
 <p>MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO</p>	<p>Estudio de requisitos técnicos que permitan caracterizar la cobertura con tecnología LTE</p>	 Top optimized Technologies
--	---	---

Estudio sobre los requisitos técnicos que permitan caracterizar la cobertura con tecnología LTE necesaria para proporcionar determinados servicios de datos

Estudio realizado por Top Optimized Technologies para la Dirección General de
Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información (<http://www.optimizedtech.net>)

ÍNDICE

1	Introducción	4
2	Fundamentos básicos de la tecnología	6
2.1	Fundamentos básicos de HSPA	6
2.1.1	Categoría de terminales	7
2.2	Fundamentos básicos de LTE	9
2.2.1	Modos TDD/FDD	11
2.2.2	Técnicas multiantena (MIMO).....	12
2.2.3	Categoría de terminales	13
2.2.4	LTE- Advanced	14
2.2.5	Análisis prospectivo sobre la disponibilidad y prestaciones de terminales que soporten la tecnología LTE y LTE-A.....	15
3	Requisitos técnicos de cobertura utilizados en la normativa española y de otros países	18
3.1	Requisitos en España	18
3.2	Requisitos por países.....	19
4	Definiciones previas aplicables a los requisitos técnicos de cobertura	24
4.1	Definición de velocidad de datos	24
4.2	Tipo de escenario	24
4.3	Tipo de terminal	25
4.4	Definición de nivel de señal requerida.....	25
4.5	Disponibilidad de cobertura	26
4.6	Banda de frecuencias y ancho de la banda	27
4.7	LTE- Advanced	27
5	Modelo de cálculo de enlace	29
5.1	Detalle del modelo de cálculo de HSPA	30
5.1.1	Conversión entre SINR y velocidad (tasa) alcanzable	32
5.1.2	Resumen de parámetros de transmisión	35
5.1.3	Pérdidas por penetración de interiores	35
5.1.4	Margen de interferencia	35
5.2	Detalle del modelo de cálculo de LTE.....	37

5.2.1	Conversión entre SINR y velocidad alcanzable. Modelo de Shannon.....	38
5.2.2	Resumen de parámetros de transmisión	41
5.2.3	Pérdidas por penetración en interiores	41
5.2.4	Margen de interferencia	42
5.3	Detalles del modelo comunes a ambas tecnologías	42
5.3.1	Ganancia antena receptora.....	42
5.3.2	Figura de ruido	42
5.3.3	Ganancia MIMO	43
5.3.4	Margen por desvanecimiento	43
5.3.5	Modelo de carga.....	45
5.3.6	Velocidad media diaria.....	46
5.3.7	Modelos de Propagación.....	46
6	Umbral técnico necesario	48
6.1	Nivel de servicio y de señal recibida en el acceso a Internet de banda ancha mediante redes móviles 3,5G (HSPA).....	48
6.2	Nivel de servicio y de señal recibida en el acceso a Internet de banda ancha mediante redes móviles 4G (LTE).....	49
6.2.1	Velocidades alcanzables del acceso a Internet de banda ancha mediante redes móviles 4G (LTE) para los niveles de señal recibida utilizados.....	49
6.2.2	Variación de las velocidades alcanzables del acceso a Internet de banda ancha mediante redes móviles 4G (LTE) en función de la banda de frecuencias.....	50
6.2.3	Niveles de potencia recibida para alcanzar determinadas velocidades usuario del acceso a Internet de banda ancha mediante redes móviles 4G (LTE) con antena externa (CPE).....	51
6.2.4	Velocidades alcanzables del acceso a Internet de banda ancha mediante redes móviles 4G (LTE) en modalidad TDD para determinados niveles de señal recibida	51
7	Referencias y bibliografía.....	53

1 INTRODUCCIÓN

El presente informe recoge los resultados del estudio realizado por Top Optimized Technologies para la Secretaría de Estado de Telecomunicaciones y para la Sociedad de la Información (SETSI) relativo al análisis e identificación de los requisitos técnicos necesarios para determinar la cobertura LTE para servicios de banda ancha.

Este estudio se ha concretado en la elaboración de un modelo de cálculo que permite obtener los niveles de señal recibida necesarios para ofrecer una velocidad de usuario determinada, o recíprocamente, las velocidades de usuario alcanzables dado un cierto nivel de de señal recibida. Todo ello para unas condiciones de red y servicio previamente parametrizadas para cada uso, de acuerdo con las recomendaciones y orientaciones que se incluyen.

Asimismo, aunque el objetivo principal de este estudio se centra en la caracterización de la cobertura de las tecnologías LTE y su evolución LTE Advanced (LTE-A), se han extendido los modelos elaborados a la tecnología 3,5G-HSPA. De esta forma se posibilita determinar los niveles de servicio alcanzados con los umbrales de señal recibida utilizados con HSPA y poderlos usar como referencia para determinar umbrales equivalentes en LTE.

El informe se estructura en torno a dos grandes bloques:

- Un resumen tecnológico de HSPA, LTE y LTE-Advanced, incluyendo la normativa referente a requisitos y niveles utilizados en otros países de la UE.
- Elaboración de un modelo de cálculo a partir del análisis anterior que sirva como base para la identificación de los requisitos técnicos adecuados para cada uso o tipo de cobertura.

El informe está orientado como soporte a las actividades de la Dirección General de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información. En este sentido se ha tenido en cuenta su aplicación a las siguientes actividades:

- **Elaboración de mapas de la cobertura de banda ancha en España.** La Dirección General de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información elabora desde 2012 un mapa detallado de la cobertura de banda ancha en España que permite conocer la situación de disponibilidad de la misma para cada tipo de tecnología de red (ADSL, VDSL, WiMax, HFC-Docsis 3.0, Fibra óptica-FTTH, 3,5G-HSPA, 4G-LTE). Este mapa se elabora a partir de los datos suministrados por los operadores, a los que se les requiere, respecto a las tecnologías móviles, que informen sobre el porcentaje estimado de población cubierta para los que el nivel de señal recibida medido a pie de calle supera unos ciertos umbrales. El modelo generado permite definir umbrales para 4G consistentes con los niveles utilizados en 3,5G.
- **Identificación de niveles de señal LTE para el cumplimiento de los compromisos adquiridos por los operadores adjudicatarios de la banda de 800 MHz.** Los operadores que resultaron adjudicatarios en subasta pública de 10 MHz pareados en la

banda de 800 MHz se comprometieron a completar conjuntamente, antes del 1 de enero de 2020, una cobertura que permita el acceso a una velocidad de 30 megabits por segundo (Mbps) o superior, al menos, al 90 por ciento de los ciudadanos de unidades poblacionales de menos de 5.000 habitantes. El modelo generado servirá como referencia para identificar el nivel de señal recibida con tecnología LTE que posibilita dicha velocidad.

- **Seguimiento de los objetivos de la Agenda Digital.** La Agenda Digital para España tiene como objetivo que para el año 2020 todas las personas puedan disponer de servicios de acceso a Internet con velocidades por encima de los 30 megas. Adicionalmente, la nueva Ley General de Telecomunicaciones, aprobada el 29 de abril de 2014, establece como objetivo que en el año 2017 se alcance una velocidad mínima de Internet de 10 Mbps. Se incluye en este informe el cálculo específico de los umbrales de señal recibida que posibilitan las velocidades de usuario de 1, 10 y 30 Mbps.
- **Valoración técnica de proyectos.** El modelo generado podrá ser usado en la evaluación de los proyectos de solicitud de ayudas presentados por las operadoras para programas de extensión de banda ancha.

La variedad de usos hace importante contar con un modelo flexible que permita modificar los parámetros asociados a las condiciones aplicables para adaptarlos a la finalidad específica de cada caso. Por ejemplo, los objetivos de velocidad de usuario para el seguimiento de los objetivos de la Agenda Digital o para la elaboración de los informes de cobertura de la banda ancha en Europa por la Comisión Europea son muy dispares. Por esta razón se ha implementado el modelo como una hoja de cálculo para permitir la máxima versatilidad. No obstante, en este informe sólo se reflejan los resultados de los escenarios más evidentes de acuerdo a los usos descritos anteriormente.

El informe se estructura de forma que en el apartado 2 se describen los fundamentos básicos de LTE y HSPA, centrándose en aquellos conceptos que se utilizarán en el resto del documento. El apartado 3 recopila la utilización de requisitos de cobertura utilizados en la normativa española y en la de otros países de la UE. En el apartado 4 se realizan unas definiciones previas aplicables a los requisitos técnicos, condiciones de medida y disponibilidad de cobertura.

En los apartados 5.1 y 5.2 se detallan los modelos de cálculo del enlace descendente de HSPA y LTE respectivamente. Mediante la aplicación de estos modelos, posteriormente en el apartado 5.3, se calculan las velocidades correspondientes a los umbrales de señal recibida utilizados en ambas tecnologías para elaborar los actuales mapas de cobertura.

2 FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LA TECNOLOGÍA

2.1 FUNDAMENTOS BÁSICOS DE HSPA

Como respuesta a una mayor demanda de datos móviles nació HSPA (*High Speed Packet Access*), también denominada 3,5G, una evolución tecnológica de UMTS (3G). En HSPA se engloban una serie de mejoras orientadas al enlace descendente, conocidas como HSDPA, y otras al enlace ascendente (HSUPA). En este apartado nos referiremos únicamente a características del enlace descendente.

A diferencia de los canales de datos de UMTS que son dedicados para cada usuario, HSDPA se basa en la conmutación de paquetes sobre un canal compartido. Esta evolución aumenta de manera significativa la capacidad máxima de transferencia de información, alcanzando velocidades teóricas de hasta 14,4 Mbps para la Release 5 en la que se introdujo. Esto se consigue gracias al incremento de eficiencia espectral por usar modulación de mayor orden (Modulación de Amplitud en Cuadratura 16 QAM), tasa variable de codificación, *Fast Packet Scheduling* y redundancia incremental HARQ (*Hybrid Automatic Repeat-Request*).

Posteriormente, HSPA siguió evolucionando en las sucesivas releases del 3GPP. En la Release 7 se introdujeron nuevas mejoras como las técnicas multiantena (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*) y modulación de 64QAM, que permiten una velocidad máxima de 21 Mbps. En la Release 8 se introdujo la agregación de dos portadoras radio de 5 MHz, conocida como *Dual Carrier*, pudiendo alcanzar teóricamente 42 Mbps de velocidad de datos para las redes y terminales que implementen esta funcionalidad.

HSDPA implementa un nuevo canal dentro de W-CDMA llamado HS-DSCH (*High Speed Downlink Shared Channel*). Este **canal de transporte es compartido entre todos los usuarios** y se materializa en varios canales físicos HS-PDSCH, hasta un máximo de 15. HSDPA, como parte del estándar UMTS, emplea la tecnología de acceso radio WCMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) de acceso múltiple por división de código de banda ancha, que consiste en emplear códigos expansores ortogonales como firmas para cada señal. De esta manera, cada canal físico HS-PDSCH emplea su propio código y puede ser separado del resto de los canales.

Un mismo usuario hará uso de varios canales HS-PDSCH en función del formato de transporte empleado y la categoría del terminal. Es el planificador de la estación base, conocida como NodoB en 3G, el que asigna los canales HS-PDSCH al usuario o usuarios planificados en cada subtrama (2 ms). Esta planificación en el dominio del tiempo tiene en cuenta no sólo el estado del canal, sino la equidad entre usuarios y posibles restricciones de retardo.

En HSDPA el formato de transporte que se puede utilizar con cada usuario se determina a partir de un indicador de calidad del canal que reporta el móvil a la base llamado CQI (*Channel Quality Indicator*). El CQI tiene a su vez el objetivo de maximizar la velocidad de datos alcanzada mediante la adaptación de la comunicación al enlace radio, esto es, modificando el esquema de transmisión en función del estado del canal para conseguir la máxima eficiencia. A diferencia de UMTS, en HSPA la potencia de transmisión no se adapta a los desvanecimientos

del canal radio. Por el contrario, se puede considerar que **HSDPA utiliza toda la potencia remanente del NodoB** (descontando la potencia empleada por los canales comunes y dedicados, empleados para ofrecer servicio de voz y servicio de datos a terminales sin HSPA), haciendo que éste transmita a máxima potencia.

El CQI que elige el móvil depende de las condiciones de canal radio que mida mediante las señales de referencia o piloto. Este nivel de piloto en 3G se conoce como RSCP (*Received Signal Code Power*) y se mide sobre el canal CPICH (*Common Pilot Channel*). El CPICH se emplea también para descubrir nuevas células y realizar traspasos, por lo que su nivel determina la cobertura de la célula. Habitualmente su potencia se encuentra entre un 5% y un 15% de la potencia máxima del Nodo B, siendo un valor típico el 10%.

Existen 30 CQIs definidos para HSDPA según [1]. Cuando las condiciones de canal son más favorables los CQIs mayores aportan mejor eficiencia a la comunicación mientras que los CQIs inferiores aportan la robustez necesaria en condiciones adversas de canal.

El tamaño del bloque de transporte empleado viene determinado por el CQI que reporte el terminal así como por su categoría de terminal HSPA. Un smartphone actual ya llega a la categoría 24 por lo que su velocidad teórica máxima de datos HSDPA sería de 42 Mbps empleando agregación de portadoras [2].

2.1.1 Categoría de terminales

Asociado a las tablas de CQI que puede emplear un terminal móvil está su categoría de terminal HSPA. A partir de la Release 9 en la especificación [2], se definen más de 30 categorías de terminales HSPA en función del número máximo de códigos HS-DSCH empleados en paralelo (5, 10 o 15), el orden de modulación soportado, si soporta agregación de portadoras radio (*dual carrier*) y su compatibilidad con técnicas MIMO.

3GPP Release	Category	Max. number of HS-DSCH codes	Modulation	MIMO, Multi-Cell	Max.data rate[Mbit/s]
Release 5	1	5	16-QAM		1,2
Release 5	2	5	16-QAM		1,2
Release 5	3	5	16-QAM		1,8
Release 5	4	5	16-QAM		1,8
Release 5	5	5	16-QAM		3,6
Release 5	6	5	16-QAM		3,6
Release 5	7	10	16-QAM		7,2
Release 5	8	10	16-QAM		7,2
Release 5	9	15	16-QAM		10,1
Release 5	10	15	16-QAM		14,0
Release 5	11	5	QPSK		0,9

3GPP Release	Category	Max. number of HS-DSCH codes	Modulation	MIMO, Multi-Cell	Max.data rate[Mbit/s]
Release 5	12	5	QPSK		1,8
Release 7	13	15	64-QAM		17,6
Release 7	14	15	64-QAM		21,1
Release 7	15	15	16-QAM	MIMO 2x2	23,4
Release 7	16	15	16-QAM	MIMO 2x2	28,0
Release 7	17	15	64-QAM		17,6
		15	16-QAM	MIMO 2x2	23,4
Release 7	18	15	64-QAM		21,1
		15	16-QAM	MIMO 2x2	28,0
Release 8	19	15	64-QAM	MIMO 2x2	35,3
Release 8	20	15	64-QAM	MIMO 2x2	42,2
Release 8	21	15	16-QAM	Dual-Cell	23,4
Release 8	22	15	16-QAM	Dual-Cell	28,0
Release 8	23	15	64-QAM	Dual-Cell	35,3
Release 8	24	15	64-QAM	Dual-Cell	42,2
Release 9	25	15	16-QAM	Dual-Cell + MIMO 2x2	46,7
Release 9	26	15	16-QAM	Dual-Cell + MIMO 2x2	55,9
Release 9	27	15	64-QAM	Dual-Cell + MIMO 2x2	70,6
Release 9	28	15	64-QAM	Dual-Cell + MIMO 2x2	84,4
Release 10	29	15	64-QAM	Triple-Cell	63,3
Release 10	30	15	64-QAM	Triple-Cell + MIMO 2x2	126,6
Release 10	31	15	64-QAM	Quad-Cell	84,4
Release 10	32	15	64-QAM	Quad-Cell + MIMO 2x2	168,8
Release 11	33	15	64-QAM	Hexa-Cell	126,6
Release 11	34	15	64-QAM	Hexa-Cell + MIMO 2x2	253,2
Release 11	35	15	64-QAM	Octa-Cell	168,8
Release 11	36	15	64-QAM	Octa-Cell + MIMO 2x2	337,5
Release 11	37	15	64-QAM	Dual-Cell + MIMO 4x4	168,8
Release 11	38	15	64-QAM	Quad-Cell + MIMO 4x4	337,5

Tabla 1: Categorías de terminales HSPA

Estas velocidades son las teóricas alcanzables pero las reales netas serán inferiores debido a sobrecarga de señalización de protocolos en las capas de aplicaciones.

