UE} - (1.56 \log f - 0.5)$$

On:

a_{UE} : factor de correcció de l'altura de l'antena del terminal (UE).

f : freqüència (MHz)

h_{BS} : altura de l'estació base

h_{UE} : altura del mòbil

d : distància entre el eNodeB i el UE

$C: \begin{cases} 0 & \text{zona rural} \\ 3 & \text{zona urbana} \end{cases}$

7.1 Càlculs de cobertura

Els càlculs de cobertures estan vinculats directament als càlculs de *Link Budget*. Aquest, permet quantificar tots els guanys i pèrdues de l'enllaç amb l'objectiu d'obtenir les pèrdues màximes admissibles per complir amb un requisit de qualitat donat pel SNR, *Signal-to-Noise Ratio* o el E_b/N_0 . Una vegada coneguda la màxima pèrdua que permet el sistema, es pot calcular el radi de cobertura fent servir un model de gran escala apropiat. Pel que fa a aquest Treball, el model Cost 231-Hata.

Càlcul de la sensibilitat del receptor per a cada modulació

La sensibilitat d'un receptor es defineix com la mínima potència rebuda necessària per complir amb el requeriment de la relació senyal-soroll SNR o E_b/N_0 . La següent equació defineix el càlcul.

$$S_{dbm} = -174 \frac{dBm}{Hz} + 10 \log BW_{dBm \cdot Hz} + NF_{dB} + SINR_{dB} + IM_{dB} - 3dB$$

On:

BW: ample de banda del canal (Hz).

NF: figura de soroll del receptor (dB).

IM: marge d'implementació (dB).

Mentre menor sigui la sensibilitat del receptor, millor serà el receptor. És a dir, a menor sensibilitat, el receptor pot treballar amb nivells de potència menors, amb la qual cosa permet que els sistemes tinguin una major cobertura. No obstant, també serà més costós.

- Pel que fa a les especificacions del LTE, la densitat de soroll tèrmic (kT), es defineix com -174dBm/Hz. On k és la constant de Boltzmann ($1.380662 \cdot 10^{-23}$) i T és la temperatura expressada en Kelvin.
- D'altra banda, la SINR requerida ve definida per la tecnologia que s'estigui fent servir i depèn, entre altres objectius, de la qualitat de la BER, de la modulació i de la codificació de canal emprada.
- La figura de soroll del receptor (NF) és una mesura de la degradació de la SINR causats pels components de la cadena del senyal de radiofreqüència. És a dir, la figura de soroll (NF) és una mesura que indica quant soroll addicional el receptor al senyal útil, i es manifesta com una reducció de la SNR a la sortida en comparació a l'entrada. L'estàndard LTE defineix un requisit de no sobrepassar els valors de 9dB per als UEs i de 5dB per als eNodeBs.
- L'IM és un marge que considera les diferències teòriques i pràctiques de la SINR. També considera la degradació del senyal a causa del tractament digital que s'hi aplica i del ús dels moduladors no lineals.

- Adicionalment, s'aplica un factor de correcció de 3dB per tenir en consideració l'ús d'antenes de recepció de doble guany.

Quant al Treball, l'anàlisi dels càlculs seran realitzats tant per a l'enllaç descendent (downlink) com per a l'enllaç ascendent (uplink).

Enllaç descendent (downlink)

A l'enllaç descendent es considera que l'equip transmissor és el eNodeB i l'equip receptor el UE. A causa que l'estàndard LTE presenta sistemes de modulació i codificació de canal adaptatius, la SINR obliga a variar la modulació i la codificació. A la il·lustració següent es mostra els valors del SINR establerts en el requeriments del LTE per a les diferents combinacions de modulació i taxes de codificació.

System	Modulation	Code rate	SINR (dB)	IM (dB)	SINR+IM (dB)
LTE UE	QPSK	1/8	-5.1	2.5	-2.6
		1/5	-2.9		-0.4
		1/4	-1.7		0.8
		1/3	-1		1.5
		1/2	2		4.5
		2/3	4.3		6.8
		3/4	5.5		8.0
		4/5	6.2		8.7
	16QAM	1/2	7.9	3	10.9
		2/3	11.3		14.3
		3/4	12.2		15.2
		4/5	12.8		15.8
64QAM	2/3	15.3	4	19.3	
	3/4	17.5		21.5	
	4/5	18.6		22.6	

Il·lustració 159. Valors de SINR a l'estàndard LTE, segons la modulació i taxa de codificació. [4]

L'ample de banda assignat segons la banda seleccionada té un valor de 20MHz, però per als càlculs es necessita obtenir l'ample de banda efectiu. Com sabem del capítol 4, l'assignació de recursos depèn de la canalització. Per a una canalització de 20MHz es té assignat 100 *Resource Blocks*. Adicionalment, se sap que l'ample de banda de cada *Resource Block* (RB) és de 180KHz, per tant, l'ample de banda efectiu serà el que es calcula a continuació:

$$BW_{efectiu} = \#RBs \cdot BW_{RB} = 100 \cdot 180KHz = 18MHz$$

A la següent taula es representa els càlculs obtinguts, per cada modulació i taxa de codificació, segons l'equació del càlcul de la sensibilitat del receptor per cada modulació.

Modulació	Taxa de codificació	SINR en RX (dB)	IM (dB)	Sensibilitat en el UE (dBm)
QPSK	1/8	-5.1	2.5	-98.05
	1/5	-2.9	2.5	-95.85
	1/4	-1.7	2.5	-94.65
	1/3	-1	2.5	-93.95
	1/2	2	2.5	-90.95
	2/3	4.3	2.5	-88.65
	3/4	5.5	2.5	-87.45
	4/5	6.2	2.5	-86.75
16-QAM	1/2	7.9	3	-84.55
	2/3	11.3	3	-81.15
	3/4	12.2	3	-80.25
	4/5	12.8	3	-79.65
64-QAM	2/3	15.3	4	-76.15
	3/4	17.5	4	-73.95
	4/5	18.6	4	-72.85

Il·lustració 160. Valors de sensibilitat a l'enllaç descendent (downlink). Elaboració pròpia.

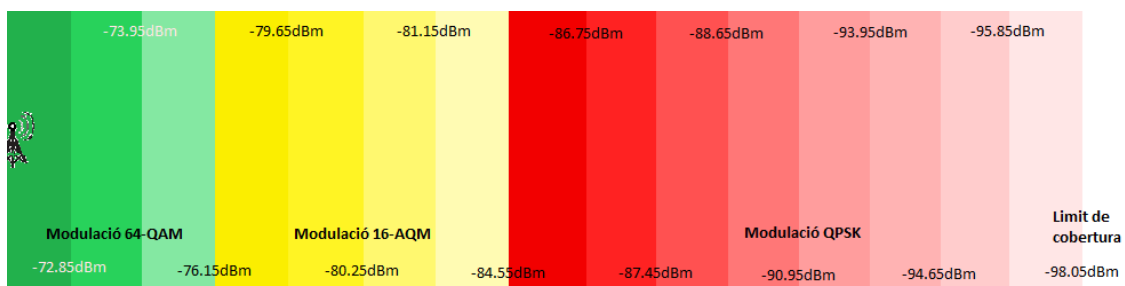
Anem a fer un exemple de càlcul de sensibilitat en el UE. Per a una modulació QPSK, amb una taxa de codificació 1/8, una SINR de -5.1dB, un IM de 2.5dB i un NF en el receptor de 9dB:

$$S_{dBm} = -174 \frac{dBm}{Hz} + 10 \log BW_{dBm \cdot Hz} + NF_{dB} + SINR_{dB} + IM_{dB} - 3dB$$

$$S_{dBm} = -174 \frac{dBm}{Hz} + 10 \log(18 \cdot 10^6) + 9dB - 5.1dB + 2.5dB - 3dB =$$

$$S_{dBm} = -98.05dBm$$

A la il·lustració següent es pot observar les variacions de la sensibilitat d'acord al tipus de modulació per a l'enllaç descendent.



Il·lustració 161. Variacions de sensibilitat a l'enllaç descendent (downlink). Elaboració pròpia.

Enllaç ascendent (uplink)

En aquest cas es considera que l'equip transmissor és el UE i l'equip receptor és el eNodeB. Considerem el UE de categoria 5 (Cat. 5), ja que aquesta categoria suporta la modulació 64-QAM en uplink, i a dia d'avui és estès a tot arreu (fabricants). Per saber més sobre les categories UE del LTE es recomana visitar l'adreça del [3GPP](#).

A la següent taula es representa els càlculs obtinguts, per cada modulació i taxa de codificació, segons l'equació del càlcul de la sensibilitat del receptor per cada modulació.

Modulació	Taxa de codificació	SINR en RX (dB)	IM (dB)	Sensibilitat en el eNodeB (dBm)
QPSK	1/8	-5.1	2.5	-102.05
	1/5	-2.9	2.5	-99.85
	1/4	-1.7	2.5	-98.65
	1/3	-1	2.5	-97.95
	1/2	2	2.5	-94.95
	2/3	4.3	2.5	-92.65
	3/4	5.5	2.5	-91.45
	4/5	6.2	2.5	-90.75
16-QAM	1/2	7.9	3	-88.55
	2/3	11.3	3	-85.15
	3/4	12.2	3	-84.25
	4/5	12.8	3	-83.65
64-QAM	2/3	15.3	4	-80.15
	3/4	17.5	4	-77.95
	4/5	18.6	4	-76.85

Il·lustració 162. Valors de sensibilitat a l'enllaç ascendent (uplink). Elaboració pròpia.

A l'hora de fer els càlculs de sensibilitat en el eNodeB s'ha tingut en compte que l'ample de banda efectiu és de 18MHz i que la figura de soroll (NF) és de 5dB, tal com defineix l'estàndard.

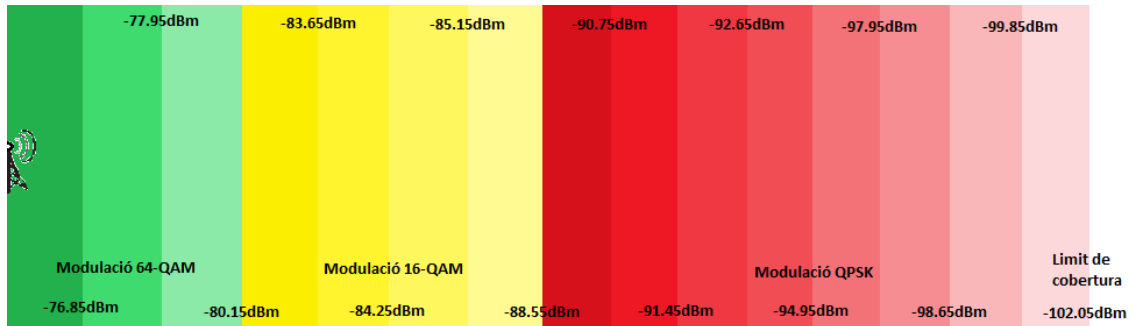
Si fem un exemple de càlcul de sensibilitat en el eNodeB. Per a una modulació QPSK, amb una taxa de codificació 1/8, una SINR de -5.1dB, un IM de 2.5dB i un NF en el receptor de 5dB:

$$S_{dBm} = -174 \frac{dBm}{Hz} + 10 \log BW_{dBm \cdot Hz} + NF_{dB} + SINR_{dB} + IM_{dB} - 3dB$$

$$S_{dBm} = -174 \frac{dBm}{Hz} + 10 \log(18 \cdot 10^6) + 5dB - 5.1dB + 2.5dB - 3dB =$$

$$S_{dBm} = -102.05dBm$$

A la il·lustració 163 es pot observar les variacions de sensibilitat d'acord al tipus de modulació per a l'enllaç ascendent (uplink). De manera molt similar com succeïa a l'enllaç descendent, el valor de la sensibilitat varia de manera inversament proporcional a la distància entre el eNodeB i el UE.



Il·lustració 163. Variacions de sensibilitat a l'enllaç ascendent (uplink). Elaboració pròpia.

Radi de cobertura de cel·la.

Els valors de sensibilitat obtinguts ens permeten realitzar els càlculs per obtenir el radi de cobertura de la cel·la. S'ha de tenir en compte l'escenari realitzat: enllaç descendent o enllaç ascendent.

- **Enllaç descendent**

Per als càlculs serà necessari tenir en compte les següents dades:

- Valors de sensibilitat límits en la cobertura ràdio.
- Pèrdues per propagació.
- Màxima pèrdua permesa.

Valors de sensibilitat límits en la cobertura ràdio.

Els valors límits de sensibilitat dels equips terminals estan relacionats amb el tipus de modulació amb el que està treballant el sistema (QPSK, 16-QAM, 64-QAM). Dels resultats obtinguts a la il·lustració 160, podem definir els valors de sensibilitat en els extrems delimitats pel tipus de modulació, segons es detalla a la següent taula.

Modulació	SINR mínim en RX (dB)	SINR màxim en RX (dB)	Sensibilitat mínima (dBm)	Sensibilitat màxima (dBm)
QPSK	-5.1	7.9	-98.05	-84.55
16-QAM	7.9	15.3	-84.55	-76.15
64-QAM	15.3	18.6	-76.15	NA

Il·lustració 164. Valors límits de sensibilitat segons la modulació per a l'enllaç descendent. Elaboració pròpia.

Pèrdues per propagació.

En aquest cas, la freqüència portadora és la freqüència de l'enllaç descendent i es calcula amb la següent equació:

$$F_{DL} = F_{DL_LOW} + 0.1(N_{DL} - N_{OFF_DL})$$

On:

- F_{DL} : freqüència central a l'enllaç descendent.
- F_{DL_LOW} : freqüència límit inferior de la banda.
- N_{DL} : identificador de la freqüència, denominat *Absolute Radio Frequency Channel Number* de l'enllaç descendent.
- N_{OFF_DL} : indica l'identificador inferior de freqüència dins del rang d'una banda.

Si substituïm els valors de la il·lustració 152, d'acord al canal seleccionat per al disseny plantejat: identificador resultant ($Banda, N_{DL}, BW$) = (3, 1300, 20).

$$F_{DL} = 1805 + 0.1(1300 - 1200) = 1815MHz$$

Coneixent el valor de la freqüència central F_{DL} podem calcular el a_{UE} (factor de correcció d'altura de l'antena del terminal UE), el qual es reemplaçarà a l'equació de les pèrdues de propagació Cost 231-Hata.

$$a_{UE} = (1.1 \log f - 0.7)h_{UE} - (1.56 \log f - 0.5)$$

$$a_{UE} = (1.1 \log 1815 - 0.7) \cdot 1.5 - (1.56 \log 1815 - 0.5) = 0.2567dB$$

Substituïm el valor anterior a l'equació de les pèrdues de propagació:

$$L_p = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_{BS} - a_{UE} + (44.9 - 6.55 \log h_{BS}) \log d + C$$

$$L_p = 46.3 + 33.9 \log 1815 - 13.82 \log 25 - 0.2567 + (44.9 - 6.55 \log 25) \log d + 3$$

$$L_p = 140.1997 + 35.7435 \log d$$

Màxima pèrdua permesa.

A qualsevol sistema de comunicació ràdio es compleix:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L - M$$

On:

- P_{RX} : potència disponible en l'antena de recepció.
- P_{TX} : potència de sortida en l'antena de transmissió.
- G_{TX} : guany de l'antena transmissora.

- G_{RX} : guany de l'antena receptora.
- L : pèrdues de propagació (trajectòria).
- M : marge de pèrdues.

Les pèrdues per propagació seran màximes quan $P_{RX} = S$.

$$L_{max.} = MPLA = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - M - S$$

$$L_{max.} = MPLA = EIPR + G_{RX} - M - S$$

El valor de la sensibilitat (S) depèn de la modulació que s'estigui fent servir i de la ubicació del UE: límit inferior o superior de l'àrea de cobertura.

A la taula següent (veure il·lustració 165) es mostra un resum de les especificacions tècniques de l'equip transmissor (estació base) i del equip receptor (terminal cel·lular).

Característiques del TX [eNodeB]	Unitats	Valor
Potència de transmissió PTX	dBm	46.00
Guany element radiant	dBi	18.5
Elements de l'agrupació (array)	NA	1
Guany per elements de l'agrupació	dB	0.00
Guany per Beam Forming	dB	0.00
Guany per sistema MIMO	dB	0.00
EIRP: Potència Efectiva Radiada Isòtropa	dBm	64.50
Característiques del RX [UE]		
Guany de cada element radiant d'antena RX	dBi	0.00
Quantitat d'elements de l'agrupació	NA	1
Guany per diversitat d'antenes	dB	0.00
Guany total en RX	dB	0.00
Marges		
Marge de Fading Log Normal	dB	6.00
Fast Fading Margin	dB	2.00
Interference Margin	dB	2.00
Pèrdues per penetració	dB	2.00
Marge Total	dB	12.00

Il·lustració 165. Especificacions tècniques de l'equip transmissor i receptor, a l'enllaç descendent.
Elaboració pròpia.

Prenent les dades de la taula anterior i considerant les dades obtingudes per a la sensibilitat al downlink (il·lustració 160), cal substituir a l'equació de pèrdues màximes per propagació, i així obtenir la màxima pèrdua permesa per a la modulació QPSK.

$$MPLA_{intern} = 64.5 + 0 - 12 - (-84.55) = 137.05dB$$

$$MPLA_{extern} = 64.5 + 0 - 12 - (-98.05) = 150.55dB$$

Calculant de forma anàloga les pèrdues màximes per propagació per a les modulacions 16QAM i 64QAM, obtenim els resultats de la il·lustració següent.

Modulació	Sensibilitat		MPLA	
	Mínima	Màxima	Mínima	Màxima
QPSK	-98.05dBm	-84.55dBm	137.05dB	150.55dB
16QAM	-84.55dBm	-76.15dBm	128.65 dB	137.05dB
64QAM	-76.15dBm	NA	NA	128.65dB

Il·lustració 166. Valors de MPLA a l'enllaç descendent. Elaboració pròpia.

Per obtenir els radis de cobertura serà necessari igualar l'equació del model de propagació Cost 231-Hata amb els valors obtinguts de MPLA calculats.

Com a exemple, per a la modulació QPSK:

Radi intern:

$$140.1997 + 35.7435 \log d = 137.05 \Rightarrow \log d = \frac{137.05 - 140.1997}{35.7435} \Rightarrow$$

$$d = 10^{\frac{137.05 - 140.1997}{35.7435}} = 0.8164Km$$

Radi extern:

$$140.1997 + 35.7435 \log d = 150.55 \Rightarrow \log d = \frac{150.55 - 140.1997}{35.7435} \Rightarrow$$

$$d = 10^{\frac{150.55 - 140.1997}{35.7435}} = 1.9479Km$$

Calculant anàlogament per a les modulacions 16QAM i 64QAM, obtenim els resultats de la taula següent, la qual mostra el rang de cobertura dels anells o corones circulars segons la modulació.

Modulació	Radi	
	Mínim	Màxim
QPSK	0.816Km	1.948Km
16QAM	0.475Km	0.816Km
64QAM	NA	0.475Km

Il·lustració 167. Radis de cobertura segons la modulació a l'enllaç descendent. Elaboració pròpia.

▪ Enllaç ascendent

De manera similar a l'enllaç descendent, serà necessari tenir en compte les dades següents:

- Valors de sensibilitat límits en la cobertura ràdio.
- Pèrdues per propagació.
- Màxima pèrdua permesa.

Valors de sensibilitat límits en la cobertura ràdio

Com succeïa a l'enllaç descendent, dels resultats obtinguts de la taula "valors de sensibilitat en l'enllaç ascendent (il·lustració 162)" podem definir els valors de sensibilitat de l'estació base en els límits de les corones circulars delimitats pel tipus de modulació, segons es detalla a la il·lustració següent.

Modulació	SINR mínim en RX (dB)	SINR màxim en RX (dB)	Sensibilitat mínima (dBm)	Sensibilitat màxima (dBm)
QPSK	-5.1	7.9	-102.05	-88.55
16-QAM	7.9	15.3	-88.55	-80.15
64-QAM	15.3	18.6	-80.15	NA

Il·lustració 168. Valors límits de sensibilitat segons la modulació per a l'enllaç ascendent. Elaboració pròpia.

Pèrdues per propagació

En aquest cas, la freqüència portadora fa referència a la freqüència de l'enllaç ascendent (uplink) i es calcula amb la següent equació.

$$F_{UL} = F_{UL_LOW} + 0.1(N_{UL} - N_{OFF_UL})$$

On:

- F_{UL} : freqüència central a l'enllaç ascendent.
- F_{UL_LOW} : freqüència límit inferior de la banda.
- N_{UL} : identificador de la freqüència, denominat *Absolute Radio Frequency Channel Number* de l'enllaç ascendent.
- N_{OFF_UL} : indica l'identificador inferior de freqüència dins del rang d'una banda.

Si substituïm els valors de la il·lustració 152, d'acord al canal seleccionat per al disseny plantejat: identificador resultant ($Banda, N_{UL}, BW$) = (3, 19300, 20). Veiem com per al rang del N_{UL} està comprès entre 19200 i 19949. Per al disseny, s'agafarà $N_{UL} = 19300$

Substituint valors a l'equació anterior:

$$F_{UL} = 1710 + 0.1(19300 - 19200) = 1720MHz$$

Coneixent el valor de la freqüència uplink F_{UL} , podem calcular el a_{UE} (factor de correcció d'altura de l'antena del terminal UE), el qual es reemplaçarà a l'equació de les pèrdues de propagació Cost 231-Hata.

$$a_{UE} = (1.1 \log f - 0.7)h_{UE} - (1.56 \log f - 0.5)$$

$$a_{UE} = (1.1 \log 1720 - 0.7) \cdot 1.5 - (1.56 \log 1720 - 0.5) = -0.2588dB$$

Substituïm el valor anterior a l'equació de les pèrdues de propagació:

$$L_p = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_{BS} - a_{UE} + (44.9 - 6.55 \log h_{BS}) \log d + C$$

$$L_p = 46.3 + 33.9 \log 1720 - 13.82 \log 25 + 0.2588 + (44.9 - 6.55 \log 25) \log d + 3$$

$$L_p = 139.9237 + 35.7435 \log d$$

Màxima pèrdua permesa

De la mateixa manera que al càlcul de l'enllaç descendent, la pèrdua permesa serà màxima quan $P_{RX} = S$.

$$L_{max.} = MPLA = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - M - S$$

$$L_{max.} = MPLA = EIPR + G_{RX} - M - S$$

Característiques del TX [UE LTE]	Unitats	Valor
Potència de transmissió PTX	dBm	23.00
Guany element radiant	dBi	0.00
Elements de l'agrupació (array)	NA	1
Guany per elements de l'agrupació	dB	0.00
Guany per Beam Forming	dB	0.00
Guany per sistema MIMO	dB	0.00
EIRP: Potència Efectiva Radiada Isòtropa	dBm	23.00
Característiques del RX [eNodeB]		
Guany de cada element radiant d'antena RX	dBi	18.5
Quantitat d'elements de l'agrupació	NA	1
Guany per diversitat d'antenes	dB	0.00
Guany total en RX	dB	18.5
Marges		
Marge de Fading Log Normal	dB	6.00
Fast Fading Margin	dB	2.00
Interference Margin	dB	2.00
Pèrdues per penetració	dB	2.00
Marge Total	dB	12.00

Il·lustració 169. Especificacions tècniques dels equips transmissor i receptor, en l'enllaç ascendent.
Elaboració pròpia.

A la il·lustració 169 es mostren les especificacions tècniques del equip transmissor (UE) i del equip receptor (eNodeB).

Prenent les dades de la taula anterior i considerant les dades obtingudes per a la sensibilitat al downlink (il·lustració 160), cal substituir a l'equació de pèrdues màximes per propagació, i així obtenir la màxima pèrdua permesa per a la modulació QPSK.

$$MPLA_{intern} = 23 + 18.5 - 12 - (-88.55) = 118.05dB$$

$$MPLA_{extern} = 23 + 18.5 - 12 - (-102.05) = 131.55dB$$

Calculant de forma anàloga les pèrdues màximes per propagació per a les modulacions 16QAM i 64QAM, obtenim els resultats de la il·lustració següent.

Modulació	Sensibilitat		MPLA	
	Mínima	Màxima	Mínima	Màxima
QPSK	-102.05dBm	-88.55dBm	118.05dB	131.55dB
16QAM	-88.55dBm	-80.15dBm	109.65dB	118.05dB
64QAM	-80.15dBm	NA	NA	109.65dB

Il·lustració 170. Valors de màxima pèrdua permesa en l'enllaç ascendent. Elaboració pròpia.

Cadascun dels valors de màxima pèrdua permesa obtinguts a la taula anterior, amb l'equació de pèrdues per propagació (model Cost 231-Hata) obtenim el rang de cobertura dels anells o corones circulars segons la modulació. La següent taula (il·lustració 171) mostra aquests resultats.

Modulació	Radi	
	Mínim	Màxim
QPSK	0.244Km	0.583Km
16QAM	0.142Km	0.244Km
64QAM	NA	0.142Km

Il·lustració 171. Radis de cobertura segons la modulació a l'enllaç ascendent. Elaboració pròpia.

Com a exemple de càlcul, per a la modulació QPSK:

Radi intern:

$$139.9237 + 35.7435 \log d = 118.05 \Rightarrow \log d = \frac{118.05 - 139.9237}{35.7435} \Rightarrow$$

$$d = 10^{\frac{118.05 - 139.9237}{35.7435}} = 0.244Km$$

Radi extern:

$$139.9237 + 35.7435 \log d = 131.55 \Rightarrow \log d = \frac{131.55 - 139.9237}{35.7435} \Rightarrow$$

$$d = 10^{\frac{131.55 - 139.9237}{35.7435}} = 0.583 \text{ Km}$$

Calculant anàlogament per a les modulacions 16QAM i 64QAM, obtenim els resultats de la taula anterior, la qual mostra el rang de cobertura dels anells o corones circulars segons la modulació.

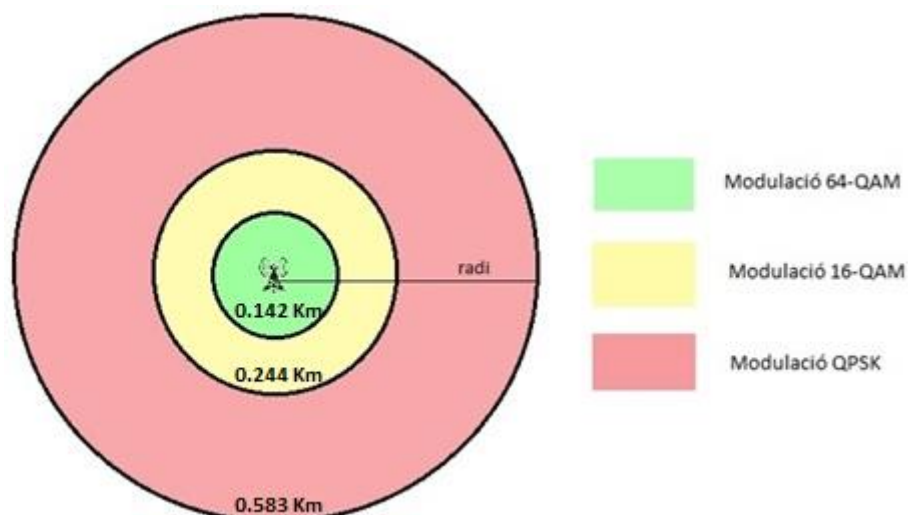
Àrea de cobertura de cel·la

Fins ara s'ha calculat de manera independent els radis de cobertura, tant per a l'enllaç descendent com per a l'enllaç ascendent. A la taula següent (il·lustració 172) es mostra el "radi de l'enllaç dominant", el qual és el radi de menor valor dels obtinguts entre els enllaços uplink i downlink.

Modulació	Enllaç descendent		Enllaç ascendent		Enllaç dominant	
	Mínim	Màxim	Mínim	Màxim	Mínim	Màxim
QPSK	0.816Km	1.948Km	0.244Km	0.583Km	0.244Km	0.583Km
16-QAM	0.475Km	0.816Km	0.142Km	0.244Km	0.142Km	0.244Km
64-QAM	NA	0.475Km	NA	0.142Km	NA	0.142Km

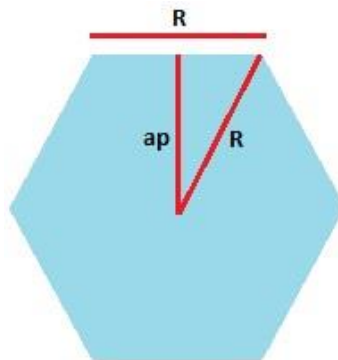
Il·lustració 172. Radi de l'enllaç dominant. Elaboració pròpia.

A la següent figura (il·lustració 173) s'observa la cobertura segons la modulació per al denominat "radi de l'enllaç dominant".



Il·lustració 173. Cobertura de l'enllaç dominant, segons la modulació. Elaboració pròpia.

Pel que fa a l'àrea de cobertura de cel·la hexagonal, aquesta estarà basada en la de radi més gran.



Il·lustració 173. Àrea d'una cel·la hexagonal. Elaboració pròpia.

De la figura anterior, es dedueix que l'àrea total del hexàgon és:

$$A = 12 \cdot S_T = 12 \cdot \frac{R}{2} \cdot ap \cdot \frac{1}{2} = 3 \cdot R \cdot ap$$

Desenvolupant el triangle:

$$R^2 = ap^2 + \left(\frac{R}{2}\right)^2 \Rightarrow R^2 - \frac{R^2}{4} = ap^2 \Rightarrow \sqrt{\frac{3 \cdot R^2}{4}} = \sqrt{ap^2}$$

$$\frac{R \cdot \sqrt{3}}{2} = ap \Rightarrow R = \frac{2 \cdot ap}{\sqrt{3}} = \frac{2\sqrt{3} \cdot ap}{3}$$

Substituint a l'equació de l'àrea del hexàgon:

$$A = 3 \cdot R \cdot ap \Rightarrow A = 3 \cdot \frac{2\sqrt{3} \cdot ap}{3} \cdot ap \Rightarrow A = 2\sqrt{3} \cdot ap^2$$

O bé, si volem expressar l'àrea de l'hexàgon en funció de només el radi:

$$A = 2\sqrt{3} \cdot ap^2 \Rightarrow A = 2\sqrt{3} \cdot \frac{3}{4} \cdot R^2 \Rightarrow A = \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot R^2$$

De la il·lustració 172 s'observa que el radi màxim, de l'enllaç dominant és $R_{max} = 0.583Km$. Substituint a l'equació de l'àrea del hexàgon obtenim:

$$A = \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot 0.583^2 = 0.88305Km^2$$

A causa que el disseny de cel·la estarà format per 3 sectors (trisectorial) i tenint en compte que cada antena té un feix d'amplada horitzontal aproximat de 60° , implica que cada antena només cobreix 120° respecte del àrea de cobertura de cada cel·la.

Per tant:

$$A_{sector} = \frac{A_{cel\cdot la}}{3} = \frac{0.88305km^2}{3} \sim 0.29435Km^2/sector$$

Anells de cobertura per modulació

A la taula següent (il·lustració 174) es mostra els radis que formen cada anell o corona circular segons la modulació. També s'indica l'àrea de cobertura i el percentatge que representa de l'àrea total (basat en radis de l'enllaç dominant obtinguts de la il·lustració 172).

S'ha de tenir en compte que les àrees que es mostren només corresponen a un sector de la cel·la (cada eNodeB té 3 sectors).

Modulació	Radi mínim	Radi màxim	Àrea de l'anell hexagonal	Àrea Total [Km ²]	Percentatge de l'àrea total
QPSK	0.244Km	0.583Km	0.24279282Km ²	0.29435	82.48%
16-QAM	0.142Km	0.244Km	0.03409715Km ²		11.58%
64-QAM	NA	0.142Km	0.01746253Km ²		5.93%

Il·lustració 174. Àrees de cobertura d'un sector. Elaboració pròpia.

7.2 Capacitat del DL i del UL

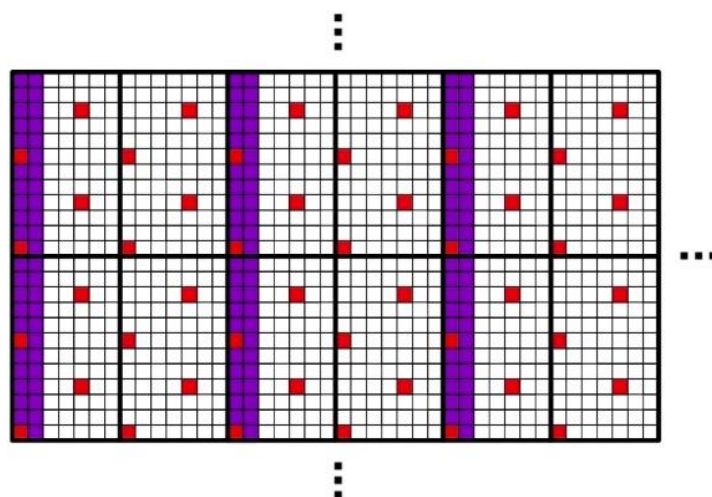
La capacitat assignada depèn de cada anell que representa una modulació en concret, els quals disposa d'una quantitat de recursos proporcionals al percentatge d'àrea que es troba sota el seu abast. Per tant, a la modulació QPSK li correspon el 82.48% dels recursos, a la modulació 16-QAM el 11.58% i el 5.93% li correspon a la modulació 64-QAM.

No obstant, aquest repartiment de recursos està sotmès a la condició següent: l'assignació de recursos a cada modulació ha de ser un submúltiple de la quantitat de *Resource Blocks* assignats, per tal que a cada modulació hi hagi un nombre enter de *Resource Blocks*.

Quantitat de recursos per modulació

Cada sector disposa d'una quantitat de recursos en el DL perquè sigui repartit entre els usuaris. Aquesta distribució dels recursos ha de ser proporcional al percentatge d'àrea coberta per modulació, ja que els usuaris es distribueixen de manera aleatòria i els recursos que s'assignen sota demanda depenen de paràmetres de QoS i del perfil de cada usuari. Pel que fa a la planificació ràdio d'aquest Treball es considerarà el següent:

- Canalització amb un ample de banda $BW = 20MHz$, el qual segons l'estàndard LTE permet treballar amb 100 *Resource Blocks*.
- Ús del prefix cíclic (normal). Cada *Resource Block* està constituït per 7 símbols i 12 portadores.
- Quant als canals de senyalització i control, aquests tenen un cicle de repetició de cada 2 *Resource Blocks*. Per tant, la quantitat de *Resource Elements* és de 168.



Il·lustració 175. Resource Elements reservats (acolorits en porpra o vermell). C. Couturier "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom (Course Slides), 2018.

- Tenint en compte els símbols de PDCCH, altres senyals i canals de control, només queden 138 *Resource Elements* disponibles per *sub-frame*. (Caselles de color blanc a la il·lustració 175).

A l'hora de calcular la capacitat del sistema, es calcularà segons l'equació següent:

$$C = \#RBs \frac{\frac{\#REs}{slot} \cdot \frac{\#bits}{símbol}}{\frac{0.5ms}{slot}}$$

Tenint en compte la canalització de 20MHz (100 *Resource Blocks*) i que l'assignació de *Resource Blocks* per modulació ha de ser proporcional al percentatge de cobertura que abasta cada modulació, es considerarà a la següent taula: 84 *Resource Blocks* per a la modulació QPSK, 10 *Resource Blocks* per a la modulació 16-QAM i 6 *Resource Blocks* per a la modulació 64-QAM (valors molt propers als percentatges de cobertura, respectivament). Això és així perquè els *Resource Blocks* han de ser nombres enters.

Modulació	Enllaç descendent			Enllaç ascendent		
	RBs	REs	Peak Rate	RBs	REs	Peak Rate
QPSK	84	7056	28.224 Mbps	84	7056	28.224 Mbps
16-QAM	10	840	6.72 Mbps	10	840	6.72 Mbps
64-QAM	6	504	6.048 Mbps	6	504	6.048 Mbps

Il·lustració 176. Capacitat dels enllaços segons la modulació. Elaboració pròpia.

Com a exemple de càlcul, trobem els REs i el Peak Rate per a la modulació QPSK:

$$REs = 84 RBs \cdot 12 subportadores \cdot 7 símbols/subportadora = 7056 REs$$

$$C = 84 RBs \cdot \frac{\frac{84 REs}{slot} \cdot \frac{2 bits}{símbol}}{\frac{0.5 ms}{slot}} = 28.224 Mbps$$

Pel a l'enllaç ascendent, cal tenir en compte que els equips terminals que s'estan proposant en la planificació són de categoria 5, els quals suporten la modulació 64-QAM. Aquesta és la raó per la qual els terminals poden treballar amb modulació 64-QAM a l'enllaç ascendent.

Ara bé, aquests càlculs de capacitats segons la modulació és en base a la distribució aleatòria dels usuaris. Ben és cert, que els *Peak Data Rate* són bastant més elevats tant per al *uplink* com per al *downlink*.

Per corroborar el que estem dient, procedirem a calcular el *Peak Data Rate* segons la modulació i en unes condicions òptimes (ideals). Pensem en un usuari que es troba en un radi inferior a 100 metres respecte del eNodeB i que per tant, el terminal treballa amb la modulació 64-QAM per les condicions del canal. Són les 03h de la matinada i la xarxa no està sobrecarregada. Considerant una canalització de 20MHz (100 RBs), una

modulació 64-QAM, un prefix cíclic normal (7símbols per portadora). Procedim a calcular el *Peak Rate* i el *Peak Data Rate*.

Primerament calculem el nombre de REs i la capacitat [Mbps] necessaris:

$$REs = 100 RBs \cdot 12 \text{ subportadores} \cdot 7 \frac{\text{símbols}}{\text{subportadora}} = 8400 REs/0.5ms$$

$$C = 100 RBs \cdot \frac{\frac{84 REs}{\text{slot}} \cdot \frac{6 \text{ bits}}{\text{símbol}}}{\frac{0.5 ms}{\text{slot}}} = 100.8 Mbps$$

Aquesta capacitat inclou tant les dades d'usuari com els canals de senyalització del sistema i els senyals de referència. Si estíem que els recursos destinats a control i senyalització en LTE oscil·len al voltant del 15-20%, la capacitat total disponible per a l'usuari serà aproximadament de 80 Mbps. Aquestes taxes de bit es corresponen a un sistema sense multiplexació espacial, és a dir, sense MIMO del anglès *Multiple Input Multiple Output*.

En cas de considerar una estructura MIMO 2x2 es pot estimar que les velocitats de pic serien el doble. Per tant, la interfície ràdio del sistema LTE podria aconseguir a l'enllaç descendent, si tenim una canalització de 20MHz, una velocitat de pic de 150-160Mbps. No obstant, com ja sabem les velocitats de pic aconseguides pels usuaris depenen de molts factors (qualitat del canal ràdio, nombre d'usuaris simultanis a la cel·la, tipus de desplegament realitzat per l'operador, QoS associada, capacitat del terminal mòbil, etc.).

Capacitat total del UL i del DL

La capacitat total, a l'enllaç ascendent i a l'enllaç descendent, serà la suma de cadascuna de les capacitats obtingudes per modulació, segons l'equació següent:

$$C_{eNB} = C_{QPSK} + C_{16QAM} + C_{64QAM}$$

És a dir, la capacitat total per al disseny proposat segons la distribució aleatòria dels usuaris i l'assignació de recursos per modulació proporcionals als percentatges d'àrees que abasta cada modulació, és la següent:

Modulació	Enllaç descendent			Enllaç ascendent		
	RBs	REs	Peak Rate	RBs	REs	Peak Rate
QPSK	84	7056	28.224 Mbps	84	7056	28.224 Mbps
16-QAM	10	840	6.72 Mbps	10	840	6.72 Mbps
64-QAM	6	504	6.048 Mbps	6	504	6.048 Mbps
Total	100	8400	40.992 Mbps	100	8400	40.992 Mbps

Il·lustració 177. Capacitat total a l'enllaç descendent i a l'enllaç ascendent. Elaboració pròpia.

S'ha de considerar que les capacitats mostrades a la il·lustració 177 no representen la capacitat total del eNodeB, sinó el que es pot donar en un moment determinat si suposem que els usuaris estan distribuïts en la mateixa proporció de l'àrea de cobertura de cada anell. En cas contrari, s'obtindrien resultats diferents.

Per exemple, si suposem que tots els usuaris estan ubicats en l'anell de 64-QAM, tindríem una capacitat de pic de 100.8Mbps (80.64Mbps de *Peak Data Rate*) sense MIMO. No obstant, però, si tots els usuaris s'ubiquessin en l'anell de QPSK, tindríem una capacitat de 33.6 Mbps (26.88 Mbps de *Peak Data Rate*) sense MIMO.

És interessant veure les capacitats que pot manegar el eNodeB en funció de la distribució dels usuaris. No obstant, en el següent apartat es detalla com els operadors de xarxa fan l'anàlisi de tràfic per a un sistema cel·lular.

7.3 Capacitat requerida pels usuaris. Anàlisi de tràfic

És evident que els usuaris es distribueixen de manera aleatòria i que estimar la capacitat requerida en funció del percentatge d'àrea abastada per cada modulació no és la manera ideal de fer-ho, perquè com hem vist, assignar només 6 RBs a la modulació 64-QAM no té gaire sentit des del punt de vista del que significa el LTE.

En aquest apartat es realitzarà un exemple senzill de planificació de tràfic per a un emplaçament LTE. Partint de la capacitat de transmissió d'una cel·la, es derivarà quants subscriptors es poden suportar amb un percentatge de càrrega del 50%.

1. Primerament partim de la capacitat del sistema o taxa mitjana experimentada en la cel·la, que serà la suma de les taxes dels usuaris connectats que estiguin transmetent en un mateix moment: hi haurà usuaris que estiguin en la vora cel·lular, els quals tindran menys taxa, i també hi haurà usuaris amb millors condicions ràdio i tindran més taxa. Cap i a la fi, la suma de tots ells condiciona el valor de la taxa mitjana experimentada en la cel·la, la qual suposarem que és de 35 Mbps com a funcionament de base residual.
2. Convertim la capacitat de la cel·la de [Mbps] a [GBps] i a [GBph]: les tarifes que tenim avui dia en el mercat, és a dir, les que ens ofereixen els operadors de xarxa són en Gigabytes.

$$R_{sector} = 35 \text{ Mbps} \Rightarrow R_{sector}[\text{GBps}] = \frac{35 \text{ Mb}}{s} \cdot \frac{1 \text{ Gbyte}}{8192 \text{ Mb}} = 0.004272460938 \text{ GBps}$$

$$R_{sector}[\text{GBph}] = \frac{0.004272460938 \text{ GB}}{s} \cdot 3600 \text{ s} = 15.38085938 \text{ GBph}$$

3. En el sistema convencional es parla de la "busy hour", que és la ranura temporal d'una hora on es donen les pitjors condicions i per a la qual cal dissenyar el sistema: l'experiència diu que la *busy hour* absorbeix més o menys un 15% del tràfic. No obstant, en cas de disseny volem dissenyar el sistema perquè aquesta *busy hour* tingui una taxa o experiència de càrrega de cel·la entorn del 50%. És a dir, no volem que estigui saturada. Per tant:

$$R_{sector}^{50\%}[\text{GBph}] = 15.38085938 \text{ GBph} \cdot \frac{50}{100} = 7.690429688 \text{ GBph}$$

Els GBph realment transmesos és de 7.69, perquè no estem considerant un 100% de càrrega, sinó el 50%.

