

# COMUNICACIONS MÒBILS DE QUARTA GENERACIÓ

**Ramon Agustí**

Universitat Politècnica de Catalunya

**E**ncara que les taxonomies poden ser imprecises, els sistemes de comunicacions mòbils o sense fils són freqüentment classificats per generacions. La primera generació (1G) consisteix en sistemes cel·lulars analògics per a transmissió de veu i arribà al començament dels anys vuitanta. La segona generació (2G) manté encara com a fet distintiu la transmissió de veu però amb sistemes digitals i de gran capacitat. A més a més, introdueix eixos cabdals en el futur de les comunicacions posteriors com són el fet de garantir la seguretat en la transmissió i la itinerància (*roaming*), característica que permet poder usar el mateix terminal en xarxes diferents en països diferents. Tot això succeí a començament dels anys noranta. L'arribada de la tercera generació (3G), prevista a inicis de la dècada actual i que ha hagut d'esperar uns quants anys, ja que ha estat involucrada en l'explosió de la recent bombolla tecnològica, difereix de la 2G en l'habilitat per integrar aplicacions de veu i dades i fer possible la comunicació multimèdia, gràcies a la seva major capacitat de transmissió, que augmenta fins a dos ordres de magnitud (des d'alguna desena de kbit/s fins a alguns Mbit/s) en les versions més actuals dels sistemes 3G. I així arribem a la quarta generació (4G), on també es pretén assolir augments de més de dos ordres de magnitud de la velocitat de transmissió fins a arribar a 1.000 Mbit/s en alguns entorns i poder equiparar en qualsevol cas les transmissions sense fils i les transmissions per cable en l'àmbit de l'usuari.

És clar que la velocitat de transmissió esmentada en aquest ràpid recorregut de la recent història de les comunicacions mòbils, tot i ser un clar exponent dels assoliments tecnològics, no esgota ni explica la totalitat de les múltiples manifestacions que cada generació acaba explotant. Així, i deixant a banda els avenços de la microelectrònica i els propis de les telecomunicacions en general, no es pot entendre el que segurament ha estat el veritable *Big Bang* de les comunicacions mòbils pel que fa al gran públic, com és el sistema europeu GSM dins del marc de la 2G, si no hi hagués hagut una clara predisposició política d'unificar els sistemes de comunicacions mòbils arreu de la Comunitat Europea a principis dels anys vuitanta,

passant de la 1G a un sistema únic utilitzable en tots el països emprant la itinerància. Aquesta veritable explosió tecnològica ha estat a més a més catapultada per la liberalització de les comunicacions i la desesperació dels monopolis naturals, dels quals també cal dir que van ser elements clau per al desenvolupament del GSM en garantir-ne la seva adopció comercial a cada país. Segurament aquest èxit, no previst inicialment en tota la seva magnitud, ha estat decisiu per fer d'Europa el líder mundial d'aquesta tecnologia i del GSM un estàndard mundial *de facto*.

Aquest èxit va instal·lar en el sector de les telecomunicacions una inèrcia d'evolució tecnològica en assumir que a la 2G hauria de seguir una 3G, que a Europa es va denominar *sistema de telecomunicacions mòbils universals* (*universal mobile telecommunications system*, UMTS) amb moltes més prestacions i que de manera natural aniria alimentant d'èxit una dinàmica gairebé exponencial de creixement del sector. Fins i tot els governs europeus, en la seva immensa majoria, no van poder escapar d'aquest enlluernament i van introduir preus desorbitats en la concessió administrativa de les bandes de freqüència als operadors que volguessin operar la 3G amb les conseqüències negatives per al sector que ara gairebé tothom reconeix. A tall d'exemple val a dir que aproximadament costava tant la concessió administrativa de la banda de freqüències per operar en UMTS com el desplegament de la xarxa 3G en si mateixa, que, per altra banda, ja era prou cara per la necessitat d'introduir equipaments nous i molta més infraestructura d'estacions base que els sistemes 2G.

Un factor que sovint es va oblidar és que en comunicacions mòbils 2G una demanda del mercat, com era la comunicació de veu, va anar per davant de la tecnologia i això va propiciar, arribat el moment, una explosió d'aquestes tecnologies solament comparable en l'àmbit de l'usuari al que va ser la de l'automòbil o la de la televisió, per citar-ne dues de prou conegudes i relativament encara no gaire llunyanes. El fet que el contingut, la veu, fos quelcom produït de manera natural i totalment arrelada en la condició humana era el gran responsable que els plans de negoci previstos en

la seva implantació es quedessin curts. Per altra banda, la 3G, en part suportada pel fet que la 2G no podria satisfer la demanda pel que fa referència a servei de veu, en realitat implicava un salt tecnològic qualitatiu amb la introducció de serveis de dades de gran velocitat de la mà d'Internet. La tecnologia Internet estava en una fase molt de laboratori quan va néixer el GSM i per tant no es va poder incorporar al sistema de manera nativa. Ho va fer una variant del GSM, anomenada GPRS, avui present en tots els terminals, però de manera una mica forçada pel propi disseny de l'arquitectura GSM i per les pròpies limitacions de velocitat de transmissió de la 2G. Per tot plegat, la 3G anava destinada a la transmissió d'uns continguts que a diferència de la veu no existien de manera natural i que per tant s'havien de crear. Aquest fet, afegit als propis derivats dels problemes financers originats per l'explosió de la bombolla tecnològica, entre d'altres, va originar l'aparició d'una tecnologia, l'UMTS, que havia nascut segurament de manera prematura. Els plans de negoci no passaven la prova dels mercats i tot plegat avui dia comencem a veure-la amb uns quants anys de retard, encara que no en tots els països. Durant molt de temps s'ha estat parlant de la *killer application* o *aplicació definitiva* per a l'UMTS intentant emular el que va ser la veu per GSM. L'opinió actualment més estesa és que no hi ha una aplicació com a tal i sí multitud d'aplicacions que han de venir de la imbricació d'ofertes de multitud d'altres sectors, i la televisió mòbil n'és una de les més importants.

