



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL DE FI DE CARRERA

TÍTOL DEL TFC: Estudio de viabilidad de un SDR Cloud

**TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica de Telecomunicació, especialitat
Sistemes de Telecomunicació**

AUTOR: Alberto Calvo Listo

DIRECTOR: Vuk Marojevic, Ismael Gómez Miguelez

DATA: 19 de juny de 2012

Título: Estudio de viabilidad de un SDR Cloud

Autor: Alberto Calvo Listo

Director: Vuk Marojevic, Ismael Gómez Miguelez

Fecha: 19 de junio de 2012

Resumen

En la década de los 90, las operadoras hicieron una gran inversión para ofrecer a sus usuarios comunicaciones inalámbricas. Entonces, los usuarios tenían varios dispositivos, cada uno con una única función, un teléfono para hacer llamadas, un ordenador para tener acceso a internet, un dispositivo para GPS, etc. La tecnología ha evolucionado hacia la unión de estos dispositivos hardware en un solo terminal.

Actualmente, los usuarios requieren más ancho de banda, lo que obliga a las operadoras a actualizar sus estándares a otros de nueva generación, que proporcionan una mejor eficiencia espectral. Esta evolución se produce a un ritmo frenético y obliga, tanto a usuarios como a operadoras, a adecuar sus dispositivos.

Los equipos actuales no se han diseñado para estas adaptaciones con lo que las operadoras han de hacer una gran inversión para reemplazar sus equipos, todavía operativos, por otros con el nuevo estándar. Ante esta situación nace el Software Radio, que permite reutilizar estos equipos, adaptándolos a nuevas tecnologías de acceso radio. Software Radio, o *Software-Defined Radio* (SDR), es un concepto aplicable tanto a terminales móviles como a estaciones base.

Este proyecto estudia la viabilidad de una nueva infraestructura de acceso radio para la ciudad de Barcelona, uniendo los conceptos SDR y Cloud Computing para diseñar y gestionar estaciones base de futuro y de esta manera facilitar la compartición de recursos de cómputo y una mayor eficiencia de su uso.

Title: Estudio de viabilidad de un SDR Cloud

Author: Alberto Calvo Listo

Director: Vuk Marojevic, Ismael Gómez Miguelez

Date: June 19, 2012

Overview

In the 90's, operators made large investments for providing wireless communications services to capture clients. Users by then had multiple devices, each with a single functionality: a phone to call, a computer to access the Internet, a GPS device for receiving location information, etc. Technology has progressed and today's gadgets unify these functionalities in a single device.

Users still require higher bandwidths. Operators therefore need to upgrade their wireless communications infrastructure to new standards, which provide improved spectral efficiency. The change occurs at a frenetic pace and requires both, users and operators, to replace their devices.

The current equipment has been designed for the available systems and services (2G and 3G) with little adaptation possibilities. Operators then need to make major investments for replacing existing equipment to offer new services. The software-defined radio (SDR) concept, on the other hand, allows reusing hardware for implementing new radio access technologies. Software Radio or SDR is a concept applicable to both mobile terminals and base stations.

This project studies the viability of a new radio access infrastructure, the SDR Cloud, applied to the city of Barcelona. SDR clouds join SDR and Cloud Computing concepts to design and manage future base stations. They centralize the digital-signal processing part of base station transceivers, facilitating the computing resource sharing for improving the resource efficiencies and system flexibility.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación	1
1.2. Evolución de Sistemas de Acceso Radio	1
1.3. Software Defined Radio	3
1.4. Sistema SDR Cloud	4
1.4.1. Tecnologías SDR Cloud	5
1.4.2. Requerimientos de procesado y traspaso de datos	6
1.4.3. Ventajas e Inconvenientes	7
1.5. Objetivo y organización de la memoria.....	8
CAPÍTULO 2. ANÁLISIS SITUACIÓN ACTUAL	9
2.1. Datos geográficos y demográficos.....	9
2.1.1. Población para el estudio	10
2.2. El mercado de las telecomunicaciones	11
2.2.1. Barcelona.....	11
2.2.2. Despliegue.....	12
2.3. Conexiones de voz y datos	12
2.3.1. Voz.....	12
2.3.2. Datos	13
2.3.3. Conexiones simultáneas	14
2.4. Estaciones Base Actuales	16
2.4.1. Instalaciones necesarias	17
2.4.2. Estimación coste estaciones base actuales.....	19
2.5. Resumen capítulo.....	21
CAPÍTULO 3: EQUIPOS Y TECNOLOGIA SDR CLOUD	22
3.1 Centro de datos	22
3.1.1 Procesadores.....	23
3.1.2 Sistemas Blade.....	25
3.2 Red de fibra óptica	25
3.2.1 Topologías de red.....	26
3.2.2 Elementos de la red.....	27
3.3 Resumen capítulo.....	27
CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN SDR CLOUD	28
4.1 Remote Radio Head.....	28
4.2 Data Center.....	29
4.2.1 Estándares diseño Data Center	29