4. Calculem el tràfic generat en un dia:

$$R_{sector}^{50\%}[\text{GBpdia}] = \frac{7.690429688 \text{ GB}}{h} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ dia}} = 184.5703125 \text{ GBpdia}$$

5. Calculem el tràfic mensual.

$$R_{sector}^{50\%} [GBpmes] = \frac{184.5703125GB}{dia} \cdot \frac{30 \text{ dies}}{1 \text{ mes}} = 5537.109375 \text{ GBpmes}$$

6. Calculem el tràfic mensual per emplaçament (site): considerem que el site disposa de 3 sector (trisectorial).

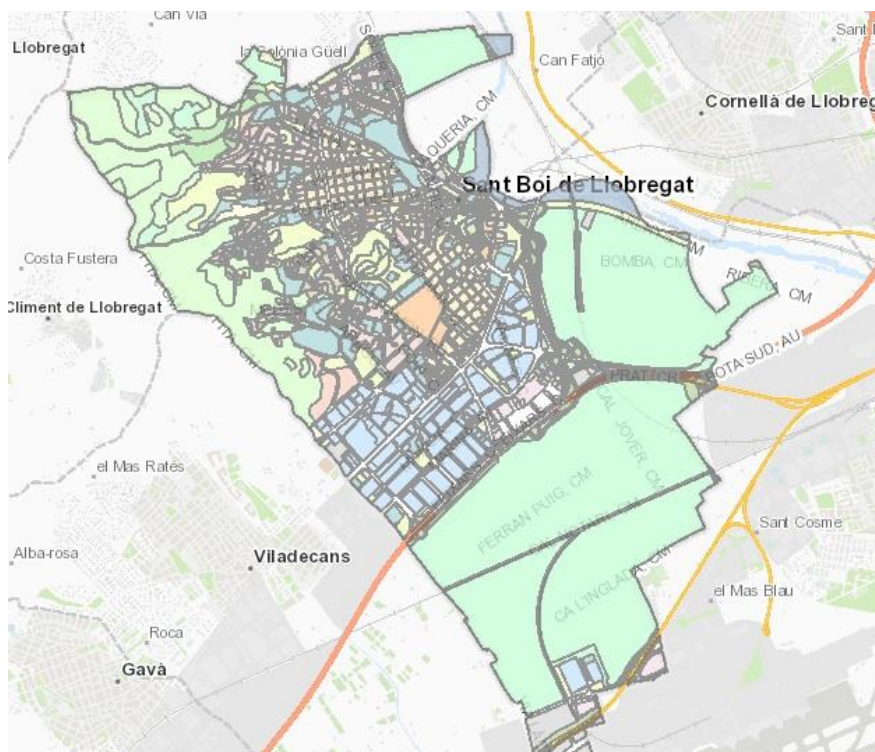
$$R_{site}^{50\%} [GBpmes/site] = \frac{5537.109375 \text{ GBpmes}}{sector} \cdot 3 \text{ sectors} = 16611.32813 \text{ GBpmes/site}$$

7. Partim de la suposició que cada usuari faci un consum mensual de 5 GB, ja que és la tarifa més convencional a dia d'avui. A partir d'aquesta dada, calculem el nombre d'usuaris que el site és capaç de suportar:

$$\# \text{ usuaris} = \frac{16611.32813 \frac{GBpmes}{site}}{5 \text{ GBpmes/usuari}} = 3322 \text{ usuaris/site}$$

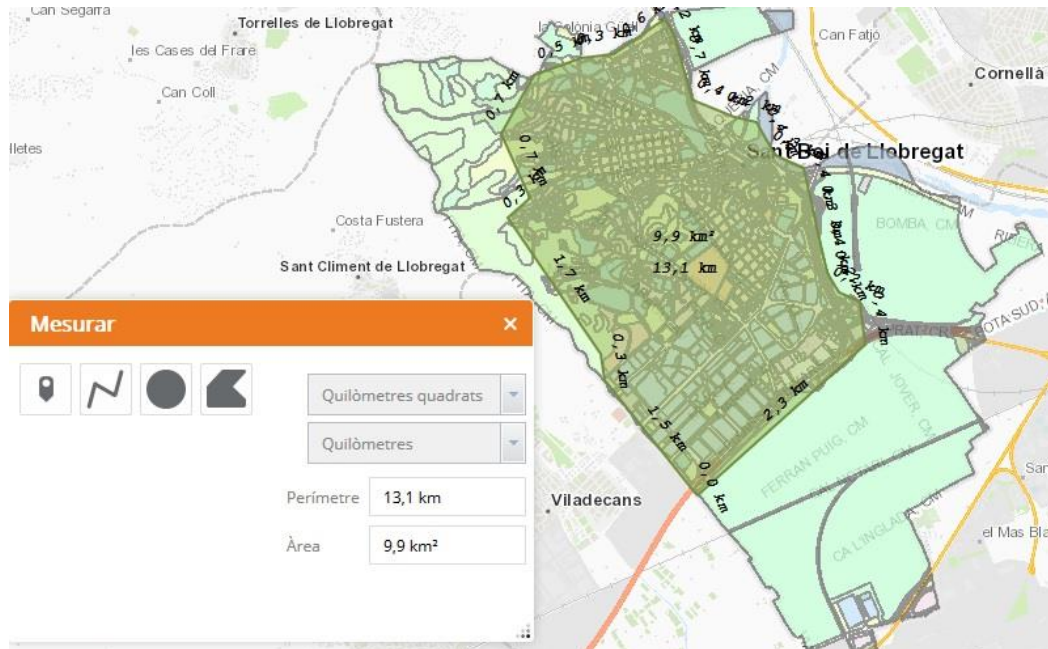
8. Cal veure el nombre de clients que són coberts habitualment pel site i determinar si el site és capaç de suportar aquest nombre de clients:

- El municipi de Sant Boi de Llobregat té una població de 82142 habitants (2017) amb una densitat de població de 3824.12 habitants/ Km^2 . Disposa d'una superfície de 21.48 Km^2 . Ara bé, de tota aquesta extensió de terreny pertanyent al municipi de Sant Boi de Llobregat, només una part és zona urbana (habitada).



Il·lustració 178. Planejament i Gestió Urbànica de Sant Boi de Llobregat. [5]

- Si ens fixem a la il·lustració anterior, d'aquests 21.48 Km^2 de superfície, una gran part són camps de conreu. Per tant, part d'aquest territori no és urbà. Cal mirar, llavors, la densitat de població en territori urbà. Per fer-ho, caldrà trobar la superfície corresponent a zona urbana.



Il·lustració 179. Àrea urbana aproximada de Sant Boi de Llobregat. [6]

- Per a un operador de xarxa que vulgui fer una desplegament d'estacions base de telefonia mòbil en territori urbà, ha de mirar la densitat de població en aquest àrea.

$$densitat_{urbana} = \frac{82142 \text{ hab}}{10 \text{ Km}^2} = 8214.2 \text{ hab/Km}^2$$

- A més a més, és habitual considerar que tots els habitants no són usuaris d'un mateix operador de xarxa. Segons les dades actuals, podem predir que el 30% són usuaris de Vodafone, un 30% usuaris de Movistar, altre 30% usuaris d'Orange, i per últim, un 10% són usuaris d'altres operadors mòbils virtuals o OMV. En qualsevol cas, de l'anàlisi de tràfic plantejat podem dir que per a un operador convencional (Vodafone, Orange, Movistar) aproximadament el 30% de 8214.2 hab/Km^2 són usuaris. És a dir, la densitat d'usuaris per Km^2 per a un operador convencional és de:

$$densitat_{usuaris_{operador}} = \frac{8214.2 \text{ hab}}{\text{Km}^2} \cdot \frac{30}{100} = 2465 \text{ usuaris/Km}^2$$

- Com sabem de la il·lustració 174, cada sector abasta un àrea de 0.29435 Km^2 . Si cada site és trisectorial, l'àrea de cada site serà de 0.88305 Km^2 . Per tant:

$$\# \frac{\text{usuaris}}{\text{site}} = \frac{0.88305 \text{ Km}^2}{\text{site}} \cdot \frac{2465 \text{ usuaris}}{\text{Km}^2} = 2177 \text{ usuaris/site}$$

- Si de l'anàlisi de tràfic plantejat cada site pot absorbir el tràfic de 3322 usuaris, i segons la densitat d'usuaris per site per operador convencional és de 2177, arribem a la conclusió que l'estimació feta garanteix que cada site pot suportar el tràfic dels subscriptors.

D'aquest apartat es conclou que cada eNodeB pot suportar la demanda de capacitat dels clients. No obstant, en cas que el eNodeB no hagués pogut suportar la demanda de capacitat, aquest inconvenient es podria solucionar de les següents maneres.

- Disminuint la potència de transmissió amb l'objectiu de disminuir l'àrea de cobertura del eNodeB. Com a incís, només dir que l'enginyeria ràdio implementa en comunicacions mòbils mecanismes capaços d'evitar congestió de tràfic: concepte de respiració de la cel·la (potència de transmissió adaptativa segons les condicions de tràfic).
- Habilitar una altra portadora.
- El fet de disminuir potència, implica disminuir àrea de cobertura. Desplegar més estacions base amb potències de transmissió més reduïdes (micra-cel·les, femto-cel·les) garanteix que el site pugui absorbir el tràfic demandat pels usuaris. Com a inconvenient, tenir més emplaçaments suposa un cost elevat per als operadors tant pel desplegament com pel manteniment dels equips.

Desplegament de eNodeBs

Per calcular el nombre de eNodeBs necessaris, necessitem saber primer el nombre de sectors ($N_{sectors}$) que requereix la planificació. Per fer-ho, caldrà dividir la superfície urbana total a cobrir ($S_{urbana\ total}$) entre la superfície coberta per cada sector del eNodeB (S_{sector}).

$$N_{sectors} = \frac{S_{urbana\ total}}{S_{sector}}$$

Recordem de l'apartat anterior, la superfície urbana total és aproximadament de $10\ Km^2$ i la superfície que cobreix cada sector és de $0.29435\ Km^2$. Substituint valors:

$$N_{sectors} = \frac{10\ Km^2}{0.29435\ Km^2} \sim 34\ sectors$$

El cas que ens ocupa requereix 42 sectors. A causa que en el disseny plantejat cada cel·la és trisectorial (3 sectors per cel·la), es necessitaran 14 estacions base desplegades per tota la superfície urbana del municipi de Sant Boi de Llobregat.

$$N_{eNB} = \frac{N_{sectors}}{n_{sectors/site}} = \frac{34}{3} = 11\ eNBs\ trisectorials + 1\ eNB\ sectorial$$

7.4 Introducció a Radio Mobile

Existeixen al mercat múltiples aplicacions comercials per a la planificació i gestió de xarxes ràdio. La varietat de càlculs que poden realitzar és molt elevada i van des de la simple elaboració de link budget fins a ajust de models de propagació a partir de mesures, càlculs de cobertures sobre models digitals del terreny (DEM, de l'anglès Digital Elevation Models), càlculs d'interferències, assignació de freqüències, optimització de retards en xarxes de freqüència única, disseny de radioenllaços, etc.

Algunes de les més importants són les que es troben en els següents enllaços:

- ICS Telecom de ATADI: <http://www.atdi.com/ics-telecom/>
- Atoll de Forsk: <http://www.forsk.com/atoll-33-general-features>
- Celplanner de Celplan: <http://www.celplan.com/products/celplanner.asp>
- Asset de Aircom: <http://www.teoco.com/>

En el present projecte s'utilitzarà l'aplicació Radio Mobile. Es tracta d'una eina gratuïta que permet realitzar alguns dels càlculs fonamentals en el procés de planificació de xarxa: càlculs de cobertura amb un únic model de propagació i simulació de radioenllaços, entre d'altres. Malgrat tenir un menor nombre de funcions respecte a les eines comercials, serà de gran utilitat per conèixer la filosofia de funcionament d'aquests programes, tots ells molt similars en la seva manera d'operació.

Model de propagació a Radio Mobile

Una de les limitacions de Radio Mobile és que només permet utilitzar un únic model de propagació: Longley-Rice. Aquest model va ser publicat pels investigadors Anita Longley i Phil Rice del ITS (Institute for Telecommunication Sciences) i per això també se li coneix com ITS-*ITM o simplement ITM (Irregular Terrain Model). No obstant això, sí es pot dir que es tracta d'un model summament generalista aplicable a molts entorns i sistemes de comunicacions ràdio. Lògicament això és a costa de prediccions menys precises que els models específics.

Longley-Rice és vàlid per a prediccions a:

- Diferents tipus de terreny, zones climàtiques i amb perfils orogràfics irregulars.
- Un rang molt ampli de distàncies, incloent el càlcul de pèrdues per difracció introduïts per la orografia del terreny.
- Vàlid en un rang freqüencial molt ampli.

Les eines comercials sempre ofereixen un ventall ampli de models de propagació i per tant en els balanços i simulacions s'utilitzen els adequats a cada entorn, també es diferencia entre models per a càlculs de cobertures i càlculs d'interferència.

Lògicament, un model molt ajustat a condicions de propagació urbana, cometrà un error enorme en zones rurals. Longley-Rice/*ITM és suficientment complex com per cometre un error moderat independentment de l'entorn. Va ser utilitzat en els desplegaments inicials de TV analògica i també és molt popular entre els radioaficionats.

El model és del tipus semi-empíric, concretament combina:

- Components de la teoria electromagnètica:
 - Reflexió: model de dos rajos per a distàncies < 100 Km (per sobre d'aquest valor es supera la distància transhoritzó).
 - Difracció: model “fil de ganivet” de Fresnel-Kirchhoff.
 - Refracció: modifica la curvatura terrestre per a modelar la curvatura del front d'ones per les variacions en l'índex de refracció [n]. Concretament, treballa amb la refractivitat [N] a la superfície.
 - Dispersió a la troposfera.

- Components empíriques:
 - Anàlisis estadístics que relacionen les característiques del terreny (rugositat del terreny i condicions climàtiques) amb campanyes de mesures.

Des de la seva publicació original en 1968 ha anat millorant, per exemple se li va afegir un terme denominat *urban factor* per tenir en compte l'atenuació addicional a causa del clutter urbà. Aquest factor es va calcular mitjançant comparació amb el model obtingut per Okumura a partir de les seves mesures a Tòquio.

A la següent taula (veure il·lustració 180) es mostra els rangs vàlids, tant dels paràmetres del sistema com dels paràmetres de l'entorn.

A més de les entrades següents, també s'ha d'especificar la “fiabilitat” de la predicció. Senzillament, el model calcula directament el marge per esvaïments amb estadística lognormal i la fiabilitat no és més que el percentatge de disponibilitat de l'enllaç (si mesurem en el límit de la cel·la, és la ben coneguda cobertura perimetral). No obstant això, Longley-Rice assumeix la combinació de tres components log-normals (normals en dB i per tant la desviació típica final és l'arrel de la tres desviacions al quadrat:

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{localització}^2 + \sigma_{temps}^2 + \sigma_{situació}^2}$$

- **Variabilitat per localització**: variacions de potència que es reben a una mateixa distància però seguint perfils del terreny diferents, amb diferent orografia i ombres generades per diferents obstacles i diferents tipus de clutter en funció de la posició.

- **Variabilitat per temps:** fa referència a les variacions que pot tenir la potència rebuda en diferents hores del dia o en diferents dies a causa de canvis en la refracció atmosfèrica, canvis climatològics i altres efectes. Es tracta d'un paràmetre important en el disseny de radioenllaços fixos. En el cas de telefonia mòbil (cas que ens ocupa), no se sol utilitzar i les variacions al llarg del temps s'inclouen en les variacions per la localització del terminal, s'extreu un únic paràmetre σ de les campanyes de mesures.
- **Variabilitat per situació:** representa la resta de variables ocultes o que no estan sota control i que també impacten en la variació de la potència rebuda.

Paràmetres del sistema			
Freqüència portadora	20 MHz – 20 GHz		
Distància	< 2000 Km		
Polarització	Horitzontal o vertical		
Paràmetres de l'entorn			
Altura mitjana de les irregularitats del terreny Δh	Tipus de rugositat	Δh	
	Pla o aigua	0	
	Plana	30	
	Pujols	90	
	Muntanyes	200	
	Muntanyes escabroses	500	
Constants elèctriques del terreny	Tipus de sòl	Permitivitat	Conductivitat
	Terra mitjana	15	0.005
	Terra pobre	4	0.001
	Terra bona	25	0.020
	Aigua dolça	81	0.010
	Aigua salda	81	5.000
Refractivitat a la superfície N	Tipus de clima	N	
	Equatorial	360	
	Continental subtropical	320	
	Marítim subtropical	370	
	Desert	280	
	Continental templet	301	
	Marítim templet en terra	320	
	Marítim templet a la mar	350	
Paràmetres d'instal·lació			
Altura de les antenes	0.5 m – 3000 m		
Qualitat del posicionament de les mateixes	Descripció qualitativa de la instal·lació: <i>Random, careful, very careful</i>		

Il·lustració 180. Rangs vàlids del model de propagació a Radio Mobile. Elaboració pròpia.

Capes d'informació geogràfica

Per poder realitzar estudis de cobertura és necessari disposar d'un model digital del terreny (DEM, de l'anglès Digital Elevation Model). Bàsicament es tracta d'un fitxer amb informació sobre l'altura mitjana de petites àrees. Així, els DEM de millor resolució solen contenir informació associada a àrees menors a 5 m × 5 m, una resolució de fins a 25 m × 25 m seria de qualitat mitjana i per sobre de 50 m × 50 m ja parlariem de baixa resolució on únicament estarien ben representats els grans obstacles.

Cal dir que el DEM és un fitxer amb informació numèrica, és a dir, no és una imatge que es pugui visualitzar. A més, serà necessari treballar amb diferents fitxers numèrics o "capes" que contindran diferent tipus d'informació. Per exemple:

- **Capa morfogràfica:** Aquesta capa es coneix també com a "capa amb els usos del sòl" o clutter. Cada píxel conté una "categoria" tal que pot modificar el senyal ràdio present en un punt ja sigui per l'increment de cotes (degudes per exemple a la presència d'un bosc), pèrdues addicionals (de caràcter determinista que provenen d'una campanya de mesures), tipus d'entorn específic (urbà molt dens, polígon industrial, casc històric, etc.).
- **Capa demogràfica:** la informació emmagatzemada en aquesta capa és densitat d'habitants per km². Aquesta capa permet realitzar consultes sobre la població coberta en una zona. El seu ús és molt habitual a la planificació de sistemes de TV ja que fins avui no es contemplaven les condicions de mobilitat i per tant només era important oferir cobertura en zones poblades.
- **Capa d'edificis:** emmagatzema informació sobre les altures dels edificis amb precisions elevades (píxels menors a 5 m × 5 m). Aquesta capa permet aplicar models de propagació que utilitzin aquesta informació, com per exemple COST231-Walfish Ikegami.

La cartografia de qualitat sol ser molt cara, no obstant això, existeixen opcions gratuïtes a Internet com per exemple les procedents de les missions de la NASA:

Shuttle Terrain Mapping Mission (SRTM): <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflexion Radiometer (ASTER) la versió 2 de la qual és la més recent (Octubre de 2011): <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> (ASTER GDEM) és un producte de la NASA i el METI és el ministeri d'economia, comerç i indústria del Japó.

SRTM es va realitzar l'any 2000 durant 11 dies. En aquest temps, dues antenes específiques per a mesures de radar van ser acoblades al transbordador espacial Endeavour. Aquest va recollir la informació dels ressos radar orbitant al voltant de la Terra. Posteriorment, el Jet Propulsion Laboratory <https://www.jpl.nasa.gov/index.php> del Massachusetts Institute of Technology (MIT, <http://web.mit.edu/>) els va processar per obtenir l'altitud del terreny i generar un DEM amb una precisió d'1 segon d'arc (30

m) en USA i de 3 segons (90 m) en la resta de zones del món. Fora d'USA la resolució és massa pobre com planificar sistemes cel·lulars en entorns urbans.

D'altra banda, les dades de ASTER procedeixen del satèl·lit Terra, en un projecte conjunt entre la NASA i el METI. En aquest cas la resolució és d'1 segon d'arc a tot el món. Els primers resultats de ASTER (juny 2009) van ser criticats perquè malgrat presentar millor resolució espacial que SRTM, la informació estava contaminada de molt soroll. Això es millora amb la versió 2 (octubre 2011) on s'ha afegit el resultat de processar i combinar més informació. Aquesta serà l'opció que s'utilitzarà en el Treball.

Finalment, a part de les capes amb informació numèrica, per poder representar els resultats, és necessari tenir una o diverses "capes gràfiques". O dit d'una altra manera, es precisa d'una imatge georeferenciada correctament sobre el DEM.

Instal·lació de Radio Mobile

Per instal·lar Radio Mobile cal seguir els següents passos:

1. Crear una nova carpeta en el directori on s'instal·larà el programari (per exemple, C:\Program Files).
2. Accedir a la pàgina web de Radio Mobile: [enllaç](#)
3. Descarregar els següents fitxers i descomprimir-los a la carpeta anterior.
 - rmwcore.zip → nucli de l'aplicació.
 - rmw1129eng.zip → executable de l'aplicació en anglès (ja que les traduccions disponibles en castellà no són molt bones en algunes opcions).
4. Editar el fitxer Map_Link.txt i eliminar els apòstrofs dels serveis de mapes online.
5. Executar rmweng.exe (es pot crear un accés directe a l'escriptori).

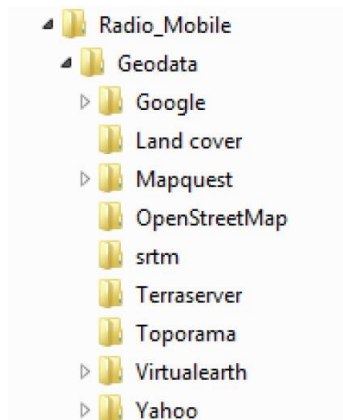
Gestió de la cartografia

Estructura de directoris per guardar les diferents capes

Radio Mobile treballa de manera directa amb la informació de SRTM ja que es pot connectar directament als servidors FTP que proveeixen les dades d'altimetria (model digital del terreny, DEM) a mesura que els necessiti. Aquestes dades es guardaran en una carpeta preestablerta i que configurarem en Radi Mobile.

A partir del DEM, Radio Mobile generarà una imatge que ho representarà, és a dir, una imatge amb les elevacions del terreny (una vegada més, cal recordar que el fitxer amb el DEM no és una imatge). Sobre aquesta, superposarem altres imatges com a mapes, ortofotos, etc. que es descarregaran de serveis com GoogleMap, Yahoo Maps, Mapquest, Virtualearth, etc. (indicats en el fitxer Map_Link.txt, després d'eliminar l'apòstrofe que predeia a cada servidor). Tota aquesta informació addicional, també s'emmagatzemarà ordenadament en una estructura de carpetes:

Creem una carpeta anomenada “Geodata” i dins d'ella, com a mínim una sub-carpeta “srtm” pel DEM, una sub-carpeta “Google” per a imatges procedents de Google Maps i “Land cover” per a la capa de clutter.



Il·lustració 181. Captura de l'estructura de les carpetes. Elaboració pròpia.

A Radio Mobile → [Options → Internet]

A. Capes numèriques SRTM i Land Cover (millor no fer servir la versió traduïda al castellà perquè hi ha errors com la traducció de Land Cover per “Cobertura de la tierra”):

- Cal indicar el *path* als sub-directoris a la carpeta Geodata.
- Per a SRTM s’ha de seleccionar un servidor FTP amb resolució 1 arc de segon. Encara que com s’ha dit anteriorment, es podrà descarregar tota la informació de Earth Explorer com es detallarà al següent pas. També seleccionem un servidor per a Land Cover.
- Cal indicar que només es descarregarà la informació si no es troba en el directori, i que es guardi una còpia local.

B. Capes gràfiques:

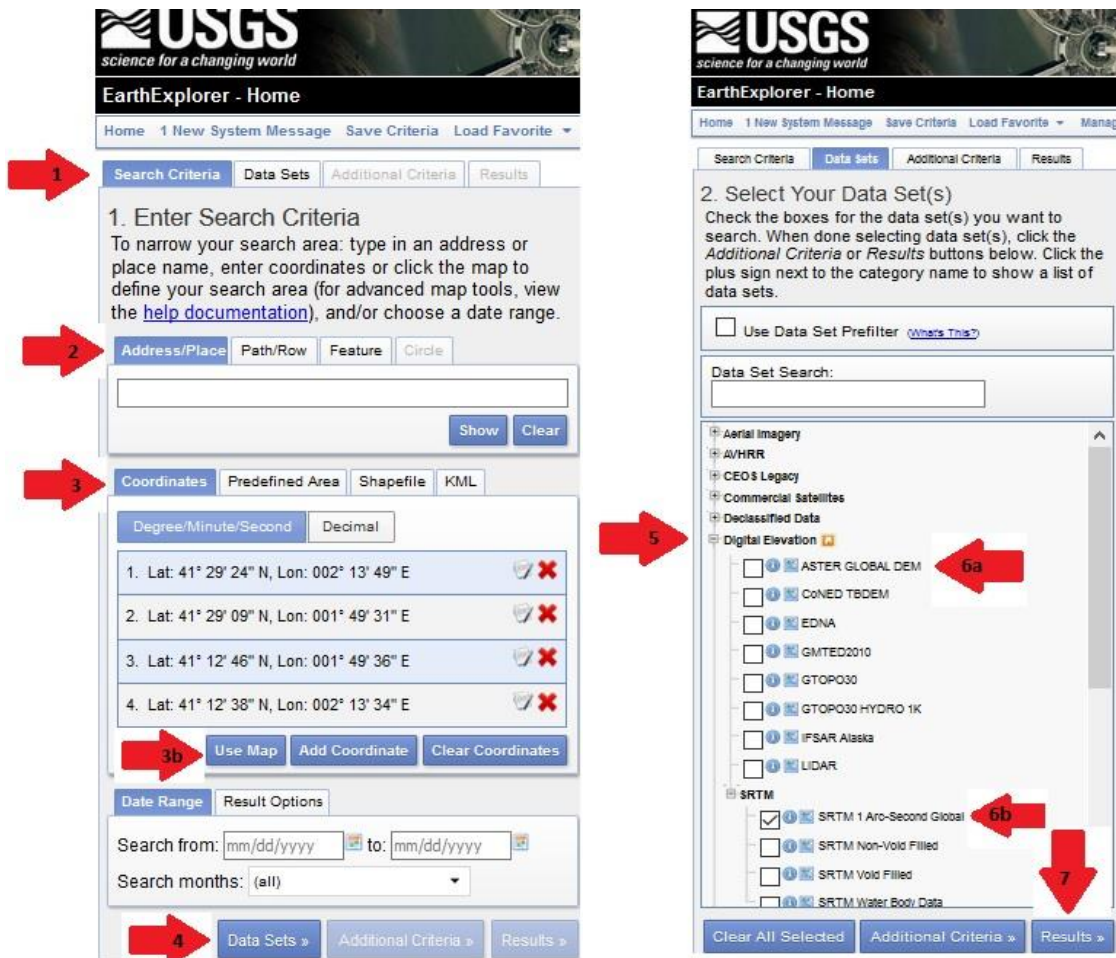
- De nou, cal indicar que només s’ha de descarregar la informació si no es troba en el directori i que es guardi una còpia en local.
- Indicar els *paths* corresponents i prémer OK al finalitzar.

Descàrrega de dades amb una resolució d’1 arc (30 m píxel): ASTER o SRTM-1-arc

Accedim a Earth Explorer <https://earthexplorer.usgs.gov/> i seguim els següents passos, detallats a la il·lustració següent:

1. A l’esquerra ens assegurem de tenir seleccionada la pestanya “Search Criteria”. A la dreta fem un zoom de la zona d’interès, de la qual desitgem obtenir el DEM.
2. Existeixen molts criteris de cerca. A continuació es procedeix a buscar per “Address/Place” → Sant Boi de Llobregat / Spain.

3. Modifiquem el zoom perquè Sant Boi de Llobregat estigui centrat en el mapa. Premem en *Coordinates* → *Use Map*. Marcarà de color vermell el mapa actual, el qual es pot modificar el zoom per observar la selecció.



Il·lustració 182. Passos per descarregar dades del Earth Explorer. Elaboració pròpia.

4. Premem a *Data Sets* (que ens portarà a la segona pestanya superior següent, que es troba a la dreta de *Search Criteria*).
5. Cliquem a *Digital Elevation*.
6. Escollim entre “*ASTER GLOBAL DEM*” o “*SRTM 1 Arc-Second Global*”.
7. Finalment, cliquem a “*Results*”.

Els resultats de Earth Explorer són cadascuna de les porcions “tocades” pel mapa seleccionat. Fixem-nos que es denominen **ASTGDEMv2_ONxxWxxx** on la part en negreta indica les coordenades de la cantonada sud-oest: ‘N’ North/’S’ i ‘W’ West/’E’ East i xx és el valor numèric corresponent.

Per poder descarregar els fitxers se’ns sol·licitarà que ens registrem. Descarregarem els fitxers .zip. Si descarreguem d’un servidor SRTM els fitxers tindran una extensió hgt i poden ser directament utilitzats per Radio Mobile. D’altra banda, si decidíssim descarregar els arxius ASTER, Radio Mobile no és capaç d’interpretar el format GeoTIFF i caldrà realitzar una conversió de format dels arxius anteriors.

Concretament, es convertirà al format utilitzat per SRTM (fitxers .hgt) seguint els passos següents:

- Eliminem el '2' del nombre dels fitxers dem: ASTGTM2_XXXXX_dem.tif. Això només indica que són dades de la versió 2 (2011) de ASTER.
- Descarreguem l'executable ASTER2SRTM que es pot trobar buscant a Google i realitzem la conversió. Per fer-ho, només cal indicar el *path* d'entrada (ASTER) i el de sortida (SRTM). El mateix programari s'encarregarà de buscar els fitxers amb nom ASTGTM_ (d'aquí prové la importància d'haver eliminat el 2 prèviament).
- Ubiquem els fitxers amb extensió .hgt en el directori següent: C:\Program Files\Radio Mobile \Geodata\srtm que haguem creat abans. A partir d'aquest punt, la cartografia podrà ser utilitzada.

Definició del mapa de treball general

Importació de les dades d'altimetria/elevació.

Després d'executar Radio Mobile, el primer pas serà seleccionar l'àrea objectiu. Per fer-ho, cliquem **F8** o bé, **[File] → Map Properties**.

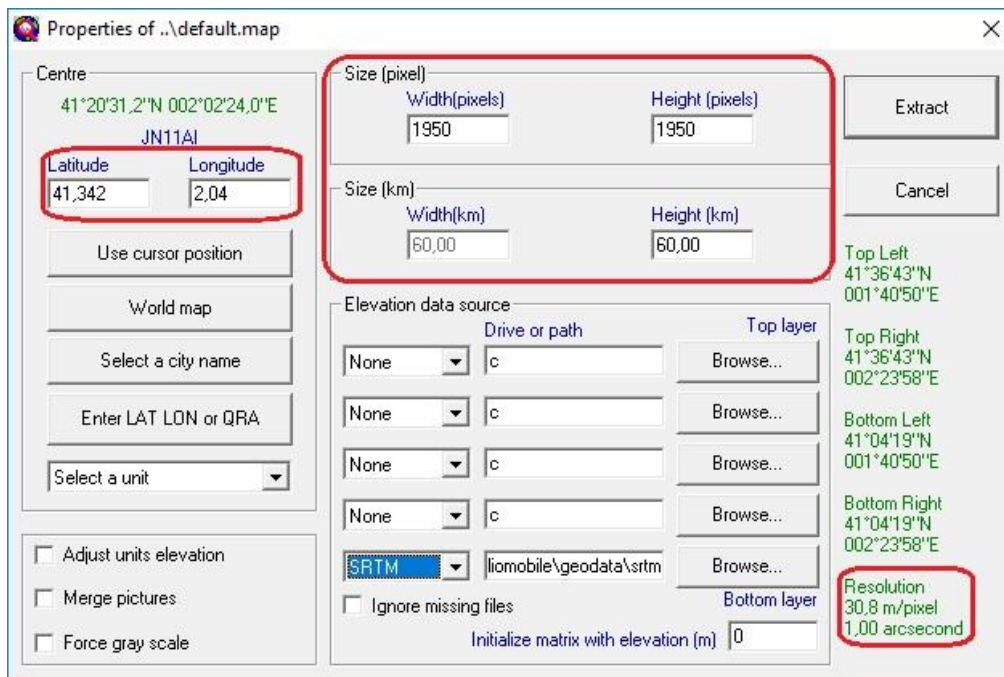
En aquesta pantalla hem d'indicar el punt central de la nostra zona de treball i la seva grandària en píxels i Km. El centre es pot triar a partir de diferents criteris, l'opció triada serà introduït manualment la seva latitud i longitud. Per al municipi de Sant Boi de Ll.

- Latitud: 41° 20' 33''N
- Longitud: 02° 02' 27''E

Introduïm les dades següents modificant les que venen per defecte per assegurar-nos que configurem la resolució del nostre DEM. Observem que es genera un àrea de 60 x 60 Km² amb la resolució adequada a les dades de ASTER, és a dir, arcs d'1 segon de grau.

- Longitud d'un costat [Km]: 60 Km.
- Nombre de píxels d'un costat: 1950.
- Resolució [segons d'arc]: 1

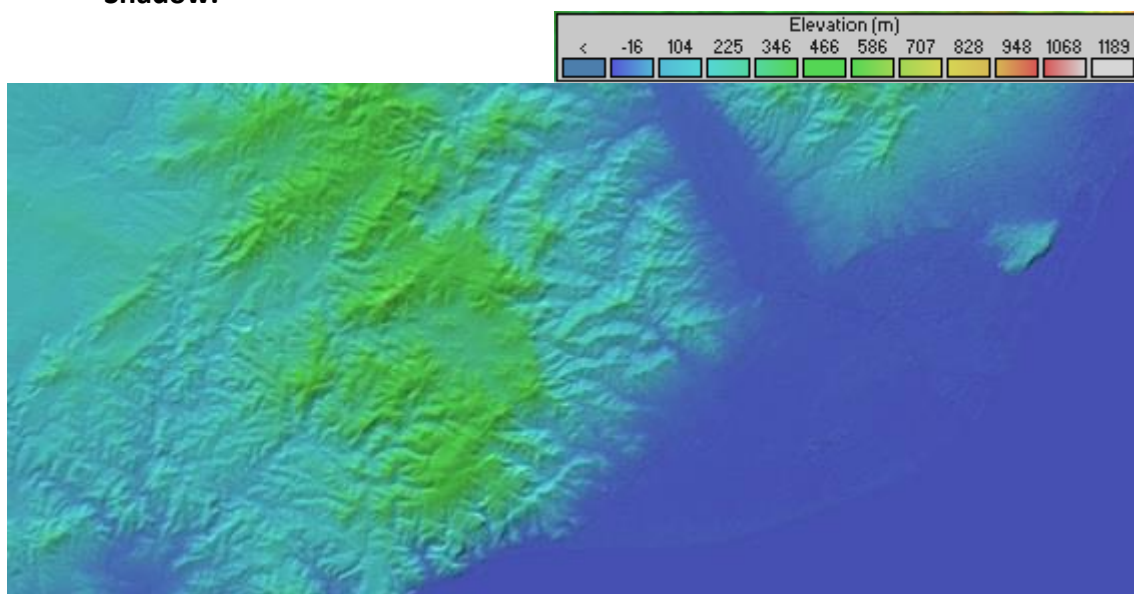
Finalment, abans de prémer "Extract" és important que haguem indicat a "Elevation data source" l'opció SRTM i el nostre directori RadioMobile\Geodata\srtm.



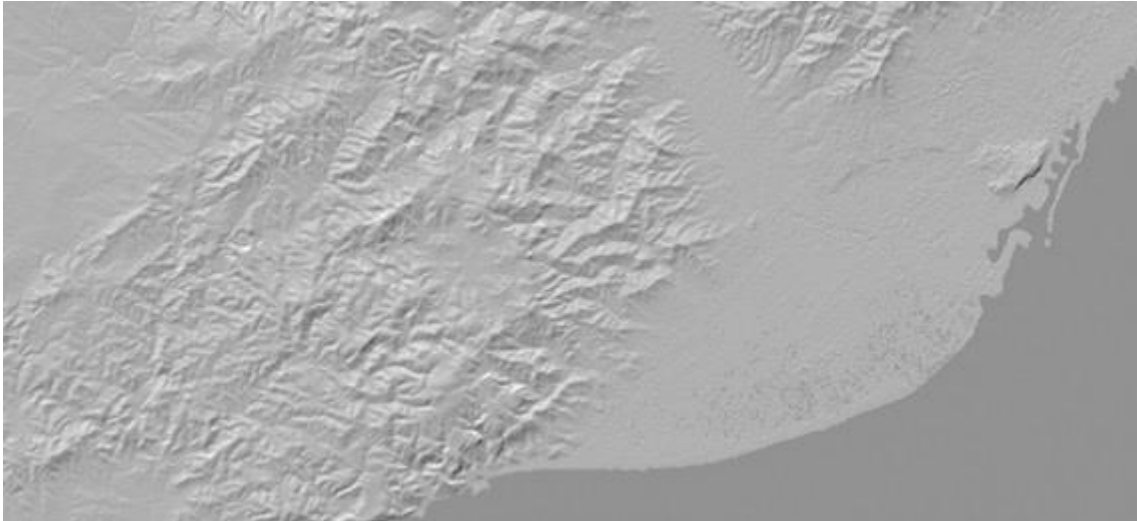
Il·lustració 182. Configuració de la resolució del DEM. Elaboració pròpia.

Després de prémer “*Extract*”, Radio Mobile accedirà als fitxers SRTM necessaris i generarà una imatge única amb aquesta informació per facilitar la visualització.

- Com la imatge tindrà una extensió superior a la de la pantalla, podem fer servir CTRL+click per moure’ns.
- Si explorem les diferents opcions de representació que trobem en el menú **[File]** → **[Picture Properties]** (CTRL+I): línies de nivell, realització de representació 3D, etc. No obstant, per obtenir una millor representació dels càlculs de cobertura posterior, millor deixar la imatge en escala de grisos.
- També en el menú **[Edit]** → **Stratification, Elevation Contour, Force gray scale i Shadow.**



Il·lustració 183. Imatge d’altimetria/elevació carregada a Radio Mobile.

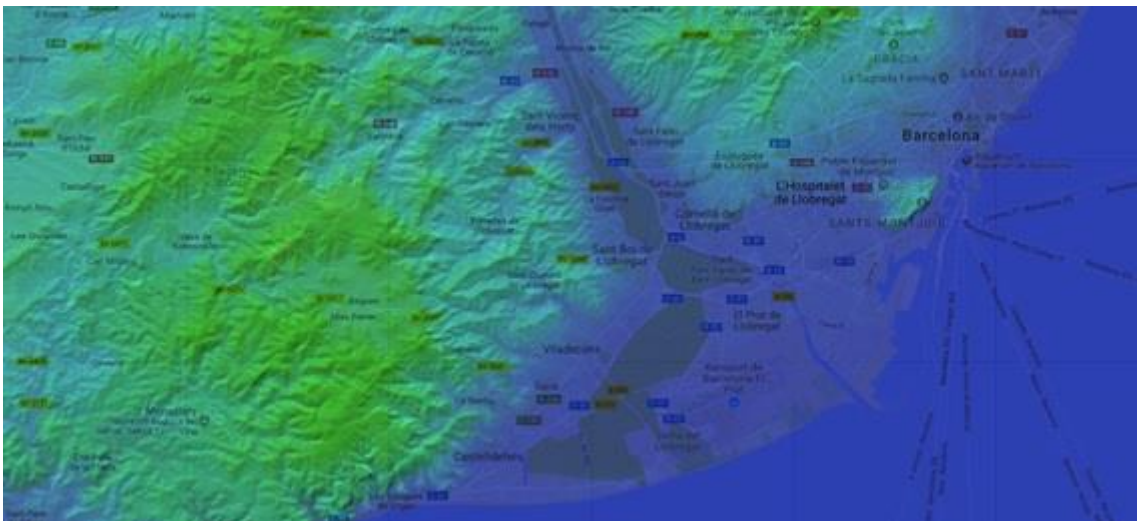


Il·lustració 184. Imatge d'altimetria/elevació en escala de grisos carregada a Radio Mobile.

Importació de capes gràfiques georeferenciades

Les capes gràfiques se superposaran sobre la imatge que representa l'altimetria. A continuació s'indicarà els passos a seguir per descarregar-les d'Internet i importar-les a Radio Mobile.

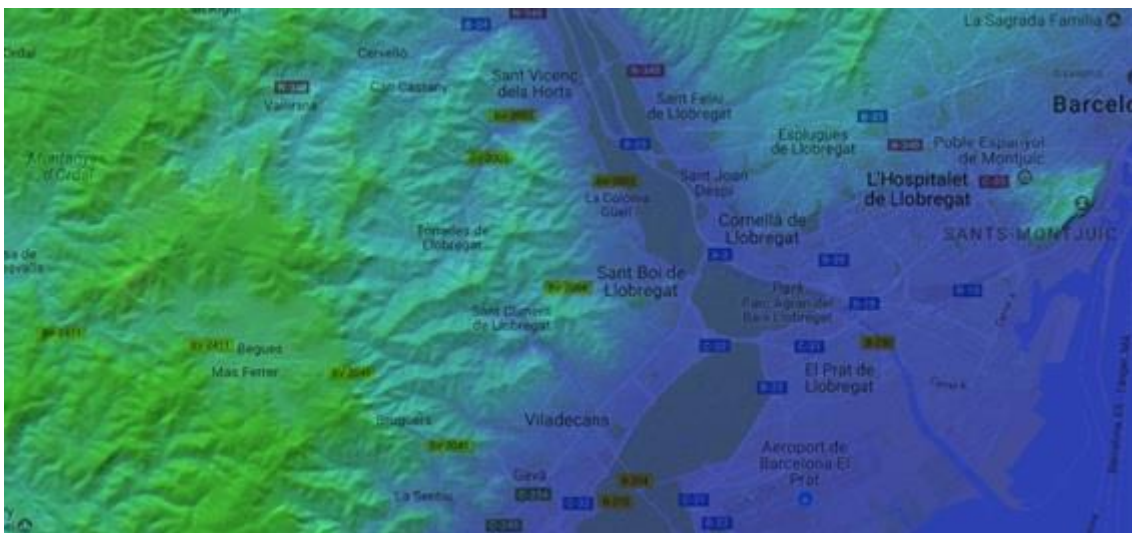
[Edit] → [Merge Pictures] → “Internet Google Map” → “Roads” → “Multiply”. Radio Mobile ajustarà l'opció de zoom més adequada. En principi, no és necessari modificar-la. Seguidament escollim “keep in a new picture”, així disposarem de dues imatges: la original sense alterar i una de nova amb carrers i vies de comunicació superposades.



Il·lustració 185. Capa gràfica superposada al model digital del terreny DEM.

A continuació es realitzarà un zoom en un rectangle que delimiti la ciutat de Sant Boi de Llobregat seguint els passos següents:

1. A la imatge amb carrers, movem el cursor a la cantonada superior-esquerre de la zona a limitar i anotem les seves coordenades (41°25'38"N 01°45'59"E). Repetim el mateix procediment amb la cantonada inferior-dreta (41°15'22"N 02°15'43"E).
2. A la imatge sense carrers, fem clic amb el botó dret a la coordenada superior-esquerre i arrosseguem aproximadament fins a la inferior-dreta, terminant amb un segon clic en el botó dret.
3. Acceptem i es crearà una nova imatge (sense carrers) amb el zoom escollit.
4. Tornem a realitzar els passos per descarregar una imatge gràfica de Google Maps. Radio Mobile ajustarà el zoom més apropiat. En aquest cas escollim "keep in actual picture".
5. En aquest punt disposarem de tres imatges de treball:
 - a) Imatge del DEM complet sense imatges superposades.
 - b) DEM complet amb imatges de carrers.
 - c) Zoom de (b) a Sant Boi de Llobregat.