Una altra tecnologia anomenada WI-FI o estàndard 802.11 impulsada des dels Estats Units ha estat la gran guanyadora en aquests darrers anys en cobrir el forat tecnològic d'accés sense fils a Internet en entorns locals que l'UMTS no ha estat en condicions de liderar. La tecnologia WI-FI neix per tant com una extensió del món Internet, a diferència de la cel·lular, que seria una extensió de les arquitectures convencionals de telecomunicacions arrelades en els sistemes clàssics de transmissió telefònica. De fet, l'abast natural de la WI-FI es redueix a unes quantes desenes de metres, encara que dins d'aquesta cobertura es poden assolir velocitats d'una magnitud per sobre de les tecnologies UMTS. Aquest fet ha originat un debat, segurament interessant, pel qual aquestes xarxes convenientment desplegades en infinitat de cel·les de desenes de metres d'abast podrien arribar a cobrir grans extensions de terreny i competir directament amb l'UMTS. La realitat és que, si bé això és factible en superfícies com campus, àrees comercials o fins i tot zones delimitades de ciutat, fer-ne una extensió global en tot un territori incloent-hi interiors d'edificis com fa l'UMTS és de molt dubtosa viabilitat. El cost de la infraestructura que cal desplegar ho faria inviable. És per aquest motiu que actualment estem anant cap un concepte d'integració de xarxes que s'anomena *Beyond 3G* o *B3G*, on sembla que hi ha prou de consens entre els actors implicats. Aquest concepte permetria que un usuari es pogués connectar amb el seu terminal a la xarxa més adient

en cada cas. És a dir, es connectaria a una xarxa UMTS o GSM cas que no es requerís gran amplada de banda o simplement calgués garantir una gran cobertura i a estacions WI-FI, sempre que estiguessin disponibles, quan es requerís un accés de dades a Internet de curt abast però de gran amplada de banda.

### Descripció de les tecnologies mòbils actuals

El recorregut de les comunicacions sense fils resumit en l'apartat anterior s'ha desenvolupat sota la direcció tecnològica dels organismes d'estandardització i els principals són la Unió Internacional de Telecomunicacions (ITU),<sup>1</sup> el 3rd Generation Partnership Project (3GPP)<sup>2</sup> i l'Institut d'Enginyers en Electricitat i Electrònica (IEEE).<sup>3</sup> Inicialment el 3GPP ha estat bàsicament l'organisme que promou l'estandardització dels grans sistemes cel·lulars, que són els que ofereixen un abast gairebé del 100 % del territori, com els esmentats GSM i, en certa mesura, l'UMTS. Aquests sistemes provenen dels grans fabricants mundials d'equips de telecomunicació amb una llarga trajectòria arrelada en els sistemes de telefonia convencional. Per altra banda estan els sistemes estandarditzats en el si de l'organització IEEE i que neixen amb una vocació de comunicacions de curt abast i molt lligada al món de la transmissió de dades i particularment Internet. Dos èxits recents d'aquest tipus d'estàndards són el conegut popularment per WI-FI (IEEE 802.11 amb les seves variants) i el Bluetooth (IEEE 802.15.1).

La figura 1 mostra alguna de les idees apuntades en relació amb l'estat de l'art actual en comunicacions mòbils. El conjunt de tecnologies indicades presenta una frontera certament difuminada a la dreta, que és on ha de començar la propera generació 4G. La generació que hi ha entremig, la 3,5G o Beyond 3G, és un primer pas en la direcció de la 4G.

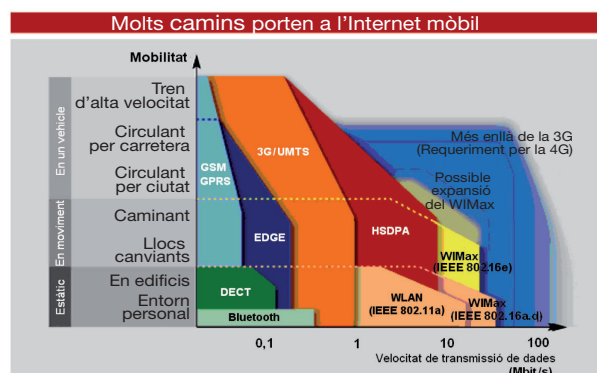


FIGURA 1. Diagrama mobilitat - velocitat de transmissió.

1. <<http://www.itu.int>>.
2. <<http://www.3gpp.org>>.
3. <<http://www.ieee.org>>.