4.2.2	Equipos e instalaciones necesarias	30
4.2.3	Presupuesto equipos	37
4.3	Coste de operación	38
4.3.1	Medidas de eficiencia	38
4.3.2	Estimación del consumo y costes	38
4.4	Red fibra óptica.....	40
4.4.1	Diseño de la red	41
4.4.2	Costes red fibra óptica.....	44
4.5	Resumen capítulo.....	45
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS		46
5.1	Comparación de los sistemas.....	46
5.1.1	Coste despliegue	46
5.1.2	Coste operacional.....	48
5.1.3	Coste inversión y amortización.....	48
5.2	Conclusiones del proyecto.....	50
5.3	Líneas futuras	50
BIBLIOGRAFÍA		51

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

En un mercado tan competitivo como el de las telecomunicaciones, donde los usuarios cada vez exigen más servicios y menores precios, se está produciendo una situación insostenible: disminuyen los ingresos y crecen los costes de despliegue, operación y actualización de la Red de Acceso Radio.

El continuo crecimiento del tráfico de Internet y la aparición de nuevos servicios multimedia ha generado la necesidad de una red de telecomunicaciones móviles más potente, robusta, segura y escalable.

La red de telecomunicaciones existente debe evolucionar para corresponderse con el desplazamiento que se está produciendo de la red de voz tradicional a una red centrada en datos en la que, la mayoría de los operadores, se verán en la necesidad de hacer uso de dispositivos de comunicaciones que utilizan la fibra óptica como medio de transmisión.

Para mantener la rentabilidad y el crecimiento, los operadores móviles deben encontrar soluciones para reducir costes, así como para proporcionar mejores servicios a los clientes, con lo que se enfrentan al diseño de una nueva arquitectura de red que permita flexibilidad y a la vez reduzca costes.

De esta manera se dio inicio al estudio de viabilidad que presenta este proyecto.

1.2. Evolución de Sistemas de Acceso Radio

Existen varios sistemas de comunicaciones celulares. Los de segunda generación, desarrollada en la década de los 90, contemplaba únicamente servicio de voz y utilizó comercialmente tecnología GSM (Global System for Mobile communications). En el año 2000 se introdujo GPRS (General Packet Radio Service) posibilitando la transmisión de datos a una velocidad máxima de 115 kbps. Dada la aceptación que tuvo, en 2002 se introdujo EDGE (Enhanced Data Rates GSM of Evolution), una mejora en la tecnología de transmisión de datos que aumentó la velocidad hasta los 236,8 kbps.

La tercera generación se introdujo en el 2003 bajo la tecnología W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) con una velocidad de hasta 2 Mbps, aunque comercialmente no llegó hasta 2006 bajo HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) ofreciendo hasta 14 Mbps.

Hasta la actualidad, donde ya se empieza a desplegar la cuarta generación (LTE – Long Term Evolution) las redes de telecomunicaciones operan con tecnologías de segunda y tercera generación.

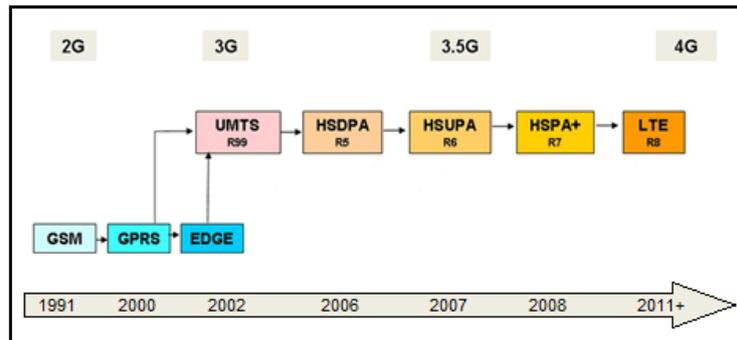


Fig. 1.1. Evolución sistemas de telecomunicaciones móviles

El sistema UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) es un sistema 3G. Está compuesto por dos subsistemas: el Core Network (CN) o Núcleo de Red y el UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network). El Núcleo de Red es el responsable de las funciones de transporte e inteligencia y es la vía de conexión con otras redes de telecomunicaciones.

El UTRAN formado por el Nodo B y la RNC (Radio Network Controller), es la red de acceso radio que une el Núcleo y los terminales.

- El Nodo B es el responsable de la transmisión y recepción radio, habitualmente en una celda aunque puede englobar varias. Sus funciones son la codificación-decodificación, modulación- demodulación dependiendo del sentido de la transmisión, y la amplificación de la señal entre otras.
- La RNC tiene como misión el control y gestión de recursos de la red de acceso radio. Principalmente se encarga de iniciar o restablecer llamadas, lanzar recursos cuando quedan liberados y gestionar los handovers.

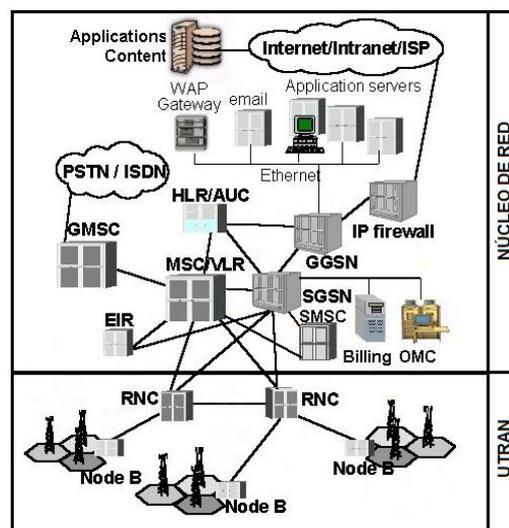


Fig. 1.2. Esquema red UMTS

1.3. Software Defined Radio

En la última década, los sistemas de telecomunicaciones inalámbricos han ido evolucionando a un ritmo frenético para responder a los requisitos, cada vez más exigentes, de los usuarios.