Il·lustració 186. Zoom del model digital del terreny superposat.

7.5 Link Budget a Radio Mobile

És important que els càlculs de link budget siguin correctes abans de procedir a fer la simulació.

Cal tenir en compte les següents consideracions:

- Selecció d'antenes per a l'entorn.
- Aplicació de downtilts en els casos directius, i per tant, el valor de guany en antena que percep un usuari en el límit e la cel·la.
- Presència de MHA/TMA si escau. El MHA/TMA té un impacte en el budget del uplink, però també del downlink.
- Considerar la longitud de feeder (estimació).
- Utilitzar la sensibilitat sense sensibilitat i sumar el guany per diversitat apart.
- Per a un entorn urbà, es pot considerar una desviació típica de la component log-normal de $\sigma = 8 \text{ dB}$.

Càlculs de link budget

- *Marge per fading (dB)*:

Per a una desviació típica $\sigma = 8 \text{ dB}$ i percentatge de cobertura perimetral del 95%

$$P_b = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{MF}{\sqrt{2} \cdot \sigma} \right) \quad \text{Si } \sigma = 8 \text{ dB i } P_b = 0.95$$

$$\left(0.95 - \frac{1}{2} \right) \cdot 2 = \operatorname{erf} \left(\frac{MF}{\sqrt{2} \cdot 8} \right) \Rightarrow 0.90 = \operatorname{erf} \left(\frac{MF}{\sqrt{2} \cdot 8} \right)$$

$$1.16 = \frac{MF}{\sqrt{2} \cdot 8} \Rightarrow MF = 1.16 \cdot \sqrt{2} \cdot 8 = 13.12 \text{ dB}$$

- **Sensibilitat [dBm]**:

De la estació base BTS cap al terminal MT, la sensibilitat recomanada pels operadors comercials és de -102 dBm.

$$\text{Sensibilitat}[\text{dBm}] = \text{Noise Figure}[\text{dB}] + \text{Thermal Figure}[\text{dBm}] + \text{SINR}[\text{dB}]$$

$$\text{Thermal Figure}[\text{dBm}] = 10 \cdot \log(KTB) + 30\text{dB} \text{ on B és l'ampla de banda del canal.}$$

- **PIRE [dBm]**

$$\text{PIRE} [\text{dBm}] = \text{TX power}(\text{dBm}) + \text{TX antenna gain}(\text{dBi}) - \text{TX Cables loss} \\ - \text{Connector loss}(\text{dB}) - \text{Breaching loss}(\text{dB})$$

- RX Isotropic Power [dBm]

$$\begin{aligned}
 &RX \text{ Isotropic power (dBm)} \\
 &= RX_{min}(dBm) + MF(dB) - RX \text{ antenna gain}(dBi) \\
 &- RX \text{ diversity gain (dB)} + RX \text{ cables}(dB) + Connector(dB) \\
 &+ Breaching \text{ loss (dB)}
 \end{aligned}$$

- Maximum propagation loss [dB]:

$$Maximum \text{ propagation loss [dB]} = PIRE[dBm] - RST[dBm]$$

- Reliable Service Threshold [dBm]:

$$\begin{aligned}
 RST[dBm] &= RX \text{ Isotropic Power}(dBm) - Margin1(Position \text{ loss}(dB)) \\
 &- Margin2(body \text{ loss}(dB))
 \end{aligned}$$

	URBAN	
	BS – MS	MS - BS
Desviació típica Lognormal Fading (dB)	8	8
Cobertura perimetral a la vora de cel·la (%)	95	95
Fading Margin (dB)	13.12	13.12
Sensibilitat (dBm)	-102	-110
Interference Margin (dB)	3.00	3.00
RX TMA (MHA) gain (dB)	0.00	0.00
RX antenna gain (dBi)	0.00	18.5
RX downtilt loss (dB)	0.00	3.00
RX diversity gain (dB)	0.00	3.00
RX cables + Connectors	0.00	1.00
RX Breaching loss RX Duplexer loss (dB)	0.00	1.50
RX Isotropic Power (dBm)	-85.88	-109.88
TX Power at TRX (dBm)	46.00	23.00
TX Breaching loss TX combiner	4.30	0.00
TX Breaching loss TX Duplexer (dB)	1.50	0.00
TX TMA (MHA) loss (dB)	0.00	0.00
TX Cables + Connectors loss (dB)	1.00	0.00
TX antenna gain (dBi)	18.50	0.00
TX downtilt loss (dB)	3.00	0.00
EIRP(dBm) = PIRE(dBm)	54.70	23.00
Margin 1: Position loss (dB)	20.00	20.00
Margin 2: Body loss (dB)	3.00	3.00
Maximum propagation loss (dB)	117.58	109.88
RST: Reliable Service Threshold (dBm)	-62.88	-86.88

Il·lustració 187. Elaboració del *link budget*.

Com podem observar, l'enllaç limitant és el *downlink*. Recordem que l'enllaç limitant és aquell que té menys pèrdues de propagació (dB).

El cas que ens ocupa, enllaç limitant en *uplink*, requereix calcular la potència de transmissió per la BTS tal que ambdós enllaços (*uplink* i *downlink*) estiguin balancejats.

Per balancejar i que ens quedi el mateix valor de pèrdues per propagació en *downlink* i *uplink* cal procedir de la manera següent:

- Primer de tot cal saber la diferència entre aquests dos valors: $117.58 - 109.88 = 7.7\text{dB}$ de diferència.
- Com la màxima pèrdua per propagació és la PIRE – RST. Si la PIRE ve donada per la potència transmesa, només cal restar el valor de 7.7dB a la potència transmesa i així el balanç estarà equilibrat.

A la següent il·lustració es mostra de color groc els valors modificats.

	URBAN	
	BS – MS	MS - BS
Desviació típica Lognormal Fading (dB)	8	8
Cobertura perimetral a la vora de cel·la (%)	95	95
Fading Margin (dB)	13.12	13.12
Sensibilitat (dBm)	-102	-110
Interference Margin (dB)	3.00	3.00
RX TMA (MHA) gain (dB)	0.00	0.00
RX antenna gain (dBi)	0.00	18.5
RX downtilt los (dB)	0.00	3.00
RX diversity gain (dB)	0.00	3.00
RX cables + Connectors	0.00	1.00
RX Breaching loss RX Duplexer loss (dB)	0.00	1.50
RX Isotropic Power (dBm)	-85.88	-109.88
TX Power at TRX (dBm)	38.30	23.00
TX Breaching loss TX combiner	4.30	0.00
TX Breaching loss TX Duplexer (dB)	1.50	0.00
TX TMA (MHA) loss (dB)	0.00	0.00
TX Cables + Connectors loss (dB)	1.00	0.00
TX antenna gain (dBi)	18.50	0.00
TX downtilt loss (dB)	3.00	0.00
EIRP(dBm) = PIRE(dBm)	47.00	23.00
Margin 1: Position loss (dB)	20.00	20.00
Margin 2: Body loss (dB)	3.00	3.00
Maximum propagation loss (dB)	109.88	109.88
RST: Reliable Service Threshold (dBm)	-62.88	-86.88

Il·lustració 188. Link Budget modificat per tal que els enllaços estiguin balancejats.

Radi de cel·la a Radio Mobile

Radio Mobile només disposa d'un model de propagació, que a curtes distàncies aproxima el model de dos rajos. Per tant, per evitar excessives discrepàncies entre prediccions i simulació, es calcularà el radi de cel·la amb el model de Egli en entorn urbà.

El model de Egli diu:

$$\frac{1}{L_{prop}} = \left(\frac{h_{BTS} \cdot h_{MT}}{d^2} \cdot \frac{40}{f[\text{MHz}]} \right)^2$$

Tenint en compte la banda de treball de 1800 MHz, l'altura de l'antena de l'estació base és de 25 metres i la del receptor 1.5 metres, només ens queda considera les pèrdues per propagació trobades en el link budget, que són de 109.88 dB. Així doncs, trobem l'única incògnita que ens falta: la distància entre el transmissor i el receptor (d), que és el radi de cel·la.

$$d^4 = \frac{h_{BTS}^2 \cdot h_{MT}^2 \cdot 40^2}{f^2} \cdot L_{prop}$$
$$d = \sqrt[4]{\frac{25^2 \cdot 1.5^2 \cdot 40^2 \cdot 10^{\frac{109.88}{10}}}{1800^2}} = 509.8 \text{ m}$$

Downtilt

El fet d'assumir que l'altura mitjana de les antenes transmissores (BTS) és de 25 metres sobre el sòl, implica trobar el downtilt adequat tal que la caiguda de 3 dB del diagrama de radiació apunti al límit de la cel·la.

- Primer trobem l'angle pel qual l'antena apunta al límit de la cel·la aplicant trigonometria.

$$\alpha = \arctg\left(\frac{h_{BTS}}{R_{cel\cdot la}}\right) \Rightarrow \alpha = \arctg\left(\frac{25}{509.8}\right) = 2.807^\circ$$

- Ara cal mirar en el diagrama de radiació vertical de l'antena escollida K741327 de Kathrein l'angle a -3dB i afegir el resultat a l'anterior. Segons les especificacions d'aquest model per a la banda de 1800 MHz, $\alpha_{-3dB} = 2.75^\circ$.

Per tant:

$$\alpha_{downtilt} = \alpha + \alpha_{-3dB} \Rightarrow \alpha_{downtilt} = 2.807^\circ + 2.75^\circ = 5.56^\circ$$

7.6 Primera simulació amb Radio Mobile

Abans de començar a realitzar les simulacions del desplegament és necessari entendre la terminologia emprada per Radio Mobile. Trobem tres elements diferenciats: *Networks*, *Systems* i *Units*.

- **Network:** és la xarxa pròpiament dita, formada pels diferents emplaçaments.
- **Systems:** fa referència a un sistema de TX/RX complet. Així definirem un sistema genèric amb les característiques genèriques de les nostres estacions base i un altre sistema amb les característiques genèriques dels terminals.
- **Units:** es tracta de les unitats (bases o mòbils) concretes de la xarxa. Bàsicament es tractarà de les seves coordenades, ja que després s'indiciarà que pertany a un cert sistema i automàticament heretarà totes les seves propietats ràdio.

Creació d'unitats

Unitat que serà associada a un sistema del tipus estació base:

Fem clic al centre del mapa que té zoom i després creem una unitat nova (CTRL+U). Li donem un nom i indiquem la seva elevació (Pel que fa a aquest Treball, les bases estaran elevades 25 m sobre el nivell del sòl). Seleccionem "Place unit at cursor position". Finalment, el botó "+" permet canviar la seva icona.

Unitat que serà associada a un sistema del tipus mòbil:

També s'haurà de crear una unitat que serà associada després a un sistema del tipus mòbil. Això no significa que les cobertures es calcularan sobre un mòbil particular, sinó que dit mòbil s'anirà posicionant píxel a píxel i s'avaluarà si rep el RST desitjat o no. Així, podem situar la unitat en qualsevol lloc del mapa, no serà rellevant.

Importació d'antenes

El següent pas és associar aquesta ubicació amb unes característiques de TX/RX, però prèviament és necessari importar els diagrames de radiació escollits. Cal seguir els passos següents:

1. Accedir al directori on hem instal·lat el Radio Mobile (C:\Program Files\RadioMobile\antenna\). En aquesta subcarpeta apareixen els fitxers amb la informació dels diagrames de radiació. Caldrà crear un fitxer amb el diagrama de radiació corresponent a un model d'antena prèviament escollit. Per exemple, un model de Kathrein el guany del qual sigui al voltant de 15dBi a la banda de 1800 MHz.
2. **Descàrrega de diagrames:** cal anar a la pàgina següent de Kathrein <https://www.kathreinusa.com/patterns/> i registrar-se per poder tenir accés a la llibreria de diagrames de radiació. Un cop tinguem accés amb les nostres

credencials, podrem introduir el model d'antena desitjat al cercador. En el resultat, ens apareixerà un enllaç a les especificacions i un altre al diagrama. Cliquem sobre el segon i ens demanarà el login i el password.

Fixem-nos que se subministraran diferents diagrames (els fitxers .msi són fitxers de text editables) per a diferents freqüències, polaritzacions i downtilts elèctrics. La millor manera de fer-ho seria descarregar tots els diagrames i adaptar-les per al seu ús repetit al Radio Mobile. No obstant, optarem per descarregar:

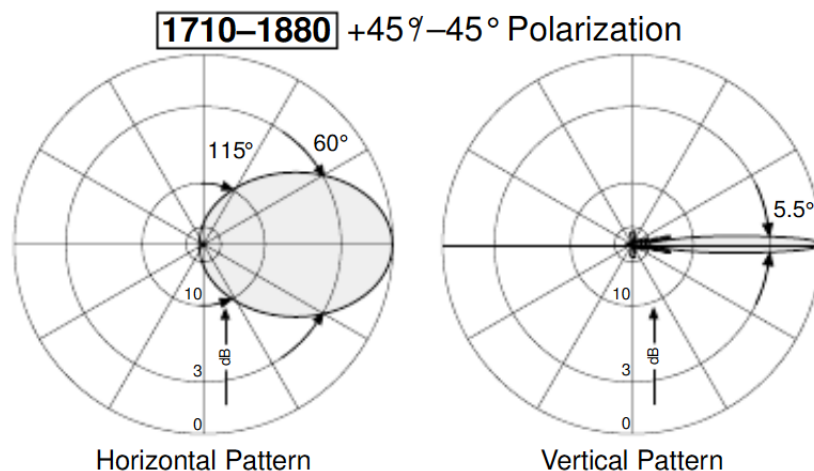
- Freqüència downlink.
- Polarització -45° .
- Sense *downtilts*. S'aplicarà directament a Radio Mobile. Recordem que al aplicar una inclinació elèctrica es modifica la presència de lòbuls secundaris (cosa que no pot predir Radio Mobile perquè depèn de l'agrupació dels dipols i de la seva distribució espacial dins de cada panell). Per tant, es tracta d'una opció que permetrà ajustar i provar amb diferents *downtilts* ràpidament, però no serà 100% el diagrama real.

3. **Generació dels arxius .ant:** es tracta d'un fitxer de text amb la col·lecció de guanys respecte del guany màxim, per tant, tindrà un signe (-). Important veure que el fitxer .msi facilita atenuacions separades amb salts de línia (es pot veure un exemple obrint un .ant dels existents de Radio Mobile).

a) Les primeres 360 línies descriuen el diagrama horitzontal. Es tracta de l'atenuació respecte a la direcció de màxim guany des de 0° fins a 359° . Aquesta és la informació que dona els propis fitxers .msi de Kathrein.

b) Les segones 360 línies descriuen el diagrama de radiació vertical, però començant en -90° , per tant, caldrà moure els punts del fitxer .msi.

L'antena escollida és l'antena K741327 de la marca Kathrein, les especificacions de les quals són les que es mostren a continuació (veure il·lustracions 187 i 188).



Il·lustració 187. Diagrames de radiació de l'antena K741327 de Kathrein a la banda d'interès. [Base de dades de Kathrein.](#)

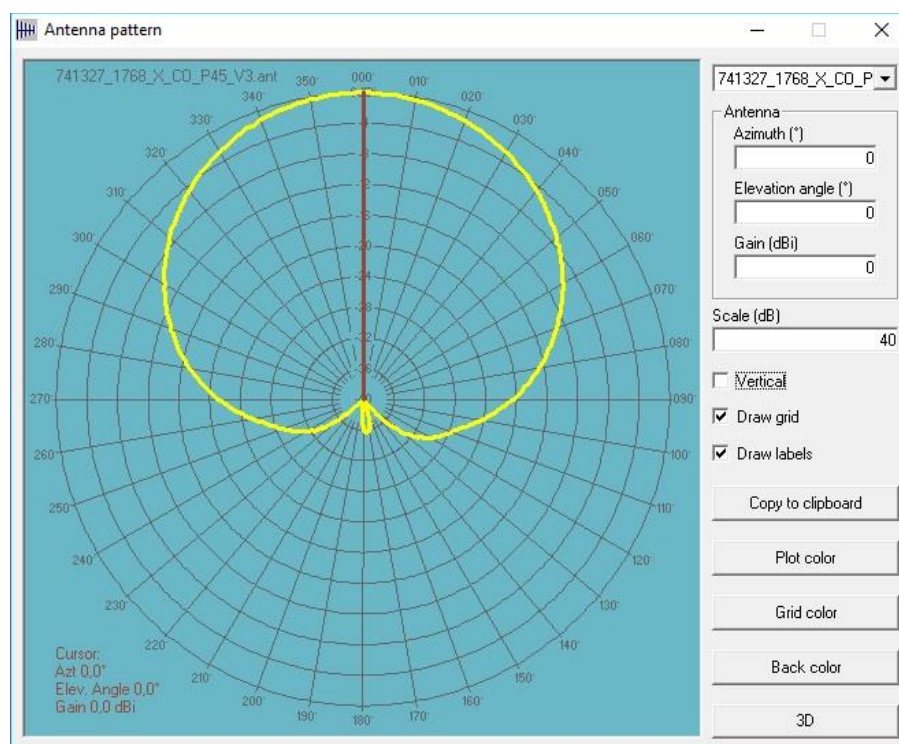
XXPol A-Panel 870–960/1710–1880 65°/60° 17/18.5dBi

Type No.	741 327	
Frequency range	870–960 870 – 960 MHz	1710–1880 1710 – 1880 MHz
Polarization	+45°, -45°	+45°, -45°
Gain	2 x 17 dBi	2 x 18.5 dBi
Half-power beam width Copolar +45°/-45°	Horizontal: 65° Vertical: 9.5°	Horizontal: 60° Vertical: 5.5°
Sidelobe suppression for first sidelobe above horizon	> 15 dB	
Front-to-back ratio, copolar	> 30 dB	> 30 dB
Isolation, between ports	> 30 dB (GSM 900 – GSM 900) > 30 dB (GSM 1800 – GSM 1800) > 30 dB (GSM 900 – GSM 1800)	
Impedance	50 Ω	50 Ω
VSWR	< 1.5	< 1.5
Intermodulation IM3 (2 x 43 dBm carrier)	< -150 dBc	< -150 dBc
Max. power per input	400 W (at 50 °C ambient temperature)	200 W

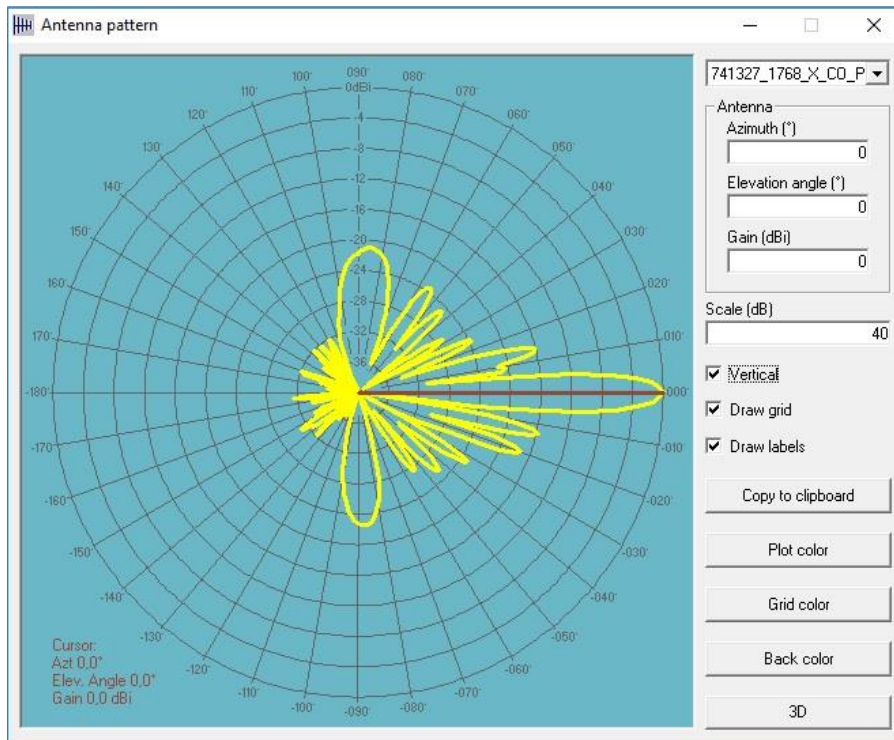


Il·lustració 188. Especificacions tècniques de l'antena K741327 de Kathrein (doble banda). [Base de dades de Kathrein.](#)

Una vegada confeccionat el fitxer amb nom 741327_1768_X_CO_P45_V3.ant accedim de nou a Radio Mobile. **[Tools]** → **[Antenna Pattern Viewer]** i seleccionarem la nostra antena. Configurarem una escala de 40 dB perquè es vegin clarament els lòbuls secundaris. Quant als terminals mòbils, es farà servir un dipol de mitja longitud d'ona (dipole.ant a Radio Mobile). Aquest últim és un fitxer que ja venia incorporat en la instal·lació de Radio Mobile.



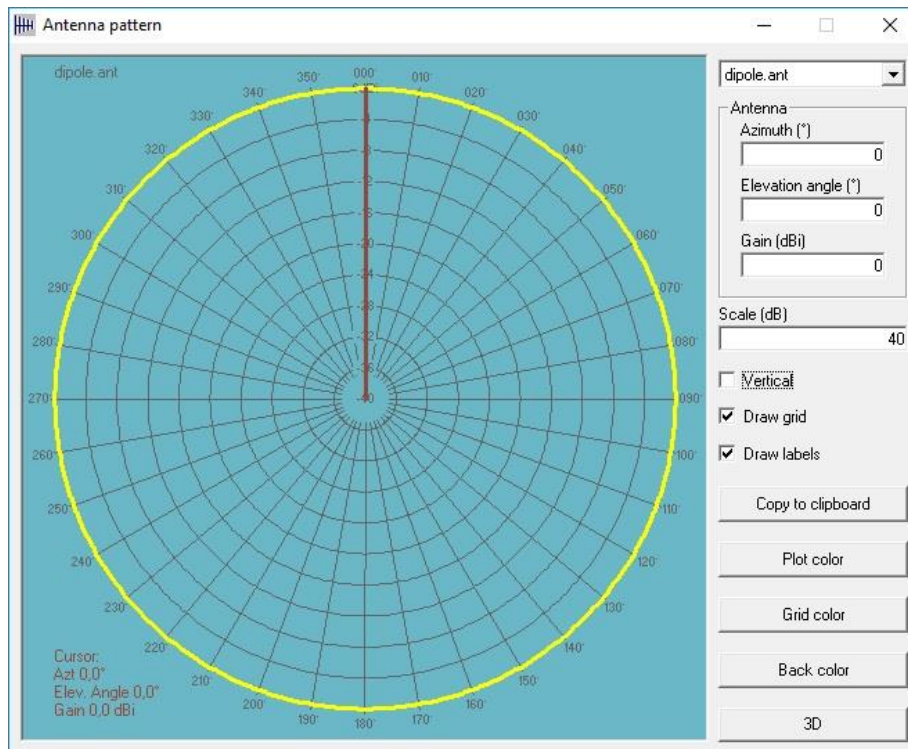
Il·lustració 189. Diagrama de radiació horitzontal de l'antena K741326 a Radio Mobile.



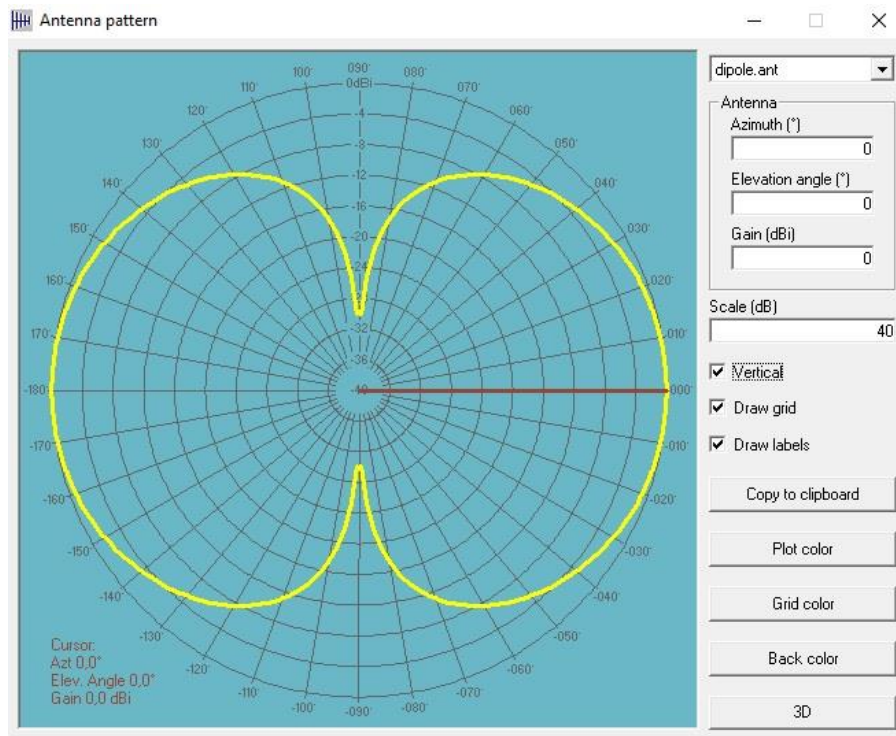
Il·lustració 190. Diagrama de radiació vertical de l'antena K741326 a Radio Mobile.

Aquests diagrames del model K741326 són de les antenes pertanyents a les BTS o *Base Transceiver Station*, és a dir, corresponen a les antenes transmissores dels eNodeBs. No obstant, Radio Mobile fa servir aquesta terminologia per referir-se a les estacions base.

D'altra banda, els terminals mòbils tindran un diagrama de radiació horitzontal omnidireccional.



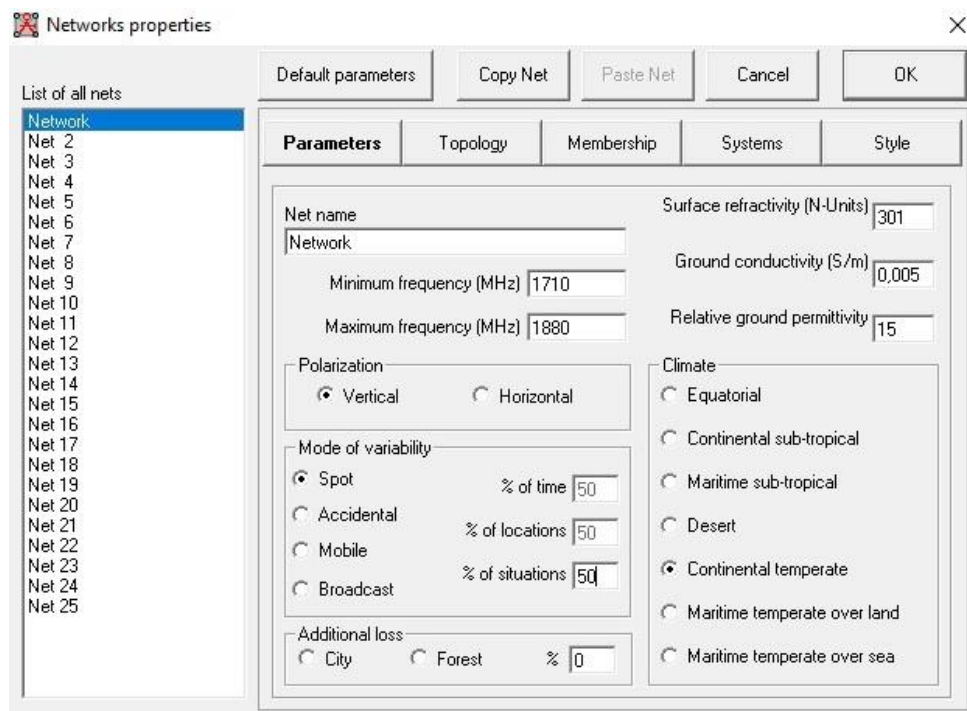
Il·lustració 191. Diagrama de radiació horitzontal del dipol de Radio Mobile.



Il·lustració 192. Diagrama de radiació vertical del dipol de Radio Mobile.

Propietats de xarxa, sistemes i associació d'unitats a sistemes

Per accedir a les propietats de la xarxa i dels sistemes premem **CTRL+C**. En el botó "Parameters" podem accedir als paràmetres genèrics de la xarxa. Assignem un nom i configurem les freqüències mínimes i màximes segons la banda d'operació.



Il·lustració 193. Configuració de la xarxa a Radio Mobile.

Fixem-nos que es poden canviar les condicions meteorològiques que utilitzarà el model Longley-Rice, i també afegir pèrdues addicionals per tractar-se d'un entorn urbà dens i/o boscos. No obstant, deixem aquestes opcions per defecte.

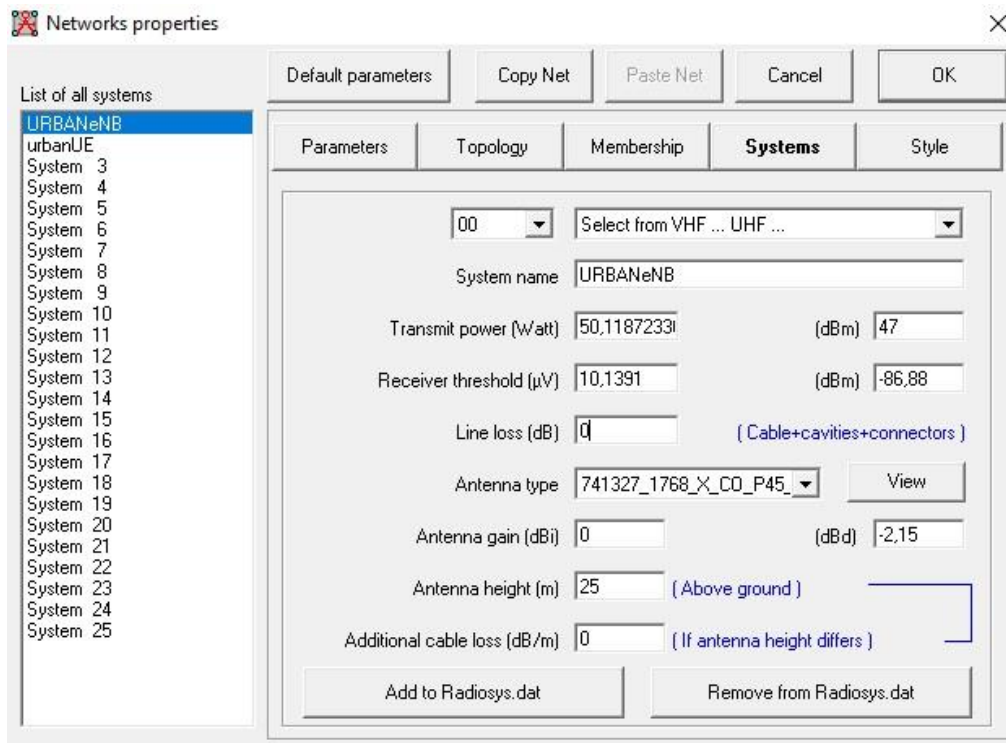
[A causa que s'han fet càlculs previs, la manera de procedir serà més senzilla: a Radio Mobile únicament s'indicarà la PIRE i el RST (Reliable Service Threshold [dBm]) calculats. La resta de paràmetres seran 0 (fixem-nos que totes les pèrdues i guanys en TX ja són en el càlcul de la PIRE i el mateix ocorre en RX amb el RST). Així, l'antena tindrà un cert diagrama de radiació, però configurarem un guany màxim de 0 dBi, pèrdues en cables i connectors també a zero, etc. El resultat serà idèntic a alimentar el programari amb tots els valors individuals de guany/pèrdues i deixar que ell mateix realitzi el balanç en els seus càlculs.]

Tenint en compte això, a la secció “*Mode of Variability*” seleccionem “*spot*” i configurem un 50%. Si indiquéssim un %, el que ocorreria és que Radio Mobile calcularia el corresponent marge per *fading* log-normal i quan representéssim un mapa de cobertura reduiria aquest marge sobre el llindar de potència. No obstant, el RST ja s'ha calculat considerant un marge, motiu pel qual ho deixem al 50%.

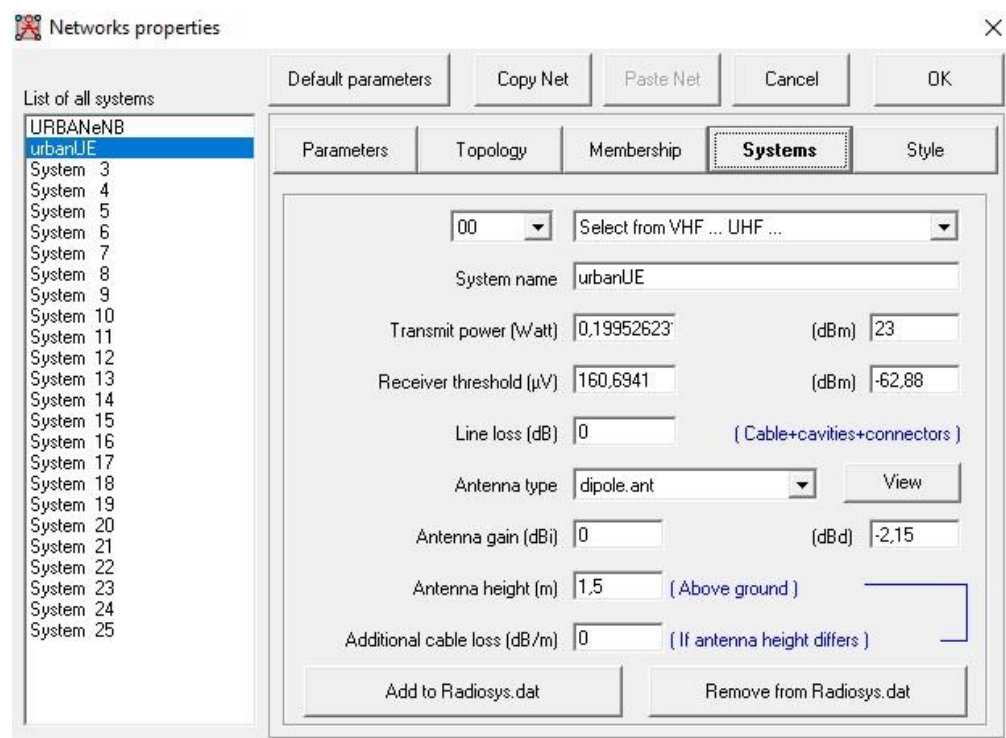
Botó “*Topology*”, les opcions disponibles són:

- ***Vice net (Command/Subordinate/Rebroadcast)***: per a comunicacions punt multi-punt on una estació “*Command*” (en el nostre cas l'estació base) intercanvia informació amb les estacions “*Subordinate*” (telèfons mòbils). Aquestes no poden intercanviar informació entre elles. A més, és possible utilitzar estacions repetidores per millorar la cobertura “*Rebroadcast*”. Aquesta serà l'opció a seleccionar.
- ***Data net, star topology (Master/Slave)***: una unitat mestra interroga als esclaus (d'un en un) per intercanviar paquets d'informació. Les unitats esclaves no poden dialogar entre elles ni es contempla l'opció d'utilitzar repetidors.
- ***Data net, cluster (Node/Terminal)***: Els nodes poden retransmetre datagrames (Rebroadcast). L'exemple típic seria una xarxa ad-hoc.

En el botó “*Systems*” observem que és aquí on s'ha de definir les plantilles de TX/RX. Definim el sistema per al tipus d'estació base que existeix en el desplegament (urbà). Caldrà definir una configuració de recepció associada al terminal mòbil (amb el seu RST). Recordem de nou, que únicament s'ha d'alimentar el programari amb la PIRE, RST, diagrames de radiació normalitzats i altura de les antenes. Es pot guardar a Radiosys.dat, així apareixerà disponible en el desplegable i serà més ràpid crear el sistema.



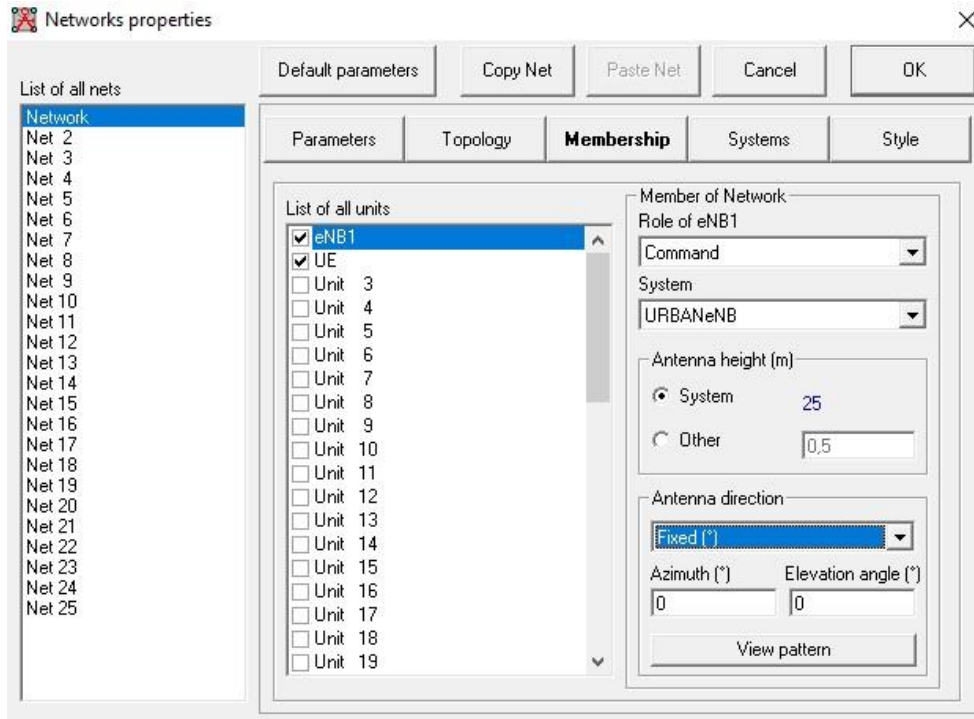
Il·lustració 194. Definició de la plantilla TX/RX per al eNodeB (desplegament urbà).



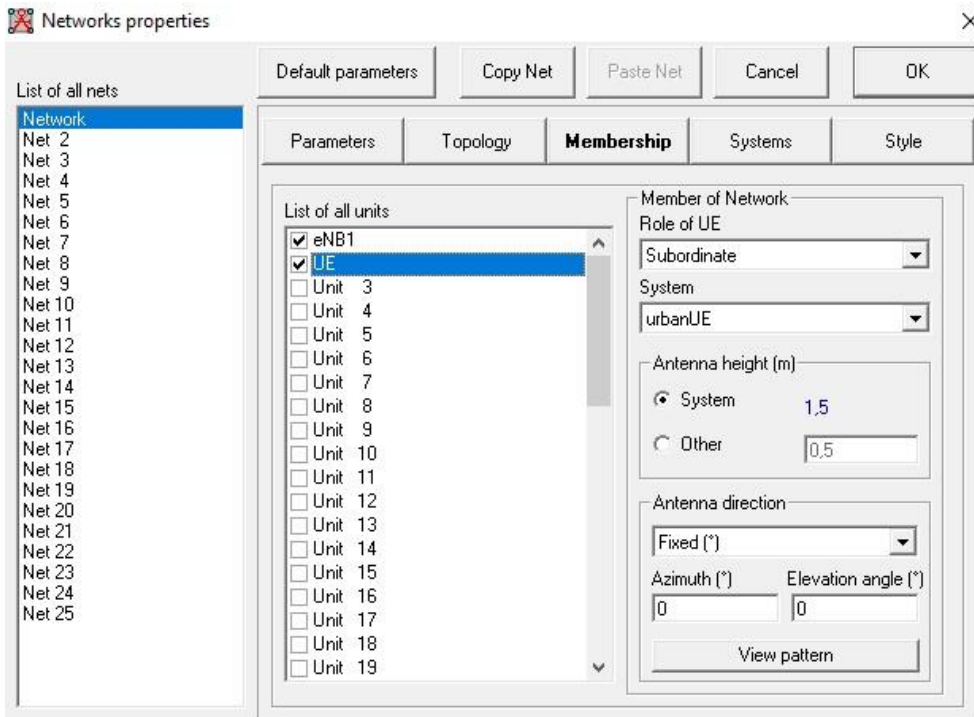
Il·lustració 195. Definició de la plantilla TX/RX per al UE (desplegament urbà).

Seguidament premem el botó “*Membership*”: a l’esquerra seleccionem la nostra xarxa. A continuació marquem el *checkbox* de les dues unitats que la conformen. Indiquem que la primera unitat creada és un membre de les BTS urbanes i és de tipus *Command*, i la segona unitat és un mòbil, també en condicions urbanes, i de tipus *Subordinate*.

També podem modificar els paràmetres individuals en la mateixa secció. Per exemple, podríem assignar una altura particular diferent de la plantilla del sistema, orientar l'antena cap a una altra unitat (útil per al disseny de radioenllaços). També indicar l'azimut i l'elevació (tilt). No modificarem cap valor particular, en aquest punt les unitats són inherents a les del seu sistema.

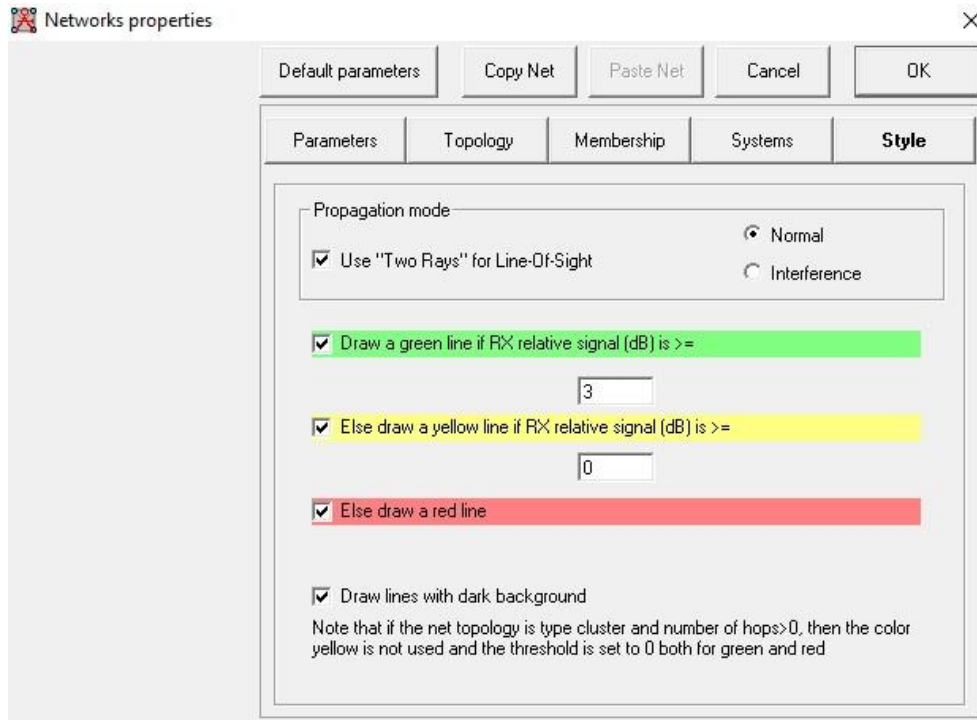


Il·lustració 196. Configuració *Membership* per a la unitat eNodeB.