2.2 FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LTE

La tecnología **LTE** (*Long-Term Evolution*), ha sido desarrollada en los últimos años con vocación de convertirse en la cuarta generación de las comunicaciones móviles. Está orientada a datos y basada en una arquitectura de conmutación de paquetes “todo IP”. Los principales objetivos marcados en su desarrollo fueron alcanzar elevadas eficiencias espectrales (5 bits/s/Hz en el enlace descendente y la mitad en el ascendente) y flexibilidad en la asignación de frecuencias. Los factores que han impulsado su aparición son tanto las crecientes necesidades del mercado como las posibilidades que brindan los avances tecnológicos.

En cuanto a la transmisión del **enlace descendente de LTE**, se emplea acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Access*), en la que la banda de transmisión se divide en un gran número de subportadoras moduladas con un pequeño ancho de banda (15 KHz) y ortogonales entre sí como muestra la Figura 1. OFDMA es una tecnología muy adecuada para alcanzar altas velocidades máximas de datos cuando se emplea un gran ancho de banda.

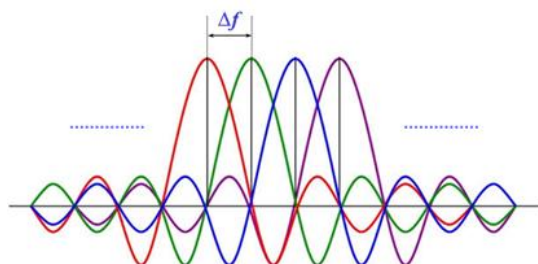


Figura 1: Portadoras radio ortogonales en LTE gracias a la modulación OFDM

Aunque las subportadoras sean ortogonales entre sí y teóricamente pueden ser transmitidas sin que se produzcan interferencias entre ellas, la dispersión temporal del canal elimina esta ortogonalidad. Para solucionarlo, se introduce un prefijo cíclico (copia de la última parte del símbolo OFDM antes del comienzo de éste). Con esto se consigue mantener la ortogonalidad entre subportadoras en presencia de dispersión temporal.

Una característica fundamental del esquema OFDM es que permite transmitir a un usuario distinto en cada subportadora, por lo que la planificación de usuarios se hace tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia pudiendo aprovechar las mejores condiciones de canal en cada momento.

En cuanto al enlace ascendente, sin embargo, un enfoque de OFDMA puro da lugar a una relación pico a promedio (*PAPR*) de la señal elevada, lo que compromete la eficiencia de potencia y la vida útil de la batería. De ahí que LTE utilice un enfoque para el enlace ascendente distinto llamado FDMA de una portadora (*SC-FDMA, Single Carrier FDMA*), que se asemeja en parte a OFDMA, pero tiene una ventaja de emplear menor potencia de pico.

LTE, al igual que WCDMA, tiene reuso frecuencial 1, es decir todas las células emplean todo el ancho de banda disponible para realizar sus transmisiones. Sin embargo, mientras que WCDMA emplea códigos para distinguir las distintas transmisiones, LTE consigue evitar la

interferencia **intracelular** gracias al esquema de transmisión OFDM. También de forma similar a WCDMA, al emplear todas las células las mismas frecuencias en sus transmisiones, se producen interferencias **intercelulares** entre células vecinas. Para mitigar el efecto de interferencia entre vecinas se pueden emplear estrategias de coordinación de interferencias (*Inter-cell interference coordination, ICIC*) entre los distintos nodos de la red para reducir la degradación de prestaciones en borde de célula. Estas estrategias no están muy desarrolladas actualmente en LTE, aunque se espera que evolucionen más en LTE-A.

Al igual que en HSPA, en LTE se emplea la realimentación del estado del canal radio a través del indicador CQI que reporta el móvil a la estación base, conocida como eNodeB en 4G. Este CQI determina el **esquema de modulación y codificación adaptativas (AMC)** que se emplea en la comunicación y consigue la adaptación adecuada de la comunicación a las condiciones del enlace radio manteniendo la potencia constante en el transmisor. Hay 15 CQIs definidos en LTE [3] asociados cada uno de ellos a una modulación y un formato de transmisión determinado, cuanto mayor CQI más eficiente será la modulación a emplear y más tasa de datos obtiene el usuario. Al igual que en HSPA, el CQI se escoge atendiendo a las condiciones radio que se midan en la señal de referencia, principalmente medida como la relación señal a ruido o la RSRQ.

Hay varias medidas estandarizadas en LTE para determinar las condiciones radio, la RSRP (*Reference Signal Received Power*), la RSRQ (*Reference Signal Received Quality*) y la RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) que mide la potencia total recibida en la banda teniendo en cuenta interferencia y ruido. La RSRP mide el promedio de potencia por portadora LTE calculada sobre todas las señales de referencia, mientras que la RSRQ es un promedio de la potencia recibida sobre todo el ancho de medición:

$$RSRQ = \frac{N_{RBs} * RSRP}{RSSI} \quad (1)$$

Como se recoge en la especificación 3GPP [3] en la tabla 7.1.7.2.1-1, para LTE se definen distintos tipos de tamaño de bloque de transporte (en bits) en función del ancho de banda en número de *resource block (RBs)*. Cada uno de estos RBs se compone de 12 subportadoras LTE separadas 15 KHz como muestra la Figura 2, por lo que el ancho de banda ocupado por cada uno es de 180 KHz. Para calcular el número de RBs que caben en un cierto ancho de banda hay que tener en cuenta que del ancho de banda total disponible para la transmisión LTE un 10% se emplea en señalización, por lo que el ancho de banda efectivo para datos es del 90% del total disponible.

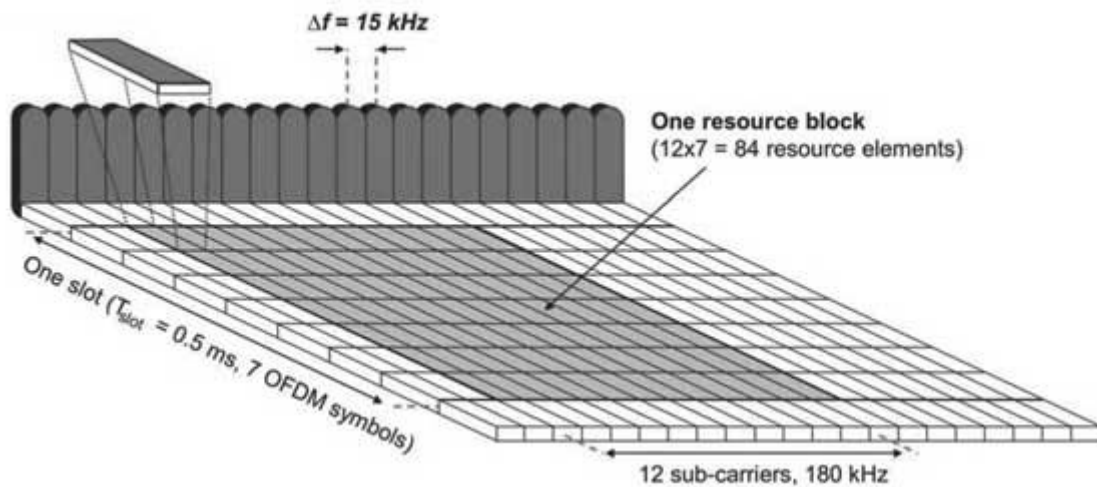


Figura 2: Recurso radio de transmisión tiempo-frecuencia (RB) en LTE

Los tamaños de bloque de datos de [3] son los que determinan la velocidad de datos del usuario LTE. Por poner algunos ejemplos y suponiendo solo una capa de transmisión (sin disponer de varias capas por las técnicas MIMO), en el caso de disponer de 10 MHz de ancho de banda, lo que se traduce en 50 RBs, el tamaño de bloque máximo (para un índice máximo de bloque de 27) es de 36696 bits. Como cada radiobloque se transmite en 1 ms (*Transmission Time Interval, TTI*), la velocidad neta máxima alcanzable por el usuario para un ancho de banda de 10MHz es de 36,7 Mbps.

En el caso de disponer de 20 MHz de ancho de banda, es decir 100 RBs, el tamaño de bloque máximo según [3] es de 75376 bits. Con un tiempo de transmisión de 1ms equivale a una velocidad máxima de usuario de 75,37 Mbps.

Es decir, sin disponer de técnicas de multiplexación MIMO la máxima tasa de datos para unos anchos de banda de 10 y 20 MHz es de 36 y 75 Mbps respectivamente.

2.2.1 Modos TDD/FDD

A nivel físico, LTE puede operar tanto en FDD (*Frequency Division Duplex*) como en TDD (*Time Division Duplex*). En FDD los enlaces descendente (*downlink, DL*) y ascendente (*uplink, UL*) ocupan cada uno una banda de frecuencias distinta (f_{DL} y f_{UL}). Por tanto, es posible transmitir simultáneamente en ambos enlaces, cuyas subtramas están alineadas. En TDD, por el contrario, ambos enlaces se transmiten en la misma banda ($f_{DL/UL}$), por lo que sólo se puede operar en uno de ellos al mismo tiempo. En este caso, en cada trama existen subtramas descendentes (D), ascendentes (U) y especiales (S) (una parte de la subtrama corresponde a cada enlace, más otra parte que queda vacía) que se van multiplexando en el tiempo dependiendo de la configuración establecida [4]. En la siguiente figura se muestran las configuraciones posibles de trama TDD.

Uplink/downlink configuration	Downlink-to-Uplink Switch-point periodicity	Subframe number									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Figura 3: Configuraciones de trama TDD

Cabe destacar que la velocidad final de cada enlace (ascendente o descendente) dependerá de la configuración escogida de número de subtramas para cada uno de los enlace dentro de cada trama, es decir, del porcentaje de tiempo de trama dedicado a cada uno de ellos. Las velocidades teóricas máximas se calculan de la misma manera que para el modo FDD y se aplica el porcentaje de subtramas dedicadas a cada enlace (DL y UL) sobre el tiempo total de trama de la configuración escogida de TDD. Normalmente las redes desplegadas emplean FDD, mientras que TDD de momento se aplica en nichos de mercado. Se estima que para el año 2018 TDD supondrá el 13% de las conexiones LTE [5].

2.2.2 Técnicas multiantena (MIMO)

LTE emplea **técnicas MIMO** relacionadas con el uso de múltiples antenas en transmisión y/o recepción. Esto supone añadir una dimensión espacial adicional que puede aprovechar la formación de canales estadísticamente independientes originados por el multitrayecto y mitigar el efecto del mismo, consiguiendo una mejora de las prestaciones del sistema y multiplicar la tasa del usuario final.

En función de la configuración utilizada se pueden tener distintas alternativas de técnicas multiantena:

- Aprovechamiento del multitrayecto para **multiplexación espacial**. Esta técnica aprovecha que se pueden establecer varios 'canales' paralelos entre la estación base y el terminal, obteniéndose un aumento en la tasa de datos sin tener que emplear un mayor ancho de banda. Para poder obtener beneficio de esta técnica es necesario que el canal radio sea rico en multitrayecto, y que los distintos trayectos lleguen al receptor con una relación señal a ruido alta.

Esta técnica permite crear L trayectos paralelos desacoplados de manera que se obtiene una ganancia en eficiencia espectral igual al número de caminos independientes L. El máximo número de caminos independientes será el mínimo entre antenas en transmisión y en recepción.

- Proveer a la transmisión de **diversidad espacial** mediante el procesamiento de señal para contrarrestar los desvanecimientos del canal radio. Esta diversidad proporciona una "ganancia de array" que se traduce en una mejora de la relación señal/ruido igual al

número de ramas disponibles N . Es decir, la ganancia de array coincide con el orden de diversidad N .

$$SINR_{div} = N * SINR \quad (2)$$

Otro efecto de las técnicas multiantena es que permiten dar forma al haz de radiación global (**beam-forming**) para maximizar la ganancia en la dirección en la que se encuentra el objetivo y favorecer el rechazo de interferencias.

En el caso de entorno suburbano o rural donde la multiplexación espacial no es posible debido a la alta correlación entre señales, los beneficios que se pueden obtener por técnicas multiantena serán debidos a los esquemas de diversidad de transmisión. En éstos últimos, la ganancia por disponer de un array de N antenas implica una ganancia de $10 \cdot \log(N)$ (dB) en relación señal a ruido en transmisión o recepción. Por ejemplo, se obtienen 3dB de ganancia con un esquema 2x2 y 6dB en el caso de un esquema 4x4.

2.2.3 Categoría de terminales

La especificación del 3GPP 36.306 [6] define para LTE un conjunto de categorías de terminal. Cada categoría se corresponde con un conjunto de funcionalidades soportadas para la comunicación entre el móvil y el eNodeB. El móvil informa a la red de su categoría, para que ésta sepa cómo puede comunicarse con él. Las diferencias entre categorías de terminal vienen dadas por el número de bloques de transporte que pueden recibir en un determinado intervalo de tiempo en el enlace ascendente y descendente, el número de flujos de transporte simultáneo (orden de MIMO), y el máximo tipo de modulación que soportan (16QAM, 64QAM).

La Release 8 de LTE distinguía entre 5 tipos de categorías de terminal alcanzando un máximo de 300Mbps de tasa de pico con la categoría 5. En las Releases correspondientes a LTE-Advanced, 10 y 11, se han definido 5 nuevas categorías de terminal sumando un total de 10 categorías. La Tabla 2 muestra las velocidades máximas tanto en el enlace descendente como en el ascendente para las distintas categorías suponiendo que se dispone de un ancho de banda de 20MHz.