Tradicionalmente, la mayoría de las operaciones de procesado de señal de los dispositivos de comunicación se realiza mediante hardware. Las incompatibilidades entre los diferentes sistemas han supuesto un problema a la hora de reutilizar equipos o prestar determinados servicios.

El Software Defined Radio (SDR) surge para solucionar estos inconvenientes de compatibilidad, realizando el procesado de señal para las radiocomunicaciones por medio de un dispositivo capaz de ser modificado mediante software, logrando así un cambio dinámico, automático y eficiente entre tecnologías, sin tener que cambiar el hardware.

El uso de esta tecnología es posible gracias a la evolución de los procesadores que actualmente proporcionan miles de millones de operaciones por segundo, orden de magnitud necesaria para el Software Radio. Sin embargo, y debido a la limitación de los circuitos de radio frecuencia (RF), el SDR también debe incluir dispositivos hardware no programables, pero reconfigurables.

La primera implementación importante del concepto SDR fue en el proyecto militar estadounidense SpeakEasy, cuyo objetivo era implementar más de 10 tipos de tecnologías de comunicaciones inalámbricas en un equipo programable, operando en la banda de frecuencias de 2 MHz a 200 MHz. Un objetivo adicional del proyecto era que el prototipo debía tener la posibilidad de actualizar su código para que así se pudieran tener en cuenta los estándares futuros. El proyecto se inició en 1991 y finalizó en 1996 logrando sus objetivos y trabajando finalmente en el rango de 4 a 400 MHz [1].

Desde entonces, se han diseñado diferentes dispositivos SDR que han marcado un importante avance en este campo, abriendo paso así, a la radio cognitiva y a la Software Defined Antenna (SDA).

La radio cognitiva fue introducida por J.Mitola quién la definió como un sistema capaz de cambiar automáticamente los parámetros de su transmisión o recepción, de manera que toda la red inalámbrica se comunica de forma eficiente, basándose en el seguimiento activo de varios factores del entorno tales como el espectro de radio frecuencia, el comportamiento del usuario y el estado de la red. Por lo tanto, la radio cognitiva se puede definir como “*un equipo radio definido por software con un cerebro cognitivo motor*” [2].

La SDA, siguiendo y explotando el concepto de Software Defined Radio, es un sistema de antena capaz de ajustarse de tal manera que mantiene las mismas características de transmisión para cualquier frecuencia. Una vez instalada, sería capaz de soportar cualquier sistema de telecomunicaciones sea cual sea su banda, con el mismo nivel de rendimiento, por ejemplo, GSM 900 MHz, DCS 1800 MHz, UMTS a 2100 MHz seguido de LTE en la banda de 2600.

De las tres tecnologías presentadas, existen numerosos tecnólogos europeos y americanos, financiados por las fuerzas armadas u otras instituciones, que han logrado numerosos avances en el campo, obteniendo los primeros prototipos operacionales, por lo que no es de extrañar que estas tecnologías marquen el inicio de una nueva era en el sector de las telecomunicaciones en un futuro no muy lejano.

1.4. Sistema SDR Cloud

Las redes de telecomunicaciones, hasta el momento, se han dimensionado para un número determinado de usuarios, asignando de manera fija, los recursos necesarios para el servicio. El principal inconveniente que presenta este tipo de diseño, es la ineficiencia frente a bajas en la demanda, donde los recursos quedan inactivos y sin poder reutilizarse para otros fines.

El término Cloud Computing (Computación en nube), es uno de los conceptos que están ganando adeptos en el mercado de las tecnologías de la información, y se refiere a “infraestructura como servicio”, es decir, los recursos de software no están del lado del usuario, sino que se proveen como un servicio a través de internet.

De esta forma, el Cloud Computing es un sistema distribuido formado por un conjunto de ordenadores interconectados y virtualizados, con la función de dar servicio de forma flexible y dinámica, adaptada a la demanda en cada momento.

La arquitectura actual de la telefonía móvil está compuesta por un sinnúmero de elementos que requieren un gran despliegue de hardware. El hecho de utilizar redes de telecomunicaciones basadas en Cloud, permite a las operadoras compartir equipos y recursos de acceso radio (antenas) y centrarse únicamente en el desarrollo de estándares de comunicaciones y servicios.

El sistema basado en SDR Cloud, pretende unir todo el sistema de procesamiento de la señal, hasta ahora ubicado en las estaciones base, en un centro de datos.

El acceso radio quedaría dividido en dos subsistemas: la Red de Antenas y el subsistema de procesamiento de señal (Fig. 1.3).