Il·lustració 197. Configuració *Membership* per a la unitat UE.

Finalment, al botó “*Style*” podem modificar la representació de dos llindars de recepció, sempre respecte al RST del dispositiu que actua com a receptor. En aquesta primera simulació representarem el mapa de cobertura, és a dir, els píxels que reben el valor RST o superior. També es representarà aquelles àrees en les quals és probable que succeeixi un *handover*. En particular, les àrees que tenen una recepció més de RST+3dB es representaran de color verd, i les àrees que tenen una recepció de RST fins a RST+3dB de color groc.



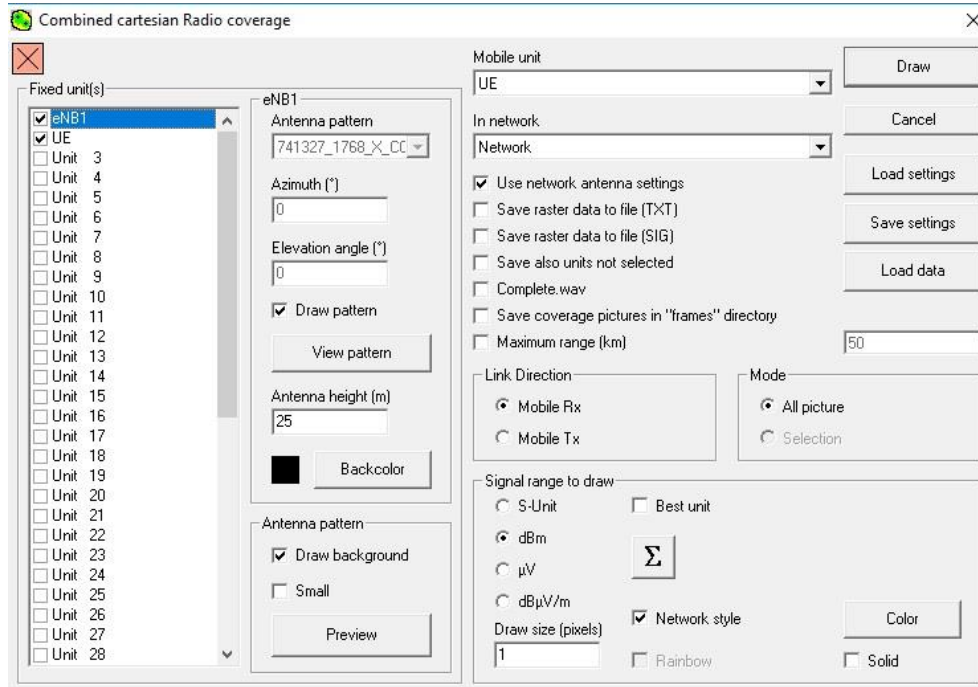
Il·lustració 198. Configuració per als llindars de recepció a Radio Mobile.

Per què escollim 3 dB i 0 dB ? Volem representar de color verd aquelles àrees on el valor rebut sigui de RST+3dB, ja que volem avaluar les àrees on hi ha bona cobertura dins de la cel·la. Representarem de color groc aquelles àrees on només reben el valor RST, la cobertura de la qual és molt justa. I finalment, de color vermell aquelles àrees on no arriba la cobertura.

El tipus de cobertura que es farà servir serà la cartesiana (icona ). En cas que no ens aparegui a la barra d'eines haurem d'anar a **[Options]** → **[Toolbar]** i seleccionar-la. Pel que fa a aquesta simulació, s'avalua el model de propagació píxel a píxel d'acord a les característiques de recepció establertes per un terminal.

- Seleccionem la nostra BTS (eNodeB) com a unitat fixa.
- Escollim el UE les característiques de les quals s'avaluaran a cada píxel.
- Indiquem la xarxa a la qual pertanyen.
- A la BTS (eNodeB) marquem la casella “*draw pattern*”. Es dibuixarà un petit diagrama de radiació en el mapa , que serà d'utilitat per recordar l'azimut que s'ha configurat.
- Assegurem d'avaluar els downtilts.
- Representem els resultats en [dBm].

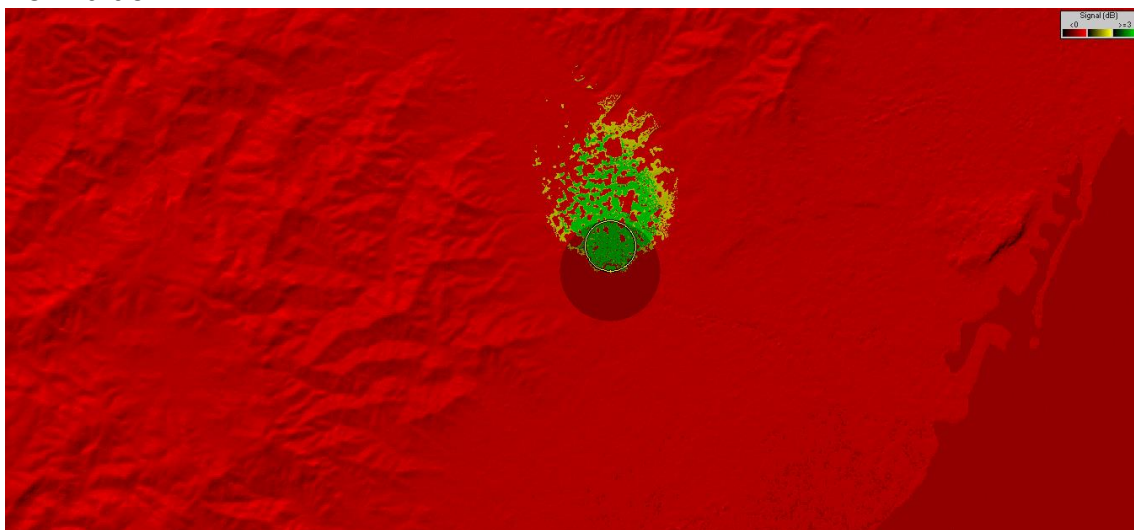
- Draw size = 1 píxel.
- Marquem “Network Style”.
- Guardem les simulacions de manera volàtil (es perdran quan tornem a simular de nou).



Il·lustració 199. Configuració de la simulació cartesiana.

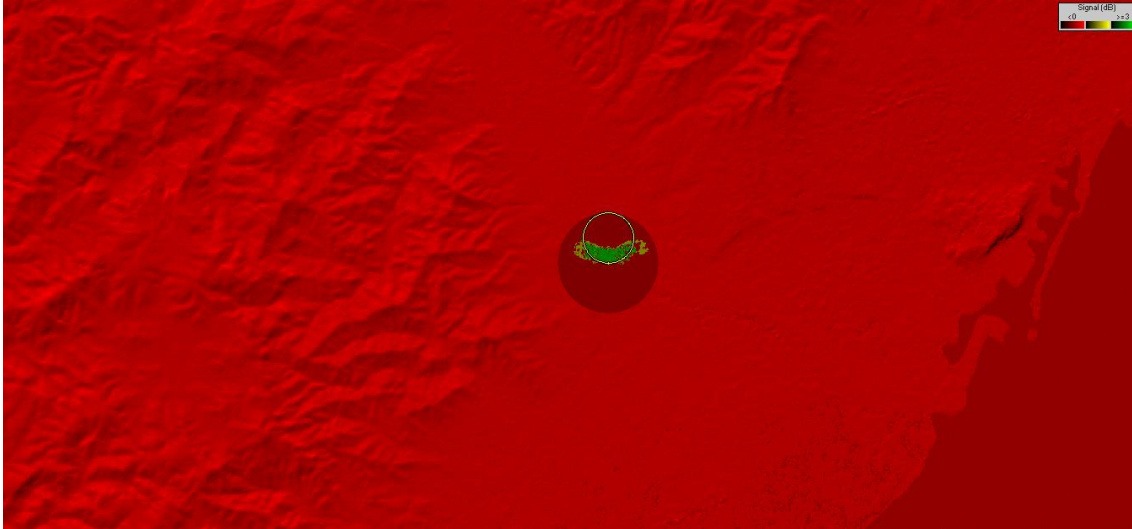
A continuació es procedeix a realitzar tres simulacions amb downtilts diferents, el resultat de les captures de les quals són les que és mostren a les següents il·lustracions.

Downtilt 0°



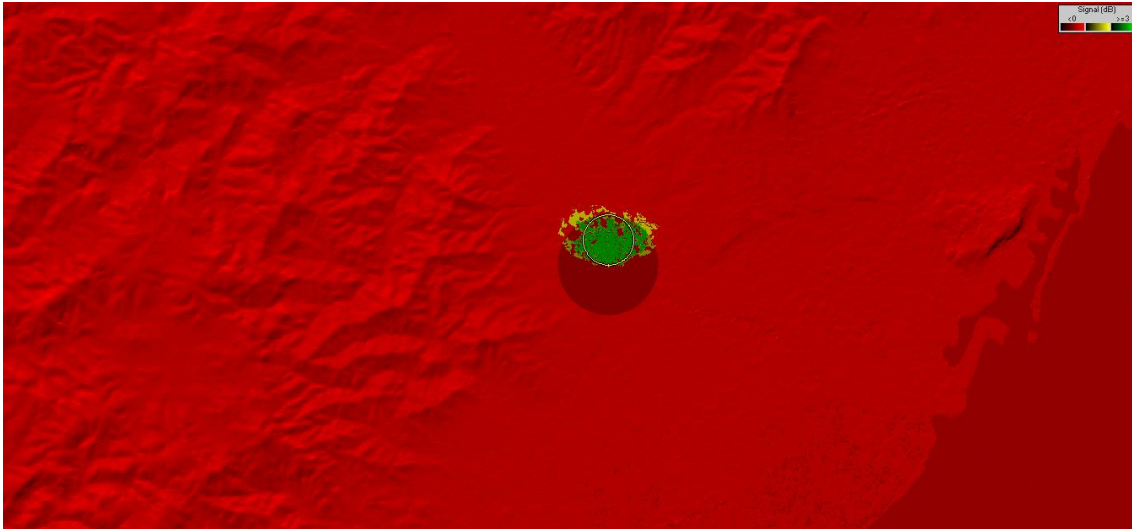
Il·lustració 200. Simulació amb resolució d'1 píxel del mapa de cobertura d'una BTS amb downtilt 0°.

Downtilt -10°



Il·lustració 201. Simulació amb resolució d'1 píxel del mapa de cobertura d'una BTS amb downtilt -10°.

Downtilt -6° (valor aproximat del càlcul de downtilt realitzat a l'apartat 8.5)



Il·lustració 202. Simulació amb resolució d'1 píxel del mapa de cobertura d'una BTS amb downtilt -6°.

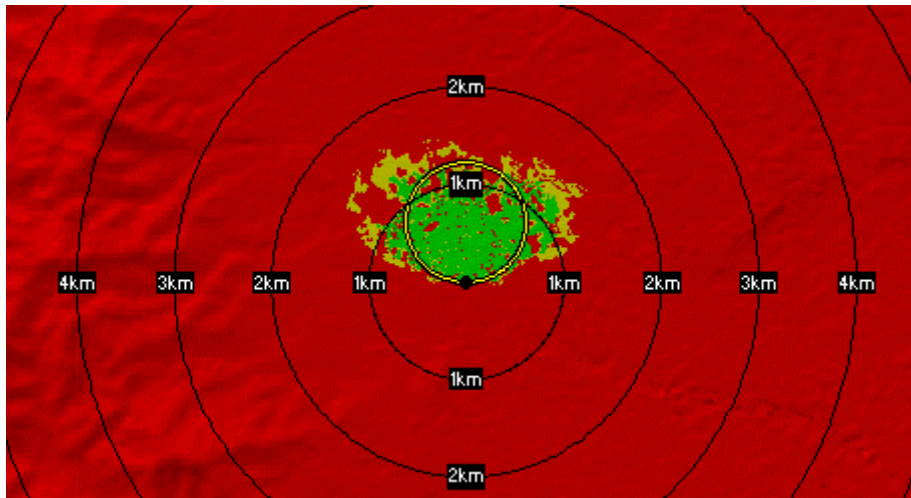
El downtilt aplicat per Radio Mobile és el downtilt mecànic. Si comparem el resultat d'aquestes tres simulacions, notem que l'abast és major amb un downtilt de 0° a causa que gran part de la radiació apunta cap a l'horitzó. A més a més, podem apreciar zones amb ombra (taques de color vermell), que podrien ser degudes també a obstacles presents dins del radi de cobertura. Tot i que el radi de cobertura és més gran (es dispersa més), podria provocar interferència amb cel·les veïnes.

Amb un downtilt de -10° respecte de la vertical, l'abast és molt menor. Per tant, és obvi que el radi de cobertura disminueix considerablement. Ara bé, fixem-nos que amb un downtilt de -10° hi ha més radiació lateral, és a dir, el primer nul de radiació no és el mateix.

Si busquem un downtilt intermedi, com el simulat amb -6°, notem que el resultat obtingut és un radi de cel·la més gran que l'obtingut amb un downtilt de -10°, però més petit que l'obtingut amb el downtilt de 0°. D'aquesta manera s'aconsegueix disminuir la interferència amb cel·les veïnes, i alhora tenir una radiació lateral menor. En qualsevol

cas, podem afirmar que hi ha un impacte del primer nul de radiació i un efecte del downtilt mecànic en l'emissió de potència en els laterals del sector.

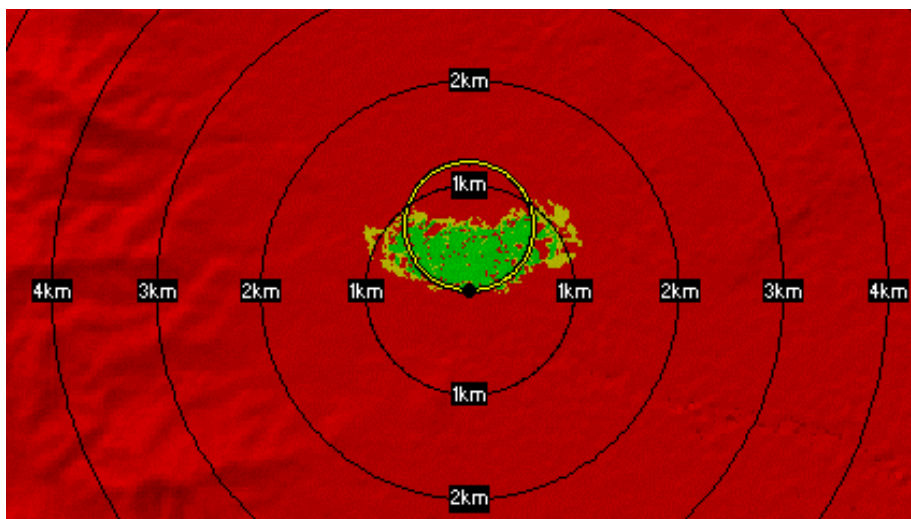
Si deixem fixat el downtilt calculat a l'apartat 8.5, podem estimar el radi mig de cobertura final. Per fer-ho, anem a **[Edit]** → **[Draw Rings]** i indiquem que dibuixi de manera permanent un cercle a distància R.



Il·lustració 203. Estimació radi de cobertura per a un downtilt de -6° .

El downtilt calculat a l'apartat 8.5 és aproximadament de -6° . No obstant, segons el resultat de la simulació, per a aquest downtilt s'obté un radi de cobertura aproximat d'1Km.

Si decidim augmentar el downtilt fins a -8° , observem que el radi disminueix aproximadament als 600-700 metres.



Il·lustració 204. Estimació radi de cobertura per a un downtilt de -8° .

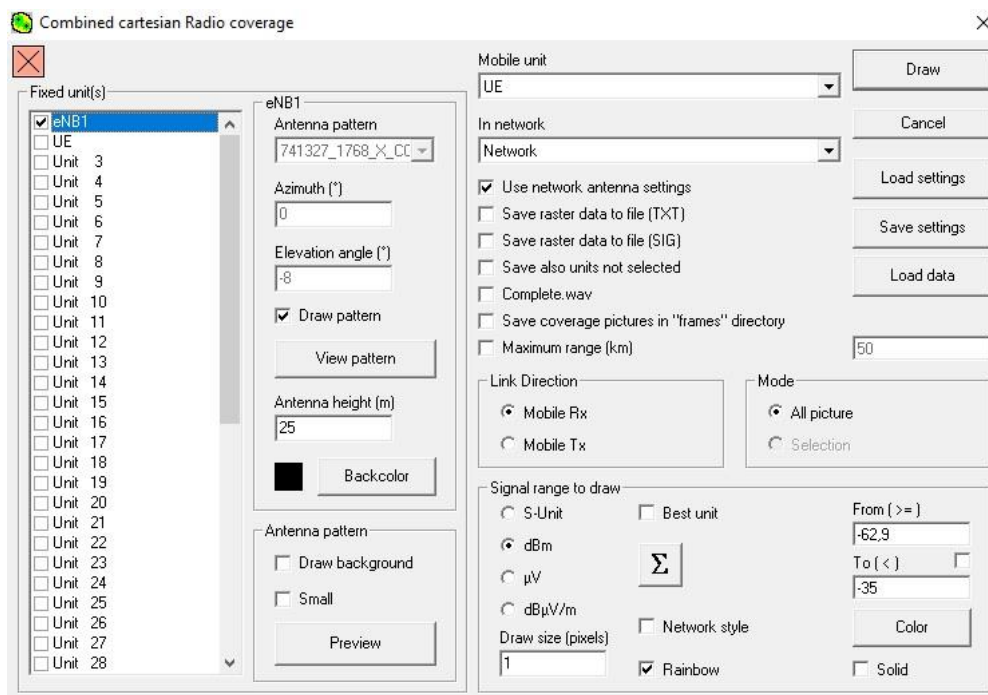
Considerant les simulacions i les proves realitzades, s'ha d'escollir un angle final de downtilt el qual mostri un bon compromís entre:

- Reducció d'abast excessiu i, per tant, reducció d'interferències en unes altres cel·les co-canal.
- Cobertura correcta. Una inclinació excessiva pot implicar àrees de cobertura petites. Recordem que si el nou radi és més petit, la probabilitat de bloqueig seria més gran que la desitjada.

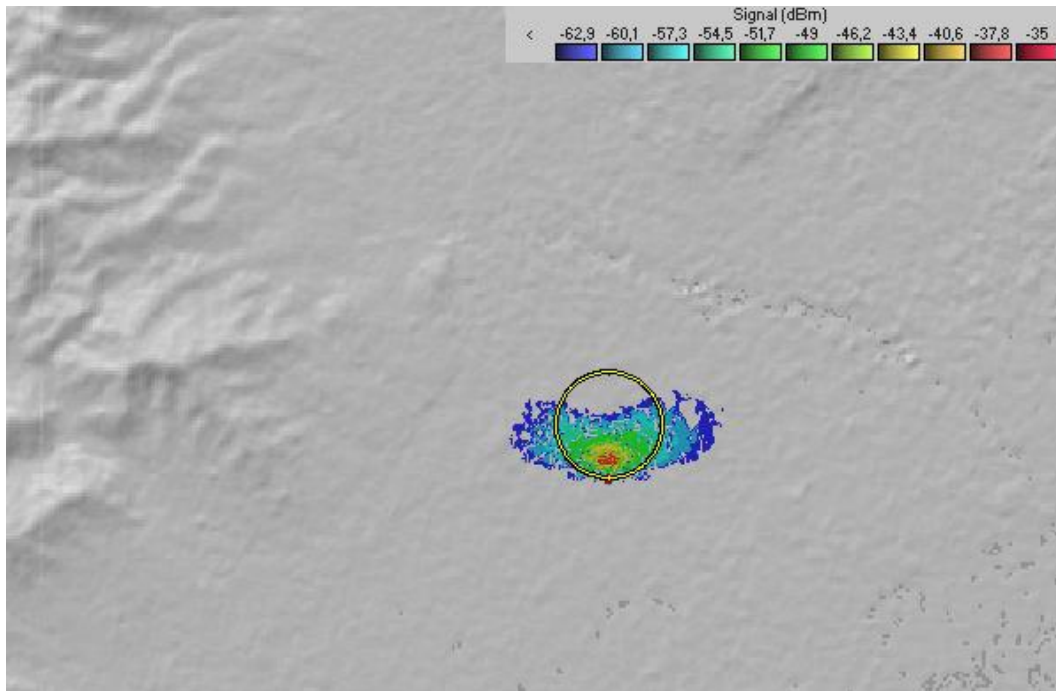
És aconsellable col·locar la unitat en 2 o 3 posicions diferents. La idea és descartar posicions amb un bloqueig particular (per exemple, a causa d'un gran obstacle, com ocorre quan hi ha una petita elevació en el centre d'una ciutat). D'aquesta forma obtindrem una estimació més correcta del radi mitjà.

L'opció "Network Style" permet dibuixar àrees que respecten una determinada condició amb respecte al llindar de recepció mínim desitjat. No obstant, també és important avaluar com canvien els nivells de potència rebuts dins de l'àrea de cada cel·la.

Si en les opcions de simulació desactivem "Network Style" i activem l'opció "Rainbow", Radio Mobile representarà la potència rebuda en qualsevol punt del mapa dins d'un rang de potències donat. Per al downtilt escollit (-8°), es representarà el rang entre el llindar de recepció mínim fins a una potència suficientment gran, com pot ser -35dBm.



Il·lustració 205. Configuració de paràmetres de simulació de cobertura.



Il·lustració 206. Simulació de cobertura de cel·la amb downtilt -8° i resolució d'1 píxel.

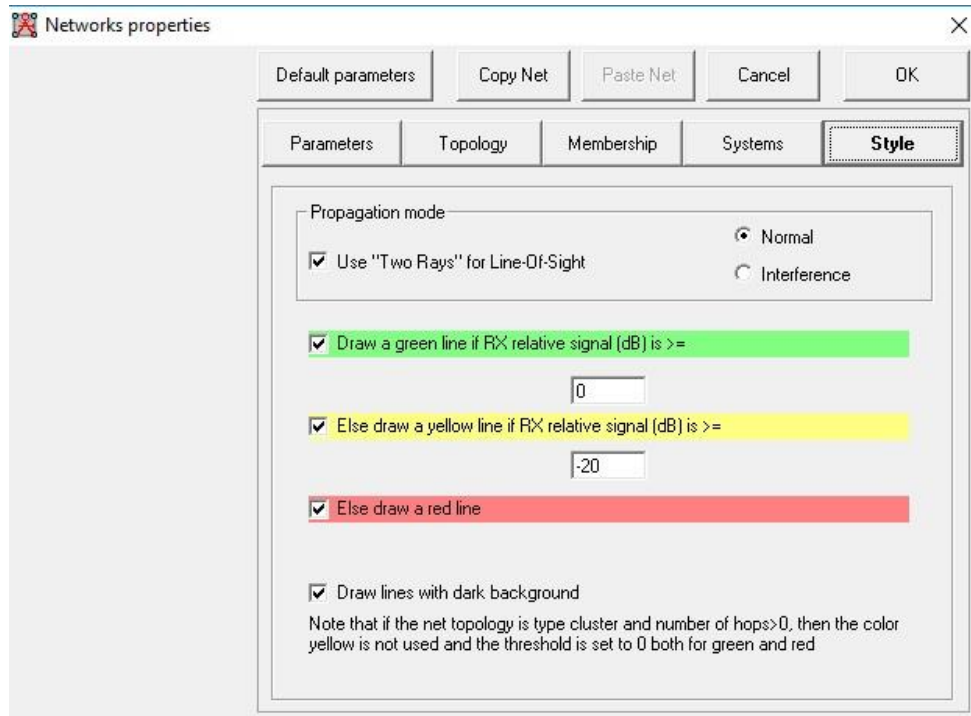


Il·lustració 207. Simulació de cobertura de cel·la amb downtilt -8° i resolució d'1 píxel amb capa gràfica superposada.

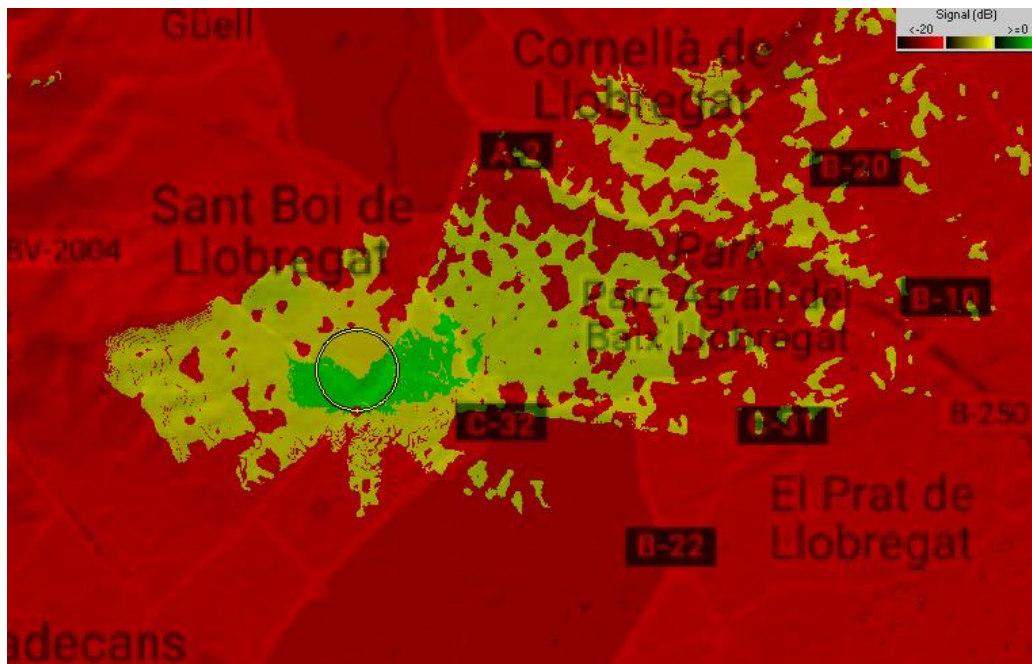
S'ha escollit un rang de -62.9dBm fins a -35dBm perquè volem veure el límit de la cel·la. Per a aquest motiu s'escull el valor de Threshold.

Tornem a "Style" de "Network Properties" i reajustem perquè es visualitzi la cobertura *indoor vs. outdoor*. A les següents captures es visualitzarà la comparativa entre la cobertura exterior i interior que pot haver-hi. Per fer-ho, hem de modificar els llindars.

Per exemple, si volem visualitzar de color verd només la cobertura corresponent a la *indoor*, caldrà tenir en compte les pèrdues per posició del *Link Budget*, motiu pel qual no posem cap valor. D'altra banda, voldrem visualitzar de color groc la cobertura *outdoor*. Si recordem, en el *Link Budget* hem sumat 20 dB de pèrdues per posició. Doncs ara caldrà restar aquests 20 dB, i així simularem que som fora d'algun recinte tancat com podria ser un edifici.



Il·lustració 208. Reajustament dels llindars per a la simulació de cobertura indoor vs. outdoor.



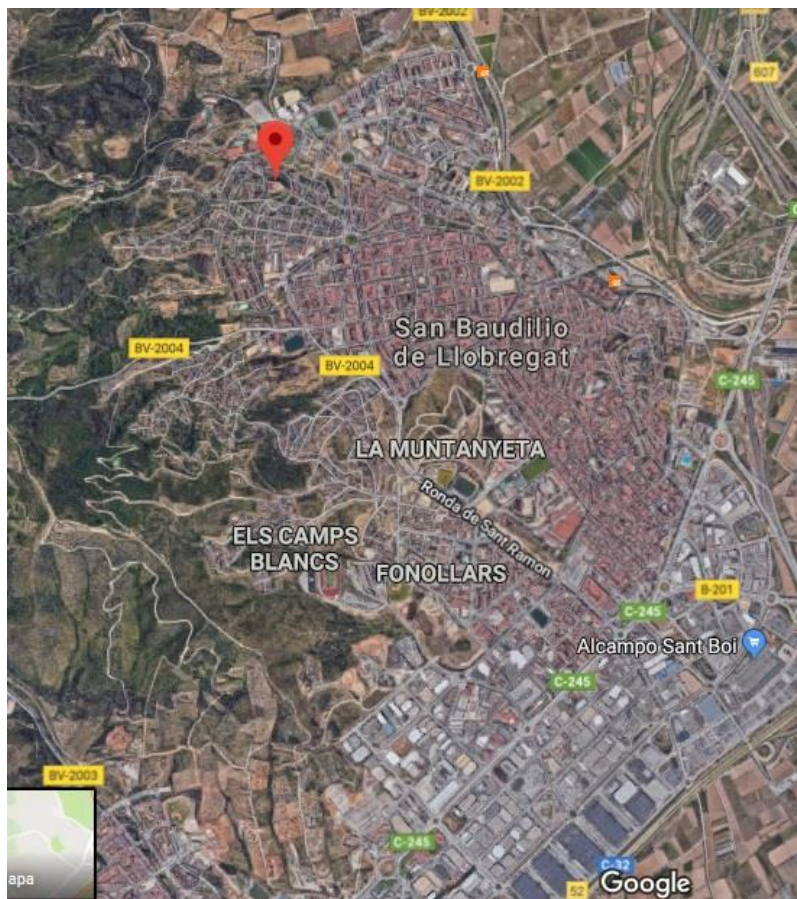
Il·lustració 209. Cobertura indoor vs. outdoor simulada amb 1 píxel de resolució.

7.7 Desplegament en entorn urbà

Selecció d'emplaçaments

Per cobrir la ciutat de Sant Boi de Llobregat s'assumirà disponibilitat geogràfica total per ubicar els emplaçaments. En el món real no disposarem "d'infinits" punts per ubicar els emplaçaments, ja que existiran un conjunt d'ubicacions possibles més o menys nombroses en funció de les gestions dels permisos que s'hagin aconseguit en les comunitats de propietaris. També depenen de les normatives dels ajuntaments locals, de la disponibilitat d'energia, de la possibilitat física d'instal·lar una base, etc. No obstant, sí cal respectar que la seva instal·lació ha de ser al terrat d'un edifici. Es procedirà de la següent manera:

1. Busquem un primer emplaçament candidat en el límit superior esquerre de la nostra àrea objectiu.



Il·lustració 210. Situació vista aèria del eNB1. Coordenades 41°21'09.9"N 2°01'22.7"E.

2. Convertim les coordenades LATITUD-LONGITUD a UTM, per exemple en el següent enllaç: <http://www.rcn.montana.edu/Resources/Converter.aspx>

La utilitat de les coordenades UTM és que ens permet calcular desplaçaments horitzontals i verticals fàcilment de manera cartesiana.

Select Map Datum
WGS 84

Decimal Degrees
Latitude: 41.352753 Longitude: 2.022969
Convert Decimal Degrees Reset Form

Degrees, Minutes, Seconds
Latitude: Degrees: 41 Minutes: 21 Seconds: 09.9108 Hemisphere: N/+
Longitude: Degrees: 2 Minutes: 01 Seconds: 22.6884 Hemisphere: E/+
Convert Degrees, Minutes, Seconds Reset Form

Standard UTM
Zone: 31 Hemisphere: N Easting: 418269.3 Northing: 4578377.6
Convert Standard UTM Reset Form

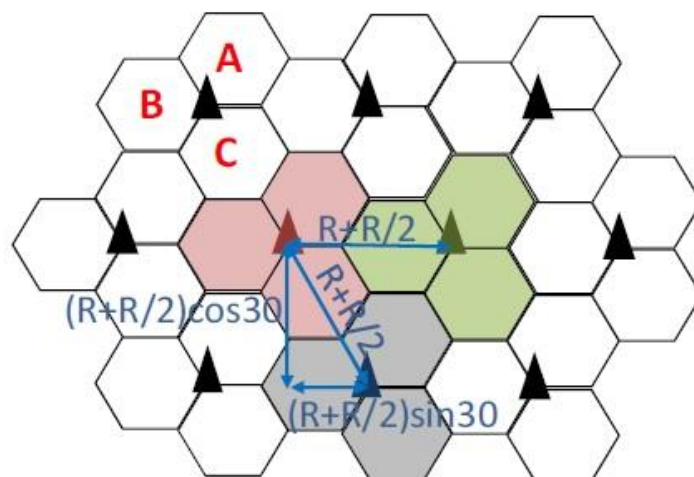
Il·lustració 211. Unitats convertides a UTM per al emplaçament eNB1.
<http://www.rcn.montana.edu/Resources/Converter.aspx>



Il·lustració 212. Vista 3D del emplaçament eNB1. Coordenades 41°21'09.9"N 2°01'22.7"E.

3. Calculem les distàncies teòriques que caldria aplicar per a la resta d'emplaçaments si el terreny fos pla i les condicions de propagació constants. Com a màxim farem servir 10 emplaçaments, no obstant, segons el radi de cel·la estimat caldrà canviar el punt inicial de càlcul per assegurar que es cobreix el centre de la ciutat.

Com les distàncies són constants, podem trobar les coordenades de tots els emplaçaments ràpidament a partir de les del primer: trobem les coordenades dels primers emplaçaments de cada "fila" (entre files hi ha un offset horitzontal de $(R + R/2) \cdot \sin 30^\circ$ i vertical de $(R + R/2) \cdot \cos 30^\circ$. Per a la resta simplement s'ha de sumar un desplaçament constant horitzontal. Cal tenir present que el radi de cel·la és finalment el radi ajustat a l'apartat anterior (600 metres).



Il·lustració 213. Esquema representatiu de les distàncies entre emplaçaments. Mario García Lozano, Laboratori de Comunicacions Sense Fils, EETAC-UPC.

A continuació podem crear una taula en un full de càlcul amb les corresponents coordenades amb les consideracions següents:

- Respectar el format indicat (amb títols idèntics) ja que després s'importaran a Radio Mobile.
- No és necessari calcular totes les cel·les.
- El nom de les "units" serà el del primer sector de cada emplaçament. Escollim un nom amb la terminació A. Observem de l'anterior il·lustració que tindrem 3 tipus de sectors segons el seu azimuth. Els sectors de tipus B i C seran creats posteriorment a partir de la creació del primer.
- Totes les elevacions estan a 200 metres, a continuació es corregirà amb l'altura correcta incloent edificis en Google Earth.
- La columna "Text" ha d'estar buida, però ha d'existir.

Unit name	Enabled	Y	X	Elevation(m)	Icon	Forecolor	Style	Backcolor	Text
eNB_1A	1	4578377,6	418269,3	200	1	FFFF		0	0
eNB_2A	1	4578377,6	419169,3	200	1	FFFF		0	0
eNB_3A	1	4577597,6	417819,3	200	1	FFFF		0	0
eNB_4A	1	4577597,6	418719,3	200	1	FFFF		0	0
eNB_5A	1	4577597,6	419619,3	200	1	FFFF		0	0
eNB_6A	1	4576817,6	419169,3	200	1	FFFF		0	0
eNB_7A	1	4576817,6	420069,3	200	1	FFFF		0	0
eNB_8A	1	4576037,6	418719,3	200	1	FFFF		0	0
eNB_9A	1	4576037,6	419619,3	200	1	FFFF		0	0
eNB_10A	1	4576037,6	420519,3	200	1	FFFF		0	0

Il·lustració 214. Dades amb les coordenades UTM de cada emplaçament. Elaborat amb Excel.

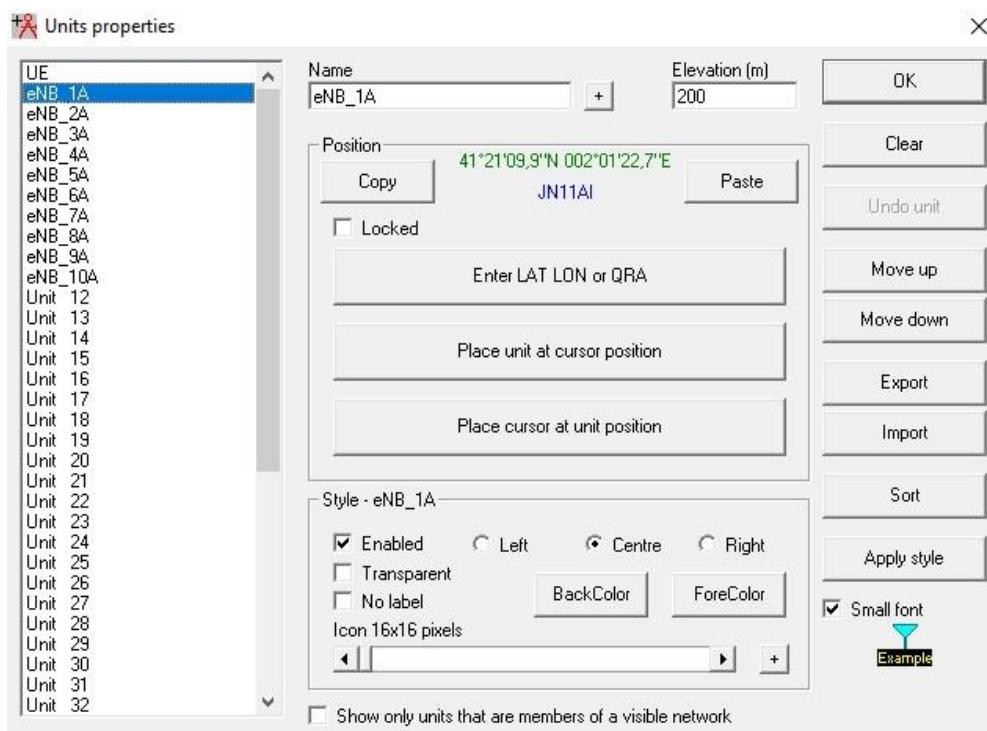
Seguidament convertim les coordenades a graus decimals. Com la diferència serà molt petita, podem assumir que els emplaçaments amb una mateixa Y tenen la mateixa latitud, i mateixa X implica mateixa longitud.

Unit name	Enabled	Latitude	Longitude	Elevation(m)	Icon	Forecolor	Style	Backcolor	Text
eNB_1A	1	41,352747	2,02296509229267	200	1 FFFF	0	0	0	
eNB_2A	1	41,352838	2,03372246482868	200	1 FFFF	0	0	0	
eNB_3A	1	41,345676	2,01769203170480	200	1 FFFF	0	0	0	
eNB_4A	1	41,345767	2,02844822358866	200	1 FFFF	0	0	0	
eNB_5A	1	41,345858	2,03920446473338	200	1 FFFF	0	0	0	
eNB_6A	1	41,338877	2,03393017445054	200	1 FFFF	0	0	0	
eNB_7A	1	41,338877	2,04468528445717	200	1 FFFF	0	0	0	
eNB_8A	1	41,331717	2,02865701497869	200	1 FFFF	0	0	0	
eNB_9A	1	41,331808	2,03941094542412	200	1 FFFF	0	0	0	
eNB_10A	1	41,331897	2,05016492454587	200	1 FFFF	0	0	0	

Il·lustració 215. Dades amb coordenades graus decimals de cada emplaçament. Elaborat amb Excel.

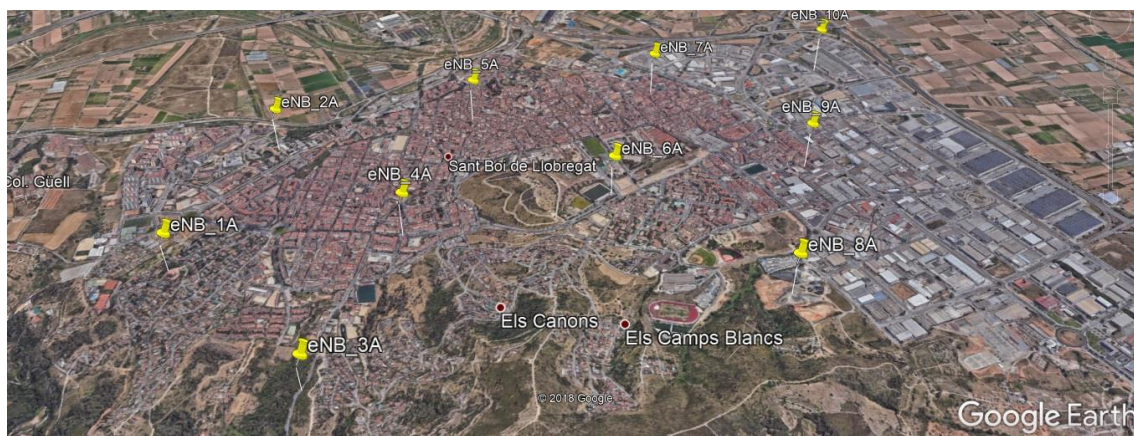
Copiem la taula anterior en un fitxer de text.

A Radio Mobile, accedim a “Unit Properties” i reordenem les unitats existents per tal que el terminal mòbil sigui el primer de la llista (fem servir “Move up” i/o “Move down”). Tot seguit, importem els emplaçaments fent clic a “Import” i carreguem el fitxer .txt. Un cop carregat, ens apareixeran totes les unitats a la dreta i caldrà seleccionar-les. A l’esquerra cliquem sobre la posició a partir de la qual desitgem escriure la informació (cal fer-ho a sota del terminal mòbil per no sobre escriure’l). La BTS del test inicial ja no és necessària. Per últim, fem clic en “OK”.



Il·lustració 216. Captura que mostra la importació dels sites.

Ara caldrà exportar de nou les unitats, però en format .kml per poder obrir-lo amb el Google Earth. Important assegurar-se que en el Google Earth estigui activada la capa d’edificis. L’objectiu, ara, serà acabar d’ajustar les posicions teòriques a posicions reals.

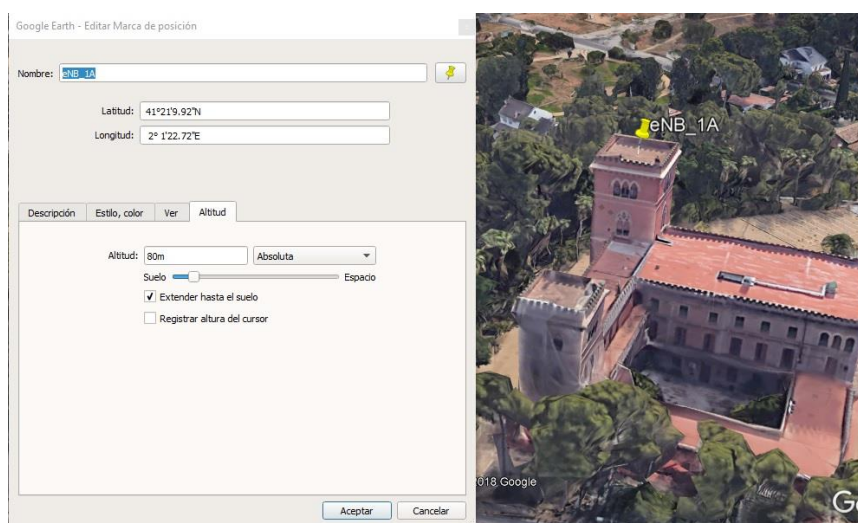


Il·lustració 217. Situació dels emplaçaments importats a Google Earth.

Recordem que la situació dels emplaçaments importats a Google Earth corresponen a situacions on la distància entre sites és teòrica. (Veure il·lustració 213).