3GPP release	User equipment category	Maximum L1 datarate downlink	Maximum number of DL MIMO layers	Maximum L1 datarate uplink
Release 8	Category 1	10,3 Mbit/s	1	5,2 Mbit/s
Release 8	Category 2	51,0 Mbit/s	2	25,5 Mbit/s
Release 8	Category 3	102,0 Mbit/s	2	51,0 Mbit/s
Release 8	Category 4	150,8 Mbit/s	2	51,0 Mbit/s
Release 8	Category 5	299,6 Mbit/s	4	75,4 Mbit/s
Release 10	Category 6	301,5 Mbit/s	2 or 4	51,0 Mbit/s
Release 10	Category 7	301,5 Mbit/s	2 or 4	102,0 Mbit/s
Release 10	Category 8	2,998,6 Mbit/s	8	1.497,8 Mbit/s
Release 11	Category 9	452,2 Mbit/s	2 or 4	51,0 Mbit/s
Release 11	Category 10	452,2 Mbit/s	2 or 4	102,0 Mbit/s

Tabla 2: Categorías de terminales LTE

Cabe destacar que estas velocidades de datos en la capa de transporte L1 se verán alteradas por la sobrecarga de los distintos protocolos, por la configuración de la red (ancho de banda, carga, etc.) y por la señalización; siendo las velocidades efectivas menores.

Para anchos de banda diferentes, o distinto número de flujos (MIMO) es necesario aplicar la misma relación de proporcionalidad entre ancho de banda y tasa máxima. En la siguiente tabla se resumen las velocidades para los principales anchos de banda:

Ancho de banda	DL		UL
	2x2	4x4	1x2
5 MHz	37 Mbps	72 Mbps	18 Mbps
10 MHz	73 Mbps	147 Mbps	36 Mbps
20MHz	150 Mbps	300 Mbps	75 Mbps

Tabla 3: Velocidades máximas en función del ancho de banda LTE

2.2.4 LTE- Advanced

En el año 2011 el 3GPP lanzó en la Release 10 de LTE una nueva propuesta de evolución para mejorar sus prestaciones, LTE Advanced o LTE-A, la cual incorpora una serie de mejoras que permiten elevar las tasas máximas. Entre las principales novedades de esta evolución se pueden citar:

- Agregación de portadoras, lo que permite que un usuario reciba en varias frecuencias simultáneamente.
- Configuraciones multiantena MIMO mejoradas que puede llegar hasta 8x8
- Introducción de estrategias coordinadas de transmisión/recepción multipunto entre nodos de la red (CoMP, *Coordinated multipoint transmission/reception*)
- Coordinación de interferencias avanzadas (ICIC) en el soporte de redes heterogéneas, minimizando las interferencias y colisiones entre redes micro y macrocelulares.

La mejora relativa a la agregación de portadoras radio consiste en la posibilidad de agregar hasta un total de 100 MHz de ancho de banda proveniente de un máximo de 5 portadoras (20 MHz por cada portadora) que pueden ser de distintas bandas no necesariamente contiguas. Al igual que ocurría con el *dual carrier* de HSPA, esto implica poder alcanzar unas tasas de usuario muy superiores a las obtenidas anteriormente por esta tecnología.

Estas mejoras introducidas en LTE-Advanced se traducen en un rendimiento de red superior al obtenido con LTE. En los documentos del 3GPP [7] y [8] se recogen los requerimientos en cuanto a velocidades y eficiencias espectrales acordados para LTE y LTE-A. En la Tabla 4 se muestra la comparación entre LTE y LTE-A de la velocidad alcanzable, tanto para valores teóricos como para simulaciones empleando un canal de referencia (Case 1: canal a 3 km/h y dos rayos):

			LTE	LTE-Advanced
Velocidad máxima (Mbps)	DL		300	1000
	UL		75	500
Eficiencia espectral máxima (bits/s/Hz)	DL		15	30
	UL		3,75	15
Velocidad de usuario (Mbps)*	DL	2x2	33,8	80,0
		4x4	53,4	123,3
	UL	2x2	14,8	40,0
		4x4	-	66,7
Eficiencia espectral (bits/s/Hz)*	DL	2x2	1,69	2,4
		4x4	2,67	3,7
	UL	1x2	0,74	1,2
		2x4	-	2
Velocidad de usuario en borde (Mbps)*	DL	2x2	1	2,3
		4x4	1,6	4,0
	UL	1x2	0,4	1,3
		2x4	-	2,3
Eficiencia espectral de usuario en borde (bits/s/Hz)*	DL	2x2	0,05	0,07
		4x4	0,08	0,12
	UL	1x2	0,02	0,04
		2x4	-	0,07

*3GPP Case 1

Tabla 4: Comparativa velocidades LTE y LTE-Advanced

Los valores de velocidad de usuario de borde indicados en la tabla se definen como el percentil del 5% de la distribución de las velocidades de la celda, lo que implica que los usuarios obtendrán una velocidad igual o superior a la indicada con una probabilidad del 95%.

Como se puede comprobar en la Tabla 4 las velocidades obtenidas tras realizar la simulación son inferiores a las máximas teóricas alcanzables.

Algunas previsiones indican que para 2020, el 50% de los usuarios de LTE se encontrarán en una red LTE-A [9].

2.2.5 Análisis prospectivo sobre la disponibilidad y prestaciones de terminales que soporten la tecnología LTE y LTE-A

El mercado de terminales LTE está avanzando muy rápidamente gracias al fuerte despliegue que está teniendo la tecnología en todo el mundo. Actualmente se han desplegado 288 redes LTE comerciales, distribuidas en 104 países, de las cuales 36 son LTE-TDD y el resto LTE-FDD [10].

A principios de 2014 existían 1240 modelos de terminal compatibles con LTE frente a los 680 del año anterior [11], incrementándose el número de fabricantes en un 44%. 455 de estos

terminales LTE son teléfonos inteligentes (*smartphone*), que son en un 99% de los casos compatibles con los estándares móviles anteriores (3G).

La mayor parte de los dispositivos lanzados son categoría 3, con hasta 100 Mbps de bajada (ej. Huawei Ascend G526, LG G2, Nokia Lumia 925) aunque existen ya 87 terminales de categoría 4, con hasta 150 Mbps (ej. Sony Xperia Z2, Nexus 5). Ya hay algunos terminales de categoría 6 anunciados o a la venta en algún país, siendo capaces de descargar 300 Mbps con tecnología LTE-A y agregación de portadoras, como son el Samsung Galaxy S5 LTE-A y el LG G3.

Es frecuente que un mismo modelo de móvil, sea sacado al mercado en sucesivas versiones según se mejora su categoría o en diferentes mercados, como ha ocurrido con el Apple iPhone 5 y Samsung Galaxy S5.

La tendencia es que la disponibilidad de terminales LTE será masiva durante los próximos años. Se prevé que para el año 2019 casi el 30% de las conexiones móviles serán conexiones de LTE según un informe que elabora todos los años Ericsson [12], ascendiendo a un total de 2600 millones de usuarios LTE.

Un estudio elaborado para el organismo de regulación de comunicaciones de Reino Unido (Ofcom) [13], muestra que el tiempo medio desde la finalización de una versión del estándar hasta la aparición de los primeros terminales comerciales es de unos 2/3 años, y desde la aparición de los terminales hasta su adopción masiva (50 millones de usuarios) es de otros tres años.

Este hecho se ha cumplido sobradamente con la primera versión de LTE, cuya Release 8 se publicó definitivamente en diciembre de 2008, y en diciembre de 2013 ya existían más de 200 millones de usuarios. La siguiente figura muestra la evolución temporal de la tecnología LTE desde su creación [14].

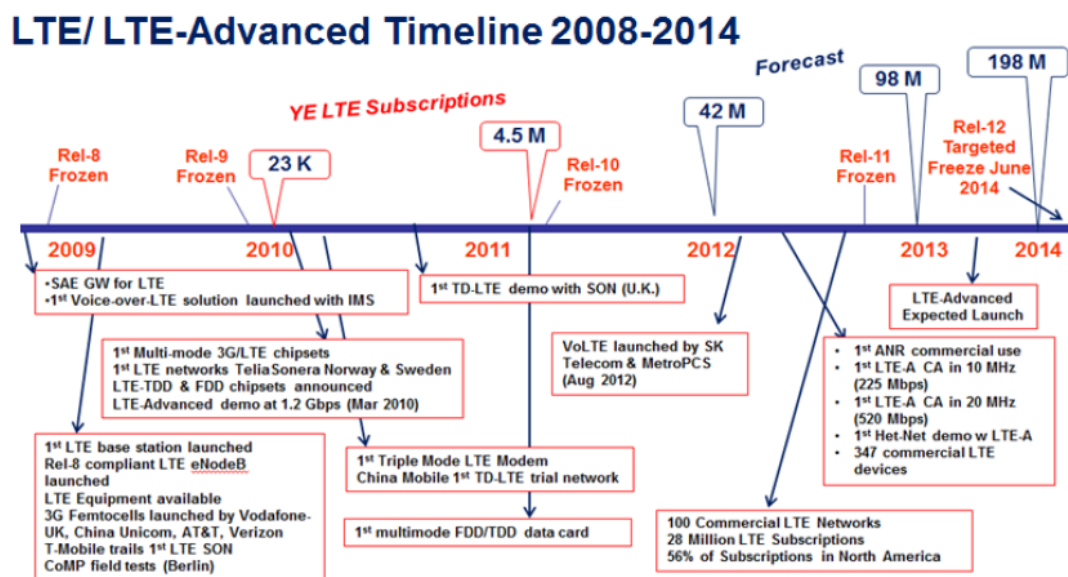




Figura 4: Evolución temporal LTE/LTE-A

	Estudio de requisitos técnicos que permitan caracterizar la cobertura con tecnología LTE	 Top optimized Technologies

Con LTE-Advanced se espera una velocidad de adopción al menos igual de rápida. La primera versión del estándar (Rel-10) finalizó en Junio de 2011, y en el año 2013 ya se han visto las primeras redes comerciales y los primeros terminales compatibles. Se espera una disponibilidad masiva de terminales y de redes comerciales para el año 2016.

3 REQUISITOS TÉCNICOS DE COBERTURA UTILIZADOS EN LA NORMATIVA ESPAÑOLA Y DE OTROS PAÍSES

En este apartado se recopilan los requisitos técnicos utilizados en cuanto a coberturas de tecnologías avanzadas de banda ancha móvil, tanto a nivel europeo como particularizados por requisitos individuales de cada país. En la mayoría de los casos, al igual que en España, dichos requisitos han surgido de las subastas del espectro del dividendo digital en la banda de 800 MHz. Además se incluye, en caso de existir, el método de medida previsto para garantizar su cumplimiento.

3.1 REQUISITOS EN ESPAÑA

El Servicio Universal, reglamentado en el Real Decreto 726/2011, de 20 de mayo [15], define una calidad mínima para ubicaciones fijas. Aunque su definición no se refiere específicamente a tecnologías móviles, es una referencia útil para aquellos emplazamientos en los que no hay alternativas de redes fijas disponibles.

De forma extractada, el mencionado Real Decreto establece que la conexión a la red pública de comunicaciones electrónicas, desde una ubicación fija, provista a través de cualquier tecnología, deberá ofrecer a sus usuarios finales la posibilidad de establecer comunicaciones de datos a velocidad suficiente para acceder de forma funcional a Internet. En concreto, se define que la conexión a la red deberá permitir comunicaciones de datos en banda ancha a una **velocidad en sentido descendente de 1 Mbit por segundo**.

En relación con cada usuario el operador designado para ofrecer el Servicio Universal tiene que garantizar que la citada velocidad global de datos que debe proporcionar la conexión, promediada a lo largo de cualquier periodo de 24 horas, no sea inferior a un megabit por segundo.

Por otra parte, ya se ha mencionado que las subastas del espectro del dividendo digital en la banda de 800 MHz reguladas en el Real Decreto 458/2011 [16] establecían unas obligaciones en línea con los objetivos definidos por la Agenda Digital Europea. Los operadores que resultaron adjudicatarios en subasta pública de 10 MHz pareados en la banda de 800 MHz se comprometieron a completar conjuntamente, antes del 1 de enero de 2020, una cobertura que permita el acceso a una velocidad de 30 megabits por segundo (Mbps) o superior, al menos, al 90 por ciento de los ciudadanos de unidades poblacionales de menos de 5.000 habitantes.

Actualmente en España la Dirección General de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información define unos requisitos para la recopilación de información destinada a elaborar los mapas detallados de cobertura de banda ancha que permiten conocer de manera precisa la situación de disponibilidad en todo el territorio.

Para las tecnologías móviles de banda ancha actualmente las operadoras deben facilitar los datos de cobertura atendiendo a los requisitos siguientes:

- **3,5G-HSPA:** *"Se entenderá como población cubierta aquella que reside en ubicaciones en las que el nivel de señal recibida, a pie de calle, es igual o superior a -90 dBm, valor que se considera representativo de la cobertura de banda ancha en exteriores. Asimismo, se facilitará la cobertura en los mismos términos y para niveles de señal recibida de, al menos, -70 dBm, que se considera representativa de la cobertura de banda ancha en el interior de los edificios. Ambos niveles se entenderán referidos a una probabilidad de ocurrencia del 90% del tiempo".*
- **4G-LTE:** *"Se facilitará, para cada entidad de población, el porcentaje estimado de población cubierta con redes de cuarta generación (LTE) en la banda de 1.800 MHz para dos niveles de potencia recibida de señal de referencia (RSRP) a pie de calle: -103 dBm y -81 dBm. Ambos niveles se entenderán referidos a una probabilidad de ocurrencia del 90% del tiempo".*

3.2 REQUISITOS POR PAÍSES

La Oficina de Comunicaciones Europea de la CEPT realizó un cuestionario sobre las obligaciones de cobertura establecidas por los distintos países, cuyas respuestas se encuentran recopiladas en el documento [17].

En la siguiente tabla se resumen dichas obligaciones de cobertura de los distintos países, referidas a la banda de 800 MHz de LTE.