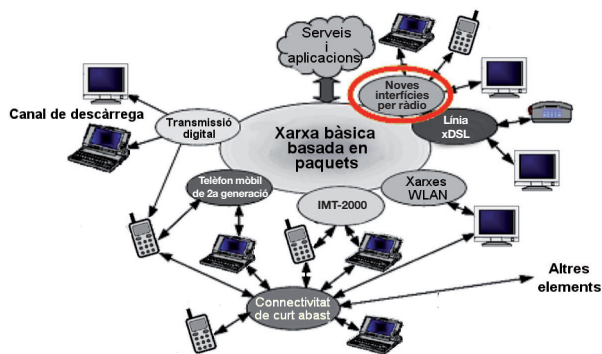


FIGURA 2. Sistemes B3G/4G [ITU-R M.1645].

L'inventari de tecnologies 2G mostrades en la figura 2, i encara no esmentades amb anterioritat, inclou, a part del ja esmentat GSM i el GPRS, variants d'aquests sistemes, com és l'EDGE, que modifica la modulació del senyal per aconseguir una velocitat de transmissió més elevada. El DECT és un sistema sense fils de la 2G per a interiors i que té un mercat important ja que aconseguix mobilitat dins de la llar o en entorns d'oficines per servei de telefonia. En relació amb el món IEEE, cal destacar el WIMAX [802.16 MAN] com a tecnologia pensada inicialment per assolir cobertures ja homologables a l'UMTS, encara que amb velocitat més elevada. WIMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) és un estàndard de transmissió sense fils per dades que proporciona accessos concurrents de fins a uns 50 km de radi i a velocitats de fins a 70 Mbit/s, emprant en aquest cas antenes directives. Aquesta és una tecnologia que encara està evolucionant. L'accés sense fils a Internet amb més cobertura que la tecnologia WI-FI seria una de les aplicacions més immediates del WIMAX.

Una nova generació de sistemes que hauria d'omplir l'espai a la dreta de la figura 1 es considera en la figura 2 com a sistemes B3G. Podem observar-hi com tot un seguit de tecnologies actualment ja operatives busquen la seva interoperativitat mitjançant una mena de «lingua franca» com és un nucli de xarxa Internet basat en la transmissió per paquets de dades. De fet, per a molts, el B3G és ja un capítol de l'anomenada 4G, tot i que hi ha molts problemes que s'han de resoldre tant des del punt de vista de terminal i estacions base com de gestió de xarxa. Cal apuntar que una possible tecnologia per a aquest terminal és l'anomenada *Software Defined Radio* (ràdio definida pel programari).<sup>4</sup> La idea esquemàtica rau en el fet que, a l'entrada del receptor i tan a prop de l'antena com sigui possible, es digitalitza el senyal rebut, i un cop digitalitzat passa a ser dades per ser processades per un ordinador que, depenent del programari amb el qual el fem treballar, es pot comportar com un receptor d'UMTS, GSM, WI-FI o qualsevol altra tecnologia existent. Aquesta tecnologia en part ja existeix en certa mesura en equips militars i estacions base, però caldrà esperar encara uns quants anys per poder-la adaptar a terminals comercials de baix cost i consum.

4. <<http://www.sdrforum.org>>.

Amb la constant evolució de les comunicacions sense fils succeeix, però, que cada cop més es poden veure incursions de les tecnologies estandaritzades fora dels que serien els seus territoris naturals. A tall d'exemple, cal esmentar els casos d'intent de desplegament de WI-FI en grans àrees de ciutats a base d'anar encadenant moltes zones de cobertura de poc abast mitjançant els coneguts equips d'accés, amb les antenes corresponents i els enllaços entre ells. Difícilment, però, aquestes tecnologies podran competir amb les pensades per a cobertura global com l'UMTS, de la mateixa manera que l'UMTS difícilment pot competir en casos de cobertura reduïda. La idea de fons és que no es pot dissociar en termes generals la cobertura oferta per un sistema mòbil i la velocitat de transmissió assolida. És a dir, petites cobertures impliquen grans velocitats de transmissió i, a l'inrevés, grans cobertures porten a moderades velocitats de transmissió. Certament, a base d'encadenar equips, hom pot pensar a fer desplegament ample de cobertura, però, més enllà d'un cert límit, els costos de la infraestructura associada no ho fan possible tal com ja hem esmentat abans. Un factor clau que trobem en totes les descripcions evolutives dels sistemes de comunicacions mòbils és el binomi velocitat de transmissió - mobilitat. En la figura 3 es mostra aquest binomi ubicant-hi algunes de les tecnologies representatives en el quadrant corresponent. Cal destacar que les tecnologies de curt o molt curt abast i velocitats baixes com la RFID (identificació per radiofreqüència), requereixen molt poc consum de potència i per tant unes dimensions molt reduïdes. Aquestes tecnologies tenen un enorme potencial d'aplicació i formen part de les xarxes personals invisibles (per exemple dins de la roba que vestim) que capturen el context que ens envolta com a persones i que finalment lligades amb la 4G podran desplegar el seu potencial d'informació contextual i fer-la arribar a qualsevol lloc.