A continuació, a cada marca de posició fem **clic dret** → **propietats**. La marca de color groc parpellejarà dins d'un requadre, moment en el que podrem arrossegar-la a la posició final desitjada. Podem escollir l'edifici dominant més pròxim, però sempre tenint present el nostre radi de cel·la estimat per no desplaçar-nos excessivament ($\pm 10\%$ de R), ja que poden aparèixer forats de cobertura i/o solapaments excessius. En aquest punt cal aplicar el sentit comú. L'ideal seria que tots els emplaçaments s'ubiquin sobre un edifici, no obstant, si hi ha alguna marca de posició que no és possible, es considerarà un torre sobre el sòl, l'alçada de la qual serà de 25 metres. Com a incís, només dir que considerar algun site com a torre sobre el sòl implica que aquesta tingui més metres de *feeder*, més atenuació, en comparació a les que s'ubiquen sobre un terrat d'un edifici i caldria refer les dades del seu balanç. No obstant, però, assumirem que tots els sites tenen les mateixes pèrdues per *feeder*.

L'altura de Google Earth serà la del terreny + edifici (com s'indica en la zona inferior de de la captura següent). Fixem-nos en el seu valor final, el qual caldrà modificar-lo manualment en les propietats de la marca de la posició (veure il·lustració 218).

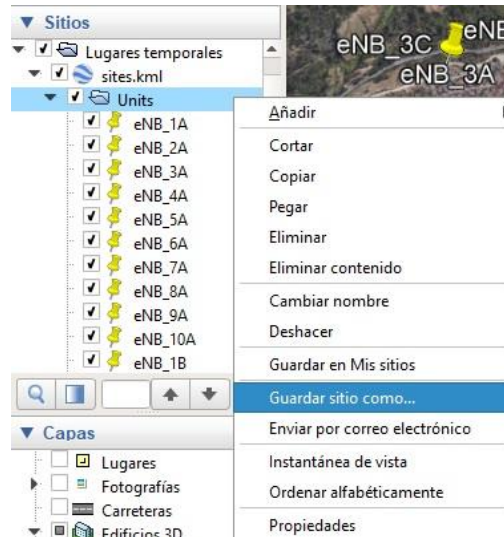


Il·lustració 218. Modificació manual d'altura absoluta a Google Earth.

Fem el mateix procediment per a la resta d'emplaçaments.

Una vegada creats els emplaçaments, fem clic amb el **botó dret** en cadascun d'ells → **copiar**, i després clicar en la carpeta en la que estan continguts i **pegar**.

Arrosseguem les diferents marques de posició perquè els sectors de tipus A estiguin tots seguits a la llista. El mateix amb els sectors de tipus B i C. Verifiquem que tot sigui correcte i que no falta cap sector. Fem clic amb el botó dret a la carpeta on es troben totes les marques de posició i cliquem a “*Guardar sitio como*”. Seleccionem el format .kml.



Il·lustració 219. Guardar les unitats en format .kml per importar-lo a Radio Mobile.

Una vegada importat el fitxer .kml a Radio Mobile, anem a “*Network Properties*” per associar totes les unitats a la nostra xarxa i al sistema BTS urbà. Cal assegurar-se que tots són de tipus “*Command*”, modificar la direcció de l’azimut segons correspongui i actualitzar també el downtilt per a cada sector d’unitat (-8°).

Tenint en compte la tri-sectorització, s’indica a continuació quin serà l’azimut de cada sector i la seva separació angular. Podem visualitzar l’azimut amb “*View Pattern*” per assegurar que l’antena apunta al lloc desitjat.

Diferència angular entre sectors	Azimut sector A	Azimut sector B	Azimut sector C
120°	20°	140°	260°

Il·lustració 220. Azimut de cada sector i separació angular. Elaboració pròpia.

Finalment, cal crear un directori per a la xarxa existent i guardar-la.

Càlculs de cobertures

Abans que res, en qualsevol moment de càlcul de cobertures a Radio Mobile, la barra espaciadora detindrà el càlcul i la tecla S el ralentirà (reduirà l'ús de la CPU per poder seguir fent servir l'ordinador amb unes altres tasques i que no quedi bloquejat).

Totes les representacions seran en dBm. Els dB μ V/m són habituals en planificació de sistemes de TV i les "S-Units" pertanyen a l'àmbit dels radioaficionats (permeten obtenir una representació gràfica dels 12 nivells que típicament es mostren en els receptors d'ona curta).

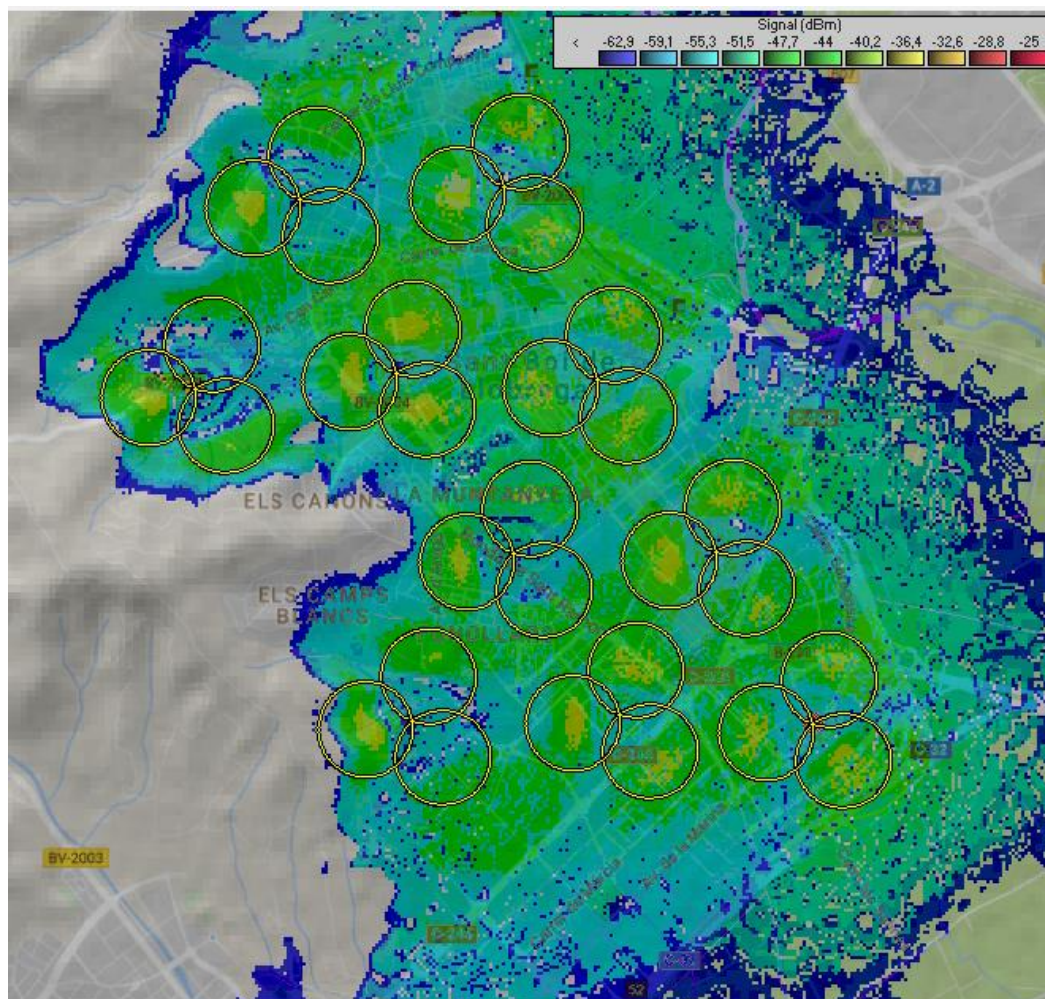


Il·lustració 221. "S-Units" esquerra. "S-meter" dreta. David García Vizcaíno – Curs d'operador d'estacions de radioaficionat – EETAC-UPC.

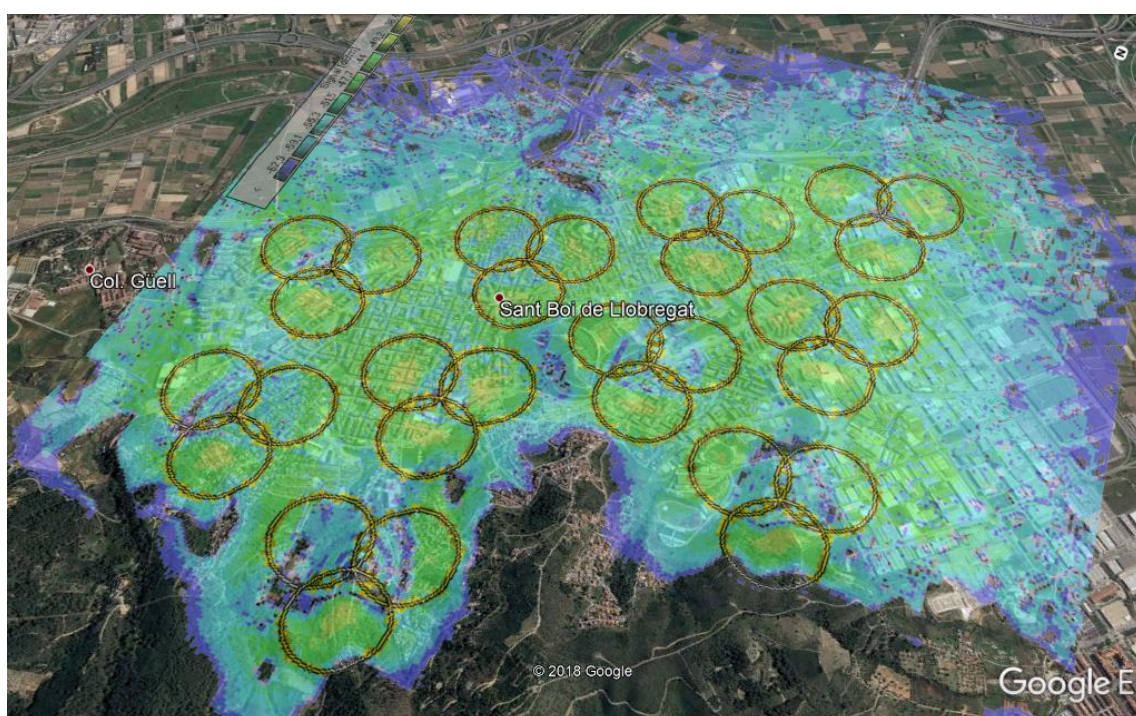
Cada vegada que realitzem una simulació ens hem d'assegurar que l'opció "Draw pattern" estigui activada per a cada "unit" i "Save coverage pictures in frames directory". Això generarà una carpeta anomenada "framesXXX" dins del directori de la xarxa, on XXX és un nombre que anirà creixent a cada simulació. Dins d'aquest, s'emmagatzemaran les imatges associades a les cobertures individuals de cada sector i fitxers .kml per a la seva representació al Google Earth. Seleccionem el format PNG perquè es generin zones transparents per millorar la visualització al Google Earth.

A continuació una captura de la cobertura global amb una resolució de 2 píxels i una escala de colors des del RST (-62.9dBm) fins a -25dBm. El fet d'escollir una resolució menor, implicaria una simulació aproximada de 3 hores. Aquest és el motiu pel qual s'ha decidit simular a Radio Mobile els 30 sectors amb una resolució de 2 píxels. (Temps de simulació aproximat de 40 minuts).

Com a aclariment, dir que la posició final de cada BTS (eNodeB) s'ha escollit amb la condició descrita anteriorment: una variació en la ubicació del 10% del radi. Així doncs, la separació entre la posició teòrica i la posició final no ha sigut superior a 60 metres.



Il·lustració 222. Cobertura global simulada (resolució 2 píxels) dels 10 emplaçaments a Sant Boi de Llobregat.



Il·lustració 223. Cobertura global (combinada) representada al Google Earth.

Com s'ha pogut veure dels resultats obtinguts, caldrà optimitzar-los ajustant la posició, *downtilt* i azimut per tal d'eliminar forats de cobertura. Tot i que també es pot millorar la posició d'alguna base el rendiment del qual no sigui l'adequat perquè l'emplaçament no estigués ben escollit: per exemple, no haver considerat l'orografia del terreny i tenir una petita elevació davant dels edificis. En aquests casos, el mètode més ràpid és:

- Obrir tots els fitxers .kml amb les cobertures individuals i la combinada al Google Earth.
- Es pot activar i desactivar les diferents cobertures per realitzar on és possible realitzar optimitzacions. Mantenir oberta la finestra de Radio Mobile.

Si per qualsevol cas es desitja canviar la posició d'algun emplaçament, Radio Mobile suporta el "*copy-paste*" directe de Google Earth. Per tant, el més ràpid seria:

- Realitzar el canvi en Google Earth.
- Copiar la marca de la posició.
- A Radio Mobile anar a "*Unit Properties*" i clicar en el botó "*paste*" i automàticament es prendran les dades procedents de Google Earth.

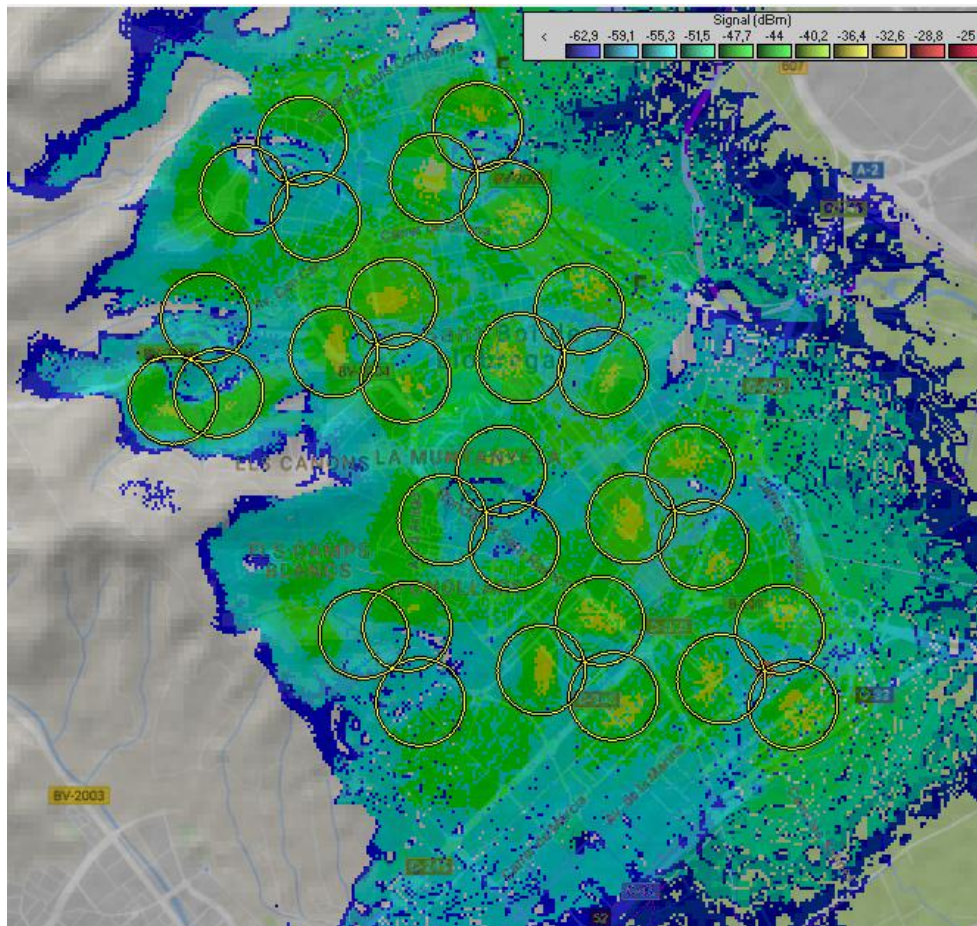
7.8 Optimització de cobertura

Emplaçament	Sector	Problema	Solució	Inconvenient
eNB1	C (260°)	Forat de cobertura per l'orografia del terreny	Disminuir <i>downtilt</i> a (-4°)	Per la posició que ocupa, cap.
eNB2	A (20°)	Petit forat de cobertura al barri de Ciutat Cooperativa	Disminuir <i>downtilt</i> a (-7°). I canviar azimut del sector a 0°	Implica un augment d'interferència amb el sector A del eNB1
eNB3	A (20°)	Torre d'altura 25m, forat de cobertura a les immediacions.	Baixar antena del sector A. (15m) Perdre diversitat en espai.	Cap. Perdre diversitat en espai fa que disminueixi la CIR.
eNB3	B (140°)	Petits forats de cobertura a les immediacions.	Baixar antena del sector B per perdre diversitat en espai. Manténir <i>downtilt</i> a -8°.	Cap. Perdre diversitat en espai fa que disminueixi la CIR.
eNB3	C (260°)	Sector mal orientat. Ha	Canviar azimut a 203°.	Per la posició que ocupa. Cap.

		d'apuntar a la urbanització.		
eNB4	B(140°)	Petit forat de cobertura al Parc de la Muntanyeta	Disminuir downtilt a -5°.	L'efecte <i>multipath</i> podria incrementar la CIR.
eNB5	B (140°)	Forat de cobertura pròxim a l'emplaçament	Canviar azimuth a 120°. disminuir downtilt a -7°	Possible augment d'interferència a la cel·la veïna eNB2 sector B.
eNB6	C (260°)	Forat de cobertura per l'orografia abrupte del terreny.	Mantenir l'antena a 25m. I disminuir downtilt a -6°.	L'orografia del terreny ho permet. Però pot provocar un forat a les immediacions.
eNB8	C (260°)	Abast limitat per l'orografia del terreny.	Oferir cobertura a la muntanya de Sant Ramó. Aplicar downtilt -1°. Però canviar l'azimut a 320°	Cap.

Després de dur a terme les modificacions esmentades anteriorment (les altures modificades a Google Earth per importar-les de nou a Radio Mobile, i els azimuths i downtilts a modificats a "Membership" de "Network Properties"), s'ha tornat a realitzar una simulació de cobertura global dels 10 emplaçaments (30 sectors). El resultat ha estat el següent:

- El sector C del eNB1 millora l'abast de cobertura. No obstant, deixa un petit forat a les immediacions del emplaçament.
- El sector A del eNB2 no aconsegueix cobrir el petit forat de cobertura present al barri de Ciutat Cooperativa.
- El sector A del eNB3 millora l'abast de cobertura, tot i que a les immediacions tenir cobertura llindar no és un problema perquè l'emplaçament està ubicat en zona de muntanya on no hi ha presència habitual de persones.
- El sector B del eNB3 millora l'abast de cobertura a la urbanització de Can Paulet.
- El sector C del eNB3 millora el nivell de cobertura a la urbanització Can Paulet. Amb l'azimut anterior de 260° radiava energia a àrees no habitades.
- El sector B del eNB4 cobreix el petit forat que hi havia abans al Parc de la Muntanyeta, amb downtilt actual de -5°.
- El sector B del eNB5 no millora l'abast de cobertura amb un downtilt de -7°, ja que continua havent el forat existent.
- El sector C del eNB6 millora l'abast de cobertura amb el nou downtilt de -4°.
- El nou azimuth del sector C (320°) del eNB8 millora considerablement l'abast i el nivell de cobertura assolit al barri de Camps Blancs.



Il·lustració 224. Cobertura global simulada (resolució 2 píxels) amb les optimitzacions indicades dels 10 emplaçaments a Sant Boi de Llobregat.

Tot i així, com a últim intent s'intentarà millorar els forats de cobertura existents, de la següent manera:

- Nou emplaçament eNB11 amb un únic sector per cobrir el forat existent a la urbanització Els Canons. L'orografia del terreny dificulta ajustar més els downtilts i azimuts en detriment d'altres àrees.

Per determinar de manera ràpida la marca de posició del nou emplaçament a partir dels existents, procedim a fer el següent:

- Com la distància entre nodes ha de seguir el criteri plantejat a la il·lustració 213, calculem la distància i l'angle azimut entre els emplaçaments eNB7 i eNB6 (en coordenades cartesianes tenen el mateix valor de Y i diferent X).
- Amb el mateix azimut a Google Earth, trobem un nou punt tal que la distància entre el eNB6 i aquest nou punt sigui igual que la distància que hi ha entre els eNB7 i eNB6 (900 metres). Veure il·lustració 225.



Il·lustració 225. Distància i azimuth entre els emplaçaments eNB7 i eNB6.

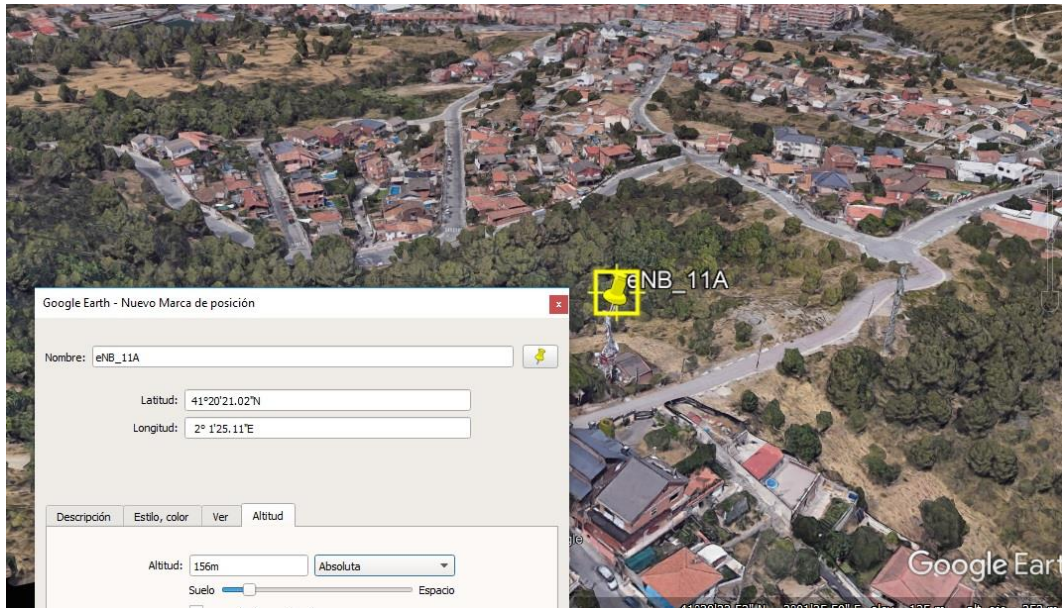
Ara tracem una nova línia per tal de trobar un nou punt, el qual disti 900 metres del emplaçament eNB6 i tingui azimuth (la línia) de 270°.



Il·lustració 226. Marca de posició teòrica del nou emplaçament (eNB11).

Una vegada determinat la posició teòrica del nou emplaçament (eNB11), tenim un marge del 10% del radi per triar una ubicació òptima, tal que pugui garantir la cobertura a la urbanització Els Canons.

A la il·lustració 227 s'observa les coordenades del emplaçament eNB11, l'alçada de la qual és de 16 metres respecte del sòl. A més a més, tenim una vista 3D on s'aprecia l'àrea objectiu.



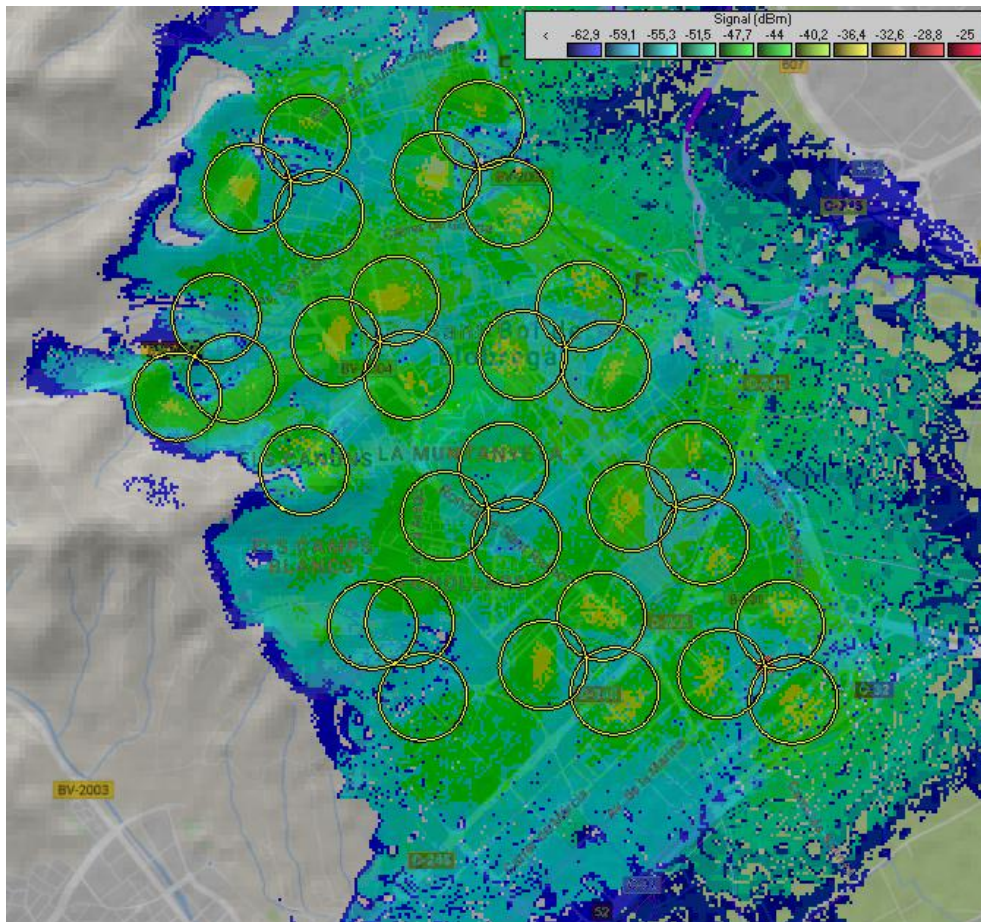
Il·lustració 227. Coordenades del emplaçament eNB11 amb vista 3D de l'àrea objectiu.

Abans d'importar les dades actualitzades dels emplaçaments en format .kml, s'ha de decidir quants sectors tindrà aquest nou emplaçament afegit a la fase d'optimització de cobertures. Veient la vista 3D anterior, s'intueix que amb un únic sector és suficient per garantir la cobertura a la urbanització Els Canons. L'azimut òptim s'hauria de mirar quin és millor (20° o 30°). Es simularà primer amb un azimut de 20°, perquè així es respecta la planificació prèvia feta de la resta d'emplaçaments, on els sectors de tipus A tenen un azimut de 20°.

Els valors definitius d'azimut i downtilt per a cada sector són els següents:

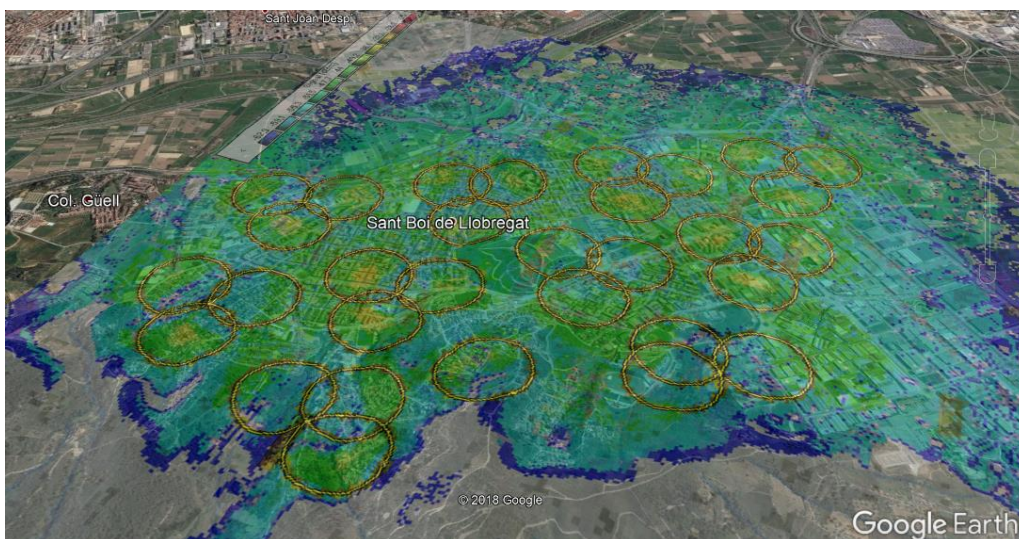
Site	Posició	Sector A Azimut/downtilt/altura	Sector B Azimut/downtilt/Altura	Sector C Azimut/downtilt/Altura
eNB1	41°21'9.92"N 2°1'22.72"E	20°/-9°/24m	140°/-8°/24m	260°/-7°/24m
eNB2	41°21'11.59"N 2°2'1.43"E	0°/-6°/18m	140°/-8°/18m	260°/-8°/18m
eNB3	41°20'43.02"N 2°1'3.01"E	30°/-8°/18m	120°/-8°/18m	203°/-8°/25m
eNB4	41°20'45.35"N 2°1'41.06"E	20°/-8°/18m	140°/-5°/18m	270°/-7°/18m
eNB5	41°20'44.40"N 2°2'18.91"E	20°/-8°/25m	115°/-7°/25m	260°/-8°/25m
eNB6	41°20'19.70"N 2°2'3.03"E	20°/-8°/25m	140°/-8°/25m	260°/-4°/25m
eNB7	41°20'19.84"N 2°2'41.48"E	20°/-6°/23m	140°/-8°/23m	270°/-7°/23m
eNB8	41°19'55.98"N 2°1'44.09"E	20°/-6°/25m	140°/-8°/25m	330°/-1°/25m
eNB9	41°19'56.81"N 2°2'23.15"E	20°/-8°/33m	140°/-8°/33m	260°/-7°/33m
eNB10	41°19'55.58"N 2°2'59.97"E	20°/-8°/24m	140°/-8°/24m	260°/-8°/24m
eNB11	41°20'19.83"N 2°1'20.81"E	30°/-10°/23m	NA	NA

Després de fer nombroses proves amb Radio Mobile, la taula anterior conclou les marques de posició, azimut, downtilt i altura de cada sector.



Il·lustració 228. Cobertura global simulada (resolució 2 píxels) amb les optimitzacions finals indicades dels 11 emplaçaments a Sant Boi de Llobregat.

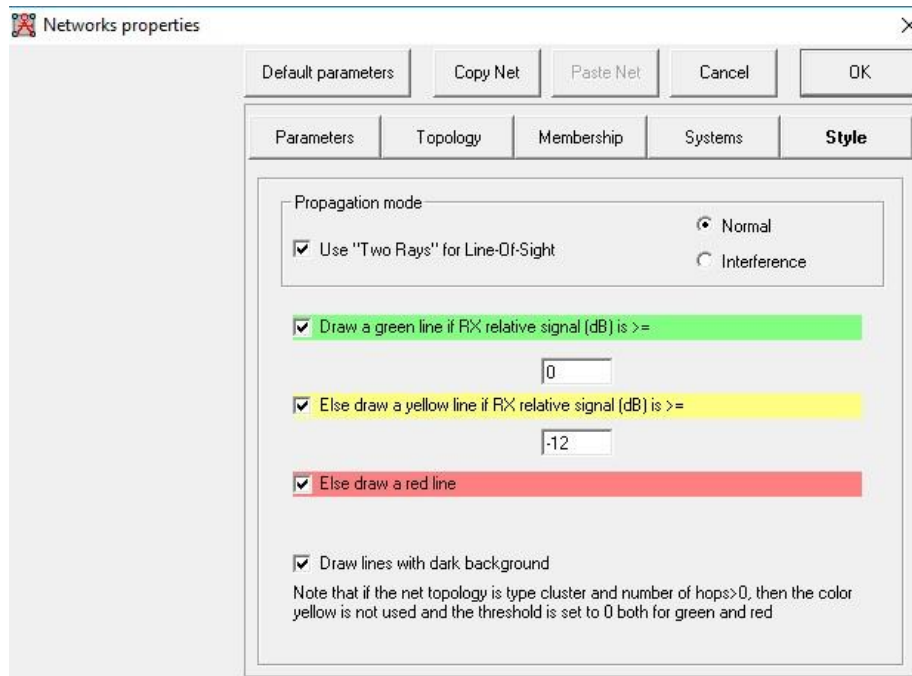
Com es pot veure de la il·lustració anterior, afegir un nou emplaçament amb un sector orientat a la urbanització Els Canons garanteix la cobertura.



Il·lustració 229. Cobertura global final (combinada) representada al Google Earth.

Cobertura indoor vs. incar

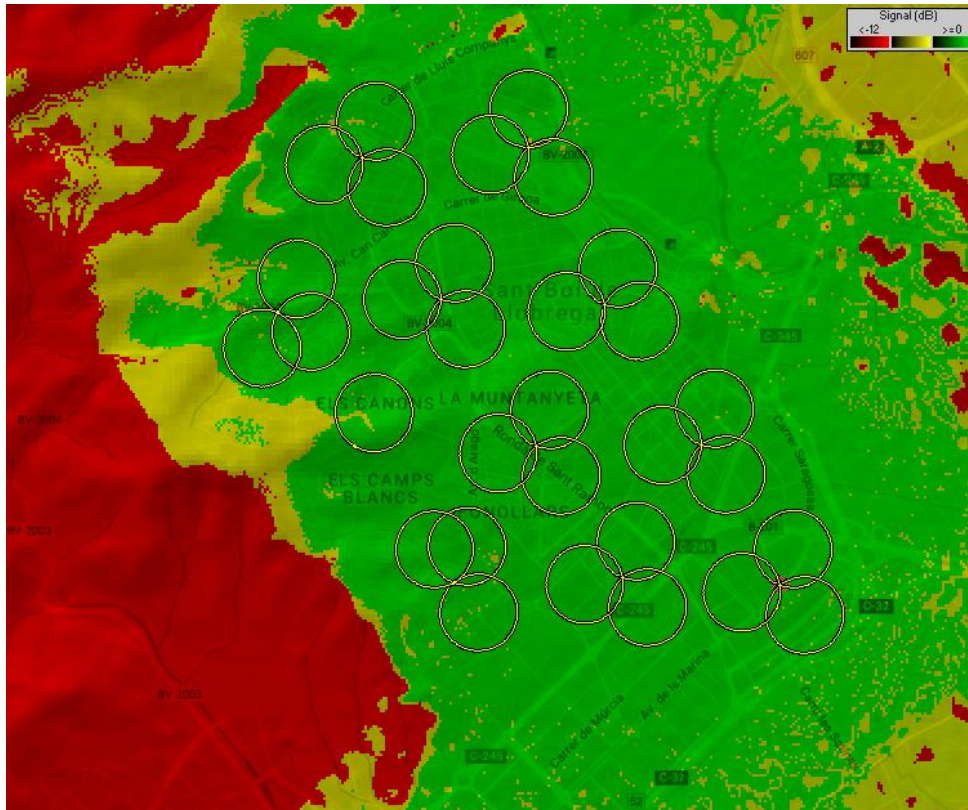
La següent simulació serà realitzada amb l'opció "Network Style", perquè es pugui representar simultàniament la cobertura *indoor* i la cobertura *incar*. Per fer-ho anem a [Networks Properties] → [Style] i hem de modificar els llindars.



Il·lustració 230. Modificació llindars per a simular cobertura indoor vs. incar.

Per poder simular la cobertura indoor a Radio Mobile, modificarem a l'apartat "Style" i posarem la $RST = P_{min} + MF + BL + IL$. D'altra banda, per visualitzar la cobertura *incar*, el valor de *Reliable Service Threshold* serà $RST = P_{min} + MF + BL + INCAR$. És a dir, aquesta nova RST no tindrà en compte les pèrdues per edificis, però s'afegeix unes pèrdues per estar dins d'un vehicle. Resumint, de color verd es mostrarà la cobertura *indoor*, la RST de la qual serà 0, ja que en el *Link Budget* s'ha calculat tots els paràmetres de pèrdues. De color groc es mostrarà la cobertura *incar*, on la RST serà: $RST - 20\text{dB}$ (pèrdues per edificis que no es tenen en compte) + 8dB (pèrdues per cotxe) = $RST - 12\text{dB}$.

A la il·lustració 231 s'observa com la cobertura indoor abasta pràcticament el 100% del nucli urbà de Sant Boi de Llobregat. Per tant, la conclusió és que la planificació duta a terme (ubicació d'emplaçaments, azimuts, downtilts) garanteix la cobertura a l'interior dels edificis.



Il·lustració 231. Simulació cobertura indoor vs. encar.

Simulació *Modulation Coding Scheme (MCS)*

Els operadors que desitgen oferir un servei de dades mitjançant la tecnologia LTE des del inici del desplegament necessiten estudiar les diferents combinacions de modulació + codi, denominat *Modulation and Coding Scheme (MCS)* disponibles a l'entorn de cada emplaçament. Com sabem de la teoria, el sistema LTE afegeix noves codificacions de canal i les modulacions (QPSK, 16QAM i 64QAM). El *scheduler* s'encarregarà de decidir dinàmicament quina modulació i codi són els més apropiats en funció de les condicions del canal. Així doncs, els usuaris propers a una estació base, amb bona potència de recepció RX i poques interferències, tindran un bon canal i rebran una modulació de més nivells i amb menys redundància per codificació de canal. Pel contrari, els usuaris allunyats hauran d'utilitzar QPSK amb una taxa de codi molt baixa. A LTE, les diferents combinacions de *modulació + codi* són un total de 32.

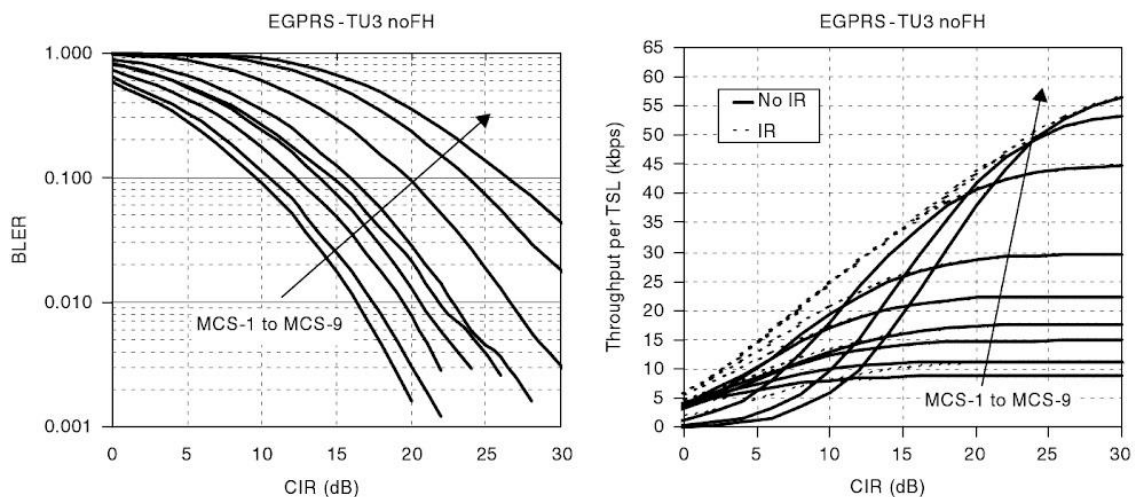
No obstant, simular a Radio Mobile els diferents MCS per a la tecnologia LTE és força complicat. No obstant, per a la tecnologia GSM sí es podria simular, ja que el sistema EDGE només disposa de 9 MCS diferents. Podem aprofitar que la banda de 1800MHz emprada per a la planificació, també es pot fer servir per a la tecnologia DCS1800.

MCS	Modulation	Effective Coding Rate	Rate per time slot [Kbps]	Max rate per radiochannel [Kbps]
MCS-1	GMSK	0.53	8.8	70.4
MCS-2	GMSK	0.66	11.2	89.6
MCS-3	GMSK	0.8	14.8	118.4
MCS-4	GMSK	1	17.6	140.8
MCS-5	8-PSK	0.37	22.4	179.2
MCS-6	8-PSK	0.49	29.6	236.8
MCS-7	8-PSK	0.76	44.8	358.4
MCS-8	8-PSK	0.92	54.4	435.2
MCS-9	8-PSK	1	59.2	473.6

Il·lustració 232. Diferents MCS de la tecnologia EDGE. <http://www.radio-electronics.com/info/cellularcomms/gsm-edge/mcs-coding-schemes-classes.php>

Com s'observa, el *scheduler* de EDGE pot assignar diversos time-slots al mateix usuari per incrementar la seva taxa en certs moments. Així, podem observar que el màxim *rate* que pot tenir un cert usuari en EDGE és de 473.6 Kbps i es dona amb un MCS-9 i fent servir els 8 time-slots d'un *radiochannel*.

Un bon *scheduler* ha de ser capaç d'assignar sempre el MCS òptim d'acord a les condicions del canal. No obstant, a causa que existeix la possibilitat de retransmetre la informació, els sistemes se solen planificar per a una BLER=10%. A continuació es pot observar la relació entre la CIR de l'enllaç i la BLER aconseguida per a cada MCS en un entorn amb un *delay spread* del tipus TU3 *Typical Urban 3Km/h*.



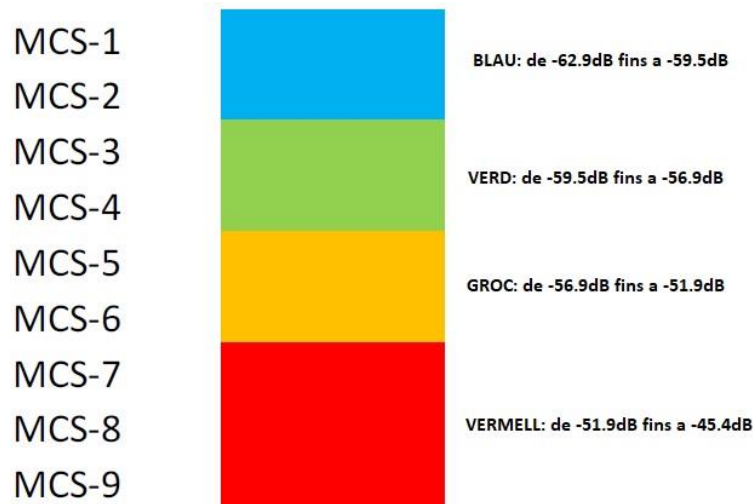
Il·lustració 233. CIR vs. BLER per a cada MCS. [GSM, GPRS and EDGE Performance Evolution Towards 3G UMTS](#) Ed. Wiley.

A partir de la gràfica anterior es pot elaborar una taula amb els valors de CIR exigits i les noves RST *Reliable Service Threshold* a considerar per cada MCS tenint en compte que en GSM es requereix una $CIR \geq 9dB$.

Modulation and Coding Scheme (MCS)	CIR for BLER = 10% [dB]	RST [dB]
MCS-1	9.0	-62.9
MCS-2	10.5	-61.4
MCS-3	12.4	-59.5
MCS-4	14	-57.9
MCS-5	15.0	-56.9
MCS-6	16.0	-55.9
MCS-7	20.0	-51.9
MCS-8	24.0	-47.9
MCS-9	26.5	-45.4

Il·lustració 234. CIR requerida i valor RST per cada MCS. Elaboració pròpia.