Tabla 5: Resumen de requisitos en los distintos países

Country	Objetivo de Cobertura	Definición de cobertura	Método de comprobación
Austria	<p>Obligación de cobertura al 25% de la población en la banda de 800 MHz y al 95% teniendo en cuenta el resto de bandas.</p> <p>Obligaciones específicas para municipios específicos: https://www.rtr.at/en/tk/multibandauktion_AU</p>	<p>1 Mbps DL y 0,5 Mbps UL en outdoor en zonas generales de cobertura de 25% y 95%</p> <p>2 Mbps DL y 0,5 Mbps para UL en indoor en municipios específicos. Se considera 20 dB atenuación indoor.</p>	<p>Simulaciones proporcionadas por el operador con condiciones de tráfico reales.</p> <p>Deberá incluir lista y ubicación de BTS, tráfico y uso de las células y mapa de cobertura</p> <p>Se harán medidas de velocidad con descarga de 3 minutos con terminales comerciales costeadas por el operador</p>
Bélgica	<p>30% de la población a los 2 años de obtener la licencia, 70% a los 4 años, 98% a los 6 años. Uno de los adjudicatarios tiene una obligación adicional de cubrir 60 ciudades específicas a los 3 años.</p> <p>Las obligaciones podrán alcanzarlas con cualquiera de las bandas.</p>	<p>3 Mbps disponibles las 24 horas del día, 7 días a la semana</p>	<p>Sin definir en 4G. En 3G se seleccionan 1000 puntos de medidas con terminales comerciales.</p>
Chipre	<p>Para los operadores existentes, 40% de cobertura en 5 años. Para operadores entrantes, 40% de cobertura en 3 años, y 65% de cobertura en 5 años.</p>	<p>Velocidad de al menos 30 Mbps en todo el área cubierta</p>	<p>Sin definir</p>
República Checa	<p>Los distritos están divididos en grupo A (baja densidad de población) y B (resto de distritos).</p> <p>En 30 meses: Al menos 30 de 32 distritos del grupo A</p> <p>En 5 años: 100% de los distritos Grupo A, 22 distritos Grupo B, al menos 50% de las líneas ferroviarias y autopistas.</p>	<p>Velocidad DL 2Mbps los primeros 7 años, 5Mbps en adelante.</p> <p>Se debe cubrir el 95% de la población del distrito con:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 75% probabilidad de cobertura indoor sin 	<p>En banda 800 MHz</p> <p>-SINR -5 dB, RSRP -109 dBm Exteriores para cubrir el 75% de interiores. Se asume que con una antena externa se cubre el 85% si al menos tiene 2,5 dB ganancia</p> <p>La operadora enviará mapas de cobertura,</p>

	En 7 años, 100% grupos A y B, líneas ferroviarias y autopistas.	antena externa - 85% probabilidad de cobertura indoor con antena externa	y se podrán realizar medidas aleatorias en campo.
Dinamarca	Una de las dos licencias tiene la obligación de cubrir el 98% del área y el 99,8% de la población en un tercio de los distritos en 3 años.	10Mbps DL en exteriors.	Simulaciones o medidas del operador.
Estonia	Sólo requisito para operadores con licencia nacional. Deben instalar al menos 199 estaciones y dar cobertura al 95% del territorio (sin contar ciudades)	5 Mbps DL. A partir de pruebas de campo de ha establecido un nivel de señal de 58 dBμV/m/5MHz	El operador debe enviar mapas de cobertura. El supervisor podrá realizar medidas para su comprobación.
Francia	90% de las áreas rurales en 10 años 98% del país en 12 años, 99,6% en 15 años.	Las redes deben estar provistas para dar un máximo teórico de 60 Mbps con 10 MHz de ancho de banda y 30 Mbps con 5 MHz. Se define cobertura como 95% de probabilidad de recepción en exteriores en cualquier momento.	Se comprobarán los mapas de cobertura proporcionados con drive tests usando terminales comerciales. Se permite 5% margen de error.
Alemania	Se identificaron un conjunto de zonas con escasa cobertura que se clasificaron por prioridades. Sólo cuando el 90% de la población de una prioridad está cubierta, se puede usar la frecuencia para dar cobertura en la siguiente clasificación de prioridad.	No existe criterio específico, pero el objetivo del gobierno es proporcionar 50Mbps antes de 2018	Pruebas de campo.
Islandia	Licencia A: 99,5% de cobertura en 4 años. Licencia B: 93,5% de cobertura en 4 años.	En 4 años: 10 Mbps de pico, 3,85 Mbps de promedio diario, 2,5 Mbps de promedio en las tres horas más cargadas. En 8 años: 30 Mbps de pico, 11,3 Mbps de promedio diario, 7,5 Mbps de promedio en las tres horas más cargadas.	Pruebas de campo con equipo TSMW Romes de ROS.

Irlanda	Cobertura al 70% de la población en 3 años (con cualquier banda)	Nivel para 10MHz: 44 dBuV/m La cobertura debe alcanzarse para el 95% del área durante al menos el 95% del tiempo.	Drive tests y mapas de cobertura proporcionados por el operador. Terminales tipo Swissqual.
Italia	Se asoció una lista de municipios a cada uno de los bloques de frecuencia a subastar (excepto uno, que carecía de requisitos). El operador deberá cubrir de su lista asignada: - 30% antes de 2016 con cualquier banda, 75% antes de 2018 con cualquier banda, 37,5% antes de 2020 en banda 800 MHz, 75% antes de 2023 en banda 800 MHz	90% probabilidad de tasa de 2 Mbit/s en exteriores en todo momento.	Se podrán realizar pruebas de campo de forma ocasional con los equipos disponibles (analizadores de espectro...)
Lituania	BANDA 800 Después de obtener la licencia: - 30% de los distritos en 3 años - 80% de los distritos en 5 años Todo el territorio (excepto algunas zonas de borde) en 2020 BANDA 900 Cobertura del 90% del país	BANDA 800: 2Mbps para el 50% de los hogares en 3 años 2Mbps para el 85% de los hogares en 5 años 4Mbps para el 95% de los hogares en 2020 BANDA 900: RSSI -72 dBm/5MHz zonas urbanas RSSI -92 dBm/5MHz resto de zonas	Drive Tests, medidas y simulaciones a partir de metodología aprobada por el ministerio. Equipamiento Agilent E6474A.
Portugal	Obligación de ofrecer cobertura a un determinado número de municipios en función del rango de frecuencias asignados. Se considera cubierto un municipio si al menos el ayuntamiento dispone de servicio de banda ancha móvil.	El servicio de banda ancha a proporcionar debe permitir una tasa igual a la mayor de las correspondientes a la oferta comercial suscrita, en cada momento, por los clientes ubicados en el cuartil inferior de esas ofertas, ordenados por tasas ascendentes.	Las operadoras deben enviar mapas de cobertura y todos los parámetros relevantes usados para los cálculos. Tienen niveles de referencia para UMTS: >-95 Buena, > -105 aceptable, >-115 Mala, <-115 Inexistente

Eslovenia	Obligación de cobertura para uno de los lotes asignados: <ul style="list-style-type: none"> - 95% de la población de Eslovenia incluyendo 225 de 300 municipios (al menos 75% población) en 3 años. 	Al menos 10 Mbps en exteriores en sentido descendente con una tasa mínima de 2 Mbps. En sentido ascendente una tasa mínima de 1 Mbps	
Reino Unido	Cobertura antes de 2018 de al menos el 98% de la población de Reino Unido y al menos el 95% de la población de cada estado: Inglaterra, Gales, Escocia e Irlanda del Norte.	Velocidades de al menos 2 Mbps en interiores con un nivel de cumplimiento del 90%. Se considerará un nivel de carga bajo (22% carga en antenas interferentes). El servicio debe ser proporcionado usando equipamiento externo. En 4G nivel -4,1dB SINR para 10 MHz	No se comprobarán resultados. En alguna ocasión se podrán realizar medidas de campo esporádicas. Los operadores deben enviar anualmente sus estimaciones de cobertura. OFCOM ha publicado información detallada sobre los métodos para realizar las previsiones de cobertura.
Noruega	Obligación de cobertura del 40% de la población en el plazo de 4 años para todas las licencias de 800 MHz y del 98% a los 5 años (para la licencia de 2x10MHz) tras la obtención de la licencia.	Velocidades medias mínimas en exteriores de 2Mbps en cualquier situación.	Sin definir.
Suecia	Obligación de cobertura de al menos el 75% de las ubicaciones fijas para 2013 y para finales del 2014 el resto de ubicaciones.	Velocidades mínimas de acceso de 1 Mbps.	El criterio exigido de velocidad de 1Mbps se puede cumplir de varias formas: alcanzando ese máximo de manera puntual, 750 kbps en media diaria o bien asegurando que la media de las 4 horas del día con menor velocidad supere los 500 kbps.

4 DEFINICIONES PREVIAS APLICABLES A LOS REQUISITOS TÉCNICOS DE COBERTURA

Una vez perfilados los conceptos básicos de la tecnología, y tomando como referencia los requisitos técnicos de cobertura de banda ancha que se están utilizando en otros países para el seguimiento de compromisos relativos a LTE, en este apartado se abordan las distintas definiciones y condiciones aplicables a la elaboración de los requisitos técnicos de cobertura.

4.1 DEFINICIÓN DE VELOCIDAD DE DATOS

Tanto el compromiso de velocidad para los operadores que obtuvieron licencia en la banda de 800 MHz como la Agenda Digital Europea establecen como objetivo alcanzar una cobertura que permita el acceso a una velocidad de 30 megabits por segundo (Mbps) o superior para el año 2020. Es preciso definir en qué condiciones se puede alcanzar dicha velocidad.

La tendencia en otros países según se ha descrito en el apartado 3 es considerar el objetivo de 30 Mbps como una velocidad máxima y relajar los requisitos cuando se refiere a una velocidad mantenida a lo largo de un cierto periodo de tiempo.

Por otra parte, en España se cuenta con el antecedente de la definición del servicio universal de acceso de datos a 1 Mbps, que establece un objetivo de velocidad referido a la velocidad media promediada a lo largo del día [15].

Para este modelo se ha optado por partir de una velocidad de pico, que se puede calcular con mayor precisión dados los parámetros de transmisión de la estación base y condiciones de recepción, y estimar a partir de ésta las velocidades promediadas alcanzables en función de la carga de la red y de las variaciones de tráfico durante el día.

Se considerará por tanto que la **velocidad de pico** se deberá alcanzar en una **red con baja carga**, entendiéndose como tal **aquella que tiene un único usuario demandando servicio en la célula que da cobertura**, y en la que las células vecinas también tienen un nivel de carga bajo, de forma análoga a como se define en otros países europeos [18].

El proceso de estimación de la velocidad en red cargada a partir de esta velocidad de pico se describe en el apartado 5.3.5.

4.2 TIPO DE ESCENARIO

Este estudio se centra en el escenario en el que se desea ofrecer un servicio de banda ancha en ubicaciones fijas, generalmente viviendas, en entornos rurales en los que no existen otras alternativas de acceso. En este escenario es frecuente que los bordes de célula, donde se

encuentran las zonas de más baja cobertura, se sitúen en las afueras del municipio o en zonas limítrofes entre municipios. Por esta causa se han contemplado en el modelo las características específicas de los entornos rurales o suburbanos.

Estos entornos tienen la característica de ser abiertos y tener poca densidad de edificios, lo que conlleva que no se puedan aprovechar las ganancias de las técnicas MIMO por multiplexación espacial así como emplear modelos de propagación de señal característicos de entorno rural o suburbano para determinar el radio máximo de cobertura del servicio.

4.3 TIPO DE TERMINAL

Como se ha comentado anteriormente, en los entornos de estudio los niveles de señal en el borde de celda son bajos, por lo que una solución empleada es la instalación de antenas exteriores a las viviendas para acceder al servicio.

En el caso de LTE, el tipo de equipo orientado a actuar como modem en una ubicación fija se denomina CPE (*Customer premises equipment*). Un ejemplo de equipo CPE comercial se puede ver en la referencia [19].

A la hora de fijar unos requisitos de cobertura es necesario contemplar por tanto el escenario de que se emplee un móvil o módem de datos estándar, en cuyo caso, habrá unas pérdidas por penetración en caso de encontrarse en el interior de un edificio, y también el caso de emplear una antena exterior, que elimina las pérdidas de penetración y aporta una ganancia de antena mayor. Los niveles exigidos y velocidades alcanzadas variarán lógicamente en cada caso.

4.4 DEFINICIÓN DE NIVEL DE SEÑAL REQUERIDA

Aunque los objetivos de servicio se suelen expresar en términos de velocidad ofrecida al usuario, en la práctica es difícil verificar el cumplimiento de dichos objetivos de velocidad con mediciones directas. En el estudio de los requisitos establecidos en otros países se puede observar que algunos de ellos definen medidas de campo, pero estas tienen que estar limitadas a cierto número de ubicaciones, dado el coste de desplazar un equipo de medida a cada ubicación concreta.

Por las razones expuestas, el criterio más práctico se basa en solicitar a las operadoras un informe de cobertura, calculado a partir de la información que disponen de planta de red, potencias transmitidas y modelos de propagación, para unos determinados niveles de señal recibida, asociados a las condiciones de servicio deseadas.

La medida del nivel de señal recibida suele expresarse en valores de potencia de señal del piloto, ya sea RSCP en caso de 3G o RSRP en caso de 4G, debido a que estos niveles son los que usa el móvil como referencia para seleccionar la red y célula a la que se conecta. Sin embargo, la velocidad alcanzable por el usuario está relacionada más directamente con la potencia disponible para el canal de datos.

La relación entre la potencia de piloto o referencia y la del canal de datos es fija y conocida por el móvil, ya que como se ha indicado anteriormente el móvil debe ser capaz de estimar el CQI y por tanto el formato de transporte de los datos a partir de la potencia que recibe de piloto. Sin embargo, esta relación es un valor de configuración de la operadora que probablemente sea distinto en función del tipo de estación base y zona en la que se presta cobertura.

Por este motivo, a la hora de establecer este requisito, se ha considerado que el nivel de señal más adecuado es la **potencia media en exteriores del canal de datos** (en dBm). Esto permite como ventaja adicional emplear valores comparables entre diferentes tecnologías de acceso radio (HSPA, LTE, etc.), no sujetos a la distinta definición de señales de referencia RSCP y RSRP.

Este nivel de potencia del canal de datos se supone medido a pie de calle, en exteriores, y lleva un nivel de cumplimiento asociado como se detallará en el próximo apartado.

4.5 DISPONIBILIDAD DE COBERTURA

La definición de un requisito técnico de cobertura lleva asociado el establecimiento de unos niveles de cumplimiento. En general, estos niveles de cumplimiento se definen como un porcentaje de ubicaciones o tiempo en los que se satisfacen los objetivos establecidos. Sin embargo, estos niveles pueden hacer referencia a diferentes conceptos que conviene distinguir:

- Disponibilidad temporal. Los valores de tráfico soportado por cada emplazamiento varían a lo largo del día según el perfil de uso del servicio. Los recursos son compartidos entre todos los usuarios, lo que implica que las condiciones de servicio que alcanza cada usuario variarán a lo largo del día. En algunos países se define una disponibilidad, definiéndose porcentajes de tiempo o número de horas con alta carga en las que se miden las velocidades alcanzadas. Sin embargo, en el modelo que se incluye en este informe se trabaja con un balance de enlace basado en velocidades de pico. De este modo, el concepto de disponibilidad temporal queda englobado en cómo esta velocidad de pico se traduce en la velocidad media diaria, y no se empleará explícitamente como requisito técnico.
- Probabilidad de cobertura. Los modelos de cobertura establecen un nivel medio en cada ubicación de acuerdo a los modelos de propagación. Estos niveles están sujetos a una variabilidad estadística debido a la variabilidad intrínseca a la propagación radioeléctrica y a que la adecuación de las medidas reales a los modelos teóricos nunca es perfecta. Por esta razón, es imposible asegurar un nivel de cumplimiento total y se define un porcentaje de cumplimiento, aplicable a ubicaciones y tiempo en los que se miden unos niveles de señal superiores a los umbrales definidos. Este es el concepto de nivel de cumplimiento que se utilizará en el presente documento.

El cumplimiento de una cobertura con una probabilidad determinada se traduce en la aplicación de unos márgenes de desvanecimiento sobre los valores medianos de señal.

Cabe destacar que los niveles de cumplimiento pueden depender del tipo de servicio o de cliente. En los cálculos realizados en este estudio se parte de una probabilidad de cobertura del 90% para un servicio a terminales estándar, y una más exigente del 95% cuando se esté ofreciendo un servicio de banda ancha a ubicaciones fijas (con CPE, por ejemplo) para suplir la carencia de otros medios de acceso como el ADSL o la fibra óptica. No obstante el modelo permite utilizar otros valores.

4.6 BANDA DE FRECUENCIAS Y ANCHO DE LA BANDA

El ancho de banda disponible es un factor determinante de la velocidad máxima alcanzable. En función de este ancho de banda será necesaria una cierta eficiencia de bit por hercio para alcanzar la velocidad objetivo, y esta eficiencia determina los requisitos de nivel de señal en recepción necesarios. Por tanto, el requisito de cobertura será distinto en función del ancho de banda disponible.