- El subsistema de procesamiento consiste de un Data Center encargado de la parte de procesamiento de señal de los Nodos B.
- La Red de Antenas comprendería los equipos radiantes y un circuito RF formado por filtros, amplificadores y conversores analógico-digital y digital-analógico.

El uso de esta solución para infraestructuras móviles de banda ancha ofrece, entre otras ventajas:

- **Energía:** LightRadio reduce el consumo energético de las redes móviles de hasta un 50 % sobre el equipo actual de la red de acceso radio.
- **Enlace sin cables:** El enlace backhaul de microondas permite la cobertura de banda ancha prácticamente en cualquier lugar.
- **Mejora el ancho de banda del usuario:** duplica el ancho de banda ofreciendo velocidades de 100 Mbps en movimiento y 1 Gbps en un punto fijo al mismo tiempo que reduce el coste por bit, haciendo posible ofrecer nuevos servicios y precios más competitivos.

Orange, Movistar o China Mobile [4] son algunas de las operadoras que ya han cerrado acuerdos para probar esta nueva tecnología, con el objetivo de ofrecer 100 Mbps a través del teléfono móvil usando la tecnología de cuarta generación LTE (Long Term Evolution).

1.4.2. Requerimientos de procesamiento y traspaso de datos

La primera capa dentro de cualquier modelo de red está formada por el medio físico, encargada del envío de la información sobre un medio de transmisión.

Para ello es necesario realizar, además de la transmisión y recepción de la señal, su codificación y decodificación. Los conversores pueden situarse en el propio emisor, donde la transmisión de la señal se realizaría de manera digital o bien en el receptor, transportando la señal analógicamente.

Cada sistema presenta sus ventajas e inconvenientes en relación, principalmente, a la distorsión y el ancho de banda requerido.

Partiendo de la arquitectura actual de telefonía UMTS, donde la conversión se realiza en la antena mediante un convertor a 65 MHz y una resolución de 16 bits por muestra, es necesario un ancho de banda de transmisión de (65 MHz * 16 bits) 1040 Mbps por canal.

Si la conversión se realiza en el Data Center, la señal se multiplexa por longitud de onda y se transmite con canales de 5 MHz. Este sistema es más vulnerable a variaciones y presenta poco rango dinámico, por lo que es preciso muestrear el nivel de señal y ajustar la salida de ganancia con un CAG (Control Automático de Ganancia).

Además de los requerimientos de transmisión de datos y siguiendo con el estándar de tercera generación, un receptor SDR-UMTS requiere cerca de 10 GOPS (Giga Operation Per Second) por usuario para el procesamiento de la señal [5].

1.4.3. Ventajas e Inconvenientes

Con el nuevo sistema, las estaciones base eliminarían las casetas y sus equipos de refrigeración, además reducirían considerablemente su tamaño, mejorando el impacto visual y minimizando costes de instalación (Fig. 1.5).

El traslado de equipos de procesamiento de señal al Data Center reducirá el consumo eléctrico de la estación y el volumen de baterías necesarias para dar servicio en caso de corte en el suministro eléctrico. Los recursos de cómputo podrán compartirse entre varios operadores radio, que proporcionan servicio a sus usuarios ubicados en varias zonas de la ciudad. De este modo, el sobredimensionamiento del sistema para el peor de los casos será menor y presentará mejor adaptabilidad a las variaciones geográficas del tráfico.

La adaptación de los equipos RF a reconfigurables minimizará costes de adaptación a nuevas tecnologías y permitirá una actualización en masa del sistema.

Como inconvenientes destaca el coste de implementación que supone el despliegue de un nuevo sistema de comunicaciones basado en SDR Cloud, el cual analizaremos en este proyecto y el Resource overhead o “gasto adicional de recursos” que supone hacer el tratamiento de la señal mediante software, usando procesadores.

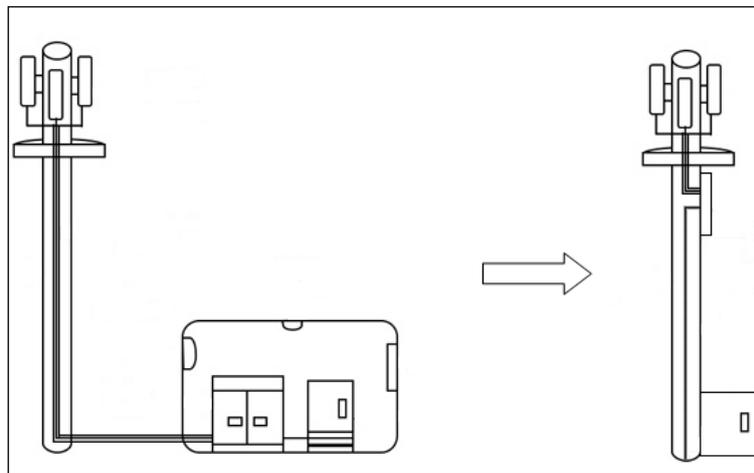


Fig. 1.5. Esquema estación base UMTS actual y parte RF del SDR Cloud

En resumen, el sistema SDR presenta las siguientes ventajas:

- Reducción impacto medioambiental
- Reducción coste operacional
- Reducción consumo eléctrico
- Reducción coste adaptación a nuevas tecnologías
- Sistema reconfigurable

Y desventajas:

- Coste del despliegue SDR Cloud
- Resource overhead

1.5. Objetivo y organización de la memoria

Este proyecto estudia la viabilidad de una nueva infraestructura de acceso radio, uniendo los conceptos SDR y Cloud Computing para diseñar y gestionar estaciones base de futuro. Este sistema une el concepto *SDR* con el *Cloud Computing* para facilitar la compartición de recursos de cómputo y una mayor eficiencia de su uso.