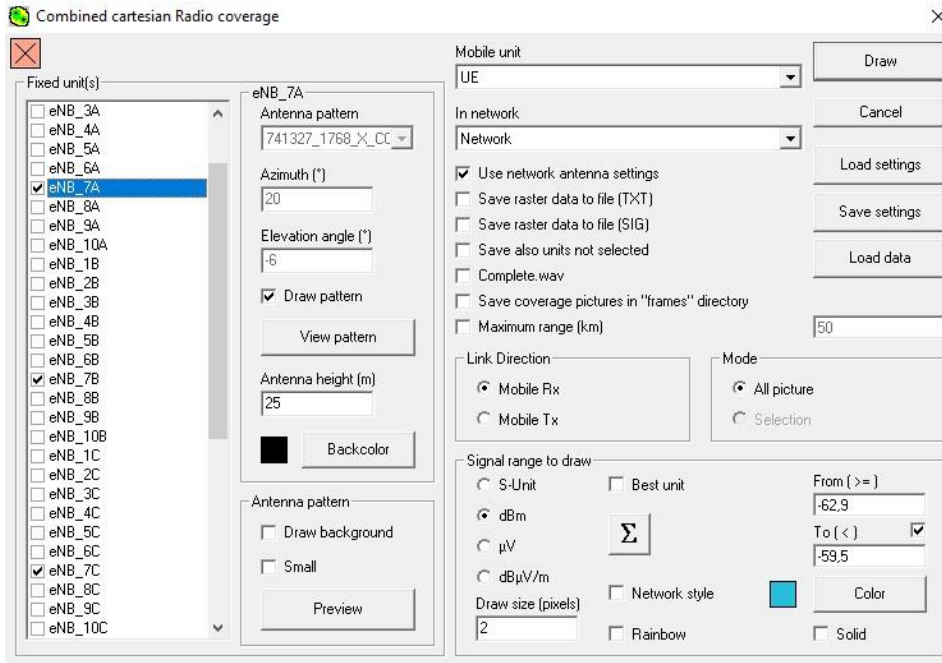
A continuació podem seleccionar un emplaçament significatiu (amb tres sectors) i representar els MCS amb la següent llegenda de colors.



Il·lustració 235. Llegenda de colors per a la simulació de MCS a Radio Mobile. Elaboració pròpia.

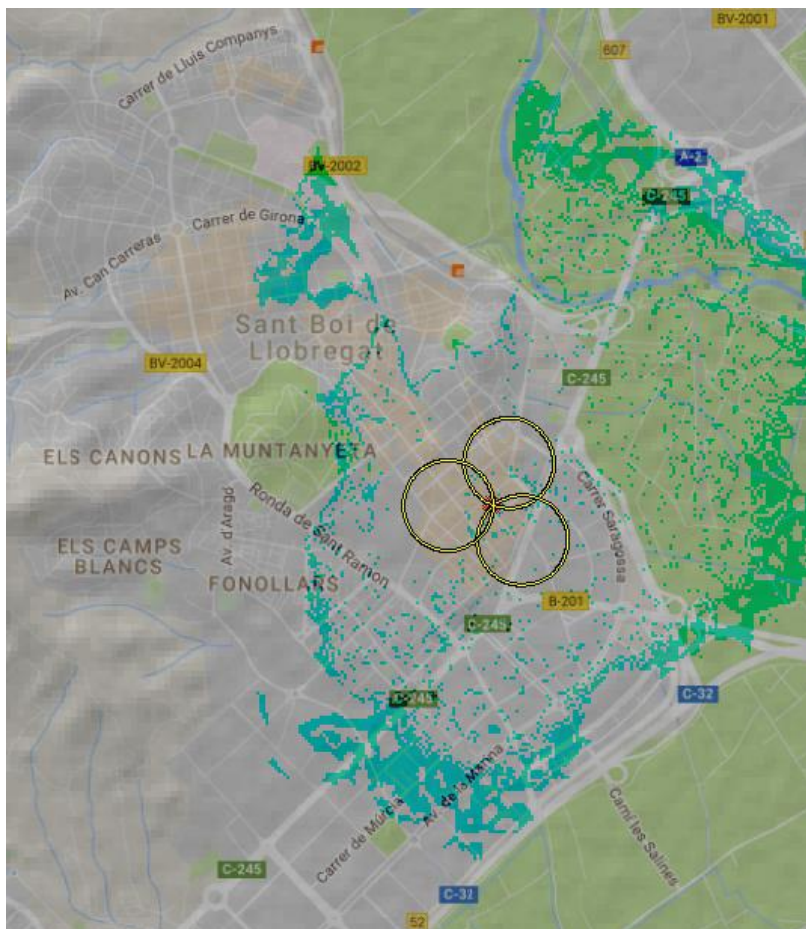
Radio Mobile no deixa editar els llinars, per tant, caldrà fer una simulació per color i representar els rangs sense solapaments. Per canviar els colors és útil utilitzar la funció "load" i "save" per editar més ràpid la paleta en colors.dat.

Per exemple, seleccionem els 3 sectors (A,B,C) del emplaçament eNB7 i configurem primer el llinar per representar els MCS-1 i MCS-2 (color blau).



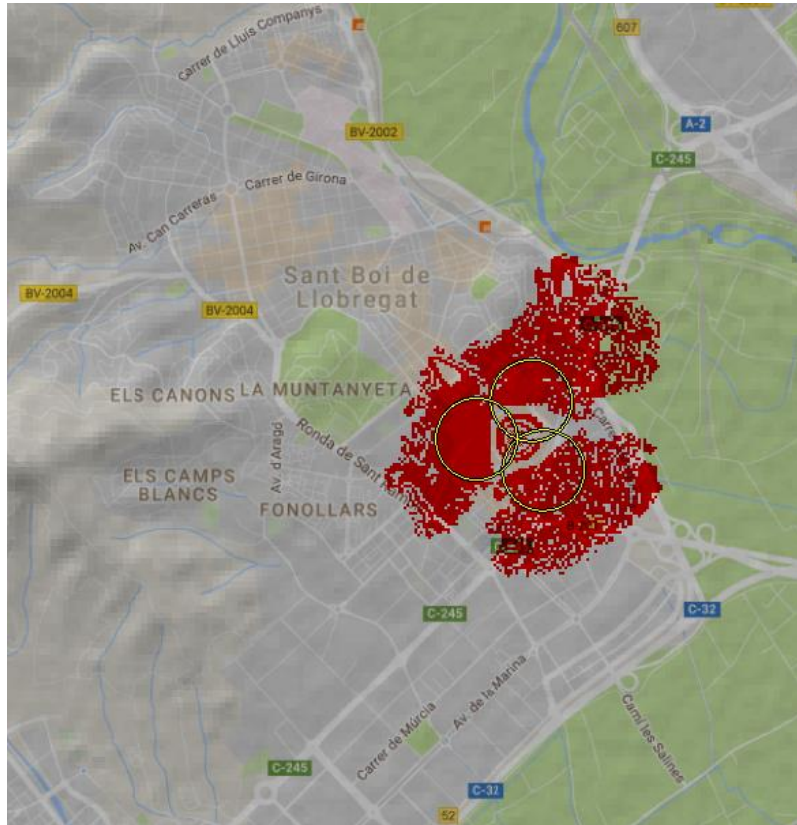
Il·lustració 236. Configuració llinard per representar MCS-1 i MCS-2 del eNB7.

Fixem-nos que només es selecciona els 3 sectors pertanyents al emplaçament 7, ja que volem veure en quines àrees els terminals treballarien en MCS-1 i MCS-2 si només hi hagués un emplaçament (eNB7).



Il·lustració 237. Àrees on el scheduler assignaria MCS-1 i MCS-2 als terminals.

Per representar els MCS-7, MCS-8 i MCS-9, caldrà configurar el llindar de -51.9dBm fins a un valor més gran que -45.4dBm , per exemple: -25dBm , ja que podem tenir àrees on la potència en aquests punts de l'espai superi el llindar calculat i igualment s'assignaria als terminals mòbils un MCS-9.



Il·lustració 240. Àrees on el scheduler assignaria MCS-7, MCS-8 i MCS-9 als terminals.

Dels aspectes més destacats d'aquesta simulació podem comentar que les àrees de color vermell representen molt bones condicions del canal i, per tant, el scheduler s'encarregarà d'assignar un MCS tal que la taxa de codi efectiva sigui superior al 76%. Si ens fixem, hi ha un forat circular al emplaçament on no es rep potència. Això és a causa que les antenes estan a una altura per tenir diversitat en espai, i a més a més, tenen un *downtilt* que impossibilita tenir cobertura justament a sota d'on es troben. Per a la resta d'àrees, a causa de l'orografia del terreny, edificis, obstacles d'un altre tipus, etc. s'assignarien altres MCS segons el valor de potència rebut en un punt. D'altra banda, a mesura que augmenta la CIR, més gran ha de ser la RST requerida. Ens podem preguntar quins MCS tindran una cobertura perimetral del 50%. Doncs bé, per tenir una cobertura perimetral del 50% necessitem un $MF \leq 0$, i perquè això es compleixi la RST ha de disminuir el seu valor 13.12dB (valor calculat al *Link Budget*), que és el valor inicial que teníem de MF per a una $CIR = 9\text{dB}$ ($RST = -62.9\text{dBm}$). Per a una cobertura perimetral del 50%:

$$RST_{\text{llindar}} = -62.9\text{dBm} - (-13.12\text{dB}) = -49.78\text{dBm}$$

Les MCS-8 i MCS-9 estan per sota d'aquest llindar, per tant, tindran una cobertura perimetral menor del 50%.

7.9 Anàlisi d'interferència

Per poder fer un anàlisi d'interferència, caldrà calcular el factor de reutilització freqüencial. Amb aquest valor, tindrem una idea preliminar del nombre de grups de freqüències ortogonals que cal assignar.

En un entorn urbà amb una CIR=9dB:

$$10^{0.9} = \frac{1}{2} \cdot (\sqrt{3K} - 1)^4 \Rightarrow K = \frac{(1 + \sqrt[4]{2 \cdot 10^{0.9}})^2}{3} = 2.99289$$

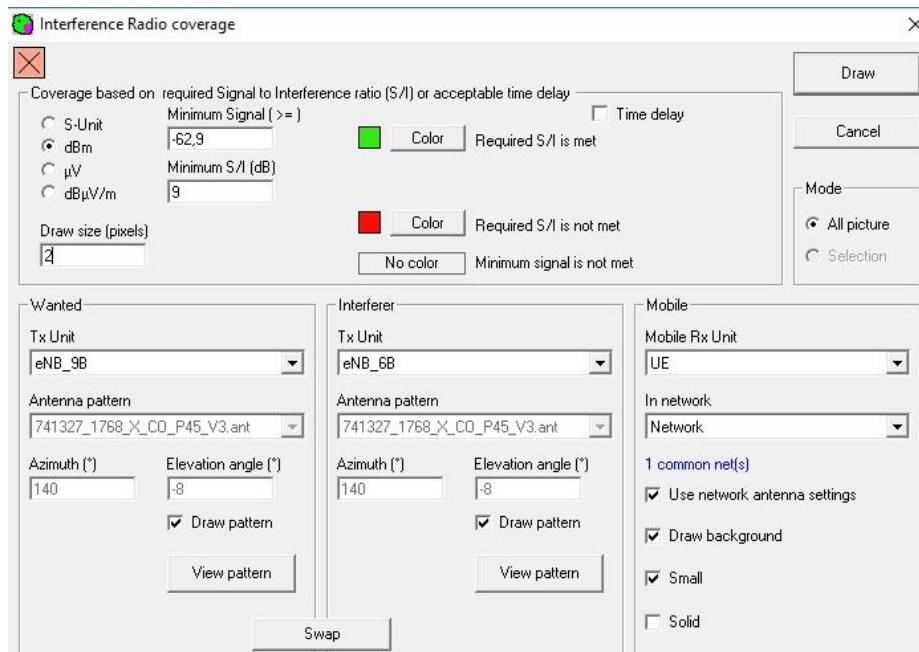
$$K > 2.99289 \Rightarrow K = 3$$

Seleccionem 4 sectors co-canal amb azimuth 140° per estudiar la interferència de tres d'ells sobre un quart. Per fer-ho, cal assegurar-se que almenys 2 sectors tinguin un azimuth perfectament alineat (d'un punt a un altre). L'anàlisi d'interferència a Radio Mobile és punt a punt i per fer la simulació: **[Options]** → **[Toolbar]** i activem la icona "Interference radio coverage", ja que l'accés a l'opció no és visible per defecte.

Site	Sector	Azimut	Rol
eNB6	B	140°	Interferent
eNB7	B	140°	Interferent
eNB8	B	140°	Interferent
eNB9	B	140°	Interferit

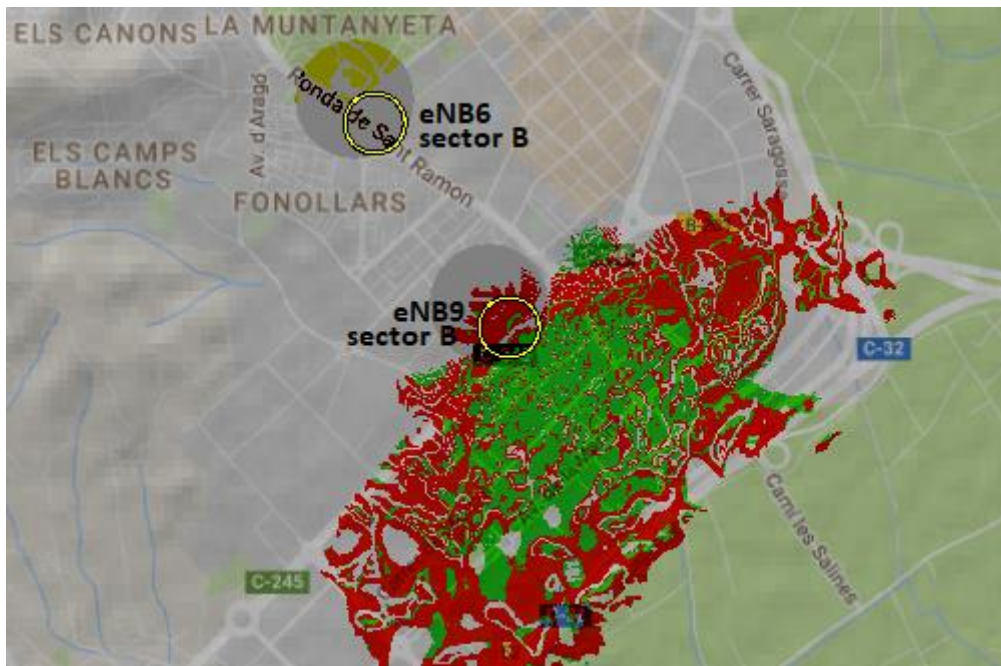
Il·lustració 241. Quadre resum dels 4 sectors co-canal en l'anàlisi d'interferència.

Com s'ha comentat, almenys 2 sectors han de tenir un azimuth perfectament alineat. En el cas que ens ocupa, el sector B del eNB6 està alineat amb el sector B del eNB9.



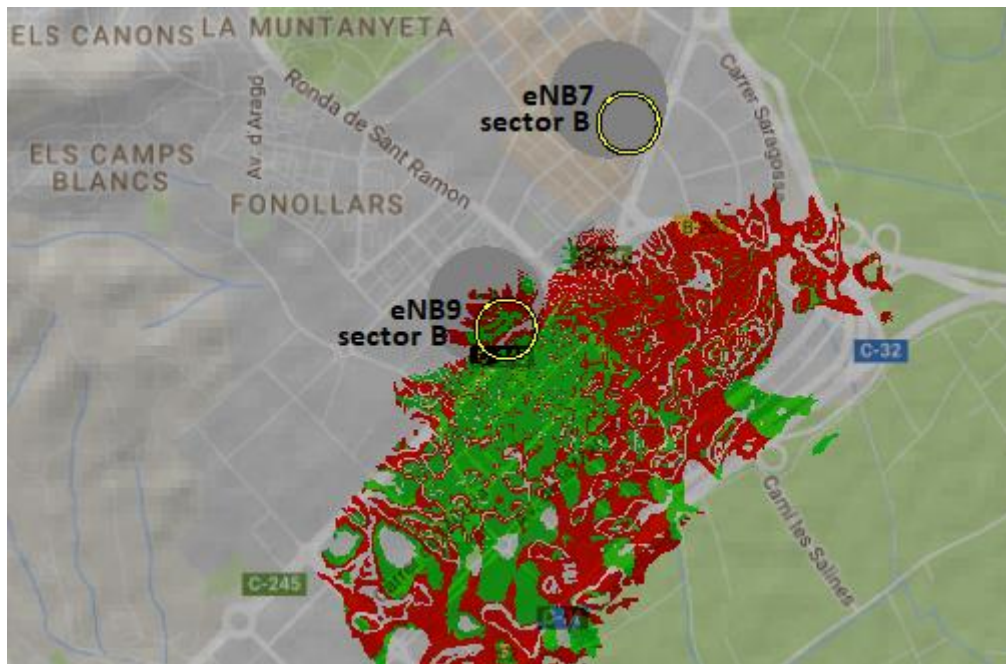
Il·lustració 242. Pantalla de configuració d'estudi d'interferència. Parella eNB6B→eNB9B.

S'ha configurat una CIR de 9dB, ja que la CIR mínima per al servei de veu de GSM és de 9dB. Recordem que la tecnologia LTE es fa servir per a dades. A dia d'avui, el servei de veu encara funciona per GSM. És el que s'anomena coexistència de tecnologies.

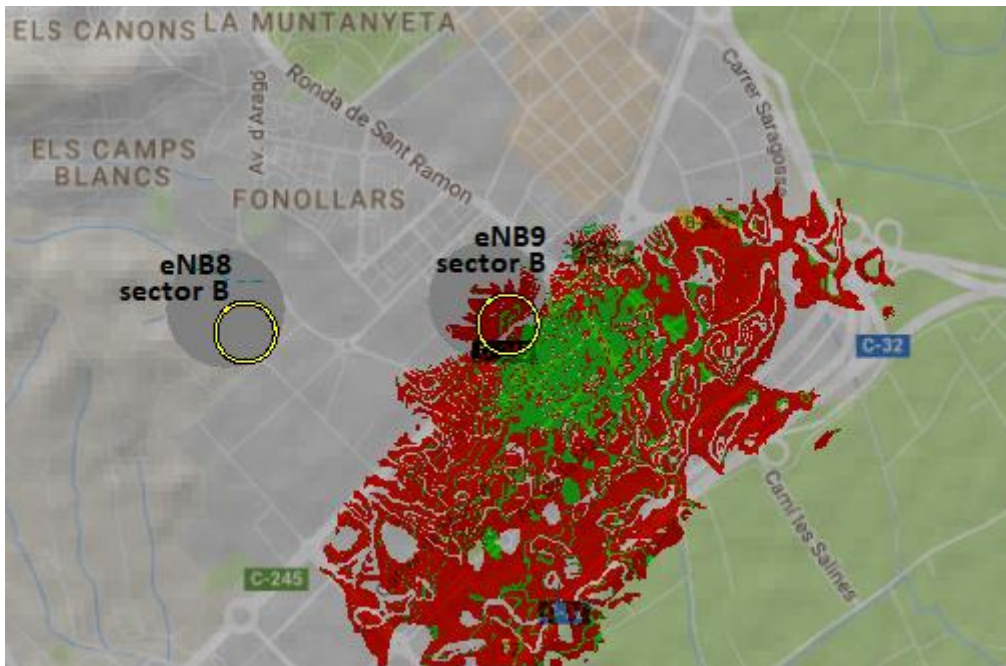


Il·lustració 243. Interferència produïda al sector B del eNB6 sobre eNB9. Resolució d'1 píxel.

L'àrea de color verd representa les zones on es compleix el S/I (*Signal / Interference*). De color vermell, aquelles zones on no es compleix el S/I, és a dir, aquelles àrees on la CIR < 9dB.



Il·lustració 244. Interferència produïda al sector B del eNB7 sobre eNB9. Resolució d'1 píxel.



Il·lustració 244. Interferència produïda al sector B del eNB8 sobre eNB9. Resolució d'1 píxel.

Del resultat d'aquestes simulacions s'extreu el següent: l'estació base que menys interferència produeix sobre el sector B del eNB9 és justament l'estació base eNB6, el sector B del qual està alineat amb el sector B del eNB9. Pel que fa a la interferència produïda del sector B del eNB7 sobre la del eNB9 és major, sobretot per les regions que abasta el eNB7. Recordem que el fet d'aplicar un downtilt de -8° implica més radiació lateral. Aquest és el motiu pel qual la interferència abasta més àrea. Per últim, la interferència produïda del sector B del eNB8 sobre la del eNB9 és encara més gran, a causa que per la posició que ocupa el eNB8 (elevació) fa que tingui més diversitat en espai. Evidentment, si volem reduir les interferències és pot fer de diverses maneres: reajustar azimuts, downtilts, altura d'antenes, reducció de potència. Qualsevol d'aquests punts implica disminuir la cobertura i l'aparició de forats en les simulacions.

En definitiva, l'estudi d'interferències es fa per abordar les possibles interferències que poden experimentar els usuaris, quan diferents sectors de diverses cel·les radien amb la mateixa freqüència.

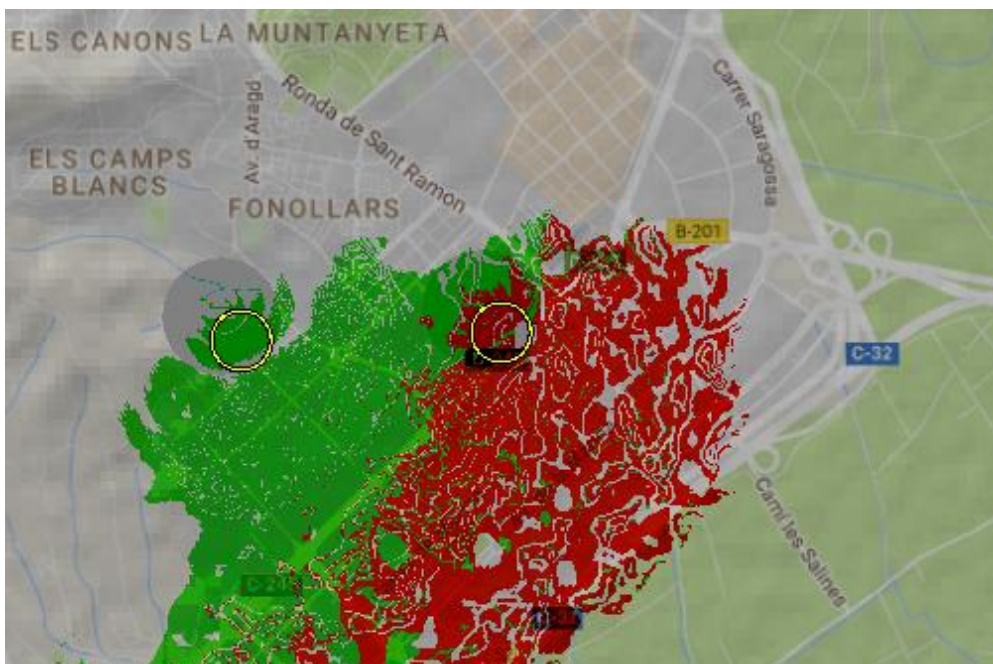
A partir de l'anàlisi de la interferència de tots contra tots, en eines comercials això és automàtic. És a dir, no hi ha la necessitat d'avaluar parella per parella manualment. A continuació es presenta una taula d'una matriu d'interferència co-canal que hauria de contenir tal percentatge. Cal destacar que la matriu hauria de contenir el percentatge en què el sector és el servidor, i no el percentatge d'àrea en què un terminal podria connectar-se potencialment a ell, àrea de la qual generalment és més extensa i que és exactament el que es veu a Radio Mobile.

Sectors de la xarxa	S1	S2	S3	S4	...
S1	0	% del sector S1 interferit per S2 sota les condicions co-canal: $Co_{2 \rightarrow 1}$	% del sector S1 interferit per S3 sota les condicions co-canal: $Co_{3 \rightarrow 1}$	% del sector S1 interferit per S4 sota les condicions co-canal: $Co_{4 \rightarrow 1}$...
S2	$Co_{1 \rightarrow 2}$	0		$Co_{4 \rightarrow 2}$...
S3	$Co_{1 \rightarrow 3}$	$Co_{2 \rightarrow 3}$	0	$Co_{4 \rightarrow 3}$...
S4	$Co_{1 \rightarrow 4}$	$Co_{2 \rightarrow 4}$	$Co_{3 \rightarrow 4}$	0	...
...	0

Il·lustració 245. Matriu d'interferència co-canal teòrica. Elaboració pròpia.

Aquesta matriu permet establir la diferència mínima en el nombre de canals a respectar. Per exemple, si el percentatge del sector S3 amb CIR < 9dB a causa de la interferència del sector S30 és més gran del 5%, es decideix que aquests no seran sectors co-canal. Cal tenir en compte que els sectors molt distants podrien interferir inesperadament i que dos sectors veïns podrien estar separats per un obstacle important tal que no puguin veure's entre ells, parlant en el sentit radioelèctric. En el primer cas, no reutilitzaríem la freqüència, però podríem fer-ho en el segon cas. D'aquí la importància d'aquesta matriu. A més, la teoria de *clusters* simplement ens permet tenir estimacions sobre l'ampla de banda requerit, però l'assignació de freqüències finals requereixen aquest tipus d'estudi.

Per al cas amb més interferència, podem repetir l'estudi, però intercanviant interferent i interferit. Com s'ha pogut veure dels resultats de les simulacions, el sector que més interferència provoca sobre el sector B del emplaçament eNB9, és el sector B del eNB8. Per tant, ara es simularà la interferència que produeix el sector B del eNB9 sobre el sector B del eNB8.



Il·lustració 246. Interferència produïda al sector B de l'eNB9 sobre l'eNB8. Resolució d'1 píxel.

Després de veure el resultat de la darrera simulació, podem preguntar-nos si la matriu d'interferència és simètrica. La resposta a aquesta pregunta és tracta observant com al intercanviar les fonts (una per la interferent i l'altre per la interferida) la simulació ens diu que no és simètrica. Això vol dir, que si el % d'interferència de eNB8B sobre eNB9B és un de determinat, no vol dir que passi exactament el mateix en el cas contrari. De fet, té sentit que la matriu no sigui simètrica ja que una parella de sectors situats en posicions diferents no s'interferiran de la mateixa manera.

7.10 Planificació del Backhaul (a la urbanització Els Canons)

En aquest apartat s'assumirà que un dels emplaçaments del municipi de Sant Boi de Llobregat no disposa de sortida per fibra òptica, per tant, caldrà instal·lar un element concentrador que reculli el tràfic de l'estació base que dona servei a la urbanització Els Canons (eNB11). Aquesta interconnexió es pot fer amb qualsevol tecnologia, però habitualment en zones semi-urbanes o rurals es realitzen mitjançant radioenllaços. L'objectiu d'aquest apartat és realitzar el disseny dels "vanos" o de les obertures necessàries perquè l'estació base d'aquesta urbanització pugui arribar al concentrador.

Pel que fa a Radio Mobile, el TX i el RX del radioenllaç són unitats diferents de les estacions base, per tant, prèviament caldrà crear el transmissor i el receptor adequat, a més de seleccionar una freqüència de treball. Les bandes habituals per a radioenllaços són: 7, 14-15, 17-19, 21-23, 25-26 i 37-39 [GHz]. Es pretén realitzar-ho a 7 GHz.

Primer de tot, cal anar a Google Earth per crear dues ubicacions (TX i RX del radioenllaç). El TX es trobarà a la mateixa torra del eNB11, és a dir, tindrà les mateixes coordenades, però diferent altura que l'antena de l'estació base. Habitualment les antenes dels radioenllaços són per sota de les antenes panell de telefonia mòbil. Per tant, s'escollirà una altura menor. Quant al receptor del radioenllaç, estarà ubicat a l'estació base eNB6 (torra de 25 metres d'altura), les coordenades de les quals també seran les mateixes que la del eNB6.



Il·lustració 247. Situació del TX i del RX del radioenllaç.

En el següent quadre resum es recull algunes mesures fetes a Google Earth.

Site	Posició	Azimut/altura absoluta d'antena
eNB11 RadioLinkTX	41°20'19.83"N 2°1'20.81"E	90°/171m
eNB6 RadioLinkRX	41°20'19.70"N 2°2'3.03"E	270°/64m

Il·lustració 248. Valors definits per al TX i RX del radioenllaç. Elaboració pròpia.

A continuació caldrà importar a Radio Mobile, en format .kml, les dades del TX i del RX del radioenllaç.



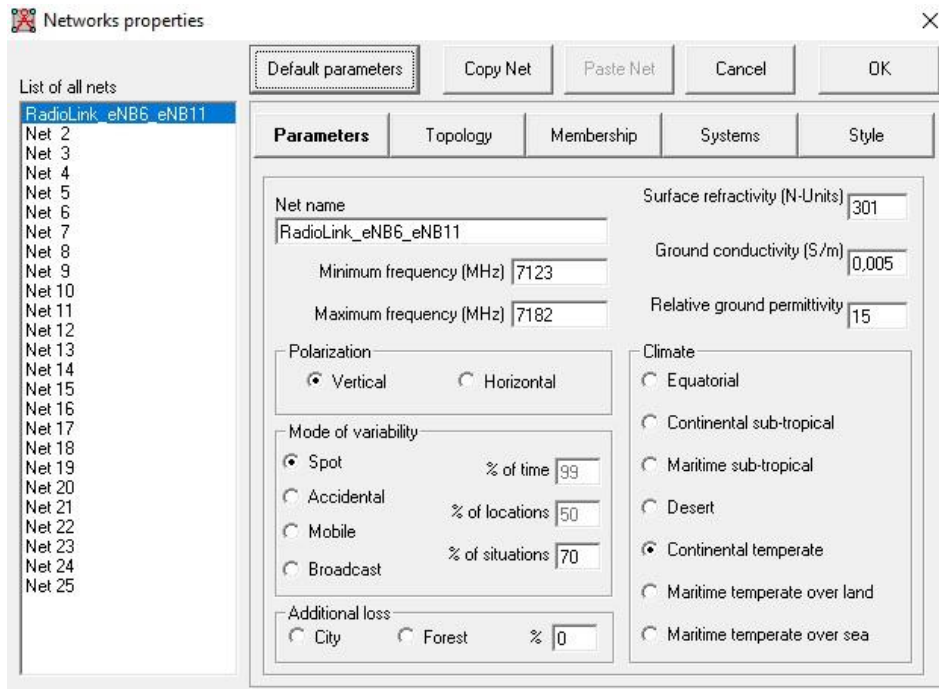
Il·lustració 249. TX i RX del radioenllaç importats a Radio Mobile.

Propietats de xarxa, sistemes i associació d'unitats a sistemes

Una vegada que tenim les unitats importades a Radio Mobile, cal definir el tipus de xarxa en la qual anem a realitzar els càlculs, així com la freqüència de treball, entre d'altres. Per tant, anem a "Network Properties" i al botó "Parameters".

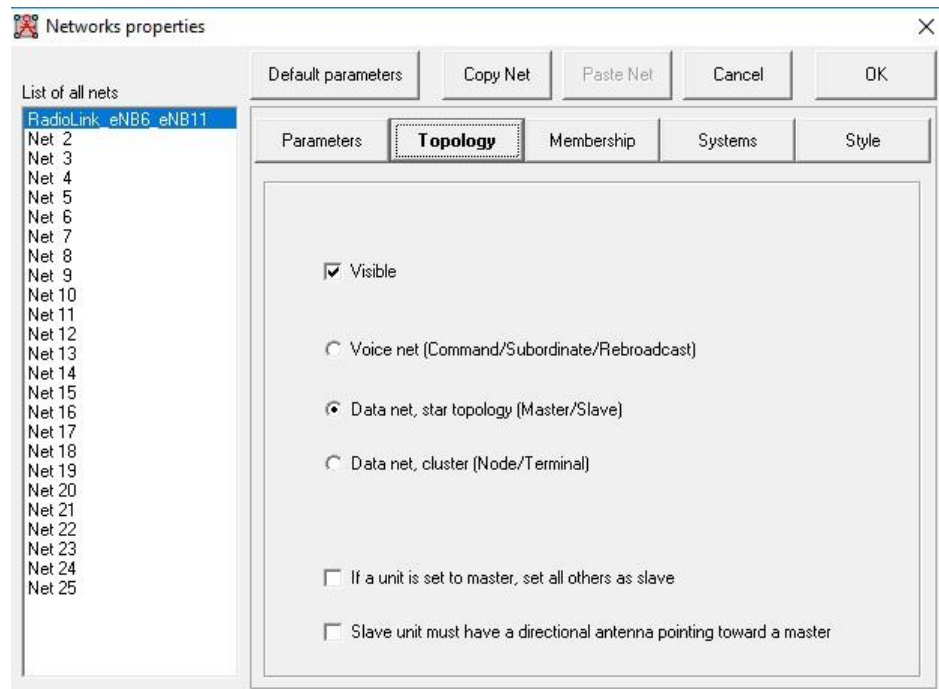
- Nom de xarxa: RadioLink_eNB6_eNB11
- Freqüència mínima: 7123 MHz
- Freqüència màxima: 7182 MHz
- Polarització: vertical
- Mode estàtic: Spot (% de temps = 99 , % de situacions = 70)
- Clima: continental temperat

Pel que fa als valors de freqüència mínima i màxima, s'ha considerat el model PTP 820S de la marca *Cambium Networks*. En el següent enllaç es pot consultar les especificacions d'antena [PTP 820S](#).



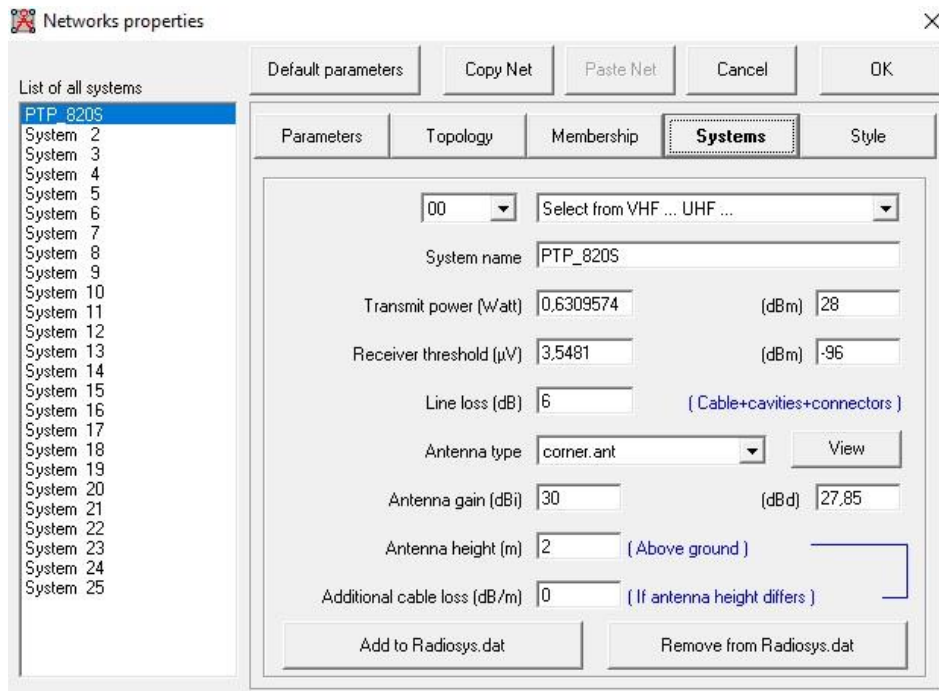
Il·lustració 250. Configuració de paràmetres de xarxa per al radioenllaç.

Una vegada tinguem configurat els paràmetres de la nostra xarxa, cliquem al botó “Topology” per escollir “Data Net, star topology (Master/Slave)”.



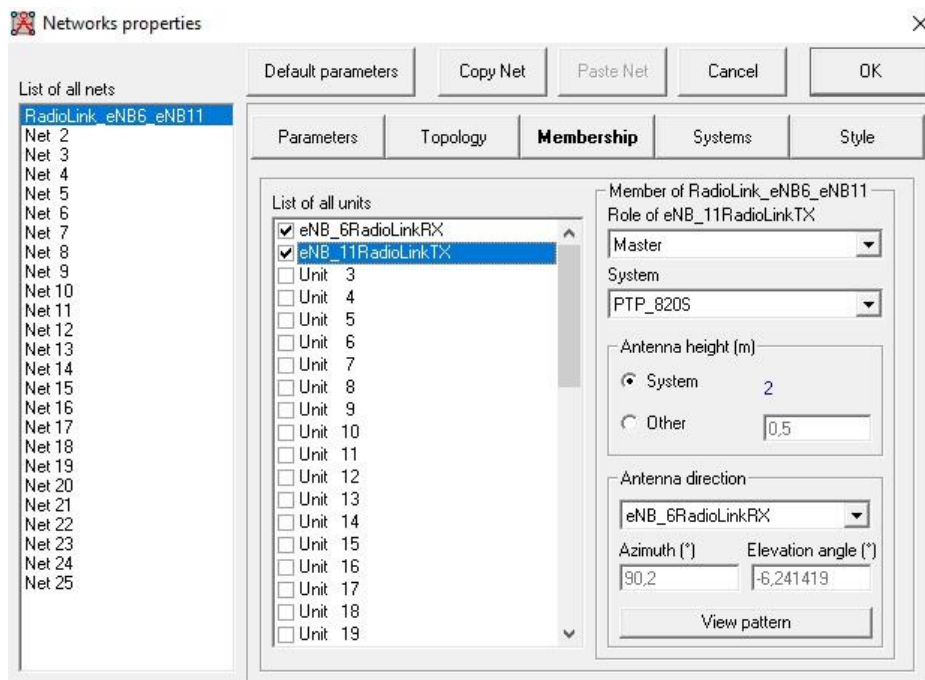
Il·lustració 251. Configuració de topologia per al radioenllaç.

A continuació és necessari crear un nou sistema a Radio Mobile, on s’indicarà la potència dels dispositius, així com els guany de les antenes. Segons les especificacions del model PTP 820S té una potència de transmissió màxima de 28dBm, un guany de 30 dBi i una sensibilitat llindar de -96dBm.



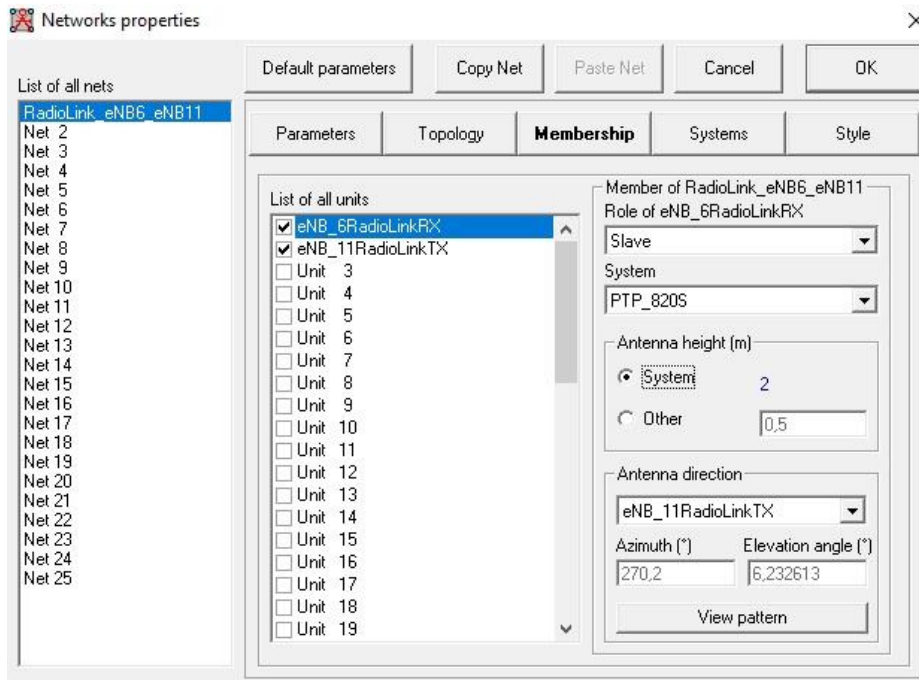
Il·lustració 252. Configuració de sistema per al radioenllaç.

Per últim, premem el botó “Membership” on escollirem les unitats i les associarem al sistema.



Il·lustració 253. Configuració a Membership de la unitat transmissora del radioenllaç.

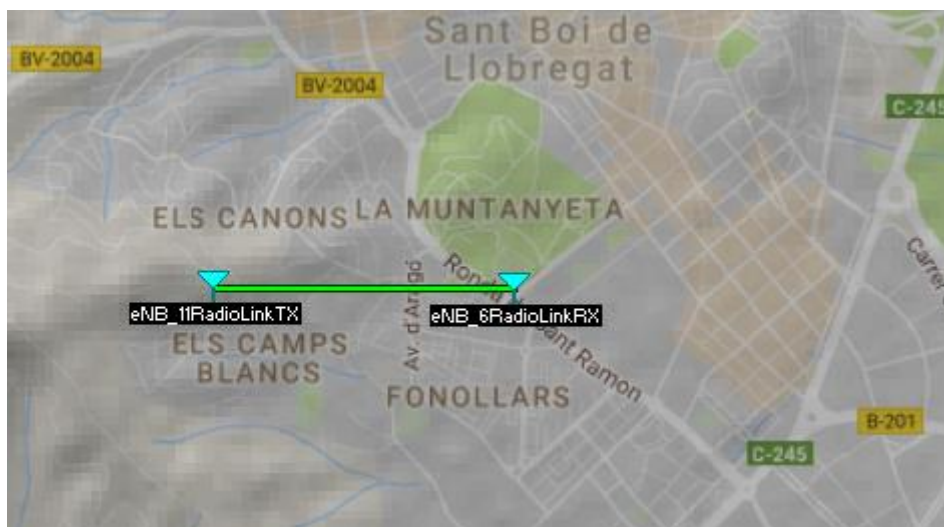
Fixem-nos que a l’apartat “Antenna Direction” hem de seleccionar cap a on apunta l’antena transmissora. En aquest cas, apunta cap a l’antena receptora eNB6_RadioLinkRX. Automàticament, Radio Mobile calcula l’azimut i l’angle d’elevació que ha de tenir l’antena TX.



Il·lustració 254. Configuració a *Membership* de la unitat receptora del radioenllaç.

L'antena receptora eNB_6RadioLinkRX estarà orientada, en aquest cas, cap al eNB_11RadioLinkTX (antena transmissora). Important seleccionar els rols que farà cada unitat.