La banda de frecuencias empleada afecta a la capacidad de propagación de la señal radioeléctrica. Esto impacta principalmente en las pérdidas de penetración en interiores descritas en el apartado 5.2.3. La consecuencia es que el nivel necesario de señal recibida será distinto en función de la banda de frecuencias empleada, siempre que no se empleen antenas exteriores a las viviendas.



Del mismo modo, el requisito depende de si se emplean bloques de frecuencias pareados para el servicio de LTE en la modalidad FDD, o bloques no pareados en la modalidad de LTE TDD. En el caso de TDD habrá que emplear en el modelo el ancho de banda destinado al enlace descendente.

Aunque el modelo descrito en este documento contempla las variables mencionadas anteriormente, si no se indica lo contrario en los ejemplos que se describan en lo sucesivo se asumirá un bloque de frecuencias pareadas de 10 MHz en la banda de 800 MHz.

4.7 LTE- ADVANCED

De las mejoras características de LTE-Advanced, la agregación de portadoras influye de manera significativa en la metodología de definición de cobertura. Esta funcionalidad imposibilita la definición de un umbral único de señal que garantice la velocidad deseada, al depender la velocidad alcanzada de la combinación específica de ancho de banda y frecuencia empleada.

Para una misma ubicación, la señal recibida en cada una de las bandas llegará con un nivel diferente en función de la atenuación sufrida por la señal en dicha banda. Por ello, para poder realizar una definición de un requisito técnico en caso de disponer de agregación de bandas, el procedimiento consistiría en aplicar el modelo para cada una de las bandas, calculando las velocidades obtenidas en cada banda y realizando una agregación posterior de velocidades en cada banda. La agregación de las velocidades alcanzadas en cada banda debe ser superior al objetivo de velocidad final de usuario.

 MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO	Estudio de requisitos técnicos que permitan caracterizar la cobertura con tecnología LTE	 Top optimized Technologies

En caso de querer definir de manera inversa los niveles requeridos en cada banda partiendo de la velocidad agregada en todas ellas, la dificultad reside en cómo repartir esa velocidad agregada entre las bandas, existiendo multitud de posibilidades y dificultando su definición.

5 MODELO DE CÁLCULO DE ENLACE

El modelo realizado es un cálculo clásico de balance de enlace descendente en el que se incluyen todas las hipótesis relativas al tipo de escenario y servicio.

Hay dos formas de aplicar el modelo, tomando como entrada el nivel de cobertura expresado **como potencia media (explicar en margen de desvanecimiento el tema de la distribución Gaussiana) en exteriores del canal de datos** y obteniendo como salida la **velocidad media diaria**; o bien partir del requisito de velocidad y obtener el nivel de cobertura necesario.

A este informe se adjunta una hoja de cálculo en la que están disponibles ambas versiones tanto para HSPA como para LTE.

En la Figura 5 se muestra el esquema seguido en los cálculos del modelo, en el que se ha asumido por simplicidad en la descripción el primero de los dos enfoques anteriores. El esquema general es válido para ambas tecnologías.

La velocidad ofrecida al usuario está directamente relacionada con la SINR alcanzada. Para calcularla es necesario obtener tanto la potencia necesaria como la interferencia más el ruido en recepción:

- La potencia en recepción se calcula como la potencia media a pie de calle a la que se le aplica un margen que permita asegurar el nivel de cumplimiento considerado (margen por desvanecimiento). Sobre esta potencia se aplican las pérdidas por penetración en interiores y las ganancias asociadas al receptor (antena y ganancia MIMO).
- La interferencia más el ruido se calcula a partir de la potencia de ruido en el receptor incrementada por un cierto margen de interferencia.

Finalmente, se traduce la SINR en una velocidad de usuario máxima alcanzable, sobre la que se aplica un modelo de carga y de perfil diario del tráfico, para obtener una velocidad de usuario media diaria.

En la hoja de cálculo se han añadido además los parámetros del transmisor y un modelo de propagación en entornos rurales, lo que permite obtener una estimación del radio de cobertura.

En los siguientes apartados se detallan las particularidades que intervienen en el modelo para cada una de las tecnologías.

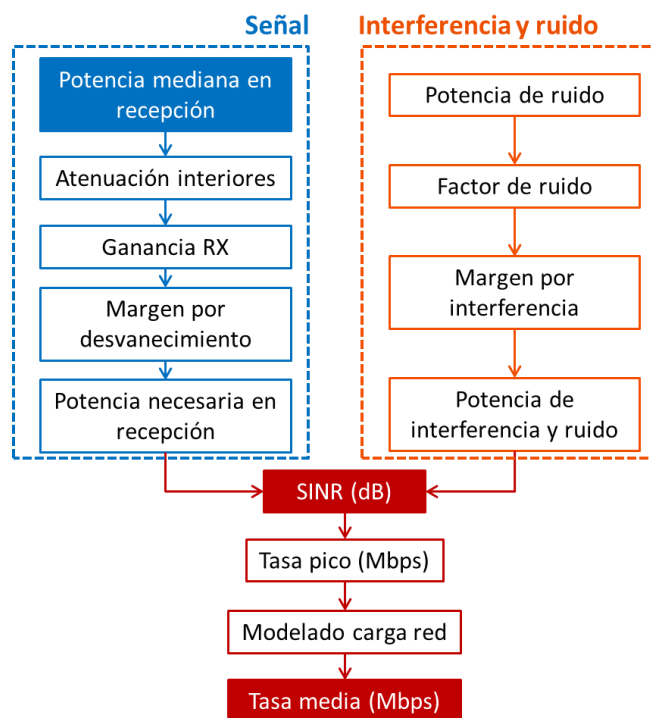


Figura 5: Esquema del modelo de cálculo del balance de enlace para 3,5G y 4G

5.1 DETALLE DEL MODELO DE CÁLCULO DE HSPA

La Tabla 6 recoge el modelo de cálculo de HSPA, particularizado para un nivel mediano en recepción de -90dBm, en donde se incluyen las principales fórmulas que relacionan las distintas magnitudes. En los apartados siguientes se detallan las particularidades de cada uno de los elementos del modelo HSPA, y en el apartado 5.3 los elementos comunes a ambas tecnologías.

El indicador habitual para expresar el nivel de señal recibida en 3,5G es la potencia recibida del piloto (CPICH), este nivel de señal de piloto se conoce como RSCP (*Received Signal Coded Power*). La RSCP del CPICH se puede calcular a partir de la potencia del canal de datos conociendo la diferencia entre ambos canales, de acuerdo a la ecuación (3):

$$RSCP_{CPICH}(dBm) = P_{RX-DATOS}(dBm) + [P_{TX-CPICH}(dBm) - P_{TX-DATOS}(dBm)] \quad (3)$$

Igualmente esta relación se puede expresar en función de la atenuación sufrida entre transmisor y receptor:

$$RSCP_{CPICH}(dBm) = P_{TX-CPICH}(dBm) - Pérdidas_{TX} + Ganancia_{TX} - At_{exteriores} \quad (4)$$

Tabla 6: Modelo de cálculo de HSPA

Parámetros Generales	A	Frecuencia banda (MHz)	2100	
	B	Ancho de banda (MHz)		
	C	% Potencia canales control y dedicados	20%	Incluye: CPICH, SCH, R99, HS-SCCH, etc, Todo excepto datos HSPA
	D	% Velocidad hora cargada / media diaria	80%	Depende del perfil diario (OFCOM: 80%)
	E	Carga de HSPA hora cargada	75%	Porcentaje de uso de HSPA
	F	Nº de usuarios simultáneos en hora cargada	2,5	Modelo cola M/D/1
Transmisor	G	Potencia máxima	44,7	Otra configuración típica de Pmax/CPICH es 43/32
	H	Potencia CPICH	32	
	I	Potencia transmitida (dBm)	44	Potencia disponible para HSPA: G(1-C)
	J	Pérdidas en transmisor (dB)	1	Cables, conectores
	K	Ganancia de antena transmisora (dBi)	18	
	L	PIRE por conexión (dBm)	61	I-J+K
Umbral cobertura	M	CPICH RSCP (dBm)	-102	
Recepción	N	Atenuación en exteriores (dB)	151	H-J+K-M
	O	Pérdida por penetración en interiores (dB)	0	17dB
	P	Atenuación en interiores (dB)	151	N+O
	Q	Potencia media en exterior (dBm)	-90	L-N
	R	Potencia media en interior (dBm)	-90	Q-L
	S	Ganancia de antena receptora (dBi)	3	Ganancia total antena, incluye ganancia MIMO (0dB SISO, 3dB SIMO MIMO)
	T	Potencia media necesaria en recepción (dBm)	-87	R+S
	U	Porcentaje de cobertura ubicaciones borde de celula (%)	90%	
	V	Desviación típica desvanecimiento (dB)	8	
	W	Margen por sombra (dB)	10,25	Gaussiana inversa: f(U,V)
	X	Sensibilidad receptor (dBm)	-98	T-W
	Y	Factor de ruido (dB)	7	Sistema receptor completo
	Z	Potencia de ruido (dBm)	-100	-114(dBm/MHz)+10log(B)+Y
	AA	Margen de interferencia (dB)	3	
Requisitos recepción	AB	Factor ensanchamiento HSPA	16	12dB
	AC	Es/No (dB)	11,5	X+AB-Z-AA
	AD	CQI alcanzable	15	CQI para conseguir la tasa deseada
	AE	Tasa alcanzable (Mbps)	1,5	
Modelo propagación	AF	Altura eNodeB (m)	35	
	AG	Altura UE (m)	1,5	
	AH	a(hm)	0	f(AG); 0 para AG=1,5
	AI	K1	138	46,3+33,9log(f)-13,82log(ht)-a(hm)
	AJ	K1'	125	K1-2(log(f/28))^2-5,4

	AK	K2	35	44,9-6,55log(ht)
KPI	AL	Distancia (m)	5552	Atenuación = K1+K2*log(d)
	AM	Tasa pico alcanzable (Mbps)	1,5	f(AD)
	AN	Tasa hora cargada (Mbps)	0,6	AM/F
	AO	Tasa media diaria (Mbps)	0,7	AN/D

5.1.1 Conversión entre SINR y velocidad (tasa) alcanzable

Se modela el comportamiento del canal descendente de 3,5G a través de la relación (SINR - CQI – Tasa (bps)). Esto permite abstraer el canal físico para poder así determinar la calidad requerida en el enlace que asegure una determinada tasa final objetivo (bps) operando a una tasa de error aceptable.

La métrica directamente relacionada con la velocidad obtenida que define la calidad de un canal es la relación señal a ruido (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*). El indicador estandarizado por el 3GPP para 3,5G para la medida de calidad del canal descendente en el receptor móvil es el CQI (*Channel Quality Indicator*), el cual se reporta a la estación base para la elección del esquema de modulación y codificación para la transmisión del enlace descendente.

El CQI elegido por el terminal móvil fija un tamaño determinado de bloque para la transmisión de tal manera que la comunicación debe cumplir el requisito de tasa de error de bloque (BLER, *Block Error Rate*) menor del 10%. Este tamaño de bloque (bits) será mayor cuanto mayor sea este CQI (mejor calidad del canal), y determina la tasa máxima que se podrá alcanzar en el enlace.

Un cierto CQI determina un tamaño de bloque en bits (TBS, *Transport Block Size*), lo cual da lugar a una velocidad binaria, teniendo en cuenta que se tiene una BLER del 10% y que el tiempo de transmisión del intervalo (TTI, *Transmission Time Interval*) es de 2 ms, según la ecuación (5).

$$Tasa (bps) = \frac{TBS(bits)}{TTI(s)} * (1 - BLER) \quad (5)$$

El CQI correspondiente a un determinado formato de transporte se mapea según la Tabla 7 de correspondencia CQI-TBS que se recogen en la tabla 7.G de la referencia [20] que corresponde a una categoría 24 de terminal:

CQI value	Transport Block Size	Number of HS-PDSCH	Modulation	Reference power adjustment Δ	N _{IR}	X _{RV}
0	N/A	Out of range				
1	136	1	QPSK	0	43200	0
2	176	1	QPSK	0		
3	232	1	QPSK	0		
4	320	1	QPSK	0		
5	376	1	QPSK	0		
6	464	1	QPSK	0		
7	648	2	QPSK	0		
8	792	2	QPSK	0		
9	928	2	QPSK	0		
10	1264	3	QPSK	0		
11	1488	3	QPSK	0		
12	1744	3	QPSK	0		
13	2288	4	QPSK	0		
14	2592	4	QPSK	0		
15	3328	5	QPSK	0		
16	3576	5	16-QAM	0		
17	4200	5	16-QAM	0		
18	4672	5	16-QAM	0		
19	5296	5	16-QAM	0		
20	5896	5	16-QAM	0		
21	6568	5	16-QAM	0		
22	7184	5	16-QAM	0		
23	9736	7	16-QAM	0		
24	11432	8	16-QAM	0		
25	14424	10	16-QAM	0		
26	15776	10	64-QAM	0		
27	21768	12	64-QAM	0		
28	26504	13	64-QAM	0		
29	32264	14	64-QAM	0		
30	38576	15	64-QAM	0		

Tabla 7: Tabla de mapeo de CQIs en tamaño de bloque TBS

Cada CQI tiene su correspondiente curva de relación BLER-SINR como se puede ver en la referencia [21]. Fijando el objetivo de una BLER del 10% se obtiene la curva que especifica la SINR necesaria para cada CQI mostrada en la Figura 6.

Dicha referencia supone un canal con ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN), lo cual implica asumir igualmente una interferencia de tipo gaussiano. Esta hipótesis se puede considerar válida para este tipo de entorno.