La finalidad consiste en un estudio sobre la viabilidad de implementación de este sistema para proporcionar servicio de comunicaciones móviles en el área metropolitana de Barcelona.

Para llevar a cabo este análisis, se ha dividido la memoria en los siguientes capítulos:

- *Capítulo 1. Introducción:* este primer capítulo ofrece una primera visión del concepto de Software Defined Radio, así como la comparación entre la estructura actual de las comunicaciones móviles y la estructura SDR Cloud. Además contiene un análisis de nuevas tecnologías que se aplicarán a corto plazo y que permitirán su adaptación de forma más fácil y económica.
- *Capítulo 2. Análisis situación actual:* en este capítulo se analiza el contexto actual de las redes de telecomunicaciones, estimando los costes operacionales para comprobar la viabilidad económica de la implantación de la nueva red. También se recopilan los datos necesarios para la ejecución del diseño.
- *Capítulo 3. Equipos y tecnología SDR Cloud:* se analizan las características de los equipos para implementar el diseño. El capítulo contiene un estudio sobre los equipos necesarios para el procesamiento de la señal, así como un análisis de la tecnología actual de las redes de fibra óptica necesarias para su transporte
- *Capítulo 4. Implementación SDR Cloud:* se aborda el diseño de un SDR Cloud para Barcelona, teniendo en cuenta diferentes estándares para el centro de datos y la red de fibra óptica. También se analiza el coste total de su implementación.
- *Capítulo 5. Análisis de resultados:* en este último capítulo, se realiza una comparación de los dos sistemas, así como las conclusiones del proyecto realizado y un análisis de líneas futuras.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS SITUACIÓN ACTUAL

El proyecto pretende estimar los costes de instalación y servicio de un sistema de telecomunicaciones SDR Cloud en la ciudad de Barcelona. Para ello, y a modo de estudio previo, es necesario considerar entre otros parámetros, el número de usuarios y sesiones activas para calcular los recursos necesarios y sus costes.

2.1. Datos geográficos y demográficos

Barcelona tiene una superficie total de 101 km² dividida en 10 distritos (Fig. 2.1) con una densidad de población media de 19.721 habitantes por kilómetro cuadrado (hab/km²) (Tabla 2.1).

Según el último censo realizado en 2010 por el Instituto Nacional de Estadística (INE), en Barcelona hay aproximadamente 1.620.000 habitantes [6].

L'Eixample, concentra cerca del 26 % del comercio de Barcelona, engloba los principales intereses turísticos con más de 4,5 millones de visitantes al año, tiene la mayor oferta hotelera con un 32,7 %, y abarca también las principales vías de comunicación. Con 265.785 habitantes censados y 45.000 habitantes no residentes más de media, lo convierte en el distrito más poblado de Barcelona, de España y uno de los más poblados de Europa [7].



Fig. 2.1. Mapa de los distritos de Barcelona

Tabla 2.1. Superficie, población y densidad de los distritos de Barcelona.

Distrito	Superficie km²	Población 2010	Densidad hab/km²
Ciutat Vella	4,49	104.507	23.923
Eixample	7,46	265.785	35.550
Sants-Montjuïc	21,35	182.914	7.973
Les Corts	6,08	82.883	13.774
Sarrià-Sant Gervasi	20,09	144.537	7.193
Gràcia	4,19	122.990	29.385
Horta-Guinardó	11,96	170.795	14.296
Nou Barris	8,04	167.949	20.885
Sant Andreu	6,56	146.844	22.367
Sant Martí	10,80	230.133	21.868
TOTAL	101,02	1.619.337	19.721,4

Fuente: Ajuntament de Barcelona – Informes estadístics

2.1.1. Población para el estudio

Para estimar de forma más precisa el número de usuarios de telefonía móvil que hay en Barcelona, es necesario tener en cuenta, a parte de la población censada, los flujos de población diarios que se producen en la ciudad por motivos laborales, curriculares y comerciales. De esta forma se podrá estimar y ubicar el número máximo de usuarios. Para ello, hay que tener en cuenta los desplazamientos que se realizan diariamente en Barcelona (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Desplazamientos diarios en días laborales y festivos.

Laborables		
Motivo	Migraciones	Emigraciones
Laboral	277.493	143.616
Estudiante	75.278	9.907
TOTAL	352.771	153.523
Fines de semana y festivos		
Laboral	11.718	2.191
Comercial-Turismo	41.521	32.331
TOTAL	53.239	34.522

Fuente: Ajuntament de Barcelona – Informes estadístics

Según estos datos el incremento poblacional registrado los días laborales es de 199.248 personas y los fines de semana y festivos es de 18.717 personas. Con estas cifras podemos estimar que el número máximo de habitantes es de 1.818.585 habitantes y se concentra en los días laborales.