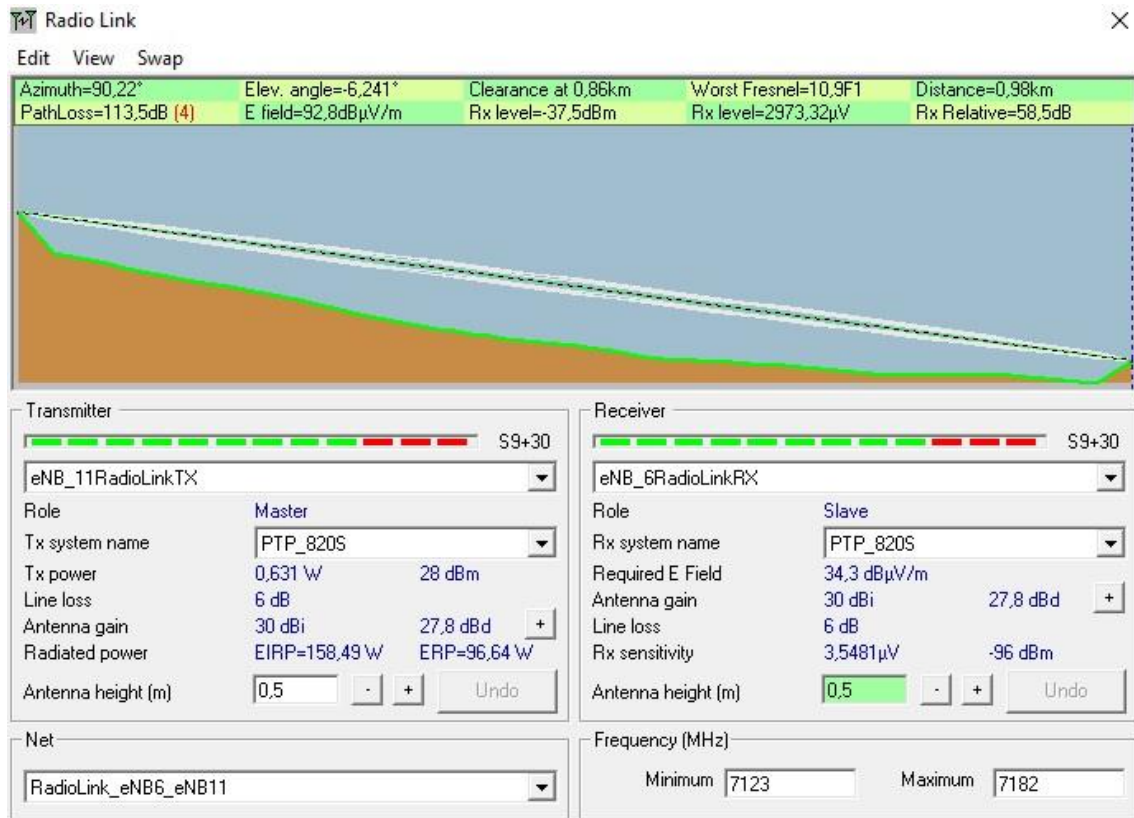
Fem clic a **[View]** → **[Show networks]** → **[All]** perquè ens mostri les unitats i si hi ha comunicació directa entre l'emissor i el receptor del radioenllaç.



Il·lustració 255. Existeix comunicació en el radioenllaç (línia de color verd).

A Radio Mobile farem servir l'aplicació **[Tools]** → **[Radio Link]**.

Només aclarir que l'altura d'antena posa 0.5 metres. Això és un valor que s'ha d'afegir a l'altura absoluta de les antenes (l'altura que s'havia establert a Google Earth), ja que Radio Mobile no deixa que sigui 0.



Il·lustració 256. Perfil del radioenllaç simulat.

De la simulació del radioenllaç s'extreu el següent: l'azimut de l'antena transmissora ha de ser de 90.22°, amb un angle d'elevació de -6.24°. La distància entre el transmissor i el receptor és de 0.98Km seguint el "line of sight". Pel que fa al radi de Fresnel, el pitjor es troba a 10,9F1, quedant lliure la primera, la tercera i la cinquena zona de Fresnel.

A mode introductori, la zona de Fresnel serveix per modelar les pèrdues que es produeixen per l'obstrucció de l'enllaç radioelèctric. Aquestes zones són uns el·lipsoides concèntrics que envolten el *line of sight* d'un enllaç radioelèctric, definit per les posicions de les antenes TX i RX. L'ona electromagnètica té la propietat que es reflexa sobre la superfície de l'el·lipsoide i després incideix sobre l'antena receptora amb un retard i desfasament. Encara que respectant el 66% del radi de Fresnel s'aconsegueix un enllaç estable, convé assegurar almenys la primera zona de Fresnel en la seva totalitat.

$$R_n = \sqrt{n \cdot \lambda \cdot \frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}} = \sqrt{n \cdot \frac{c}{f} \cdot \frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}}$$

On:

- n: nombre del radi de Fresnel (1,2,3,4,5,etc.).
- λ : longitud d'ona del senyal.
- c: velocitat de propagació en el buit.
- f: freqüència de treball del radioenllaç.
- d_1 : distància del obstacle a l'antena transmissora.

- d_2 : distància del obstacle a l'antena receptora.

Com a exemple, es calcularà el primer radi de Fresnel. Considerant que un possible obstacle estigüés just enmig entre el TX i el RX, la distància mínima entre el *line of sight* i el primer el·lipsoide és:

$$R_1 = \sqrt{1 \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{7182 \cdot 10^6} \cdot \frac{490 \cdot 490}{490 + 490}} = 3.2 \text{ metres}$$

En qualsevol cas, el valor obtingut a la simulació garanteix la viabilitat del radioenllaç. A més a més, Radio Mobile calcula les pèrdues per propagació o *Path Loss*, el valor del qual és de 113.5 dB. Si calculem el *Free Space Loss (FSL)*:

$$FSL[dB] = 10 \cdot \log \left(\frac{4\pi \cdot d}{\lambda} \right)^2 = 10 \cdot \log \left(\frac{4\pi \cdot d \cdot f}{c} \right)^2$$

On:

- d : distància de *line of sight* entre TX i RX.
- λ : longitud d'ona del senyal.

Substituint valors:

$$FSL[dB] = 10 \cdot \log \left(\frac{4\pi \cdot 980 \cdot 7182 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} \right)^2 = 109.39 \text{ dB}$$

No obstant, el valor obtingut i el *Path Loss* de Radio Mobile no són els mateixos. Pot ser a causa que Radio Mobile també tingui en compte les pèrdues per difracció.

Del perfil del radioenllaç simulat també es pot veure que la potència de recepció en el eNB6_BRadioLinkRX és de -37.5dBm. Una potència molt més superior a la llindar. Mirant a les especificacions, aquest transmissor pot treballar amb la modulació 2048 QAM i ample de banda de 60MHz si la potència rebuda és superior a -54.5 dBm, que és el cas que ens ocupa.

Fixem-nos també que s'ha considerat unes pèrdues de línia de 6 dB tant en transmissió com en recepció. S'ha escollit aquest valor perquè 6 dB pot representar perfectament l'atenuació del senyal en un coaxial de ½" (torre de gelosia amb *feeders* < 20 metres).

Per tant, si calculem la potència de recepció:

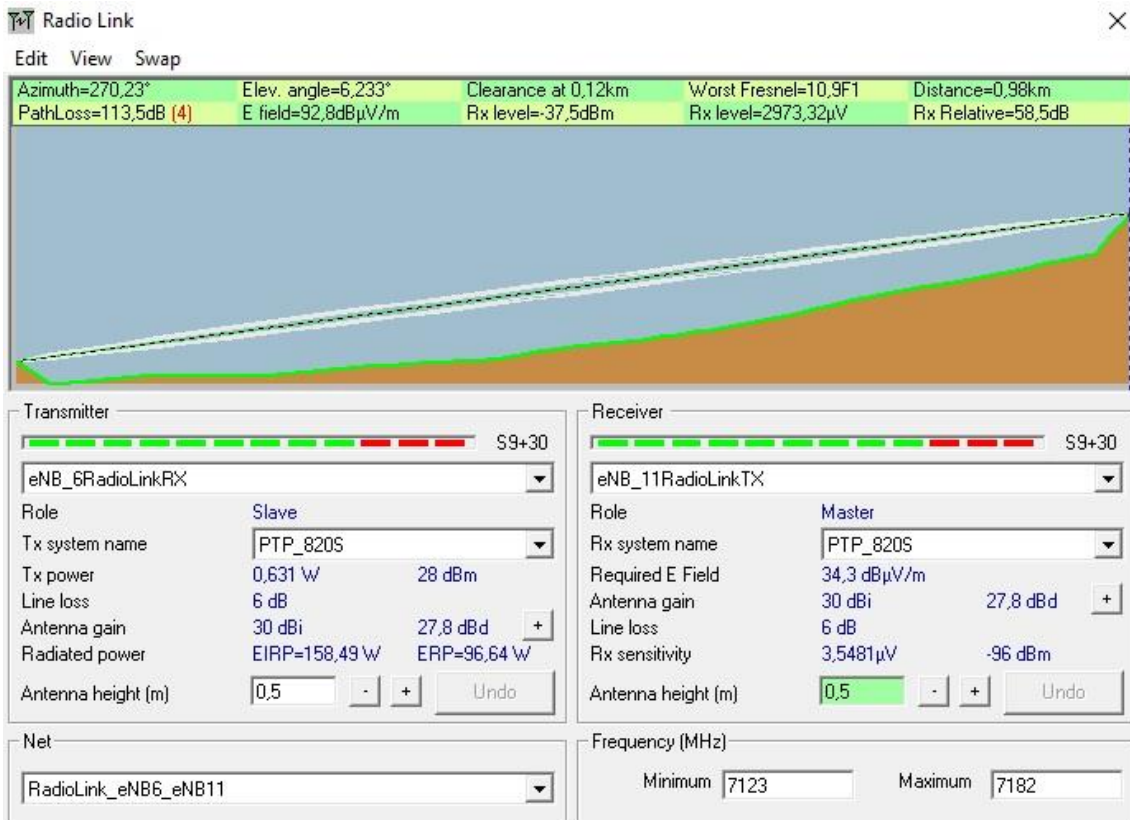
$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - FSL - LineLoss_{TX} - LineLoss_{RX}$$

Substituint valors:

$$P_{RX} = 28dBm + 30dBi + 30dBi - 109.39dB - 6dB - 6dB = -33.39dBm$$

Tornem a tenir 4.11dB de diferència respecte del valor que mostra Radio Mobile. Possiblement perquè en el *Path Loss* té en compte les pèrdues per difracció.

Per últim, si volem saber quin és l'azimut i inclinació de l'antena eNB6_BRadioLinkRX, és a dir, l'antena receptora que apunta al eNB11_BRadioLinkTX, premem el botó **[Swap]**.



Il·lustració 257. Perfil del radioenllaç.

Observem que l'antena receptora (Slave) del radioenllaç ha de tenir un azimut de 270.23° i un angle d'elevació de 6.23°. Com es pot veure, tant la potència rebuda com les pèrdues per propagació es mantenen igual.

8. Disseny de xarxa amb Packet Tracer

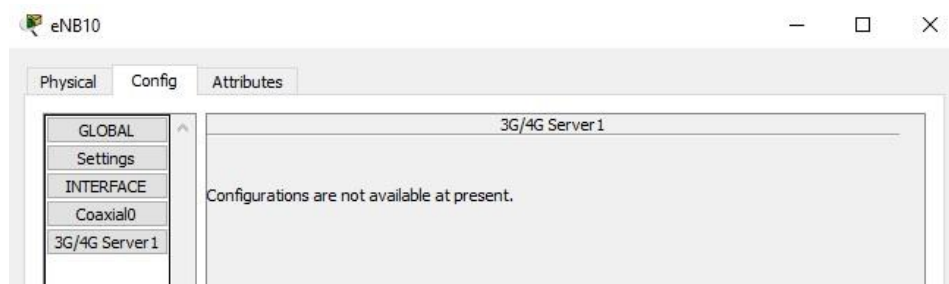
Aquest últim apartat pretén ser de caire pràctic pel que fa al disseny d'una xarxa LTE. Es començarà dissenyant la part física de la xarxa d'accés, i en segon lloc es procedirà a dissenyar la xarxa central EPC i l'IP Backhaul.

8.0 Disseny d'una xarxa LTE: E-UTRAN

En aquest punt es treballarà amb els eNodeB, els dispositius finals dels usuaris (terminals) i es veurà també com connectar-los amb el eNodeB, i com es connecta el eNodeB a la xarxa LTE.

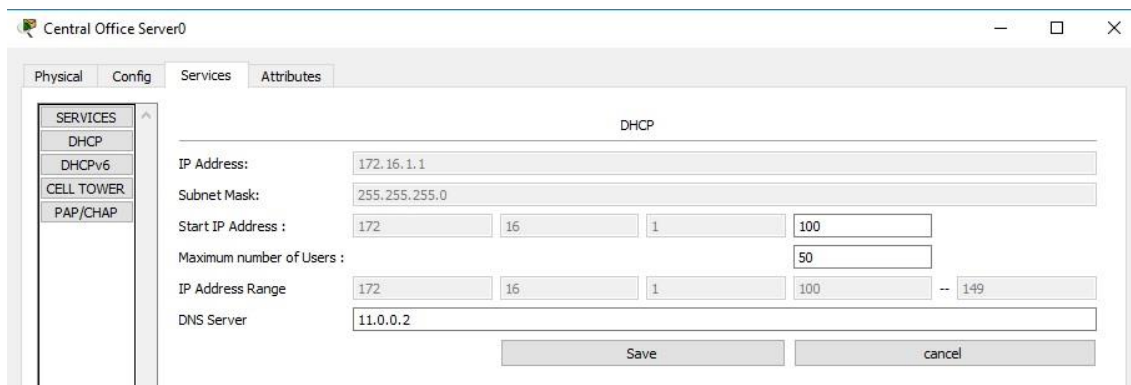
Primerament carregarem un mapa de Sant Boi de Llobregat per incorporar posteriorment els diferents elements. Dins de Packet Tracer, premem el botó *Set Tiled Background* i carreguem una captura de Google Maps del municipi.

A continuació cliquem [**Network Devices**] i arrosseguem l'element **Cell Tower** dins del mapa. En total incorporarem 2 eNodeBs a tall d'exemple. Si cliquem a sobre d'un **Cell Tower** podem veure les característiques que ofereixen: permet la connectivitat de dos elements a través de coaxial o mitjançant una interfície sense fils de tercera o quarta generació.



Il·lustració 258. Interfícies disponibles per als eNodeBs a Packet Tracer.

El següent element que es necessita incorporar és el **CO-Server**, disponible també a **Network Devices**. El Office Central Server no és més que una oficina central emprada pels operadors per controlar o gestionar diferents emplaçaments (eNodeBs) simultàniament. Si fem clic sobre el **CO-Server** veiem que és un equip que suporta 6 connexions coaxials, on cada connexió coaxial serveix per connectar un eNodeB. Posseeix una interfície del tipus Fast-Ethernet amb la qual es connectarà al backbone de la xarxa LTE o a la IP Backhaul. Com a servidor ofereix un conjunt de serveis: el primer d'ells està associat amb el DHCP, que es pot fer servir tant en IPv4 com en IPv6. Per finalitat pràctica, ja porta incorporada una adreça IP amb màscara /24. El que sí es pot configurar és el nombre màxim d'usuaris (per defecte Packet Tracer el configura per 50 usuaris). A l'últim octet podem indicar a partir de quin nombre volem que comenci l'assignació d'adreces. També podem afegir l'adreça IP d'un DNS. Altres dels serveis que podem veure des del **CO-Server** és el servei relacionat amb la gestió de les cel·les (eNodeBs) i el servei de configuració PAP/CHAP per a l'autenticació de les interfícies (backbone, diferents connexions amb els eNodeBs, etc.).



Il·lustració 259. Servei DHCP del *Central Office Server*.

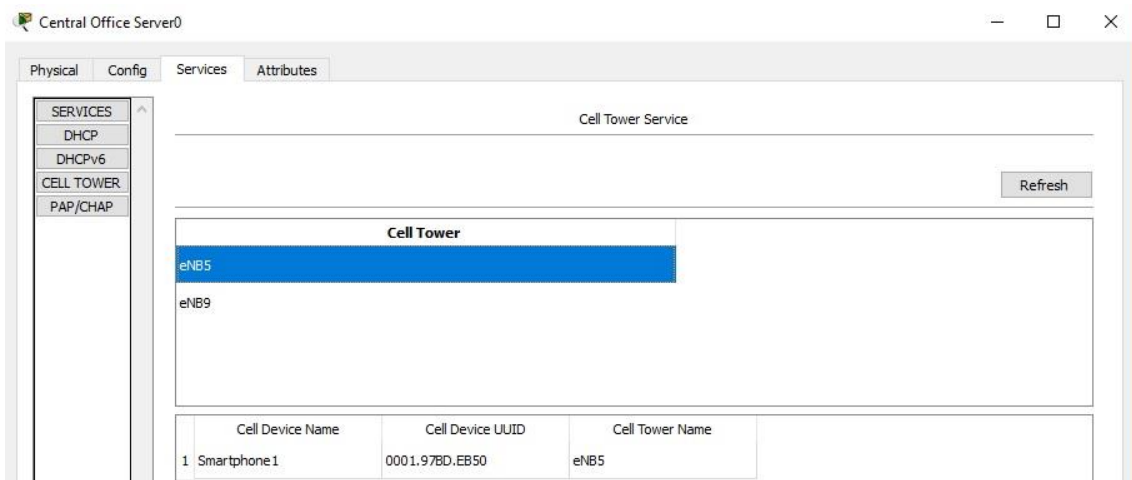
Per connectar els eNodeBs al *CO-Server* és necessari fer servir cablejat del tipus coaxial. Per tant, cal anar a **[Connections]** → **[Coaxial]** per connectar el eNodeB amb un port disponible del *CO-Server* (només en té 6). Automàticament quedarà connectat (només és una connexió física). Això és així per finalitats pràctiques del simulador. En el món real no necessitem connectar cada eNodeB a un *CO-Server*; simplement un eNodeB pot connectar-se a un *switching*, a un enllaç microones, a un router, etc. per després connectar-los a través d'un medi de transmissió (guiats o no guiats).

El següent pas és inserir els dispositius finals (terminals). Per fer-ho cal anar a *Network Devices* i arrossegar *Smart Device* fins al mapa (el simulador no fa distinció de la ubicació física dels terminals). Automàticament, el terminal es connectarà directament al eNodeB més proper.



Il·lustració 260. Elements connectats (UE, eNodeB, CO-Server) a Packet Tracer.

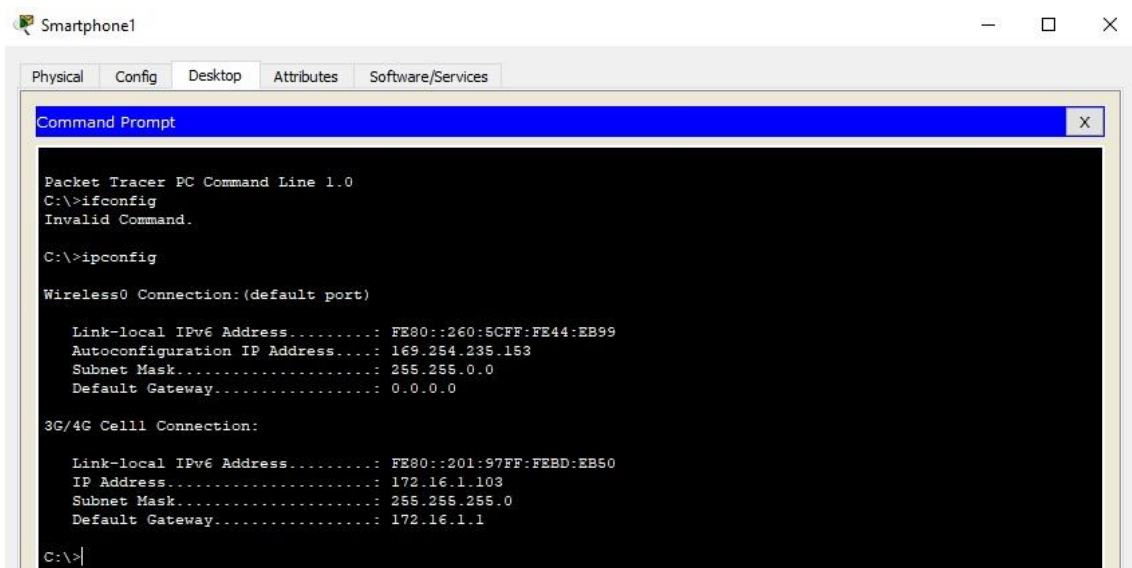
Com es pot veure a la il·lustració 260, el smartphone 1 està connectat al eNB5 i el smartphone 22 al eNB9. Ara tenim almenys un usuari a cada eNodeB, per tant, podem veure en el servei *Cell Tower* del *Central Office Server* cadascun dels eNodeB que aquest està gestionant.



Il·lustració 261. eNodeBs gestionats pel CO-Server.

Si ens fixem per exemple en el eNB5, aquest està reportant un dispositiu mòbil anomenat "Smartphone1" amb el seu respectiu UUID i el nom de la cel·la a la qual aquest està connectat. De la mateixa manera, podríem veure el dispositiu "Smartphone22" que està connectat al eNB9.

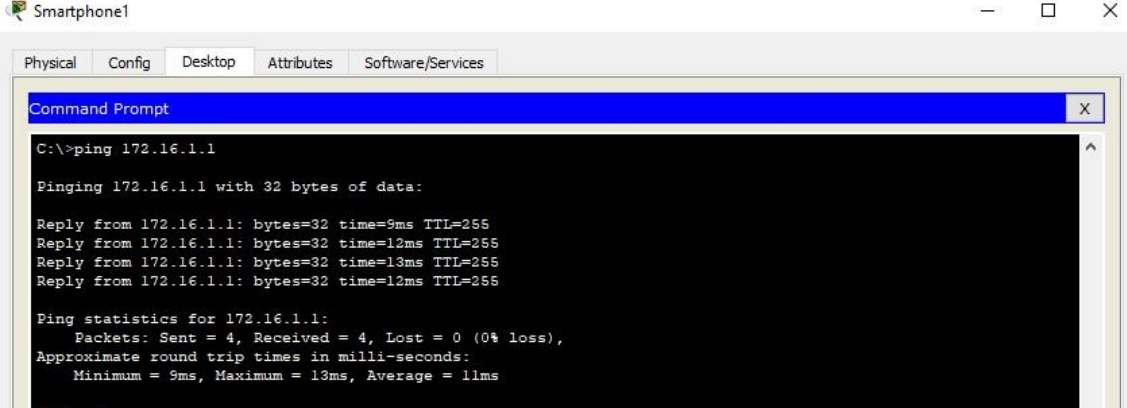
Abans de fer una prova de connectivitat, podem anar a la pestanya *Desktop* del terminal "Smartphone1" i obrir el *Command Prompt* per veure quina adreça IP li està assignant el eNB5.



Il·lustració 262. Consulta d'adreça IP en el terminal "Smartphone1".

Com s'observa, el eNB5 ofereix dos serveis, segons el simulador: ofereix connectivitat sense fils i el servei 3G/4G. Per al cas del 3G/4G, té assignat l'adreça 172.16.1.103/24, amb porta d'enllaç predeterminada 172.16.1.1 (associada al CO-Server). Si obríssim el *Command Prompt* del terminal "Smartphone22" també veuríem quina adreça té assignada: (172.16.1.100/24)

Des d'aquest punt de vista, encara que els dos dispositius mòbils estiguin connectats a cel·les diferents, comparteixen la mateixa oficina central o CO-Server, el qual té un *Default Gateway*. Per tant, ara podem fer un *ping* per exemple, del "Smartphon1" al "Smartphone22". O fer un ping del "Smartphone1" al *Default Gateway*.



```
Smartphone1
Physical Config Desktop Attributes Software/Services
Command Prompt
C:\>ping 172.16.1.1

Pinging 172.16.1.1 with 32 bytes of data:

Reply from 172.16.1.1: bytes=32 time=9ms TTL=255
Reply from 172.16.1.1: bytes=32 time=12ms TTL=255
Reply from 172.16.1.1: bytes=32 time=13ms TTL=255
Reply from 172.16.1.1: bytes=32 time=12ms TTL=255

Ping statistics for 172.16.1.1:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 9ms, Maximum = 13ms, Average = 11ms
```

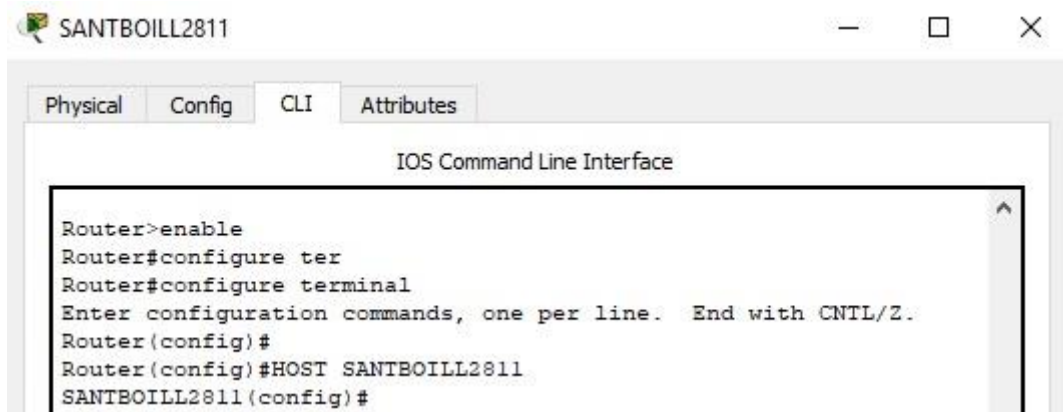
Il·lustració 263. Prova de ping del "Smartphone1" al *Default Gateway*.

No obstant, de forma bàsica es pot simular la connectivitat entre els terminals que es troben en cel·les diferents. A la pràctica, no es comuniquen directament a través d'una oficina central, sinó que els ICMP viatjarien primer a través d'una xarxa IP Backhaul, on arribarien a un *router frontera*, el qual determinarà segons la seva taula d'encaminament, el millor camí cap al destí fent servir un protocol d'encaminament dinàmic.

Per tant, és important connectar aquests eNodeBs i CO-Server al backbone de la xarxa. Abans de connectar-lo a un router, podem anar primer a **[Network Devices]** → **[Switches]** i arrosseguem un switch per connectar-lo al CO-Server. Seguidament a **[Connections]** → **[Cooper]**, ja que és el cablejat adequat per a Fast Ethernet. Internament el *switch* fa un procés de *Mapping* de l'adreça MAC del CO-Server per inserir-la a la seva taula. Aquest switch, per descomptat, el podem connectar a una xarxa IP Backhaul interconnectant-lo prèviament a un router, el qual seria un dels *routers frontera* d'aquesta xarxa. Anem a [Network Devices] i seleccionem un router entre els disponibles, per exemple, el 2811. A continuació procedim a connectar el switch amb el router mitjançant una connexió de tipus *Cooper* (igual que abans).

Si procedim a configurar el router, ho podem fer a través del CLI o *Command Line Interface*. Una vegada dins del CLI, hem d'activar el mode de configuració global:

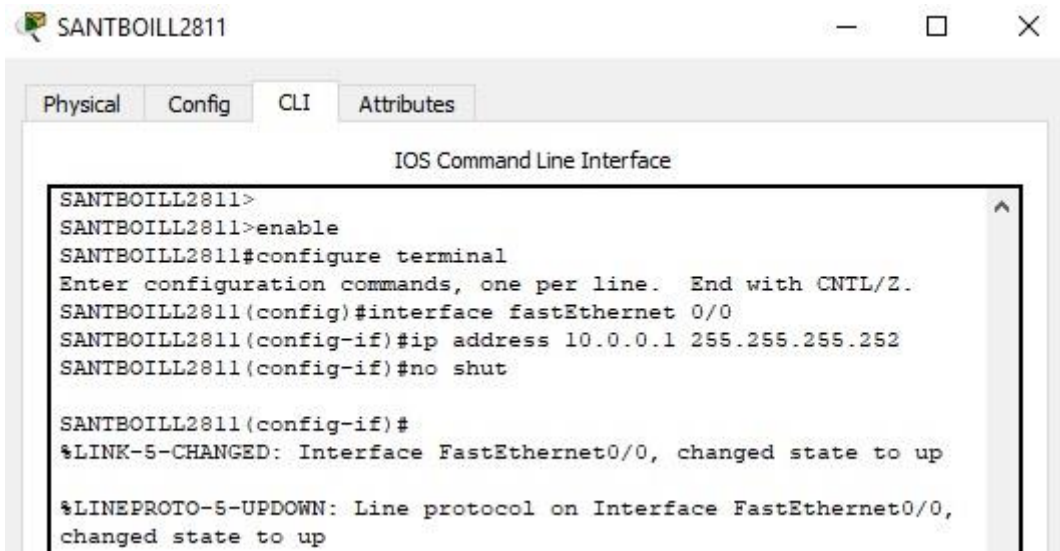
- Per entrar, escrivim: *enable*
- *configure terminal*
- Podem assignar-li un nom: *HOST SANTBOILL2811*



```
Router>enable
Router#configure ter
Router#configure terminal
Enter configuration commands, one per line. End with CNTL/Z.
Router(config)#
Router(config)#HOST SANTBOILL2811
SANTBOILL2811(config)#
```

Il·lustració 264. Assignació de nom a un router.

Com el switch l'hem interconnectat a la interfície Ethernet 0/0, cal anar llavors a *interface fastEthernet 0/0* per assignar una adreça IP. Com només hi haurà dues adreces IP (una per al CO-Server i una altra per al router), es pot aplicar una màscara /30, tot i que en escenaris més complexos convé fer un esquema d'adreçament.



```
SANTBOILL2811>
SANTBOILL2811>enable
SANTBOILL2811#configure terminal
Enter configuration commands, one per line. End with CNTL/Z.
SANTBOILL2811(config)#interface fastEthernet 0/0
SANTBOILL2811(config-if)#ip address 10.0.0.1 255.255.255.252
SANTBOILL2811(config-if)#no shut

SANTBOILL2811(config-if)#
%LINK-5-CHANGED: Interface FastEthernet0/0, changed state to up
%LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface FastEthernet0/0,
changed state to up
```

Il·lustració 265. Configuració d'adreça IP a la interfície 0/0 del router SANTBOILL2811.

El motiu d'haver escollit aquesta adreça és perquè es vol crear una connexió punt a punt. Simplement una connexió entre el router SANTBOILL2811 i el servidor CO-Server (CO Sant Boi LI). És a dir, només dues adreces IP.

Si hem assignat l'adreça 10.0.0.1/30 en el *router frontera*, procedim ara a assignar en el port del backbone del CO-Server la següent adreça IP i *Default Gateway*. Veure il·lustració 266.



Il·lustració 266. Assignació d'adreça IP al CO-Server.

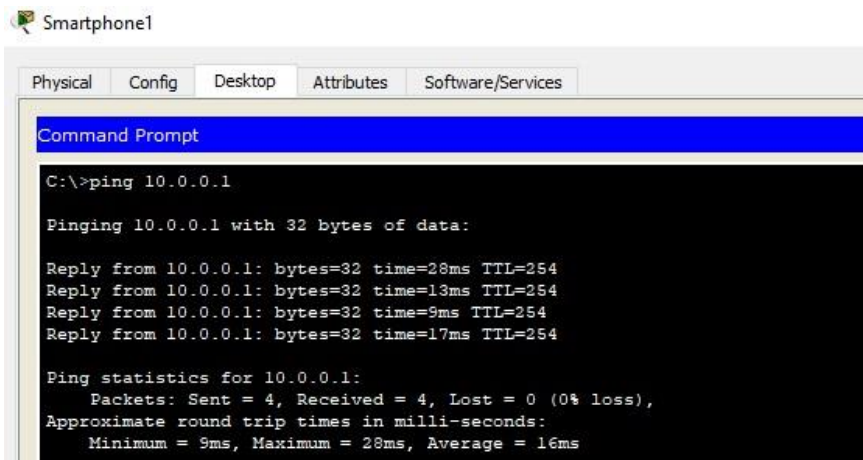
En el CO-Server es configurarà la porta d'enllaç predeterminada la del router frontera SANTBOILL2811.

Per finalitzar aquest primer apartat de disseny de xarxa, es farà les proves de connectivitat. Comencem per enviar un paquet ICMP des del servidor CO-Sant Boi LI cap al router SANTBOILL2811.



Il·lustració 267. Connectivitat entre el CO-Server i el router SANTBOILL2811.

Una altra de les proves que es poden fer és una prova de ping des de qualsevol dels terminals, per exemple, "Smartphone1" cap al router frontera. És a dir, cap a la IP 10.0.0.1.



Il·lustració 268. Ping des del "Smartphone1" cap al router SANTBOILL2811.

Per tant, tenim connectivitat des del eNodeB fins al primer router frontera, que permetrà connectar amb la IP Backhaul del LTE.

Quant a la interfície ràdio (Uu), és la que permet connectar el eNodeB amb el terminal. El simulador Packet Tracer ho representa amb una sèrie de línies discontinues perquè s'intueixi que és una connectivitat sense fils, on a l'enllaç descendent s'utilitza OFDMA i SC-FDMA a l'enllaç ascendent. Tot això, és implícit per al simulador.

Entre el eNB5 i eNB9 hi ha una interfície X2, que seria la connexió eNB5-CO-SantBoiLL-eNB9 (en el cas de la simulació). No obstant, a la pràctica, els eNB5 i eNB9 estarien connectats a un switch, que al seu torn estarien connectats a un router, tal que els paquets no passarien directament del eNB5 al eNB9 a través del CO-Server.

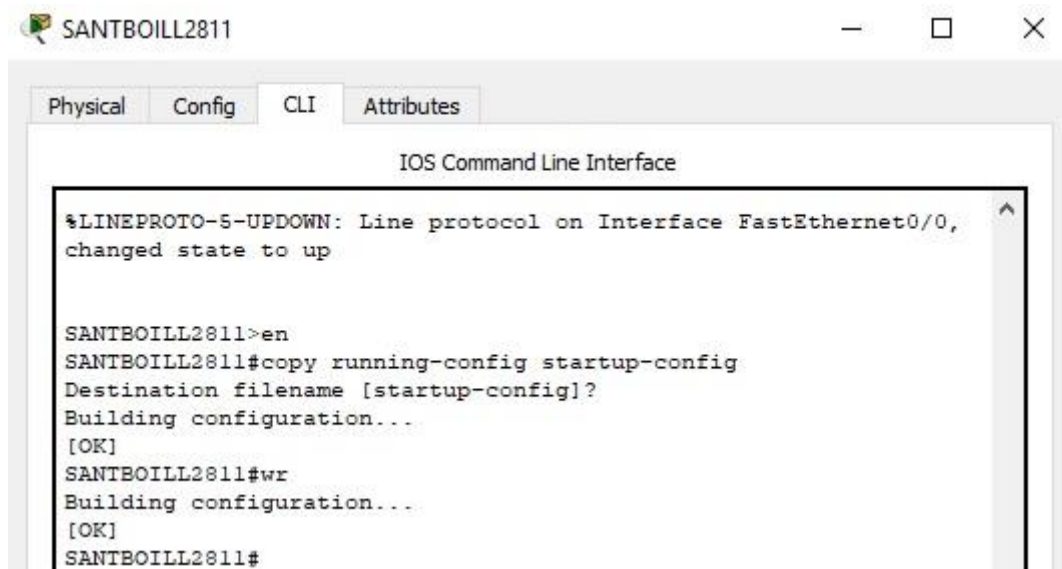
8.1 Disseny d'una xarxa LTE: IP Backhaul i EPC

En el primer punt d'aquest capítol s'havia desenvolupat la xarxa d'accés, format de manera representativa per: 2 eNodeBs (eNB5 i eNB9) connectats al servidor de l'oficina central o *CO-Server* (CO Sant Boi LL), el qual estaria interconnectat a un *switch* i seguidament aquest *switch* a un *router frontera*. Per tant, la xarxa d'accés arribà, a la simulació anterior, fins al *router frontera* (SANTBOILL2811).

El que es pretén en aquest apartat és interconnectar aquest *router frontera* amb la resta de la xarxa LTE, formada per dues sub-capes: la capa de distribució, que seria la capa d'IP Backhaul (formada per el *router frontera* SANTBOILL2811, un altre *router frontera*, i un *Serving Gateway* (SGW)). I en segon lloc, a partir d'aquí (a nivell de plànol d'usuari), estaríem parlant del *Evolved Packet Core* (EPC) on només es tindrà una connexió punt a punt entre el *Serving Gateway* i el *Packet Gateway*. Per últim, es considerarà que el PGW es connectarà a un servidor, com si es tractés d'una xarxa externa. No obstant, per consideracions pràctiques es tindrà en compte com si aquest estigués directament connectat al PGW.

Recordem que dues xarxes externes, són en realitat *Sistemes Autònoms* (SA) diferents que estarien interconnectats entre sí a través del protocol d'encaminament dinàmic BGP, del anglès *Border Gateway Protocol*. És a dir, BGP permet la publicació de les subxarxes que té cada *Sistema Autònom* i l'encaminament entre *Sistemes Autònoms* diferents. Per tant, es podria considerar un *Sistema Autònom* com la xarxa LTE d'un operador. Movistar té el seu número de *Sistema Autònom*, Orange seria un altre *Sistema Autònom*, etc. L'objectiu d'aquest apartat és dotar de connectivitat als diferents routers (tant els que conformen la xarxa IP Backhaul, com els que conformen l'EPC) mitjançant el protocol OSPF. És a dir, suposarem que tots els routers "parlen" OSPF i són dins de l'àrea 0.

Primer de tot, anem al *router frontera* SANTBOILL2811 i l'obrim fent clic per anar a *Command Line Interface* per salvar tot el que s'havia fet anteriorment (tant a la memòria NVRAM, *Non-Volatile Random Access Memory*, com a la memòria addicional que tenen el *routers* de Cisco). Això es fa així, perquè s'ha d'apagar el *router* per inserir una nova targeta amb la finalitat de poder interconnectar-lo amb un altre *router frontera*.



```
IOS Command Line Interface

%LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface FastEthernet0/0,
changed state to up

SANTBOILL2811>en
SANTBOILL2811#copy running-config startup-config
Destination filename [startup-config]?
Building configuration...
[OK]
SANTBOILL2811#wr
Building configuration...
[OK]
SANTBOILL2811#
```

Il·lustració 269. Comanes per guardar la configuració prèvia a un router.

A continuació anem a la pestanya *Physical* per apagar el *router* i afegim una targeta, per exemple, seleccionem la WIC-2T disponible a *MODULES* (disposa de 2 interfícies serials). Una vegada inserida, procedim a encendre de nou el *router* i així llançar posteriorment una connexió física.

Abans, però, inserim un nou *router frontera* anomenat ZONAFRANCA2811. Caldrà configurar el nom, de la mateixa manera que s'havia fet a l'apartat anterior amb el *router frontera* SANTBOILL2811. Per poder llançar una connexió física entre aquests dos *routers frontera* és necessari guardar també la configuració (fent servir les mateixes comanes de la il·lustració 269) en el ZONAFRANCA2811 per apagar-lo i poder inserir una targeta WIC-2T.

Per interconnectar aquests dos routers es farà servir la xarxa 10.4.0.0/30, l'adreça 10.4.0.1/30 per a la interfície 0/1 del SANTBOILL2811 i l'adreça 10.4.0.2/30 per a la interfície 0/1 del ZONAFRANCA2811. Veure il·lustració 270.



Il·lustració 270. Xarxa 10.4.0.0/30 entre els routers SANTBOILL2811 i ZONAFRANCA2811.

Ara cal obrir el router SANTBOILL2811 i anar al CLI per configurar una adreça IP a la interfície serial 0/1. A més a més, com es tracta d'un enllaç serial, cal especificar el *rate* del sincronisme del rellotge.

```

SANTBOILL2811>en
SANTBOILL2811#conf t
Enter configuration commands, one per line. End with CNTL/Z.
SANTBOILL2811(config)#interface serial 0/1/0
SANTBOILL2811(config-if)#ip address 10.4.0.1 255.255.255.252
SANTBOILL2811(config-if)#no shut
SANTBOILL2811(config-if)#clock rate 56000
SANTBOILL2811(config-if)#
  
```

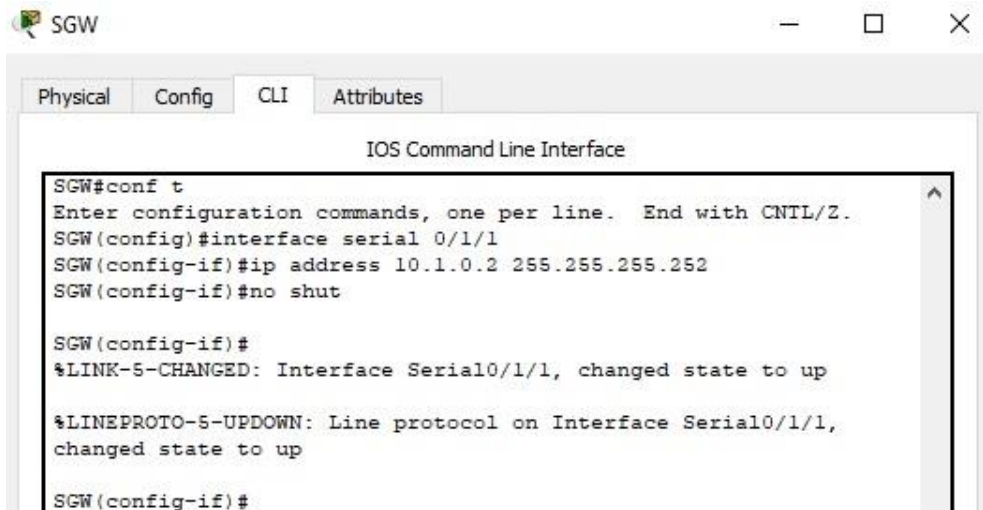
Il·lustració 271. Assignació d'adreça IP a la interfície 0/1/0 del router SANTBOILL2811.

De la mateixa manera, procedim a fer l'assignació d'adreça IP per a la interfície 0/1 del router ZONAFRANCA2811.

```

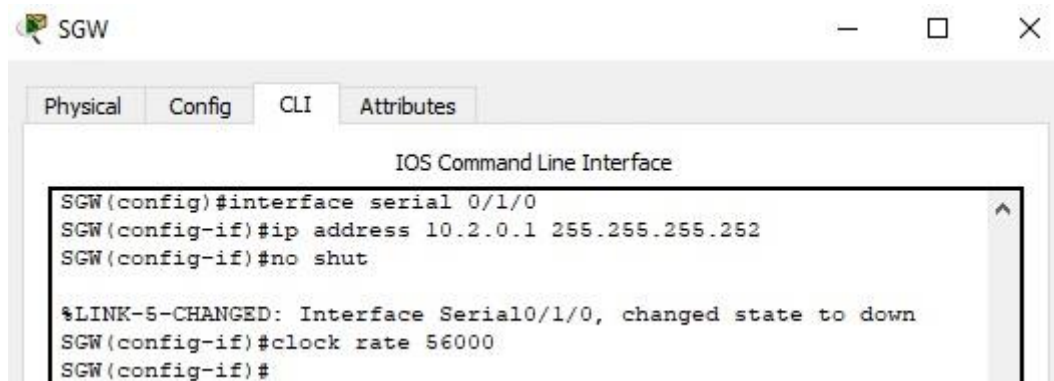
ZONAFRANCA2811>en
ZONAFRANCA2811#conf t
Enter configuration commands, one per line. End with CNTL/Z.
ZONAFRANCA2811(config)#interface serial 0/1/0
ZONAFRANCA2811(config-if)#ip address 10.4.0.2 255.255.255.252
ZONAFRANCA2811(config-if)#no shut
ZONAFRANCA2811(config-if)#
  
```

Il·lustració 272. Assignació d'adreça IP a la interfície 0/1/0 del router ZONAFRANCA2811.



Il·lustració 275. Assignació d'adreça IP a la interfície 0/1/1 del router SGW.

Aprofitem per configurar la interfície 0/1/0 del SGW, ja que serà la interfície que connectarà amb el PGW a la xarxa 10.2.0.0/30 (EPC).