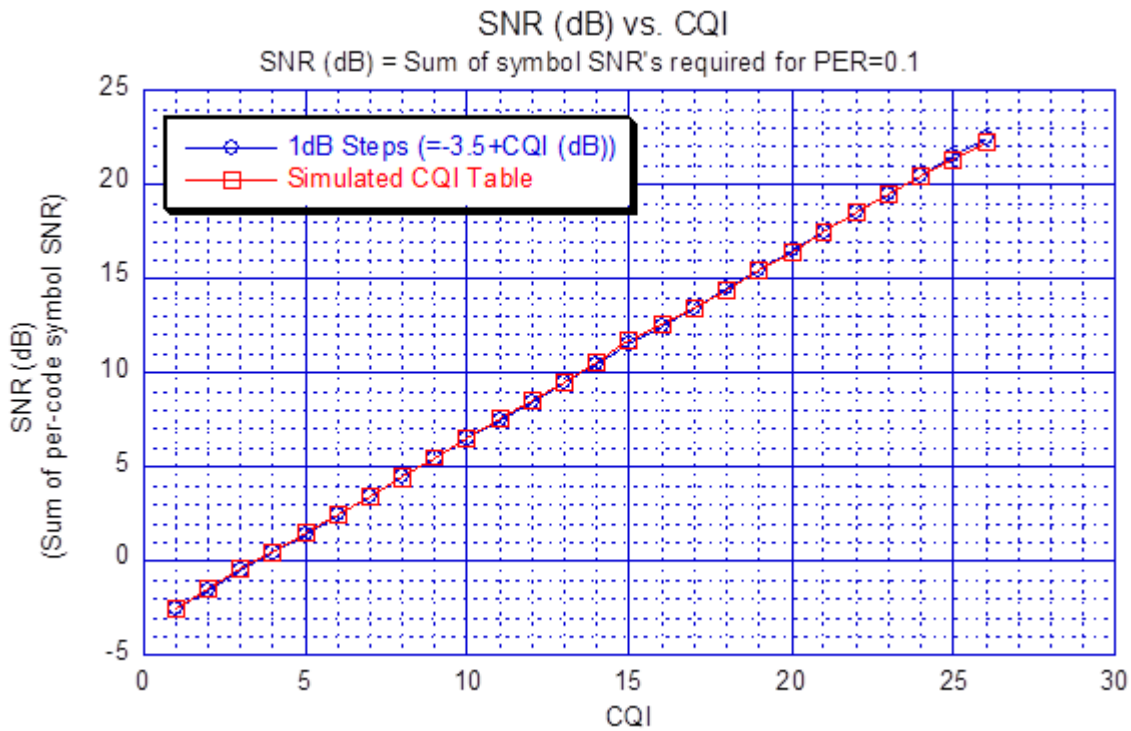


Figura 6: Mapeo CQI y SINR cumpliendo una BLER del 10%

La curva de la Figura 6 se puede expresar mediante la ecuación (6):

$$CQI = \begin{cases} 0; & SINR \leq -3,5 \\ SINR[dB] + 3,5; & -3.5 < SINR \leq 26.5 \\ 30; & SINR \geq 26.5 \end{cases} \quad (6)$$

Aunque en el modelo se emplea un valor de CQI medio, en la práctica se tendrá una cierta distribución en torno a ese valor medio. Por tanto, al hacer la conversión entre CQI y velocidad se está asumiendo que la velocidad media será la que corresponda al CQI medio. Esto no es del todo exacto al no haber una relación lineal entre ellas, pero en un escenario de ubicaciones fijas y poco desvanecimiento es una aproximación válida.

A modo de ejemplo se ha aplicado esta metodología al caso de una tasa de 1 Mbps y una frecuencia de 2100 MHz con un ancho de banda de 5 Mhz. De la ecuación (5) se obtiene un tamaño de bloque requerido de TBS = 2223 bits.

Este TBS corresponde según la Tabla 7 con un CQI = 13, ya que para asegurar 1 Mbps el CQI elegido debe ser el mínimo que cumpla que el correspondiente TBS asignado sea mayor o igual al requerido para la tasa deseada.

Un CQI = 13 aplicando la ecuación (6) se corresponde con una SINR requerida de 9,5 dB.

5.1.2 Resumen de parámetros de transmisión

En la Tabla 8 se resumen los principales parámetros del transmisor.

	Unidades	Valor
Potencia Transmitida	dBm	44,7
Ganancia antena transmisora	dB	18
Pérdidas en transmisor	dB	1

Tabla 8: Parámetros claves del transmisor

Estos parámetros se indican solo a modo informativo, ya que los parámetros del transmisor no afectan al modelo. Esto es debido a que la relación entre la señal recibida y la velocidad alcanzada depende únicamente de las características del receptor. Por tanto, los parámetros del transmisor solo tienen impacto en la estimación de la distancia máxima de cobertura.

Se ha tomado como referencia valores típicos de equipos comerciales.

5.1.3 Pérdidas por penetración de interiores

Las pérdidas por penetración de interiores tendrán influencia en la determinación nivel de señal necesaria en exteriores que permite garantizar un nivel considerado de servicio en el interior de los edificios. Estas pérdidas tienen en cuenta las pérdidas por ventanas, muros, etc. y es habitual especificarlas como el caso peor de una distribución de pérdidas.

En la referencia [22], se especifica que las pérdidas medias que se suelen considerar por penetración en los edificios se encuentran en el rango de 15 y 20 dB. El valor elegido es igual al empleado en Reino Unido [18], según se define en la Tabla 9.

	2100 MHz
Pérdidas en interiores	17 dB

Tabla 9: Pérdidas por interiores para 2100MHz

5.1.4 Margen de interferencia

Para el cálculo de la SINR se modela el efecto de la interferencia como un margen sobre el nivel de ruido térmico que cuantifica el efecto de la interferencia de las células vecinas. De acuerdo a algunas referencias bibliográficas, este margen varía entre 1 y 4 dB en función del entorno, de la disposición de la red y de la distancia entre las células vecinas [23].

La interferencia en la red es función de la carga de usuarios presente en cada momento, y por tanto el margen de interferencia varía directamente con la carga. La Tabla 10 resume el margen de interferencia en función de la carga de la red calculado a través de simulación [24].

Carga de red (%)	Margen interferencia (dB)
35	1
40	1,3
50	1,8
60	2,4
70	2,9
80	3,3
90	3,7
100	4,2

Tabla 10: Margen de interferencia en función de la carga

Teniendo en cuenta que la tecnología 3,5G es madura, con un alto número de usuarios y se ha considerado una carga de red del 75%, se ha seleccionado el siguiente valor de margen de interferencia:

$$\text{Margen interferencia} = 3 \text{ dB} \quad (7)$$

5.2 DETALLE DEL MODELO DE CÁLCULO DE LTE

La Tabla 11 recoge el modelo de cálculo de LTE, particularizado para un nivel mediano en recepción de -90dBm, en donde se incluyen las principales fórmulas que relacionan las distintas magnitudes. En los apartados siguientes se detallan las particularidades de cada uno de los elementos del modelo LTE, y en el apartado 5.3 los elementos comunes a LTE y HSPA.

El indicador habitual para expresar la cobertura en 4G es la RSRP (*Reference Signal Received Power*). Esta potencia se define como potencia por portadora, por lo que está ligada con la potencia media en recepción a través de la siguiente ecuación que emplea el número de bloques (RB, *Resource Block*) en el ancho de banda disponible y el número de portadoras por bloque (12 en LTE):

$$RSRP \text{ (dBm)} = Potencia_{RX} \text{ (dBm)} - 10 * \log_{10}(12 * N_{RB}) \quad (8)$$

Tabla 11: Modelo de cálculo de LTE

Parámetros Generales	A	Frecuencia banda (MHz)	800	
	B	Ancho de banda (MHz)	10	
	C	Número de RB en ancho de banda	50	
	D	% Velocidad hora cargada / media diaria	80%	Depende del perfil diario (OFCOM: 80%)
	E	% Carga en hora cargada	60%	Porcentaje de RB usados
	F	Nº de usuarios simultaneos en hora cargada	1,75	Modelo cola M/D/1
Transmisor	G	Potencia transmitida (dBm)	47,78	
	H	Pérdidas en transmisor (dB)	1	Cables, conectores
	I	Ganancia de antena transmisora (dBi)	17	
	J	PIRE por conexión (dBm)	62	G-H+I
Umbral cobertura	K	RSRP (dBm)	-118	
Recepción	L	Atenuación en exteriores (dB)	152	G-H+I-(K+10LOG10(12*C))
	M	Pérdida por penetración en interiores (dB)	0	13,2 @800Mhz / 16,5 @1800MHz / 17,9 @2600MHz
	N	Atenuación en interiores (dB)	152	L+M
	O	Potencia media en exterior (dBm)	-90	J-L
	P	Potencia media en interior (dBm)	-90	O-M
	Q	Ganancia de antena receptora (dBi)	3	Ganancia total antena, incluye ganancia MIMO (0dB SISO, 3dB SIMO MIMO)
	R	Potencia media necesaria en recepción (dBm)	-87	P+Q
	S	Porcentaje de cobertura ubicaciones borde de célula (%)	90%	

	T	Desviación típica desvanecimiento (dB)	8	
	U	Margen por sombra (dB)	10,25	Gaussiana inversa: f(S,T)
	V	Sensibilidad receptor (dBm)	-97	R-U
	W	Factor de ruido (dB)	7	Sistema receptor completo
	X	Potencia de ruido (dBm)	-97	-114(dBm/MHz)+10log(0,18*E)+W
	Y	Margen de interferencia (dB)	2	
Requisitos recepción	Z	SINR (dB)	-2,0	Modelo Shannon: Bweff*log(1+SINR/SINReff)
	AA	BWeff	0,6	
	AB	SINReff	1	
	AC	Tasa alcanzable (Mbps)	4,22	
Modelo propagación	AD	Altura eNodeB (m)	35	
	AE	Altura UE (m)	1,5	
	AF	a(hm)	0	f(AE); 0 para AE=1,5
	AG	K1	124	Okumura Hata: 69,55+26,16log(f)-13,82log(ht)-a(hm)
	AH	K1'	115	K1-2(log(f/28))^2-5,4
	AI	K2	35	44,9-6,55log(ht)
KPI	AJ	Distancia (m)	11962	Atenuación = K1+K2*log(d)
	AK	Tasa pico alcanzable (Mbps)	4,2	B*AA*LOG(1+10^(Z/10)/AB;2)
	AL	Tasa hora cargada (Mbps)	2,4	AK/F
	AM	Tasa media diaria (Mbps)	3,0	AL/D

5.2.1 Conversión entre SINR y velocidad alcanzable. Modelo de Shannon

Al igual que en HSPA, la relación señal a ruido medida en el receptor móvil (SINR, *Signal to Interference plus noise ratio*) es la que determina la calidad del enlace radioeléctrico y la velocidad alcanzable.

Sin embargo, para el caso de LTE no se han encontrado curvas que modelen la relación entre cada formato de transporte y su SINR necesaria, sino que se ha seguido una metodología empleada por 3GPP, y que también ha sido planteada en algún artículo científico [25], basada en calcular la eficiencia espectral alcanzable a partir de ajustes sobre la fórmula de Shannon.

La fórmula de Shannon determina la capacidad máxima teórica de un canal SISO (*Single input Single output*) medida en eficiencia espectral como función de la SINR.

$$S_{max} \left(\frac{\text{bits}}{\frac{S}{\text{Hz}}} \right) = \log_2(1 + \text{SINR}) \quad (9)$$

Este límite de capacidad no es alcanzable en la práctica debido a que existen diversas consideraciones en la implementación que conllevan una pérdida de eficiencia, por lo que se emplea en la práctica una fórmula modificada que incluya estos efectos

$$S_{max} \left(\frac{\text{bits}}{\text{Hz}} \right) = BW_{\text{eff}} * \log_2(1 + SINR/SINR_{\text{eff}}) \quad (10)$$

Donde el ancho de banda efectivo, BW_{eff} y la $SINR_{\text{eff}}$ son ajustes del ancho de banda y SINR teniendo en cuenta las pérdidas por ineficiencias en el sistema LTE (filtrado, sobrecarga de prefijo cíclico y piloto, no linealidades, etc).

Un valor de SINR determina el máximo esquema de modulación y codificación (MCS) utilizable en transmisión que permita cumplir el objetivo de BLER. Cuanto mayor sea el esquema MCS mayor será la eficiencia espectral (bps/Hz) del enlace y por tanto la tasa, pero mayor será la calidad requerida en el enlace.

Como referencia oficial, el 3GPP en la especificación TS 36.942 [26] ha detallado la aplicación de la fórmula de Shannon para modelar en enlace descendente de LTE. En el Anexo A, en el apartado A1, la eficiencia espectral alcanzada se modela a partir de la siguiente modificación de la fórmula de Shannon:

$$S_{max} \left(\frac{\text{bits}}{\text{Hz}} \right) = \alpha * \log_2(1 + SINR) \quad (11)$$

Donde α es un factor de atenuación que incluye las mencionadas pérdidas por implementación. En la tabla A.1 del anexo A.1 se detalla un valor de $\alpha = 0.6$ para un enlace LTE en DL:

Parameter	DL	UL	Notes
α , attenuation	0,6	0,4	Represents implementation losses
$SINR_{\text{MIN}}$, dB	-10	-10	Based on QPSK, 1/8 rate (DL) & 1/5 rate (UL)
$Thru_{\text{MAX}}$, bps/Hz	4,4	2,0	Based on 64QAM 4/5 (DL) & 16QAM 3/4 (UL)

Tabla 12: Parámetros propuestos por el 3GPP para los enlaces DL y UL LTE

De la ecuaciones (12) y (13) se puede calcular la SINR necesaria en función de la eficiencia espectral (bps/Hz), que está a su vez ligada con la velocidad del usuario por el ancho de banda disponible para la comunicación, de tal manera que:

$$\text{Eficiencia espectral} = \frac{\text{Velocidad usuario (bps)}}{BW \text{ (Hz)}} \quad (12)$$

$$SINR \text{ (dB)} = 10 * (\log_{10} 2^{\left(\frac{\text{Eficiencia espectral}}{\alpha} \right)} - 1) \quad (13)$$

El rendimiento del enlace está también condicionado al tipo de esquema de transmisión-recepción empleado en las antenas. Como se ha mencionado en los fundamentos teóricos, LTE dispone de distintas configuraciones de antena posibles *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) para mejorar la eficiencia del enlace radio (diversidad de transmisión y multiplexación espacial) con respecto a un sistema tradicional básico de una única antena en transmisión y recepción (*Single Input Single Output*, SISO).

En entornos suburbanos en donde debido a la característica del entorno abierto los trayectos de propagación de las señales están muy correlados espacialmente, la ganancia de las técnicas MIMO de multiplexación espacial empleadas en entornos urbanos con abundancia de reflectores es despreciable. Es por ello que en entornos suburbanos no se va a suponer una ganancia debido a técnicas MIMO de multiplexación espacial o diversidad, sino que simplemente se tendrá una ganancia de array de antena por tener un esquema de 2 antenas en recepción. **La ganancia de antena se considera de 3 dB** (2 antenas) en este tipo de entornos.

Las curvas de Shannon de capacidad máxima de un canal están definidas para un sistema SISO, por lo que cualquier ganancia debida MIMO se debe añadir a la SINR obtenida de la ecuación (13). Por ello, la SINR final será de:

$$SINR_{Shannon} = SINR + MIMO \text{ gain} \quad (14)$$

A modo de ejemplo, se va a aplicar esta metodología al caso de 800 MHz licitado a los operadores, en el que el ancho de banda concedido es de 10 MHz. En este caso se requieren 3 bps/Hz de eficiencia espectral para conseguir 30 Mbps según la ecuación (12).

En este ejemplo para la banda de 800 MHz y 10 MHz de ancho de banda disponible, con una eficiencia de 3bps/Hz el valor de SINR objetivo obtenido de la ecuación (13) y empleando la ecuación (14) se obtiene un valor de relación señal a ruido requerida de:

$$SINR = 12 \text{ dB} \quad (15)$$

Cabe destacar que una eficiencia de 3 bps/Hz requiere un formato de modulación 16QAM y una tasa de codificación alta (MCS = 10, en la tabla del Anexo A en [26]). La categoría de los terminales empleados deben soportar esta modulación, lo cual cumplen todas las categorías en el enlace descendente.

Además de la referencia disponible de 3GPP, se ha verificado el modelo de Shannon modificado con otras referencias empleadas en la industria. En el artículo [25] se emplea el modelo más general descrito en la ecuación (10), por medio de simulación, teniéndose en cuenta el efecto de las técnicas MIMO y de la ganancia por esquemas de planificación inteligentes de usuarios.

El requisito de velocidad se define como velocidad en condiciones de un usuario, por lo que se toman las curvas del artículo que no incluyen la ganancia de la planificación multiusuario. La SINR de un esquema 2x2 que se puede ver en la figura 3 del artículo es aproximadamente 13 dB, lo que concuerda con los valores obtenidos según la especificación del 3GPP [26].