2.2. El mercado de las telecomunicaciones

Según datos del último estudio de la Comisión de Mercado de las Telecomunicaciones (CMT) correspondiente al 3º-Trimestre de 2011 [8], actualmente en España existen 25 operadores de telefonía móvil, de los cuales solo 3 de ellos disponen de infraestructura propia relevante. Estas 3 operadoras se dividen el 89,5% de la cuota de mercado nacional, dando servicio a más de 46 millones de usuarios (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Operadoras y cuotas de mercado.

Operadora	Nº Líneas España	Cuota Mercado España	Cuota Mercado Cataluña
Movistar	21.270.235	41.1%	39.0%
Vodafone	14.595.355	28.2%	31.5%
Orange	10.452.422	20.2%	21.7%
Yoigo	2.535.297	4.9%	3.5%
Resto	2.898.359	5.6%	4.3%
TOTAL	51.751.668	100%	100%

Fuente: CMT

2.2.1. Barcelona

Teniendo en cuenta el censo y los flujos de población de la ciudad, podemos tasar el número medio de habitantes, pero para determinar el número máximo de usuarios de la red, es necesario tener en cuenta la tasa de penetración de la telefonía móvil que, calculada con datos del último censo INE-2010, es del 110,1% [6]. Con estos datos se estima que diariamente acceden a la red más de 1,9 millones de usuarios (Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Número de usuarios en Barcelona registrados en la red de telefonía móvil.

Operador	Nº Usuarios Barcelona
Movistar	758.734
Vodafone	612.824
Orange	422.167
Yoigo	58.145
Resto	64.977
TOTAL	1.916.847

2.2.2. Despliegue

En Cataluña, Movistar tiene alrededor de 2000 estaciones base, de las cuales 480 se sitúan en Barcelona ciudad, con las que da servicio a 758.734 usuarios.

El número aproximado de estaciones base para las tres principales compañías Movistar, Vodafone y Orange es prácticamente el mismo dado que cubren la misma área de cobertura. Se ha de tener en cuenta que estas compañías comparten aproximadamente un 20 % de estaciones base, lo que supone cerca de 300 emplazamientos. Por lo tanto podemos estimar que en Barcelona ciudad hay un total de 1.150 estaciones base.

2.3. Conexiones de voz y datos

Para estimar el tráfico de la ciudad de Barcelona, Movistar ha facilitado algunas cifras tales como el número de llamadas en 2G y 3G de diferentes días, tanto laborables como festivos, lo que ha permitido crear la base para la estimación de las llamadas de otras compañías, basándose en su cuota de mercado y asumiendo que el comportamiento del usuario no presenta cambios significativos.

2.3.1. Voz

Para calcular el número de llamadas total, se ha tomado como base, la suma de los promedios de llamadas, tanto en laborable como en festivo.

Sobre la base de llamadas real de Movistar, se ha estimado el número de llamadas correspondiente a las tres principales operadoras teniendo en cuenta su cuota de mercado.

Con estos datos, se estima que en Barcelona ciudad hay cerca de 10 millones de llamadas diarias con una duración media de 2.25 minutos. La Tabla 2.5 desglosa el número medio de llamadas diarias de los principales operadoras.

Tabla 2.5. Número medio de llamadas diarias

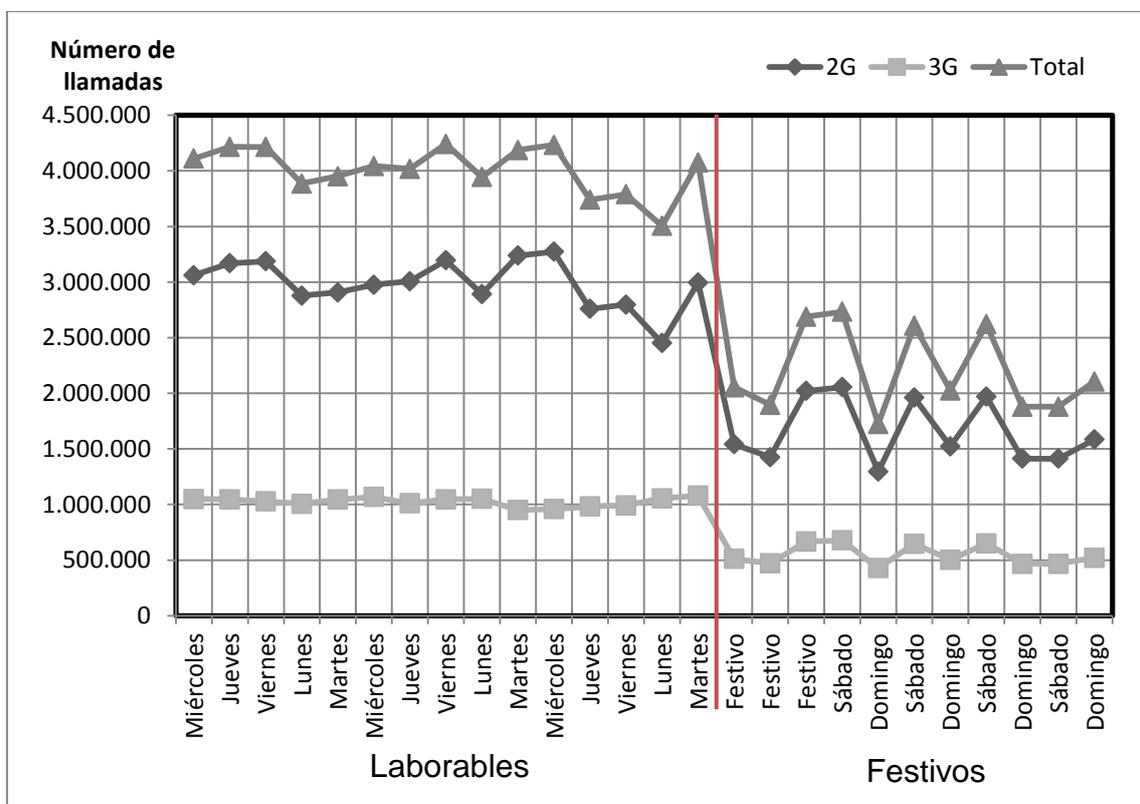
Operadora	Laborables	Festivos
Movistar	3.998.347	2.968.827
Vodafone	3.229.434	2.397.899
Orange	2.224.721	1.651.886
TOTAL	9.452.502	7.018.612