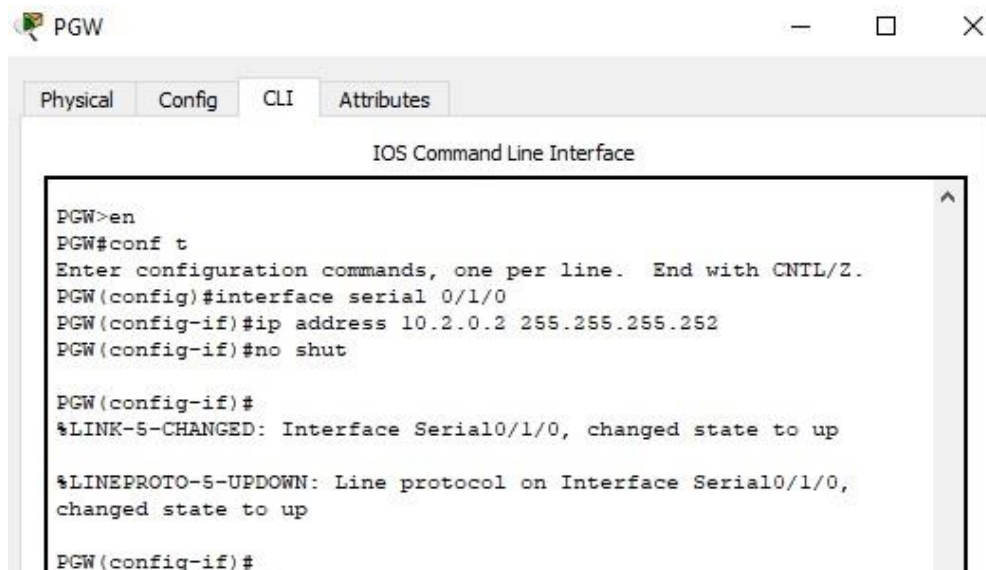
Il·lustració 276. Assignació d'adreça IP a la interfície 0/1/0 del router SGW.

Inserim un nou *router*, que serà l'anomenat PGW. Caldrà configurar-lo perquè tingui un nom, una targeta amb 2 interfícies serials i una adreça IP a la interfície corresponent a la xarxa 10.2.0.0/30.



Il·lustració 277. Representació de la xarxa 10.2.0.0/30 entre el SGW i el PGW.

Procedim a assignar una adreça IP a la interfície 0/1/0 del PGW perquè tingui connectivitat amb el SGW. Recordem que el SGW té assignada l'adreça 10.2.0.1/30 a la seva interfície 0/1/0, de la xarxa 10.2.0.0/30.

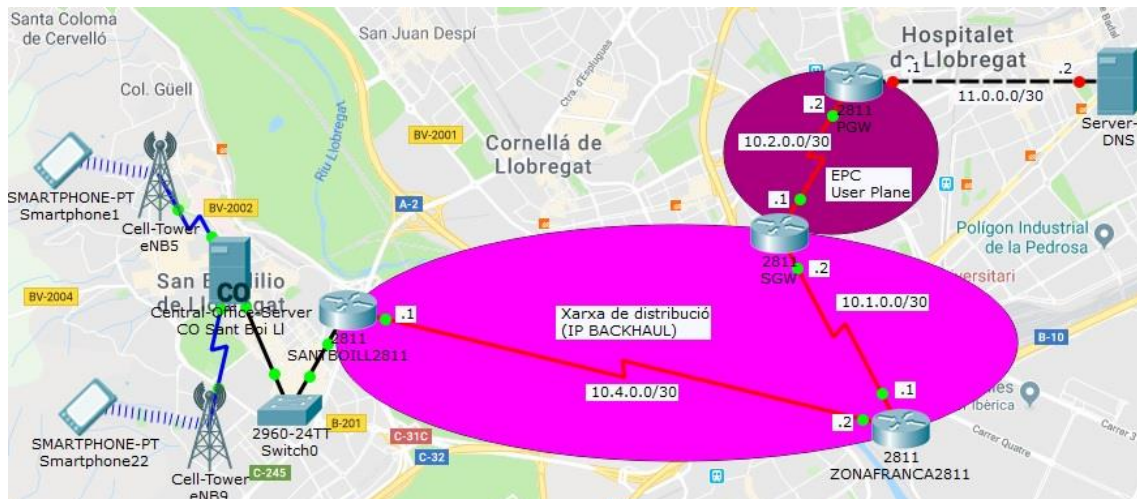


Il·lustració 278. Assignació d'adreça IP a la interfície 0/1/0 del PGW.

Just en aquest moment, s'aixeca la connectivitat entre el SGW i el PGW, per tant, poden comunicar-se.

L'últim element que s'incorporarà a aquest apartat és un servidor (DNS). Anem a **[End Devices]** → **[Generic]**.

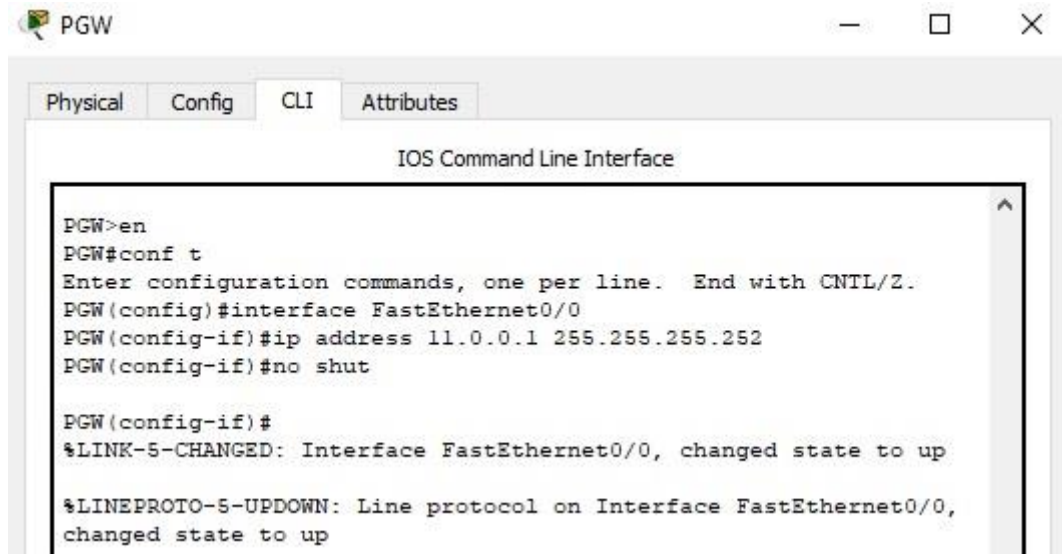
Entre el PGW i el servidor DNS hi ha la xarxa 11.0.0.0/30 i es farà servir FastEthernet, per tant, caldrà configurar l'adreça IP a la interfície FastEthernet del PGW.



Il·lustració 279. Representació de la xarxa 11.0.0.0/30 entre el PGW-servidor DNS. I resta de xarxes.

Entrem en el CLI del PGW i configurem l'adreça 11.0.0.1/30 a la interfície FastEthernet0/0. Fixem-nos que com entre el PGW i el servidor DNS es connecta un

cable de coure, en aquest cas ja no és necessari especificar cap *rate* de sincronisme de rellotge.

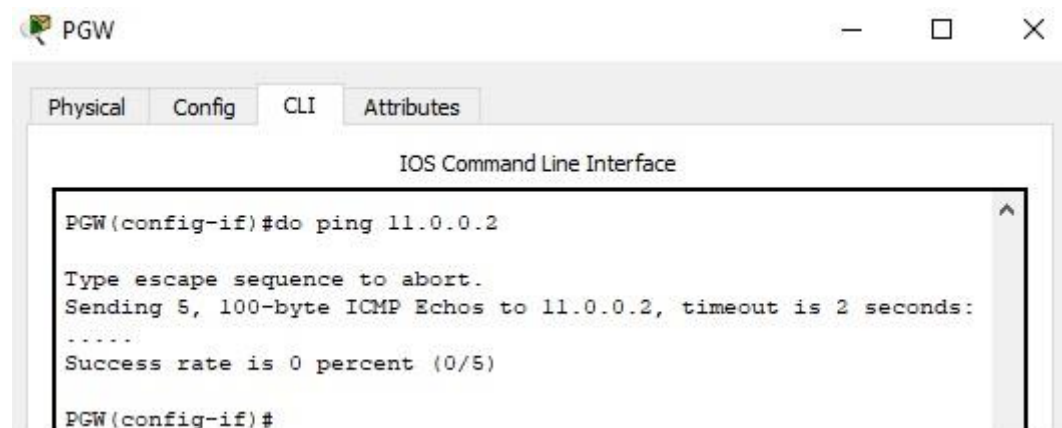


```
PGW>en
PGW#conf t
Enter configuration commands, one per line. End with CNTL/Z.
PGW(config)#interface FastEthernet0/0
PGW(config-if)#ip address 11.0.0.1 255.255.255.252
PGW(config-if)#no shut

PGW(config-if)#
%LINK-5-CHANGED: Interface FastEthernet0/0, changed state to up
%LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface FastEthernet0/0,
changed state to up
```

Il·lustració 280. Assignació d'adreça IP a la interfície FastEthernet 0/0 del PGW.

En aquest moment es pot veure a Packet Tracer que s'aixeca la connectivitat entre el PGW i el servidor DNS (extrem de la xarxa de color verd). No obstant, el servidor DNS no l'hem configurat. Per tant, si intentem fer un ping no hauria d'haver resposta.



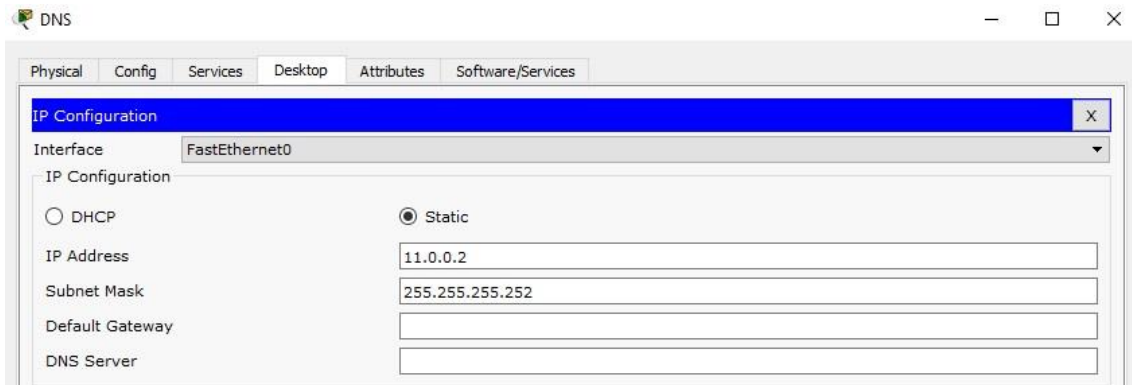
```
PGW(config-if)#do ping 11.0.0.2

Type escape sequence to abort.
Sending 5, 100-byte ICMP Echos to 11.0.0.2, timeout is 2 seconds:
.....
Success rate is 0 percent (0/5)

PGW(config-if)#
```

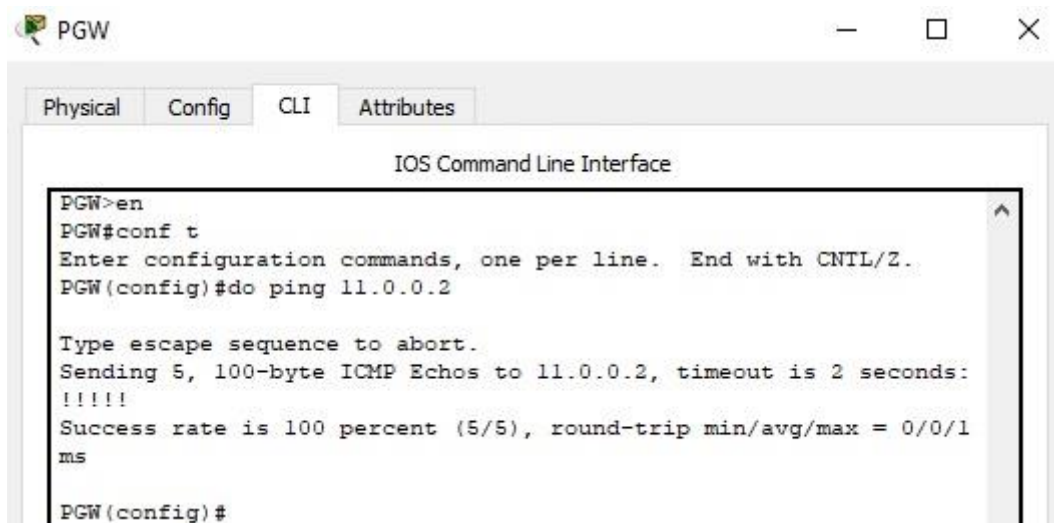
Il·lustració 281. Ping a l'adreça 11.0.0.2 (servidor DNS).

Com s'aprecia a la il·lustració anterior, cal configurar el servidor DNS. L'obrim, i a la pestanya *Desktop* cliquem a *IP Configuration*: posem a *IP Address* l'adreça 11.0.0.2, i al camp de *Subnet Mask* 255.255.255.252.



Il·lustració 282. Configuració adreça IP del servidor DNS a la interfície FastEthernet0.

Si intentem fer un pin de nou des del PGW:

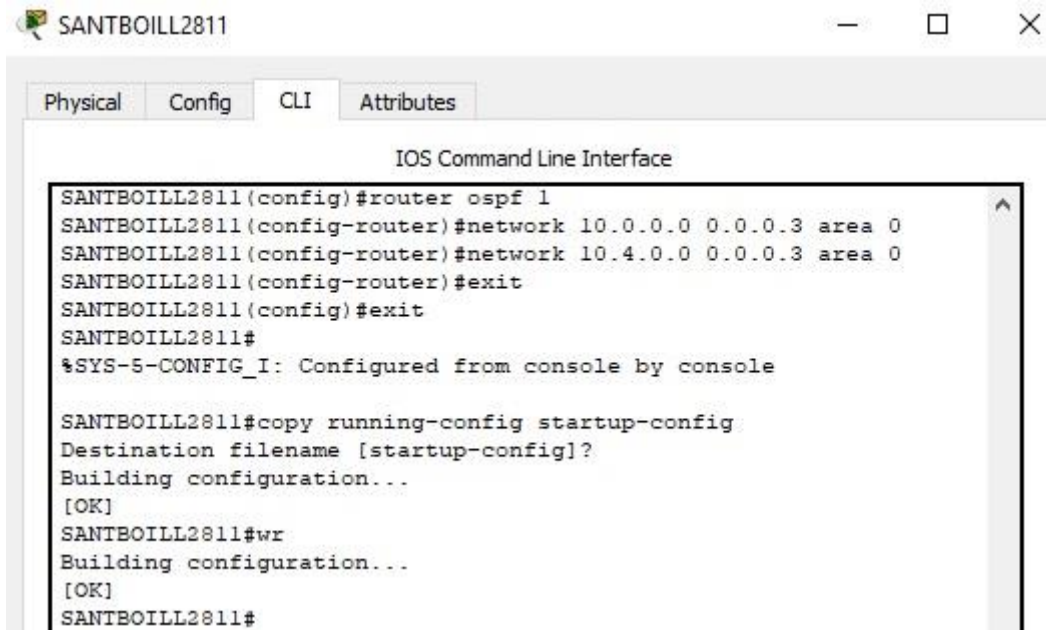


Il·lustració 283. Ping a l'adreça 11.0.0.2 (servidor DNS) des del PGW.

Ara ja totes les interfícies estan configurades a nivell físic i a nivell d'adreçament IP. Però falta configurar un protocol d'encaminament interior dinàmic, que serà l'OSPF.

Tornem al *router frontera* SANTBOILL2811 i entrem en el mode de configuració global per introduir la comana *router ospf*. Ens demanarà un nombre d'identificació de procés. Podem posar qualsevol (1). El següent pas per configurar l'OSPF a aquest router és afegir les xarxes que aquest té directament connectades (10.0.0.0/30 i 10.4.0.0/30). No obstant, la màscara a especificar serà la *wildcard*, és a dir, la inversa de la màscara de subxarxa. Per exemple, si la màscara emprada és la 255.255.255.252, la *wildcard* serà la 0.0.0.3. Realment és fer una resta per octets: 255.255.255.255 – 255.255.255.252 = 0.0.0.3. Per descomptat, també cal indicar l'àrea a la qual pertanyen aquestes xarxes.

A continuació es pot veure les comanes emprades per inserir les xarxes directament connectades del router SANTBOILL2811, i les comanes per guardar la configuració.

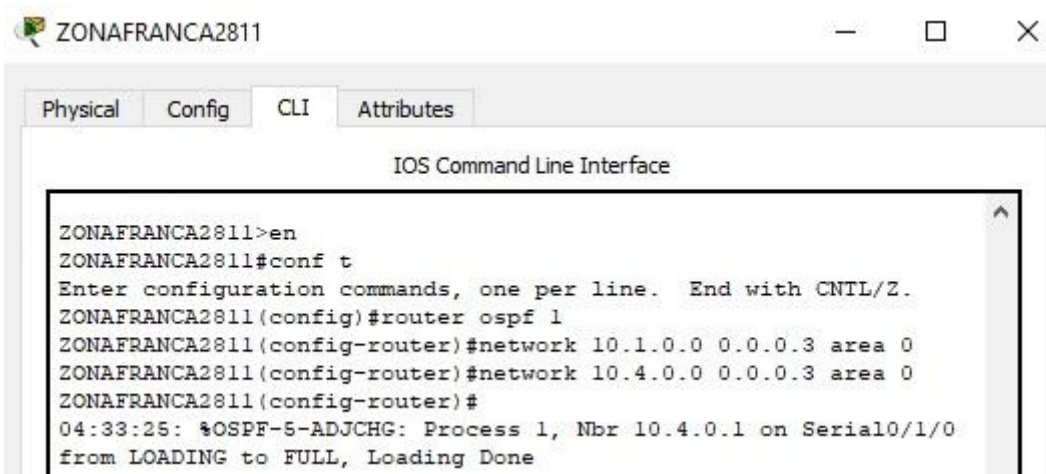


```
SANTBOILL2811
Physical Config CLI Attributes
IOS Command Line Interface
SANTBOILL2811(config)#router ospf 1
SANTBOILL2811(config-router)#network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
SANTBOILL2811(config-router)#network 10.4.0.0 0.0.0.3 area 0
SANTBOILL2811(config-router)#exit
SANTBOILL2811(config)#exit
SANTBOILL2811#
%SYS-5-CONFIG_I: Configured from console by console

SANTBOILL2811#copy running-config startup-config
Destination filename [startup-config]?
Building configuration...
[OK]
SANTBOILL2811#wr
Building configuration...
[OK]
SANTBOILL2811#
```

Il·lustració 284. Activació del protocol OSPF al *router* SANTBOILL2811.

De la mateixa manera que s’ha procedit per activar el protocol OSPF al *router* SANTBOILL2811, cal anar al *router frontera* ZONAFRANCA2811 i fer el mateix. Les xarxes que té directament connectades són la 10.4.0.0/30 i la 10.1.0.0/30.

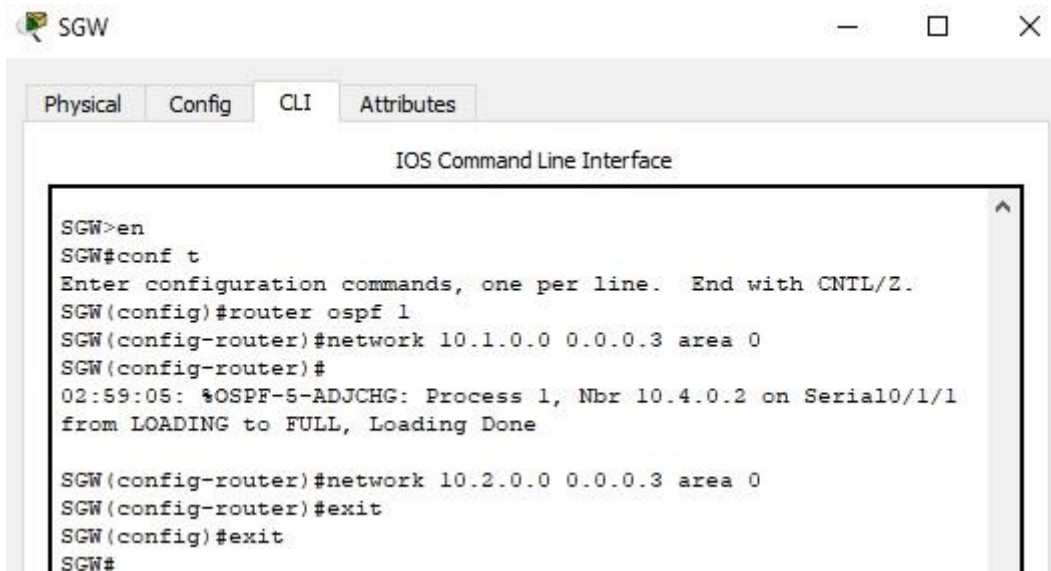


```
ZONAFRANCA2811
Physical Config CLI Attributes
IOS Command Line Interface
ZONAFRANCA2811>en
ZONAFRANCA2811#conf t
Enter configuration commands, one per line. End with CNTL/Z.
ZONAFRANCA2811(config)#router ospf 1
ZONAFRANCA2811(config-router)#network 10.1.0.0 0.0.0.3 area 0
ZONAFRANCA2811(config-router)#network 10.4.0.0 0.0.0.3 area 0
ZONAFRANCA2811(config-router)#
04:33:25: %OSPF-5-ADJCHG: Process 1, Nbr 10.4.0.1 on Serial0/1/0
from LOADING to FULL, Loading Done
```

Il·lustració 285. Configuració del protocol OSPF al *router* ZONAFRANCA2811.

Fixem-nos que al afegir la xarxa 10.4.0.0/30, apareix la primera adjacència entre SANTBOILL2811 i ZONAFRANCA2811. Com ja havíem configurat prèviament l’OSPF a SANTBOILL2811, ens apareix un *router veí* (10.4.0.1). Ara tots dos “parlen” OSPF. De nou, guardem la configuració per a aquest router.

EL següent router a configurar el protocol OSPF és el SGW. Entrem en la seva configuració global i l’activem amb les xarxes que té directament connectades (10.1.0.0/30 i 10.2.0.0/30).



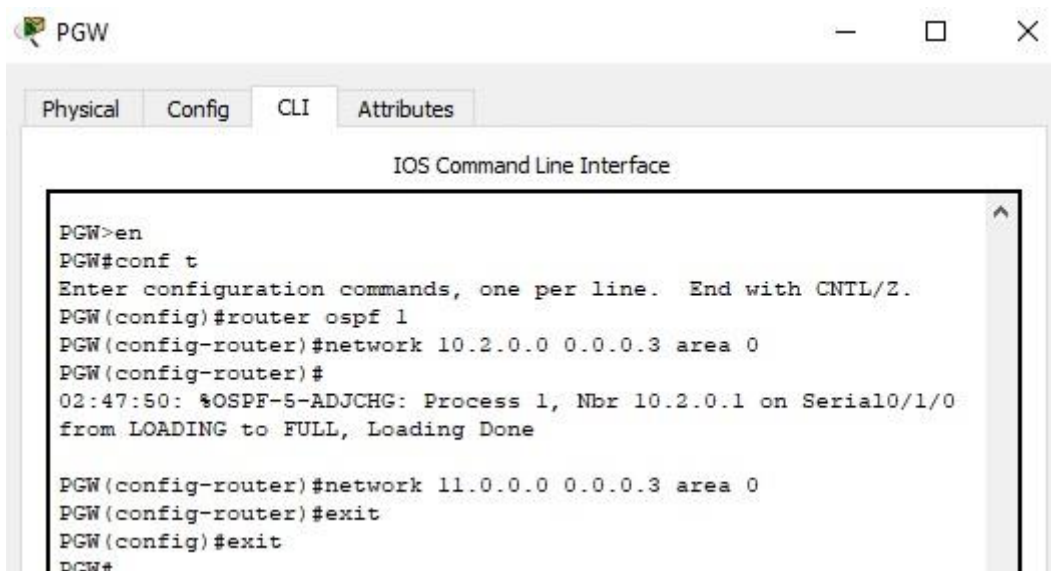
```
SGW>en
SGW#conf t
Enter configuration commands, one per line. End with CNTL/Z.
SGW(config)#router ospf 1
SGW(config-router)#network 10.1.0.0 0.0.0.3 area 0
SGW(config-router)#
02:59:05: %OSPF-5-ADJCHG: Process 1, Nbr 10.4.0.2 on Serial0/1/1
from LOADING to FULL, Loading Done

SGW(config-router)#network 10.2.0.0 0.0.0.3 area 0
SGW(config-router)#exit
SGW(config)#exit
SGW#
```

Il·lustració 286. Configuració del protocol OSPF al router SGW.

De nou, veiem que quan inserim, en aquest cas, la xarxa 10.1.0.0/30 apareix la primera adjacència per al router SGW. Com s'havia configurat prèviament l'OSPF al ZONAFRANCA2811, el SGW ha descobert un nou veí, i "parlen" OSPF.

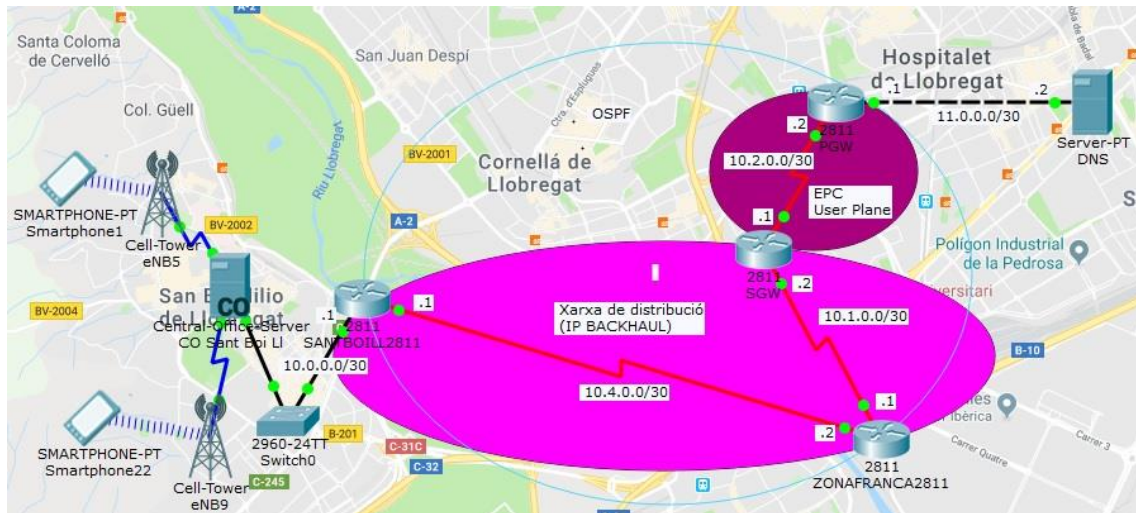
Per últim, cal activar el protocol OSPF al router PGW. Entrem en la seva configuració global i afegim les xarxes que té directament connectades. Com a incís, només dir que la xarxa 11.0.0.0/30 representa una xarxa externa, i per tant no hauria d'aplicar-se el protocol d'encaminament dinàmic interior OSPF, sinó el BGP (protocol d'encaminament exterior per comunicar diferents *Sistemes Autònoms*). Però per finalitats pràctiques d'aquest apartat es farà córrer també l'OSPF per a aquesta xarxa.



```
PGW>en
PGW#conf t
Enter configuration commands, one per line. End with CNTL/Z.
PGW(config)#router ospf 1
PGW(config-router)#network 10.2.0.0 0.0.0.3 area 0
PGW(config-router)#
02:47:50: %OSPF-5-ADJCHG: Process 1, Nbr 10.2.0.1 on Serial0/1/0
from LOADING to FULL, Loading Done

PGW(config-router)#network 11.0.0.0 0.0.0.3 area 0
PGW(config-router)#exit
PGW(config)#exit
PGW#
```

Il·lustració 287. Configuració del protocol OSPF al router PGW.



Il·lustració 289. Vista general de la xarxa IP Backhaul i EPC.

Després d’haver configurat tot aquest escenari, només faltaria simular-lo provant, per exemple, d’enviar un ping des del terminal “Smartphone1” fins a qualsevol node de la xarxa. Per fer-ho, anem a *Add Simple PDU* i col·loquem el paquet en un origen i en un destí.

Les següents dues captures mostren els resultats obtinguts si enviem un ping des de cadascun dels terminals.

Fire	Last Status	Source	Destination	Type	Color	Time(sec)	Periodic	Num	Edit	Delete
	Successful	Smartphone1	SANTBOILL...	ICMP		0.000	N	0	(e...)	(delete)
	Successful	Smartphone1	ZONAFRAN...	ICMP		0.000	N	1	(e...)	(delete)
	Successful	Smartphone1	SGW	ICMP		0.000	N	2	(e...)	(delete)
	Successful	Smartphone1	PGW	ICMP		0.000	N	3	(e...)	(delete)
	Successful	Smartphone1	DNS	ICMP		0.000	N	4	(e...)	(delete)

Il·lustració 290. Ping des del Smartphone1 als diferents nodes de la xarxa.

Fire	Last Status	Source	Destination	Type	Color	Time(sec)	Periodic	Num	Edit	Delete
	Successful	Smartphone22	SANTBOILL...	ICMP		0.000	N	0	(e...)	(delete)
	Successful	Smartphone22	ZONAFRAN...	ICMP		0.000	N	1	(e...)	(delete)
	Successful	Smartphone22	SGW	ICMP		0.000	N	2	(e...)	(delete)
	Successful	Smartphone22	PGW	ICMP		0.000	N	3	(e...)	(delete)
	Successful	Smartphone22	DNS	ICMP		0.000	N	4	(e...)	(delete)

Il·lustració 291. Ping des del Smartphone22 als diferents nodes de la xarxa.

Com s’observa, en ambdós casos s’arriba a qualsevol node de la xarxa. Per tant, existeix comunicació.

9. Conclusions

Del desenvolupament del Treball cal destacar la importància de conèixer el funcionament essencial d'arquitectura i disseny de la tecnologia LTE. Una tecnologia que ha presentat un salt qualitatiu en termes d'ampla de banda, eficiència espectral, latència, etc. que fan que l'experiència d'usuari (UX) sigui com la que podem experimentar avui dia.

Tot i que als seus inicis el desplegament d'aquestes xarxes era limitat a les grans ciutats (banda 1800 i 2600 MHz), ha sigut sorprenent com en menys d'una dècada la penetració d'aquesta tecnologia ha estat arreu del món. Com a exemple, dir que a Espanya molts dels municipis amb menys de 10.000 habitants no tenien cobertura 4G, i va ser a partir de l'any 2015, amb l'alliberació del dividend digital, quan varen començar a disposar de cobertura 4G directament a la banda de 800 MHz.

Dels diferents capítols de caire teòric destacaria com l'estàndard LTE té la capacitat de presentar nous elements (nodes) capaços de desenvolupar una tasca determinada o amb l'objectiu de resoldre o millorar la gestió del flux de dades o els procediments de seguretat. Encara que a vegades entre tecnologies consecutives molts dels aspectes són semblants, si que és interessant veure com la tendència és convergir tots els serveis a IP. Un salt que entre el 3G i el 4G no representa una diferència descomunal, sí que ho serà amb l'adveniment del 5G. És a dir, si ens descuidem dues generacions, les arquitectures i protocols poden arribar a ser molt diferents. Ens pot semblar estrany que puguem anar més enllà d'on hem arribat, però ja tenim més d'1 bilió de dispositius connectats a la xarxa gràcies a la nova era de *Internet of Things* (IoT), molts dels quals són dispositius que necessiten mobilitat. Per tant, aspectes com la seguretat, l'adreçament, l'eficiència energètica i la gestió de la mobilitat seran aspectes que aniran perfeccionant-se en els futurs estàndards de telefonia i xarxes mòbils.

Quant a la planificació i dimensionament d'una xarxa LTE, s'ha fet servir el programari de lliure distribució Radio Mobile. Encara que és una eina limitada per a tecnologies com la LTE en termes de model de propagació, anàlisi d'interferència múltiple i de tràfic, ha sigut interessant veure tots els aspectes descrits ja que són procediments que utilitzen els operadors de xarxa per fer la seva planificació ràdio. Hi ha hagut una fase de desplegament físic de la xarxa on s'ha configurat els paràmetres més destacats (ubicació d'emplaçaments, altura d'antenes, azimuts, downtilts, diagrames de radiació, banda de treball, etc.), i una segona fase de comprovació i optimització de les simulacions. Tot això ha sigut possible amb l'ajuda de la cartografia disponible de les missions de la NASA i del programari Google Earth per determinar les marques de posició i les altures de les antenes.

- A la fase de desplegament d'emplaçaments, el model emprat ha sigut l'hexagonal, ja que és el model recomanat per la seva adaptació al terreny i perquè es pot aplicar de manera sistemàtica.
- L'estudi de cobertura ha permès veure si les àrees han estat cobertes satisfactòriament. Veure els nivells de potència ha servit per determinar el grau

de cobertura en base a la sensibilitat del receptor. No obstant, l'orografia del terreny en algunes àrees ha dificultat l'homogeneïtat, perquè la presència d'obstacles bloqueja el senyal radioelèctric. Com a solució principal, s'han modificat alguns dels paràmetres en alguns dels emplaçaments (azimut, downtilt i/o altura) per tal d'aconseguir que no quedessin forats blancs. No obstant, també s'ha considerant l'opció d'afegir un nou emplaçament perquè finalment quedés tota l'àrea d'interès coberta.

- A continuació s'ha fet un anàlisi interferent de tres sectors de cel·les veïnes sobre un quart per veure la quantitat d'àrea interferida i determinar quines àrees es garanteix el servei ($CIR \leq 9\text{dB}$).
- Posteriorment s'ha avaluat quin tipus de *Modulation Coding Scheme* (MCS) s'assignaria a un terminal en base al rang de potència rebut, ja que és interessant per a un operador de xarxa veure en quines àrees els usuaris poden experimentar majors taxes de tràfic.
- Per últim, s'ha estudiat quins aspectes cal considerar si un emplaçament no disposés de fibra òptica i necessités d'un concentrador de tràfic. En concret, s'ha estudiant el disseny de les obertures necessàries (zones de Fresnel) per veure la viabilitat del radioenllaç. Els resultats obtinguts no han representat cap problema perquè la disposició del terreny i les altures de les antenes transmissora i receptora del radioenllaç han estat suficients com perquè el senyal quedés bloquejat.

A part d'estudiar la planificació ràdio, l'últim punt elaborat del Treball ha consistit en fer un disseny de xarxa amb el programari Packet Tracer de Cisco amb la finalitat de veure: com es configuren els nodes a nivell de comanes, quin paper jugar el eNodeB, com un terminal rep una adreça IP, com configurar un protocol d'encaminament interior, comprovar la connectivitat i associar la terminologia del LTE amb les solucions particulars de Cisco. Per exemple, el *Home Subscriber Server* i el *Mobility Management Entity* són representats únicament al Packet Tracer per un *Office Central Server*. Per tant, d'alguna manera també té les seves limitacions de disseny.

Per tant, després de tot el procés dut a terme en l'elaboració d'aquest Treball, és d'interès continuar investigant sobre aspectes que no s'han tractat a la memòria, com: la gestió de la mobilitat. Aprofundir en el funcionament de la interfície ràdio del LTE. Interconnectar diferents *Sistemes Autònoms* amb Packet Tracer per representar la connectivitat entre les xarxes de diferents operadors i en definitiva veure com un terminal pot comunicar-se amb un altre pertanyent a una altra xarxa.

10. Glossari

A

ACK: *Acknowledgement.*

ADSL: *Asymetric Digital Subscriber Line.*

AM: *Acknowledged Mode.*

APN: *Access Network Name.*

ARFCN: *Absolute Radio Frequency Channel Number*

ARQ: *Automatic Repeat reQuest.*

ASTER: *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflexion Radiometer.*

B

BGP: *Border Gateway Protocol.*

BPSK: *Binary Phase Shift Key-ing.*

BTS: *Base Transceiver Station.*

C

CDMA: *Code Division Multiple Access.*

CO-Server: *Central Office Server.*

CRC: *Cyclic Redundancy Check.*

D

DEM: *Digital Elevation Models.*

DHCP: *Dynamic Host Configuration Protocol.*

DL: *Downlink.*

DVB-T: *Digital Video Broadcasting – Terrestrial.*

E

EDGE: *Enhanced Data Rate for the GSM Evolution.*

EIR: *Equipment Identity Register.*

EMM: *Evolved Mobility Management.*

EPC: *Evolved Packet Core.*

ESM: *Evolved Session Management.*

eUTRAN: *evolved Universal Terrestrial Radio Access Network.*

F

FDMA: *Frequency Division Multiple Access.*

FEC: *Forward Error Correction.*

FSL: *Free Space Loss.*

G

GPRS: *Global Packet Radio Service.*

GSM: *Global System Mobile.*

GTP: *GPRS Tunneling Protocol.*

GTP-C: *GPRS Tunnel Protocol in the Control Plane.*

GUTI: *Globally Unique Temporary Identity.*

H

HSDPA: *High Speed Data Packet Access.*
HSS: *Home Subscriber Server.*
HLR: *Home Location Register.*
HARQ: *Hybrid Automatic Repeat reQuest.*

I

IM: *Interference Margin.*
IMSI: *International Mobile Subscriber Identity.*
IP: *Internet Protocol.*
ITM: *Irregular Terrain Model.*
ITS: *Institute for Telecommunication Sciences.*

J

JPL: *Jet Propulsion Laboratory.*

L

LCID: *Logical Channel Identifier.*
LTE: *Long Term Evolution.*
LTE-A: *Long Term Evolution – Advanced.*

M

MAC: *Medium Access Control.*
MCC: *Mobile Country Code.*
MCS: *Modulation Coding Scheme.*
MIMO: *Multiple Input Multiple Output.*
MIT: *Massachusetts Institute of Technology.*
MME: *Mobility Management Entity.*
MNC: *Mobile Network Code.*

N

NACK: *Non-Acknowledgement.*
NAS: *Non Access Stratum.*
NAT: *Network Address Translation.*
NVRAM: *Non-Volatile Random Access Memory.*

O

OFDM: *Orthogonal Frequency Division Multiplexing.*

P

PGW: *Packet Gateway.*
PCRF: *Policy and Charging Rules Function.*
PDU: *Protocol Data Units.*
PDCP: *Packet Data Convergence Protocol.*
PIRE: *Potència Isotròpica Radiada Equivalent.*

Q

QoS: *Quality of Services.*

QPSK: *Quaternary Phase Shift Key-ing.*

R

RA-RNTI: *Random Access RNTI.*

RB: *Resource Block.*

RE: *Resource Element.*

RNTI: *Radio Network Temporary Identifier.*

ROHC: *Robust Header Compression.*

RST: *Reliable Service Threshold.*

RTP: *Real-Time Protocol.*

RX: *Receiver.*

S

SA: *Sistema Autònom.*

SCTP: *Stream Control Transmission Protocol.*

SDU: *Service Data Unit.*

SGW: *Serving Gateway.*

SIM: *Subscriber Identity Module.*

SIP: *Session Initiation Protocol.*

SMS: *Short Message Service.*

SNR: *Signal-to-Noise Ratio.*

SQN: *Sequence Number.*

SS.RR.: *Sistema Radiant.*

SRTM: *Shuttle Terrain Mapping Mission*

T

TB: *Transport Block.*

TCP: *Transport Control Protocol.*

TDMA: *Time Division Multiple Access.*

TEID: *Tunnel Endpoint Identifier.*

TM: *Transparent Mode.*

TMSI: *Temporary Mobile Subscriber Identity.*

TX: *Transmitter.*

U

UDP: *User Datagram Protocol.*

UE: *User Equipment.*

UL: *Uplink*

UM: *Un-acknowledgement Mode.*

UMTS: *Universal Mobile Telecommunication System.*

UP: *User Plane.*

USIM: *Universal Subscriber Identity Module.*

UX: *User Experience.*

11. Bibliografia

- [1] X. Lagrange "4G Network Essentials", Institut Mines-Télécom. MOOC, 2018.
<https://www.edx.org/es/course/4g-network-essentials>
(Últim accés: 16/05/2018)
- [2] Xavier Marichal "Long Term Evolution", Telecapp Academy. MOOC, 2018.
<https://telecapp.com/lte.html>
(Últim accés: 02/06/2018)
- [3] Jong-Moon Chung. "Wireless Communication Emerging Technologies", Yonsei University. MOOC, 2018.
<https://www.coursera.org/learn/wireless-communication-technologies>
(Últim accés: 27/03/2018)
- [4] Dahlman, E.; Parkvall, S.; Skold, J.; Beming, P. 3G Evolution: HSPA and LTE for mobile broadband. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2008.
<https://es.scribd.com/book/282531652/3G-Evolution-HSPA-and-LTE-for-Mobile-Broadband>
(Últim accés: 02/05/2018)
- [5] Agustí, R. [et al.]. LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles. [S.l.]: Fundación Vodafone, 2010.
<https://es.scribd.com/doc/60165166/Lte>
(Últim accés: 13/05/2018)
- [6] Essential 4G Guide: Learn 4G Wireless In One Day.
<https://es.scribd.com/book/216443016/Essential-4G-Guide-Learn-4G-Wireless-In-One-Day>
(Últim accés: 18/03/2018)
- [7] Fundamentos de diseño y gestión de sistemas de comunicaciones móviles celulares. Sallent Roig, José Oriol; Pérez Romero, Jordi (Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica, 2014).
<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.3/36630>
(Últim accés: 28/05/2018)
- [8] Daniel Andreu. "Redes Móviles. De la teoría a la azotea". Xerrada telemàtica a l'Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeroespacial de Castelldefels – UPC.
<https://www.youtube.com/watch?v=hhYiQ8JyBTE>
(Últim accés: 27/02/2018)

- [9] Ignacio Fernández López. TFG Planificació i dimensionado de una red LTE. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona – UPC.
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/21660/Proyecto_Final_Carrera_Ignacio_Fernandez.pdf
(Últim accés: 30/05/2018)
- [10] María Duran Miñano. TFG Diseño, implantación y optimización de una red LTE real. Universidad Carlos III de Madrid.
<https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/22822>
(Últim accés: 13/04/2018)
- [11] Miguel Valle Valle. TFM Planificació Radio LTE de una red de telefonía móvil en el municipio de Rota. Universitat Oberta de Catalunya.
<http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/handle/10609/45856>
(Últim accés: 21/05/2018)
- [12] Qu Qiaoyan. TFG Despliegue de una red LTE en Madrid. Universidad Carlos III de Madrid.
<https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/16105>
(Últim accés: 11/05/2018)
- [13] Andrés Billy Baltazar Arrese. Proyecto final de carrera - Diseño de una red LTE en la ciudad de Trujillo. Universidad Nacional de Ingeniería (Perú).
<http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1389>
(Últim accés: 15/05/2018)
- [14] Programari Radio Mobile.
<http://www.ve2dbe.com/rmonline.html>
(Últim accés: 01/06/2018)
- [15] Patricia García Garnacho. “Manual de uso de Radio Mobile”, 2006.
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6989/Anexo%2016.pdf>
(Últim accés: 01/06/2018)
- [16] Programari Packet Tracer.
<https://www.netacad.com/es/courses/packet-tracer>
(Últim accés: 03/06/2018)
- [17] Mario García Lozano. Transparències de l'assignatura Laboratori de Comunicacions Sense Fils. Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeroespacial de Castelldefels. Universitat Politècnica de Catalunya.
Format físic.
- [18] David García Vizcaíno. Transparències del Curs d'Operador d'Estacions de Radioaficionat. Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeroespacial de Castelldefels. Universitat Politècnica de Catalunya.
Format físic.