5.2.2 Resumen de parámetros de transmisión

En la Tabla 13 se resumen los principales parámetros del transmisor.

	Unidades	Valor
Potencia Transmitida	dBm	44,78
Ganancia antena transmisora	dB	17-18
Pérdidas en transmisor	dB	1

Tabla 13: Parámetros claves del transmisor

La ganancia de antena puede sufrir variaciones con la frecuencia empleada, siendo valores típicos 17 dB en banda de 800 y 18 dB en 1800 y 2600 MHz.

Estos parámetros se indican solo a modo informativo, ya que los parámetros del transmisor no afectan al modelo. Esto es debido a que la relación entre la señal recibida y la velocidad alcanzada depende únicamente de las características del receptor. Por tanto, los parámetros del transmisor solo tienen impacto en la estimación de la distancia máxima de cobertura.

Se han tomado como referencia valores típicos de equipos comerciales.

5.2.3 Pérdidas por penetración en interiores

Las pérdidas por penetración en el interior de los edificios tendrán influencia en la definición de un nivel de cobertura exigible en exteriores que permita garantizar un nivel adecuado en el interior de los edificios. Estas pérdidas tienen en cuenta las pérdidas por ventanas, muros, etc. y es habitual especificarlas como el caso peor de una distribución de pérdidas.

En la referencia [22], se especifica que las pérdidas medias que se suelen considerar por penetración en interiores para LTE se encuentran en un rango de entre 15 y 20 dB como caso más habitual. En general, cuanto mayor sea la frecuencia de la banda de comunicación, mayores serán las pérdidas por penetración a través de las paredes, aunque también puede mejorar la transmisión de la señal por ventanas, por lo que hay cierta disparidad en cuanto a qué valores son más ajustados en función del tipo de edificios. Para este estudio, se ha tomado como referencia válida la documentación relativa al compromiso de cobertura que se ha generado en otros países tales como UK [18], donde se detalla esta pérdida en función de la frecuencia según se define en la Tabla 14.

	800 MHz	900 MHz	1800 MHz	2100 MHz	2600 MHz
Pérdidas en interiores	13,2 dB	13,7 dB	16,5 dB	17 dB	17,9 dB

Tabla 14: Pérdidas por interiores en función de la frecuencia

5.2.4 Margen de interferencia

En un sistema LTE en el que se emplea reuso de frecuencia 1, todas las células tienen disponible todo el ancho de banda, y por tanto emplean el mismo conjunto de frecuencias provocando interferencias de las células vecinas sobre la comunicación.

Para el cálculo de la SINR se modela el efecto de la interferencia como un margen sobre el nivel de ruido térmico que cuantifica el efecto de la interferencia de las células vecinas. De acuerdo a algunas referencias bibliográficas, este margen varía entre 2 y 8 dB en función del entorno, de la disposición de la red y de la distancia entre las células vecinas [22].

La interferencia es también función de la carga de usuarios presente en cada momento, y por tanto el margen de interferencia varía directamente con la carga. La Tabla 15 resume el margen de interferencia en función de la carga de la red calculado a través de simulación [24].

Carga de red (%)	Margen interferencia (dB)
35	1
40	1,3
50	1,8
60	2,4
70	2,9
80	3,3
90	3,7
100	4,2

Tabla 15: Margen de interferencia en función de la carga

Teniendo en cuenta el entorno LTE rural, una carga del 60% y que el requisito de velocidad se define para un nivel bajo de carga de usuarios en las células vecinas se ha seleccionado un valor bajo de margen de interferencia:

$$\text{Margen interferencia} = 2 \text{ dB} \quad (16)$$

5.3 DETALLES DEL MODELO COMUNES A AMBAS TECNOLOGÍAS

5.3.1 Ganancia antenna receptora

Se contemplan dos tipos de equipo receptor en los cálculos del modelo:

- UE estándar con ganancia de antena, incluyendo atenuación del cuerpo de 0 dB.
- Modem fijo en interior con antena externa (CPE) con ganancia de 10 dB.

5.3.2 Figura de ruido

Se ha escogido para ambas tecnologías un valor típico del factor de ruido de 7 dB.

5.3.3 Ganancia MIMO

Aunque como ya se ha comentado, para un entorno rural no se considera que se pueda explotar la multiplexación espacial que MIMO que permite multiplicar las velocidades obtenidas. No obstante, sí hay que añadir al balance de enlace las ganancias de array de antena derivadas de la diversidad de recepción. La siguiente tabla muestra los valores de referencia con una configuración MIMO de 2x2, que se considera que será la más habitual en la mayoría de los despliegues.

	Ganancia de array (dB)
Single input – Single output (SISO)	0 dB
Single input – Multiple output (SIMO) 2x2	3 dB

Tabla 16: Ganancia de array de antena

5.3.4 Margen por desvanecimiento

En toda comunicación inalámbrica, las imperfecciones propias del canal radio móvil generan diversos fenómenos que deterioran la calidad de la señal que llega al receptor y limitan la tasa de transmisión efectiva.

Los multirrayectos (debido a las reflexiones y difracciones que sufre la onda electromagnética entre el emisor y el receptor), el *shadowing* (fenómeno que se produce cuando la línea de vista entre transmisor y receptor se obstruye debido a los obstáculos que pueden estar en el trayecto de propagación) y el efecto de la velocidad de desplazamiento del móvil son los factores más importantes que generan un canal con desvanecimiento (*Fading Channel*). Estos desvanecimientos producen cambios en la señal que provocan cambios bruscos en el nivel de potencia recibida en el terminal móvil, tanto en el espacio como en el tiempo.

En el escenario concreto que se estudia con edificios de poca altura y entornos abiertos y situaciones estáticas sin movimiento del usuario, el efecto del multirrayecto y el desplazamiento *Doppler* es reducido. No obstante, es necesario incluir un término corrector para el efecto de sombra (*shadowing*) en el cálculo de la SINR requerida que tenga en cuenta estas variaciones estadísticas de la señal sobre el valor mediano proporcionado por los modelos de propagación.

El nivel de cumplimiento se puede definir como un porcentaje perimetral (L%), definido como porcentaje de emplazamientos en el borde de la célula, o como un porcentaje zonal (Z%), definido como porcentaje sobre todo el área de cobertura [27].

En este modelo se ha elegido la definición del nivel de cumplimiento como objetivo perimetral, de tal forma que se pueda garantizar que se cumplen los objetivos marcados en la zona de peor cobertura, es decir en el borde de célula.

La relación entre porcentaje zonal (Z%) y perimetral (L%) viene dada por la fórmula de Jakes:

$$Z = L + 50 * e^{\left(\frac{2xy+1}{y^2}\right)} * \operatorname{erfc}\left(x + \frac{1}{y}\right) \quad (17)$$

Donde,

$$x = \frac{k(P)}{\sqrt{2}} \quad (18)$$

$$y = 3,071 * n/\sigma_L \quad (19)$$

En donde $n=3,7$, $k(P)$ es la abscisa normalizada de una distribución Gaussiana para el porcentaje P y está relacionado con la función inversa de Gauss.

Por ejemplo un objetivo de cobertura perimetral del 90% en el borde de célula se traduce en un porcentaje de 98% de cobertura zonal en todo el área, siendo $k(P) = 1,28$ para $P = 90\%$.

Se ha tomado un valor de desviación típica del margen σ_L de **8 dB** teniendo en cuenta que estamos en entorno rural, siguiendo como referencia los valores del cuadro 1 del documento de la UIT [28]:

Frecuencia (GHz)	Polarización H/V	Morfografía	Desviación típica, σ (dB)
1,0	V	Rural	6,0
1,0	H	Rural	6,8
1,0	V	Suburbana	7,9
1,0	H	Suburbana	9,2
1,0	H/V	(1)	7,0
3,0	V	Rural	7,1
3,0	H	Rural	7,1
3,0	V	Suburbana	11,4
3,0	H	Suburbana	11,2
3,0	H/V	(1)	9,4

Tabla 17: Especificación de la UIT de desviaciones típicas de desvanecimiento para 1 y 3GHz dependiendo del entorno

Para obtener el margen de sombra a aplicar en la comunicación, se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{Margen sombra} = \sqrt{\{[K(L) * \sigma_L]^2 + [K(T) * \sigma_T]^2\}} \quad (20)$$

Donde la variación estadística temporal σ_T se desprecia con respecto a la variación de cobertura, quedando entonces la ecuación (21) simplificada:

$$\text{Margen sombra} = K(L) * \sigma_L \quad (21)$$

Para unos valores de $K(L)$ de 1,28 para el 90% de cobertura perimetral y desviación típica σ_L de 8 dB se obtiene un **margen por sombra 10,24 dB**. Se ha considerado que este margen será el mismo para todas las bandas de frecuencia.

Este margen está definido como diferencia entre la mediana de la distribución (percentil 50%) y el percentil correspondiente a la probabilidad de cobertura (percentil 90% en el ejemplo anterior). Para aplicar este margen al modelo se va a asumir que la distribución de potencias es una Gaussiana simétrica y por tanto el valor mediano coincide con la potencia media. Esto es correcto cuando se emplean unidades logarítmicas en la distribución de potencias y el cálculo de medias.

5.3.5 Modelo de carga

La capacidad de transmisión de datos que puede ofrecer una célula debe repartirse entre todos los usuarios que acceden concurrentemente. Por tanto, la velocidad media que obtiene cada usuario se reduce sobre la velocidad máxima alcanzable de acuerdo al nivel de concurrencia, que está directamente relacionado con el nivel de carga celular.

Para modelar este efecto se ha elegido un modelo basado en teoría de colas, concretamente una cola M/D/1 en notación Kendall [29]. Este modelo supone una serie de hipótesis:

- Los usuarios envían paquetes de longitud igual al tamaño de bloque empleado en cada *slot* en caso de HSPA o *resource block* (RB) en LTE. Estos paquetes se asumen independientes entre sí y distribuidos de acuerdo a una distribución de Poisson con una tasa de llegadas λ . Esto es una simplificación, ya que en un servicio de datos los paquetes suelen presentarse en ráfagas y no se ajustan a una distribución de Poisson. No obstante, el efecto no se espera que sea importante en un entorno de muchos usuarios en los que cada uno de ellos contribuye poco a la carga total.
- El tiempo de servicio de cada paquete (D) es determinista e igual al tiempo del *TTI*, con una tasa de servicio $\mu=1/D$.
- Se considera un único servidor atendiendo las peticiones de los usuarios. Esto significa que no se está considerando la posibilidad de planificar varios usuarios en paralelo, es decir se planifica a los usuarios en un esquema TDMA. Se trata de una simplificación, ya que en HSPA las modulaciones bajas utilizan pocos códigos y se podrían planificar varios usuarios en paralelo, y del mismo modo en LTE se podrían planificar subconjuntos de RB a distintos usuarios en paralelo. Por otra parte, modelar el planificador como una cola FIFO se acerca a un planificador Round-Robin en lugar de otras opciones más complejas.

De acuerdo a esto modelo el factor de carga de la red, ρ , se definiría según:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (22)$$

La carga de la red en este caso representaría el porcentaje de TTIs ocupados. Esta medida de carga está muy correlada con la carga de red definida como porcentaje de potencia usada sobre la máxima potencia disponible por la célula.

Aplicando el modelo [30] el tiempo medio de espera en el sistema:

$$W = \frac{1}{2\mu} \frac{2 - \rho}{1 - \rho} \quad (23)$$

El tiempo de servicio si no hubiera concurrencia de usuarios sería $1/\mu$, lo cual significa que la velocidad con una carga de red ρ se ve reducida frente a la velocidad máxima alcanzable de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$Velocidad_{carga} = \frac{Velocidad_{max}}{\frac{2 - \rho}{2(1 - \rho)}} = \frac{Velocidad_{max}}{1 + \frac{\rho}{2(1 - \rho)}} \quad (24)$$

5.3.6 Velocidad media diaria

A la hora de definir un objetivo de velocidad para las operadoras algunas veces puede ser conveniente referirlas a una velocidad media diaria en lugar de a la hora cargada. Este es el criterio empleado por ejemplo en la definición del servicio universal [15].

Se asume que la relación entre velocidad media diaria y velocidad en hora cargada depende exclusivamente del perfil de uso a lo largo del día, y no de la carga específica en hora cargada. Esta asunción se basa en que el perfil horario de carga depende de los hábitos de uso de los consumidores y no de su concentración, lo cual se cumple mejor en células que no presenten un alto movimiento de usuarios. Dado que el objetivo principal de este estudio es la aplicación a escenarios en los que se da servicio de acceso a internet en ubicaciones fijas, parece una suposición razonable.

Basándonos en medidas en redes comerciales realizadas por el regulador Ofcom [31], se estima que **la velocidad en hora cargada es un 80% de la velocidad media diaria**.

5.3.7 Modelos de Propagación

Los niveles de cobertura se pueden traducir en un máximo rango de celda, radio de cobertura, para el cual se aseguran los niveles de servicios determinados por la el modelo.

Esta traducción a distancias se hace mediante la aplicación de los modelos específicos de propagación radio. Éstos son diferentes en función de la frecuencia y del entorno considerado (rural, urbano, etc.).

En general las pérdidas por propagación en entornos exteriores macrocelulares se pueden expresar a través de dos constantes como muestra la siguiente ecuación:

$$Pérdidas de propagación (km) = k_1 + k_2 * \log_{10} R_{km} \quad (25)$$

Donde R_{km} es el radio de la célula en km. El radio máximo de celda se calcula aplicando la ecuación (25) fijando unas pérdidas máximas aceptables en propagación para disponer de un determinado nivel de servicio.

LTE puede operar en distintas frecuencias, 800, 1800 y 2600 MHz por lo que los modelos considerados son:

- **Para 800 MHz se emplea el Modelo de Okumura-Hata:**

$$k_1 = 69,55 + 26,16 * \log_{10} F (MHz) - 13,82 * \log_{10} H_B - a(hm) \quad (26)$$

$$k_2 = 44,9 - 6,55 * \log_{10} H_B \quad (27)$$

- **Para 2100MHz y 2600MHz se emplea el Modelo de COST-231 Hata:**

$$k_1 = 46,3 + 33,9 * \log_{10} F (MHz) - 13,82 * \log_{10} H_B - a(Hm) \quad (28)$$

$$k_2 = 44,9 - 6,55 * \log_{10} H_B \quad (29)$$

Donde para ambos modelos:

- F es la frecuencia de la banda empleada para la transmisión en MHz
- H_B es la altura de la antena del nodo B en metros y
- H_m es la altura del terminal del usuario en metros
- Y $a(H_m)$ es una corrección en función de la altura del usuario dependiendo de su altura:

$$a_{Hm} = 0 ; \text{ para } Hm < 1,5m \quad (30)$$

$$a_{Hm} = [1,1 * \log_{10} F (MHz) - 0,7] * H_m - [1,56 * \log_{10} F (MHz) - 0,8] ; \text{ para } Hm > 1,5m$$

- Si el receptor se encuentra en una zona suburbana caracterizada por edificios de poca altura y calles relativamente anchas se debe corregir la atenuación [27] con el factor (31):

$$Pérdidas corregidas = k_1 + k_2 * \log_{10} R_{km} - 2 * \left[\log_{10} \frac{F (MHz)}{28} \right]^2 - 5,4 \quad (31)$$

6 UMBRAL TÉCNICO NECESARIO

En este apartado se van a aplicar los modelos de enlace descendente de HSPA y LTE, anteriormente descritos, al cálculo de los niveles de servicio ofrecidos al usuario, en cuanto a velocidades de datos alcanzadas, para unos determinados umbrales de potencia/señal recibida de cada tecnología radio. Se tomarán como referencia los umbrales que se emplean actualmente para confeccionar los mapas de cobertura que elabora la SETSI.