Actualmente las comunicaciones móviles se realizan mediante dos tecnologías: 2G y 3G.

En relación al tráfico realizado en GSM (Global System for Mobile communication) —sistema de segunda generación—, los días laborables hay una media de 2.985.919 llamadas, mientras que durante el fin de semana se registran 1.655.005 llamadas diarias.

La relación de llamadas que se efectúan con tecnología 2G respecto a 3G, es 3 a 1, por lo tanto, podemos estimar que en días laborables hay un tráfico medio de 1.016.585 llamadas 3G, que se reduce a 552.855 llamadas diarias durante el fin de semana, todas ellas a través de la red UMTS.

La figura 2.2 muestra el número de llamadas diarias de usuarios de Movistar en el área metropolitana de Barcelona. La medición se realizó durante el mes de diciembre de 2011.



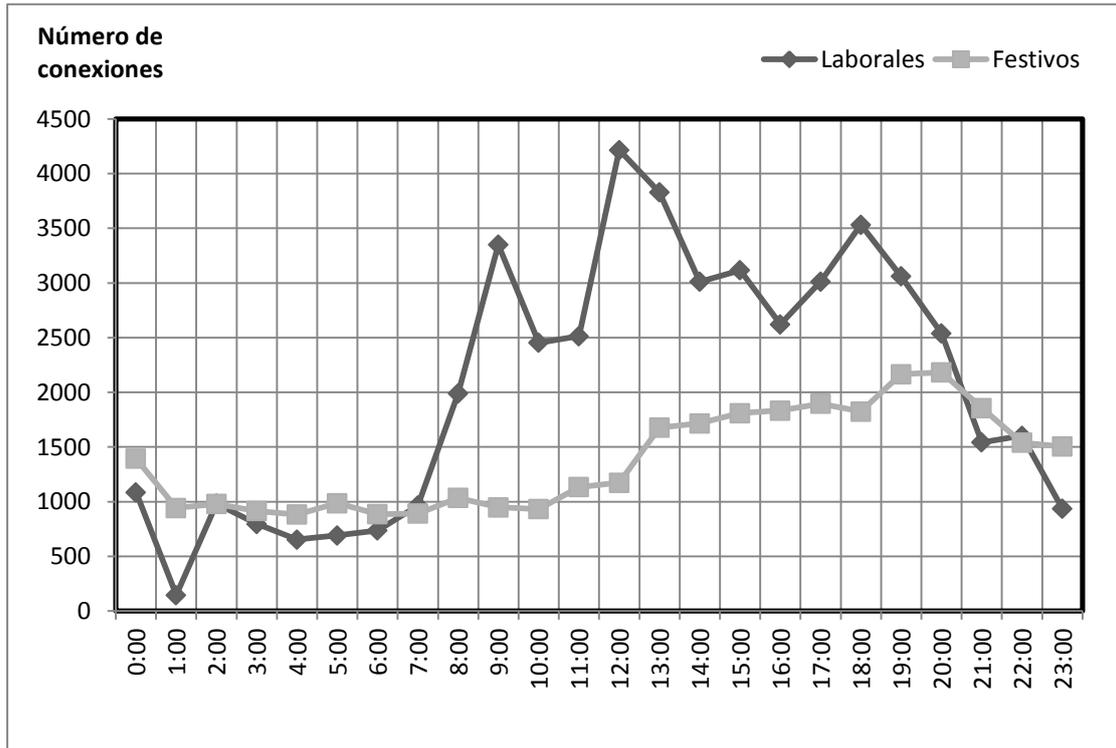
Fuente: Movistar, usado con permiso

Fig. 2.2. Gráfico llamadas días laborables y festivos

2.3.2. Datos

Según datos de la Fundación Orange el mercado global de los teléfonos inteligentes, anotó un crecimiento del 54,7% durante el último trimestre de 2011. Actualmente hay 14 millones de líneas de banda ancha móvil con una penetración de servicio del 34,8%.