### Fent camí fins a la 4G

La 4G, tal com va ser-ho la 3G, està conduïda des de l'òptica de l'oferta tecnològica. Les empreses manufactureres i els diferents agents de R+D són els seus impulsors i la ITU

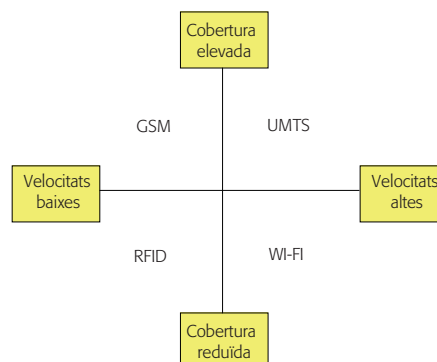


FIGURA 3. Binomi cobertura-velocitat en comunicacions mòbils.

és qui coordina i guia el procés amb un seguit de recomanacions que, entre altres conceptes, inclouen els requeriments i els criteris d'avaluació, així com una invitació als diferents organismes d'estandardització per presentar candidatures de tecnologies 4G formalment denominades *Advanced IMT 2000*, de la mateixa manera que la IMT 2000 va donar cobertura als sistemes 3G. La ITU inicia aleshores un procés que hauria d'acabar el 2011.<sup>5,6</sup> En particular, durant la conferència administrativa mundial de radiocomunicacions que es va celebrar a la tardor de 2007 (WRC-07) es va iniciar el debat en relació amb la ubicació de les bandes de freqüències on han d'operar els sistemes 4G. Aquest és un primer pas clau per al desenvolupament de la 4G, que es presenta delicat davant de l'escassetat de bandes de freqüència disponibles. De fet l'espectre radioelèctric és finit i totes les bandes estan actualment assignades. Per altra banda, es preveu el 2015 com a data per al desplegament inicial d'aquests sistemes ja en alguns països.

Encara que són múltiples els requeriments identificats, n'hi ha tres d'especialment rellevants:

— La velocitat de transmissió serà de 100 Mbit/s en moviment i 1 Gbit/s en repòs. És a dir, en la pràctica equivalent a entorns exteriors i interiors, respectivament. Aquestes velocitats representen salts al voltant de dos ordres de magnitud en relació amb les velocitats assolides actualment amb l'UMTS en entorns exteriors o WI-FI en entorns interiors. Les elevades velocitats fan pensar que es podrà usar la 4G amb qualsevol tipus de servei fins ara solament assolible emprant transmissió via cable però amb l'avantatge que dóna la ubicuitat. Certament, l'aprofitament d'aquest potencial que la 4G pot aportar es podrà dur a terme, amb un canvi de paradigma del concepte d'usuari que fins ara hem tingut. És a dir, l'usuari passa de ser actor passiu en la recepció de dades típiques de les generacions anteriors a creador i distribuïdor de grans quantitats d'informació que han de poder ser accessibles gairebé per a tothom en qualsevol lloc.

— Solament es transmeten paquets d'informació, i el retard d'extrem a extrem en el transport d'aquests paquets és com a màxim 10 ms. Aquestes dades estan pensades en clau Internet. És a dir, per tal que els protocols TCP/IP, que són en el cor de les xarxes Internet, en les quals se sustenta el nucli de xarxa o *Packet-based Core Network* de la figura 2, no malbaratin les elevades velocitats de transmissió entre 100 Mbit/s i 1 Gbit/s esmentades, calen retards molt petits en els paquets de dades que finalment arriben a l'usuari. Cal, per tant, el mínim nombre de manipulacions en els paquets enviats i el mínim nombre de nodes de processament intermedis. Aquest fet té molta incidència en l'ar-

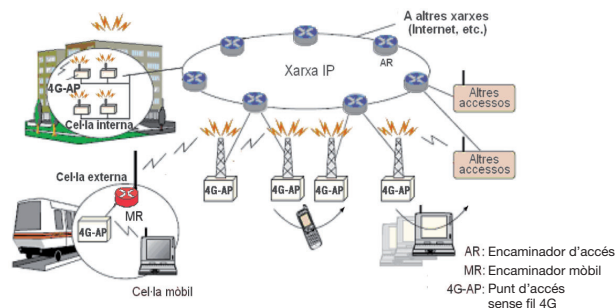


FIGURA 4. Arquitectura de la 4G.<sup>7</sup>

quitectura de la xarxa fixa de transport de paquets, des de les estacions base i fins a aquestes, que hi ha darrere de tot sistema de comunicacions mòbils i que cal dissenyar-la de manera no jeràrquica. En aquesta xarxa fixa, contràriament al que era habitual en sistemes 3G i anteriors, s'hi enganxaran no solament els sistemes 4G (nova interfície per ràdio en la figura 2) sinó qualsevol sistema anterior, en línia a l'esmentat B3G. És el que s'anomena *una xarxa plana*, tal com mostra la figura 4.

— Els costos han de ser assumibles per a l'usuari. És a dir, el cost per bit de transmissió ha de baixar almenys dos ordres de magnitud respecte al cost actual per mantenir uns costos equivalents als de la 3G. Des del punt de vista de l'equipament electrònic, i acceptant que la llei de Moore continua sent vàlida, això no hauria de ser un problema tot i tenir en compte el salt tecnològic considerat i que més endavant esmentarem breument. Des del punt de vista de desplegament d'infraestructura per part dels operadors, el nombre d'estacions base hauria de ser similar al del sistema 3G. Cal afegir que també s'haurien de mantenir els actuals nivells baixos de radiació 2G/3G, és a dir, de potència transmesa per les antenes instal·lades, que la normativa actual de radiacions electromagnètiques preveu, i tot i això s'assoleixen velocitats de transmissió molt més elevades. Finalment, el fet que la tecnologia de paquets sigui finalment operativa de manera nativa fa possible una millor rendibilitat del sistema 4G en permetre que més usuaris puguin estar simultàniament connectats a la Xarxa. Aquesta major capacitat de gestió dels recursos radioelèctrics no és menyspreable, ja que permet repartir els costos fixos CAPEX (*Capital Expenditures*) entre un nombre més gran d'usuaris.