6.1 NIVEL DE SERVICIO Y DE SEÑAL RECIBIDA EN EL ACCESO A INTERNET DE BANDA ANCHA MEDIANTE REDES MÓVILES 3,5G (HSPA)

Actualmente el nivel de señal mínima considerada para determinar el porcentaje de población cubierta con redes UMTS actualizadas con tecnología HSPA es de -90 dBm de señal recibida a pie de calle. Adicionalmente se solicita información de cobertura para un nivel de señal de -70 dBm.

Por ello, aplicando el modelo descrito en el apartado 5.1 para HSPA en banda 2100 MHz, con un nivel de potencia media en recepción en el canal de datos de -90 dBm y una **carga de red del 75%** se obtienen las tasas de usuario mostradas en la Tabla 18:

	P. media en exteriores	% localización borde celda	Tipo de terminal	Exterior/ Interior	TASA máx (Mbps)	TASA HC (Mbps)	TASA media diaria (Mbps)
HSPA	-90 dBm	90%	UE	Ext.	1,5	0,6	0,7
		95%	CPE	Int.	3,2	1,3	1,6

Tabla 18: Velocidades para usuarios HSPA con potencia recibida de -90dBm

Se calculan las velocidades tanto para equipos de usuario estándar como de CPE. El porcentaje de cobertura de borde de celda considerado en el caso de CPE es superior para una mayor similitud con el servicio de banda ancha fija (ADSL).

La columna exterior/interior se refiere a si el resultado indicado de tasa se obtiene en interiores o en exteriores.

Con una configuración típica de potencia máxima 44,7 dBm y potencia transmitida de CPICH 32 dBm, una potencia recibida para el canal de datos de -90 dBm equivale a un nivel de RSCP de CPICH de -102 dBm.

Del mismo modo, se aplica el modelo para un nivel de potencia media en recepción en el canal de datos de -70 dBm, que es el segundo umbral utilizado para los mapas de cobertura. Este nivel está orientado a medir la cobertura de un usuario estándar en interiores, ya que tanto en exteriores como en interiores usando antena externa se alcanzan las velocidades máximas para un móvil de categoría 24 (17,4 Mbps, con 64QAM y sin dual-cell)

	P. media en exteriores	% localización borde celda	Tipo de terminal	Exterior/Interior	TASA máx (Mbps)	TASA HC (Mbps)	TASA media diaria (Mbps)
HSPA	-70 dBm	90%	UE	Int.	2,1	0,8	1,1
		90%	UE	Ext.	17,4	6,9	8,7
		95%	CPE	Int.	17,4	6,9	8,7

Tabla 19: Velocidades para usuarios HSPA con potencia recibida de -70dBm

6.2 NIVEL DE SERVICIO Y DE SEÑAL RECIBIDA EN EL ACCESO A INTERNET DE BANDA ANCHA MEDIANTE REDES MÓVILES 4G (LTE)

De manera equivalente que en el apartado anterior de HSPA, en esta apartado se aplica el modelo de cálculo del enlace descendente de LTE, descrito en el apartado 5.2, al cálculo de las velocidades experimentadas por el usuario para unas determinadas premisas de señal recibida, tanto para usuario con terminal estándar como para CPE, en interiores y en exteriores.

6.2.1 Velocidades alcanzables del acceso a Internet de banda ancha mediante redes móviles 4G (LTE) para los niveles de señal recibida utilizados

En este apartado se facilita el nivel de servicio en el borde de la celda que se obtiene, aplicando el modelo, con los niveles de señal recibida utilizados en el último requerimiento de la SETSI

En la anterior solicitud de información a las operadoras, la SETSI se fijaron unos niveles de potencia recibida de señal de referencia (RSRP) a pie de calle de -103 dBm y de -81 dBm, que se corresponden a unos valores de potencia media de -75 dBm y -53 dBm, respectivamente.

También se incluye el resultado para un nivel de señal mínima de -90 dBm, que es el empleado en el servicio HSPA.

Se ha aplicado el modelo de cálculo descrito en el apartado 5.2 con los niveles de señal mínima mencionados, suponiendo una **carga de red del 60%** y un **ancho de banda de 10 MHz**, para calcular las velocidades tanto de usuario estándar como de CPE, obteniéndose los valores mostrados en la Tabla 20.

	P. media en exteriores	% localización borde celda	Tipo de terminal	Exterior interior	TASA máx (Mbps)	TASA HC (Mbps)	TASA media diaria (Mbps)
LTE BW=10MHz	-90 dBm	90%	UE	Ext.	4,2	2,4	3
		95%	CPE	Int.	12,5	7,1	8,9
	-75 dBm	90%	UE	Ext.	26,3	15	18,8
		95%	CPE	Int.	37,7	21,5	26,9
	-53 dBm	90%	UE	Ext.	37,7	21,5	26,9
		95%	CPE	Int.	37,7	21,5	26,9

Tabla 20: Velocidades para usuarios LTE con potencia recibida de -90 dBm y -75 dBm

La velocidad alcanzada con el umbral de -90 dBm está alineada con las velocidades mínimas consideradas en otros países, por lo que puede ser una buena referencia para elaborar los informes de cobertura de banda ancha que se preparan para la UE. En comparación con los valores obtenidos en HSPA éstos son mayores debidos en parte a la mejora en la eficiencia espectral en LTE, pero sobre todo por el mayor ancho de banda disponible (10 MHz frente a 5 MHz) y la menor interferencia y carga en la red. Se puede observar que con el umbral de -53 dBm se alcanza la velocidad máxima soportada para ambos tipos de terminal.

La Tabla 21 recoge los valores de RSRP correspondientes a los niveles de potencia media en recepción del canal de datos, calculados mediante la fórmula (8).

	P. media en exteriores (dBm)	RSRP (dBm)
LTE BW=10MHz	-90 dBm	-118 dBm
	-75 dBm	-103 dBm
	-53 dBm	-81 dBm

Tabla 21 Valores RSRP correspondiente a los valores de potencia media en exteriores requeridos

6.2.2 Variación de las velocidades alcanzables del acceso a Internet de banda ancha mediante redes móviles 4G (LTE) en función de la banda de frecuencias

El objetivo de esta sección es ilustrar el **efecto de la frecuencia sobre las pérdidas de penetración en interiores**. Se van a determinar las velocidades alcanzadas en interiores por un usuarios estándar (sin antena externa) para una **carga de red del 60%** y un **ancho de banda de 10 MHz**.

Como se ha comentado en el apartado 5.2, las pérdidas por penetración en interiores varían con la frecuencia de trabajo, por lo que en la Tabla 22 las tasas obtenidas se desglosan para todas las posibles frecuencias de LTE: 800, 1800 y 2600 MHz.

En este caso solo se indican en la Tabla 22 las tasas obtenidas para un nivel de potencia recibida de -75 dBm porque el nivel de -90 dBm no permite obtener tasas significativas en interiores.

	P. media en exteriores	Frecuencia	Exterior/ Interior	TASA máx (Mbps)	TASA HC (Mbps)	TASA media diaria (Mbps)
LTE (BW = 10MHz)	-75 dBm	800 MHz	Int.	5,8	3,3	4,1
		1800 MHz	Int.	3,2	1,8	2,3
		2600 MHz	Int.	2,4	1,4	1,7

Tabla 22: Velocidades en interiores para usuario estándar LTE con potencia recibida de -75 dBm

La degradación de la velocidad alcanzable al emplear bandas de frecuencia superiores es elevada.

6.2.3 Niveles de potencia recibida para alcanzar determinadas velocidades usuario del acceso a Internet de banda ancha mediante redes móviles 4G (LTE) con antena externa (CPE)

El objetivo de esta sección es realizar el cálculo contrario al de las secciones anteriores, y obtener los valores de potencia media en exteriores necesarios para alcanzar los objetivos de velocidad de 10 y 30 Mbps fijados para 2017 y 2020. Al estar orientado a ofrecer servicios de banda ancha a clientes fijos a través de redes móviles en aquellas zonas donde la banda ancha fija no es accesible, nos centraremos en el caso de emplear un modem fijo de usuario con antena externa. Se incluye además la velocidad de 1 Mbps que es la que está especificada en la definición del servicio universal.

Por ello en la Tabla 23 se muestran los niveles de potencia media en exteriores requeridos, suponiendo una **carga de red del 60%** y una **ganancia de antena externa** del equipo de usuario (CPE) de **10 dB**.

TASA media diaria (Mbps)	TASA máx (Mbps)	BW (MHz)	RSRP (dB)	P. media en exteriores (dBm)
1	1,4	20	-134	-103
		10	-131	-103
10	14	20	-122	-91
		10	-117	-89
30	42	20	-113	-82
		10		

Tabla 23: Niveles de potencia media en exteriores para velocidades en interiores de 10 y 30 Mbps empleando CPE

El caso de 30 Mbps de velocidad media diaria con un ancho de banda de 10 MHz no es alcanzable, por lo que no se ha considerado en la tabla anterior. Esto es así porque para alcanzar dicha velocidad sería necesaria una eficiencia espectral mayor de la máxima posible sin MIMO (ver apartado 2.2.3).

6.2.4 Velocidades alcanzables del acceso a Internet de banda ancha mediante redes móviles 4G (LTE) en modalidad TDD para determinados niveles de señal recibida

A modo de ejemplo de cómo afecta a los cálculos el usar la modalidad TDD de LTE, se van a repetir los cálculos del apartado 6.2.1 para esta modalidad.

Según se describe en el apartado 2.2.1, en esta modalidad se reparte el número de subtramas entre el enlace descendente y el ascendente. Esto permite dar más prioridad al enlace descendente o al ascendente según interese, lo cual es útil en caso de tráficos muy asimétricos.

Si suponemos una configuración que de la máxima prevalencia al enlace descendente (configuración número 5 en la Figura 3) se tendrían dedicados al enlace descendente 7 de cada 9 subtramas. Esto supone que habría que reducir las velocidades obtenidas en el caso general en una fracción 7/9, resultando los valores obtenidos en la siguiente tabla.

	P. media en exteriores	% localización borde celda	Tipo de terminal	Exterior interior	TASA máx (Mbps)	TASA HC (Mbps)	TASA media diaria (Mbps)
LTE BW=10MHz	-90 dBm	90%	UE	Ext.	3,3	1,9	2,3
		95%	CPE	Int.	9,7	5,5	6,9
	-75 dBm	90%	UE	Ext.	20,5	11,7	14,6
		95%	CPE	Int.	29,3	16,7	20,9
	-53 dBm	90%	UE	Ext.	29,3	16,7	20,9
		95%	CPE	Int.	29,3	16,7	20,9

Tabla 24: Velocidades para usuarios LTE en modalidad FDD con potencia recibida de -90 dBm y -75 dBm

7 REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [1] 3GPP, «3GPP TS 25.214, Physical layer procedures (FDD),» 2010.
- [2] 3GPP, «3GPP TS.25.306, UE Radio Access capabilities».
- [3] 3GPP, «TS.36.213. Physical layer procedures».
- [4] 3GPP, «3GPP TS.36.211; "Physical channels and modulation"».
- [5] A. Mason, «LTE worldwide outlook: technology, devices, services and pricing, and deployment forecasts 2013–2018,» *Research Forecast Report*, 2013.
- [6] 3GPP, «3GPP TS 36.306 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities».
- [7] 3GPP, «3GPP TR36.913, "Requirements for Further Advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced)"».
- [8] 3GPP, «3GPP TR25.913, "Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)"».
- [9] «The LTE, LTE-Advanced & 5G Ecosystem: 2014 - 2020 - Infrastructure, Devices, Subscriptions & Operator Revenue,» ReportsnReports, Jun 2014. [En línea]. Available: (<http://www.reportsnreports.com/reports/274171-the-lte-lte-advanced-5g-ecosystem-2014-2020-infrastructure-devices-subscriptions-operator-revenue.html>).
- [10] [En línea]. Available: http://www.gsacom.com/news/gsa_406.
- [11] 2013. [En línea]. Available: <http://www.netamericaalliance.com/news-events/blog/gsa-lte-ecosystem-evolving-fast-1-240-lte-devices-now-available>.
- [12] Ericsson, «Ericsson Mobility Report,» June 2014.
- [13] realwireless, «The timing of the consumer and operator features available from HSPA and LTE,» 2012.
- [14] 4. Americas, «4G Mobile Broadband Evolution,» 2012.
- [15] «Real Decreto 726/2011,» *BOE*, vol. CAPÍTULO II, nº Artículo 28.
- [16] BOE, «Real Decreto 458/2011,» [En línea]. Available: <http://www.boe.es/boe/dias/2011/04/02/pdfs/BOE-A-2011-5936.pdf>.
- [17] E. P. Chairman, «ECC - CEPT,» 05 03 2014. [En línea]. Available: [http://www.cept.org/Documents/ecc/16311/ECC\(14\)019_Follow-up-on-questionnaire-on-](http://www.cept.org/Documents/ecc/16311/ECC(14)019_Follow-up-on-questionnaire-on-)

coverage-obligations.

- [18] Ofcom, «4G Coverage Obligation, Verification Methodology: LTE,» 2012.
- [19] BandLuxe, «LTE Outdoor CPE E500 Series,» [En línea]. Available: http://www.bandrich.com/UM/E500_Series.pdf.
- [20] 3GPP, «TS 25.214. Technical Specification Group Radio Access Network; Physical layer procedures (FDD)».
- [21] 3GPP, «R4-020612, "Revised HSDPA CQI Proposal",» 2002.
- [22] H. Holma, LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced.
- [23] H. Holma, «WCDMA for UMTS, HSPA evolution and LTE».
- [24] S. Abdul Basit, «Dimensioning of LTE Network, Description of Models and Tool, Coverage and capacity estimation,» *Masters Thesis*, 2009.
- [25] P. Mogensen, «LTE Capacity compared to the Shannon Bound,» *IEEE*, 2007.
- [26] 3GPP, «TS. 36.942, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios».
- [27] J. M. H. Rábanos, Transmisión por Radio, Editorial Universitaria Ramón Areces.
- [28] UIT, «RECOMENDACIÓN UIT-R P.1146, "PREDICCIÓN DE LA INTENSIDAD DE CAMPO PARA LOS SERVICIOS MÓVIL TERRESTRE Y DE RADIODIFUSIÓN TERRENAL EN LA BANDA DE FRECUENCIAS DE 1 A 3 GHz"».
- [29] D. G. Kendall, « "Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and their Analysis by the Method of the Imbedded Markov Chain",» *The Annals of Mathematical Statistics*, 1953.
- [30] «M/D/1_queue, wikipedia,» [En línea]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/M/D/1_queue. [Último acceso: 28 07 2014].
- [31] Ofcom, «Measuring Mobile Broadband in the UK: performance delivered to PCs via dongles/datacards,» May 2011.
- [32] N. Kroes, «Giving Europe a Mobile Broadband Boost,» 2012. [En línea]. Available: http://europa.eu/rapid/press-release_SPEECH-12-124_en.htm.