La taula 1 descriu dades de tecnologies properes a la 4G partint dels sistemes WI-FI actualment prou estesos fins a les propostes dels organismes d'estandardització 3GPP i 3GPP2.<sup>8</sup> En concret, a Europa el candidat 4G s'ano-

5. «Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and system beyond IMT-2000» (recomanació ITU-R M.1645).

6. <[http://www.itu.int/osg/spu/presentations/2006/srivastava\\_broadbandasia2006shanghai.pdf](http://www.itu.int/osg/spu/presentations/2006/srivastava_broadbandasia2006shanghai.pdf)>.

7. N. UMEMA, T. OTSU i T. MASAMURA, «Overview of the fourth-generation mobile communication system», *NTT Technical Review* (setembre 2004).

8. <<http://www.3GPP2.org>>.

mena LTE (*Long Term Evolution*).<sup>9, 10</sup> Aquest sistema considera arquitectures de xarxa que són una evolució de la 3G, mirant així d'aprofitar al màxim les inversions fetes. Entremig hi ha la tecnologia WIMAX inicialment prevista com una prolongació de la WI-FI quant a suportar-ne l'abast, que és més gran que aquesta, i que actualment en la seva versió IEEE 802.16m ja es posiciona com un clar candidat a la 4G.

És remarcable d'altra banda el protagonisme que des d'Àsia es vol donar a la 4G. A l'Índia es vol passar directament a la 4G sense haver de passar per la 3G. Als Estats Units els operadors podrien saltar també directament a la 4G explotant en tot cas la B3G esmentada. Al Japó ja estan experimentant amb les tecnologies de 4G, i l'operador NTT DoCoMo és el primer que espera poder llançar comercialment els primers serveis de 4G en el decurs de l'any 2010. En relació amb la resta del món no s'esperen implantacions abans del 2015. Cal dir, no obstant això, que no són els operadors els més il·lusionats en la implantació de la 4G, ja que l'experiència de la 3G actua com a forta resistència, en tot cas són els grans fabricants els gran impulsors. L'any 2001, Alcatel, Ericsson, Motorola, Nokia i Siemens van constituir el Wireless World Research Forum (WWRF) per explorar la 4G. El fòrum, que també inclou companyies asiàtiques i nord-americanes, està estudiant patrons de comportament en l'ús que el gran públic fa de les tecnologies de cara a no repetir els errors de la 3G. Certament hi ha una natural evolució tecnològica i de recerca que no es pot aturar i això també explica el gran interès que la 4G desperta en el món de la recerca en comunicacions sense fils.

TAULA 1  
Tecnologies en curs per a la 4G

	WLAN 802.11x	WIMAX 802.16e	3GPP LTE	3GPP2 AIE
Màx. cadència dades (Mbit/s)	300	128	100	200
Amplada de banda del canal (MHz)	20	D'1,25 a 20	D'1,25 a 20	D'1,25 a 20
Banda de l'espectre (GHz)	De 2,4 a 5,8	De 2 a 6	2	2
Mètode d'accés	OFDMA	OFDMA	OFDMA SC-FDMA	OFDMA CDMA
Mode dúplex		FDD, TDD	FDD, TDD	FDD, TDD
Mobilitat	Baixa	Baixa/ mitjana	Alta	Alta
Domini	Àrea local	Àrea àmplia (àrea metropolitana)	Àrea àmplia (àrea metropolitana)	Àrea àmplia (àrea metropolitana)

9. H. EKSTROM *et al.*, «Technical solutions for the 3G long-term evolution», *IEEE Comm. Magazine* (març 2006).

10. D. ASTELY *et al.*, «A future radio-access framework», *IEEE JSAC* (març 2006).

## Salts tecnològics emprats en la 4G

Entre els diferents salts tecnològics en l'àmbit de les radio-comunicacions que la 4G incorpora per fer possible l'augment de les velocitats de transmissió, tot mantenint la densitat de desplegament de les estacions base equivalents a la 3G, cal ressaltar el paper reservat, per un banda, als sistemes MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) i als sistemes basats en les anomenades *antenes intel·ligents* i, per altra banda, en l'ús extensiu que es farà de la tecnologia d'accés OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) (present en la taula 1), que a continuació descrivim molt breument.

La tecnologia MIMO incorpora múltiples antenes connectades a l'emissor i receptor tal com indica la figura 5a per a  $M$  antenes transmissores i receptores. La informació que s'ha de transmetre es distribueix entre aquestes antenes i la tecnologia explota la separabilitat entre els diferents camins de propagació o múltiples reflexions que la presència d'obstacles inevitablement acaba introduint en un entorn de comunicacions mòbils. És com si on hi havia solament una carretera amb un carril es passés a tenir una autopista amb  $M$  carrils de circulació. En la mateixa figura 5a es mostra la capacitat que s'assoleix en les noves condicions, entesa com a màxima velocitat de transmissió sense errors en recepció, a la qual idealment podríem arribar emprant els codificadors i les tecnologies de transmissió adients. En un model idealitzat del canal de radiocomunicacions entre emissor i receptor la capacitat d'aquest canal en funció de la relació potència de senyal a potència de soroll podria arribar a ser  $M$  vegades més gran que en un sistema convencional amb només una antena per a una determinada amplada de banda  $B$ , i sense necessitat d'augmentar la potència de senyal rebuda o, el que és equivalent, disminuir la distància del radi de cobertura de les estacions base. Naturalment la capacitat és una fita superior però tot i això la tecnologia MIMO ens indica el camí que cal seguir per obtenir eficiències espectrals, enteses com a nombre de bit/s per Hz de banda, molt més altes. Aquest fet és molt important perquè mantenint els mateixos emplaçaments que en el sistema 3G i la mateixa potència en emissió podem augmentar la velocitat del senyal. Cal afegir que la millora en la velocitat de transmissió adquirida pot ser més elevada que el valor  $M$  del nombre

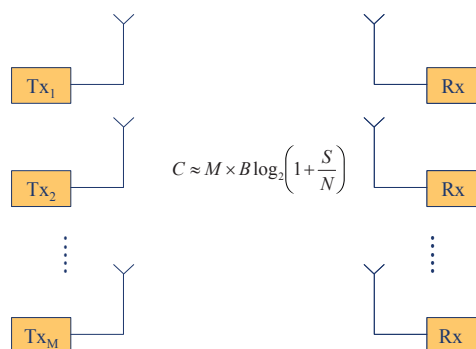


FIGURA 5a. Arquitectura MIMO.

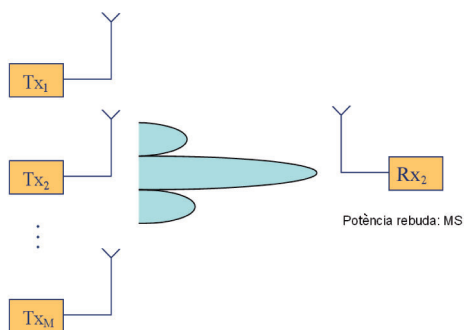


FIGURA 5b. Arquitectura agrupació intel·ligent d'antenes en emissió.

d'antenes, si tenim present que la introducció de noves tècniques de codificació com LDC<sup>11</sup> i de tractament basant-se en un ús extensiu de modulacions adaptatives fa que se sigui més a prop de la fita que marca l'expressió de la capacitat del que podíem ser-hi fa més de deu anys enre-re. De manera similar es poden emprar sistemes d'antenes en emissió formant una agrupació de  $M$  antenes tal com es veu en la figura 5b, que en aquest cas poden dirigir el diagrama de radiació resultant de l'agrupació cap a un mòbil en concret augmentant fins a  $M$  vegades el senyal rebut  $S$ . En aquest cas, i després de tractar el senyal emès distribuït entre les  $M$  antenes, el receptor amb una única antena pot combinar encara de manera òptima els diferents senyals aprofitant que presenten propietats de propagació diferenciades.

La tecnologia OFDMA és una tècnica d'accés que, a base de dividir la banda total disponible  $B$  en moltes  $N$  subbandes d'amplada  $B_u$  molt més petita, de manera que  $B = NB_u$ , ens permet combatre molt millor els problemes derivats de la variabilitat de la resposta del canal en diferents freqüències. És a dir, si  $B_u$  és prou petita, en totes les freqüències dins de  $B_u$ , el canal es comporta igual i una elevada font de degradació com és la interferència intersimbòlica, deguda a la resposta selectiva del canal amb la freqüència, no apareix. D'aquesta manera no solament es poden transmetre velocitats de transmissió molt elevades en el conjunt de la banda  $B$  total, sinó que elegint un nombre més o menys elevat de subbandes podem configurar tota mena de possibles velocitats de transmissió. Aquest fet permet que puguin conviure perfectament serveis de banda ampla amb altres de convencionals.

Acceptant que amb la mateixa o similar infraestructura de radiocomunicacions i costos d'equipament podem edificar la 4G, els salts tecnològics desplacen el que s'anomenen *corbes d'igual cost* cap a la dreta en la figura 6, on es mostra el binomi velocitat (en bit/s) - cobertura de manera esquemàtica. És a dir, la 4G pretén, tot mantenint el mateix cost que els sistemes actuals, fer un salt cap endavant en

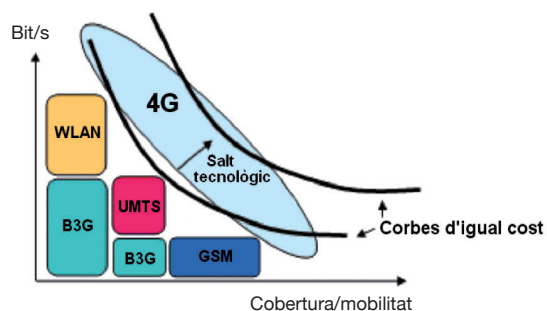


FIGURA 6. Corbes d'igual cost.

prestacions sigui augmentant la cobertura per a una mateixa velocitat o sigui augmentant la velocitat per a la mateixa cobertura.

Encara que cal esperar per poder veure quin és el comportament assolit en la pràctica, estudis realitzats<sup>12</sup> indiquen que velocitats tan elevades com les inicialment preconitzades de 100 Mbit/s en exteriors amb elevada mobilitat i 1 Gbit/s en interiors en zones de baixa mobilitat són assolibles. És de preveure, no obstant això, que les bandes de freqüència emprades que poden ser fins a uns 5 GHz, per tant més elevades que les actuals, i la presència d'entorns de propagació no considerats, per exemple interiors d'edificis, faran difícil poder mantenir la densitat d'estacions base del desplegament UMTS, raó per la qual ja s'ha identificat una nova estratègia basant-se en nous tipus de repetidors del senyal *Relay Nodes* o *Hop-Relay*. Aquests repetidors, que poden esbrinar les estructures de dades que els travessen, permeten eliminar els possibles forats de cobertura amb un cost molt més reduït que els de les estacions base. El concepte de *Relay Node* fins i tot és aplicable a un mateix terminal d'usuari que pot fer a la vegada de repetidor del senyal rebut augmentant la cobertura amb un cost reduït. En la figura 7a es pot veure un esquema d'aquest concepte, on les estacions base pegen d'una xarxa troncal (*backbone network*) basada en Internet que les manté connectades entre si i amb al resta del sistema 4G. Els mateixos terminals poden actuar també de repetidors, emprant fins i tot estructures mallades d'interconnexió. Bé siguin en for-

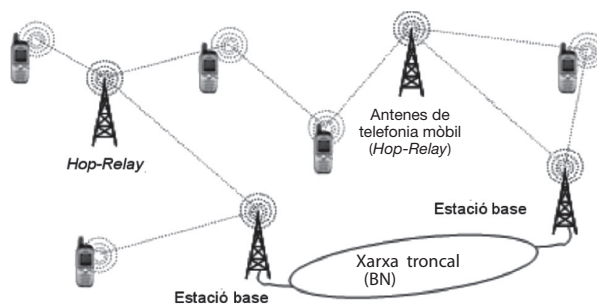


FIGURA 7a. Desplegament d'antenes de base i repetidors en sistemes 4G.

11. D. ASTELY *et al.*, «A future radio-access framework», *IEEE JSAC* (març 2006).

12. D. ASTELY *et al.*, «A future radio-access framework», *IEEE JSAC* (març 2006).

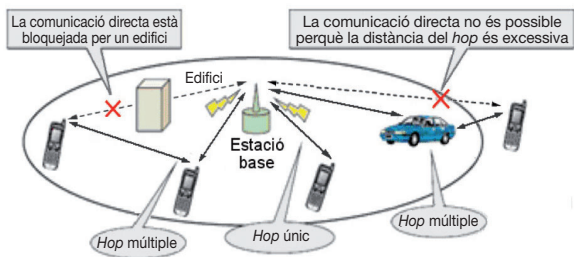


FIGURA 7b. Escenaris de propagació i repetidors.<sup>13</sup>

ma de repetidors dedicats o en forma de terminals activats com a repetidors, el concepte de *Hop-Relay* és bàsic per estendre la cobertura en forats de recepció molt limitats i habitualment emprant potència reduïda. En la figura 7b es poden veure exemples concrets de l'ús d'aquests repetidors.

La viabilitat econòmica de la 4G, tenint present les turbulències sofertes en la implantació de la 3G, ha estat un motiu d'interès per a la Comunitat Europea, que ha engegat estudis de viabilitat econòmica en aquest sentit. Més específicament, tal com es pot trobar al lloc web <http://fms.jrc.es>, s'ha fet un estudi de model de negoci de la 4G sobre la base d'un país imaginari amb una població de 46.000 habitants, on el 50 % de la gent viu en zones urbanes, el 35 % en zones suburbanes i el 15 % en zones rurals, amb un 90 % de cobertura i suposant tres anys per al desplegament de la xarxa. En aquest escenari, que preveu un desplegament com l'indicat en la figura 7a, amb *Hop-Relays* i estacions base, l'estudi conclou bàsicament que cal un mínim d'ingressos mitjans per usuari ARPU (*Average Revenue per User*) d'entre 15-19 euros per fer sostenible un model de negoci en 4G, i sense tenir en compte els costos derivats de l'ús d'una llicència per l'espectre de ràdio. Un cop més els costos de l'espectre, i en particular la bona utilització que se'n faci, sembla que seran un dels principals eixos en clau de mercat per assegurar la viabilitat econòmica de la 4G en el període previst. En aquest sentit ja és oficial la formació d'un *lobby 4G Next Generation Mobile Network* (NGMN), fòrum format per sis dels operadors més grans: Vodafone, T-Mobile, Orange, KPN, NTT DoCoMo i China Mobile, als quals segurament s'afegiran d'altres. L'objectiu és evitar repetir els enormes costos en forma de cànon per utilització de l'espectre, que en molts països els governs van instrumentalitzar per adjudicar les llicències de 3G en una possiblement desafortunada decisió de la qual es va ressentir almenys tot el sector de les TIC. Certament avui dia encara hi ha un problema i és que els reguladors europeus no permeten la migració de tecnologies més avançades com la 4G a altres bandes, com

13. N. UMEDA, T. OTSU i T. MASAMURA, «Overview of the fourth-generation mobile communication system», *NTT Technical Review* (setembre 2004).

14. <<http://www.ofcom.org>>.

per exemple les bandes GSM actuals de 900 MHz. I encara més, als Estats Units els operadors no han de comprar nou espectre per proporcionar serveis com WIMAX i altres semblants a Europa. Aquest fet, juntament amb l'escassetat d'espectre per a noves aplicacions sense fils, lligat a més a l'ús molt poc eficient que es fa de l'espectre ja assignat, ha fet que actualment s'hagi engegat un fort corrent d'opinió que preconitza una nova manera de fer l'assignació de freqüències de radio als diferents serveis de radiocomunicacions existents.<sup>14</sup>

## Aplicacions

Com és prou conegut, l'èxit de les successives etapes evolutives de les comunicacions mòbils, i en particular de la 4G, rau en el fet que aquestes tecnologies trobin ressò en la societat mitjançant un ús massiu d'aquestes. Són molts els factors no estrictament tecnològics que intervenen en aquest punt. Hem vist que a la 3G li està costant molt penetrar en el mercat. Es pensava que la videotelefonía seria una aplicació definitiva (*killer application*) per a l'enlairament definitiu de la 3G en emprar aquest servei un contingut natiu, similar al servei de veu que, sense cap mena de dubte, va catapultar la 2G. En qualsevol cas sembla clar sobre el paper, i com indica la figura 8 amb uns quants exemples d'aplicacions massives o de gran públic, que les comunicacions 4G presenten unes possibilitats immenses. Un exercici tan quotidià com assistir a una activitat lúdica es farà tant o més simple de gestionar per l'usuari com enviar un SMS. L'usuari no serà conscient de tots els passos intermedis. Vehicular la creativitat de l'usuari serà segurament també un component important de l'èxit que pugui assolir la 4G. Pensem en aquest sentit en l'actual fenomen YouTube, entre d'altres, en el món Internet. De fet, un dels problemes tradicionals de planificació de les xarxes de comunicacions actuals era adequar el seu desplegament a la asimetria de trànsit originada per un volum més elevat de trànsit cursat entre l'enllaç descendent (des de la xarxa fins al terminal mòbil) que en l'enllaç ascendent (des del terminal mòbil fins a la xarxa). L'explicació cal cercar-la en una acti-



FIGURA 8. Projeccions d'algunes aplicacions fins a la 4G.

tud simplement consumidora de continguts de l'usuari mòbil. La tendència actual a la creació per part de l'usuari dels seus propis continguts, així com a l'intercanvi d'informació en general, com és el cas de videoclips musicals, està portant a l'explosió d'un nou paradigma: P2P (*Peer to Peer*). En aquest escenari el trànsit ascendent i el descendent s'igualen, la qual cosa està obligant a esbrinar un nou model en el desplegament de les xarxes i a un replantejament del propi model de negoci. Finalment, hi ha també en la figura 8 un altre apartat identificat com a jocs interactius, que podríem estendre a qualsevol altra aplicació en què el temps de resposta ha de ser molt curt, i que la durada inferior a 10 ms emprada en la connectivitat dels usuaris farà possible. D'una manera més concreta, la figura 9 il·lustra algunes de les aplicacions previstes per DoCoMo, que sembla que serà el primer operador a oferir serveis 4G.

		Remitent	
		Persona	Màquina
Receptor	Persona	VoIP Videòfon/videoconferència Jocs interactius Xat Missatges visuals/d'àudio Correu de text	Repetidor de vídeo Supervisió de vídeo Navegació Cerca Internet Servei d'informació Descàrrega de música
	Màquina	Control remot Gravació en dispositius de memòria: veu, vídeo, etc.	Serveis de localització d'informació, sistemes de distribució, etc. Transferència de dades Manteniment de dispositius electrònics de consum

Soport per a serveis en temps real i temps no real

FIGURA 9. Aplicacions que impliquen tant persones com màquines en la 4G.  
 FONT: NTTDoCoMo.

Certament són moltes més les aplicacions que avui dia es pot imaginar que la 4G farà possibles. Finalment cal esmentar totes aquelles aplicacions de context. És a dir, portant a l'extrem les aplicacions identificades, podríem imaginar un usuari en el món 4G ple de minúsculs sensors/actuadors de cap a peus, on, a tall d'exemple, les ulleres incorporessin pantalles i càmeres digitals en miniatura, les camises (entre altres tipus de roba) estiguessin fetes de flexible *high-tech* plàstic que canviessin de disseny gràcies a les micropantalles de televisió incrustades, publicitat personalitzada que ens arribaria en els diferents centres comercials quan ens apropéssim al punt de venda corresponent, etc. En la mateixa línia, encara que potser sense necessitat d'arribar a aplicacions que poden semblar una mica agosarades, encara que no impossibles a mitjà i llarg termini, hi ha tot un seguit d'informacions locals de context capturades en les immediacions de l'usuari, per exemple mitjançant minúsculs sensors implantats en la pròpia roba, i transmeses pel terminal mòbil 4G a la seva destinació final de tractament de dades. Aquest podria ser el cas, fins i tot sense el coneixement explícit del mateix usuari, de presa de mesures biomèdiques de control i la seva transmissió cap a un centre de tractament i control de pacients.

Ja per concloure podríem resumir la 4G com la nova generació de comunicacions mòbils que ens ha de permetre una comunicació total integrant ja no solament veu i dades a velocitats fins fa poc inimaginables, sinó també el fet de vehicular totes aquelles informacions de context que ens envolten en un nou paradigma de comunicació total. ■