España es el 5º país europeo que más usa internet móvil con una media de 23.8 horas al mes [9].



Fuente: Movistar, usado con permiso

Fig. 2.3. Tráfico de datos en un sector de antena en el centro de la ciudad

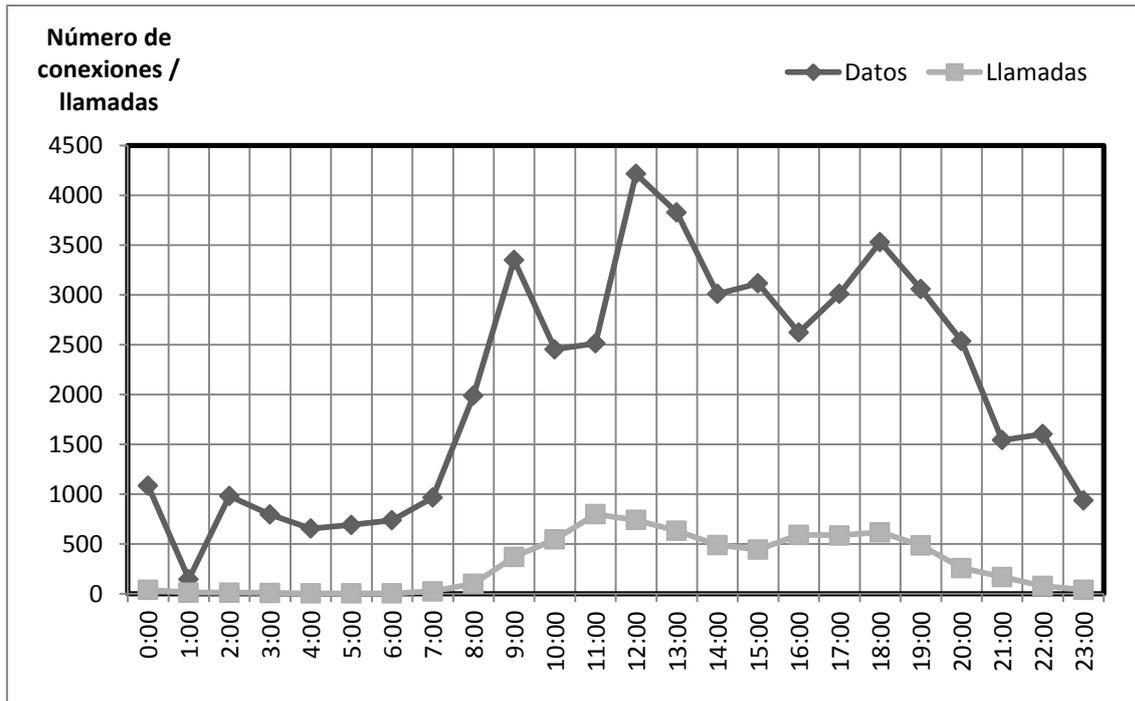
Una antena situada en el centro de la ciudad, atiende una media diaria de 148.152 conexiones de datos en días laborales y 99.309 conexiones los festivos (Fig. 2.3).

El 60% de las conexiones se registra en las antenas situadas en el centro de la ciudad y en ubicaciones donde se concentran un gran número de usuarios como estadios de fútbol o centros comerciales, con una media mensual de 3.575.518 conexiones por antena.

En toda Barcelona se contabilizan 92.465.082 conexiones de datos diarias y 2.773.952.460 mensuales con un tiempo medio de 41,6 segundos por sesión.

2.3.3. Conexiones simultáneas

Para estimar el número de llamadas simultáneas que hay en la ciudad, analizamos un sector de antena situada en el centro de Barcelona. En la hora cargada se gestionan de media 740 llamadas de voz y 4.216 conexiones de datos (Fig. 2.4).



Fuente: Movistar, usado con permiso

Fig. 2.4. Gráfico llamadas y conexiones de datos en un sector de antena del centro de la ciudad

Asumiendo una distribución uniforme de conexiones dentro de la ventana temporal de la hora cargada, se estima el número de conexiones simultáneas de la siguiente manera:

Llamadas

Conociendo el número de llamadas que se realizan en la hora cargada determinamos el número de llamadas que se realizan por minuto (2.1).

$$\text{Llamadas: } \frac{740 \text{ llamadas/hora}}{60 \text{ min/hora}} = 12,33 \text{ llamadas/minuto} \quad (2.1)$$

Sabiendo que la duración media de las llamadas es de 2.25 minutos, estimamos el número de llamadas simultáneas (2.2).

$$12,33 \text{ llamadas/minuto} \times 2,25 \text{ min.} = 27,75 \text{ llamadas simultáneas} \quad (2.2)$$

En zonas residenciales el tráfico se reduce un 60%, bajo estas premisas se concluye que en el centro de Barcelona se atienden 28 llamadas simultáneas y 12 en zonas residenciales.

Datos

Conociendo que la duración media de las conexiones de datos es de 41,6 segundos, calculamos análogamente el número de conexiones simultáneas (2.4 y 2.5) estimando finalmente que se realizan 49 conexiones de datos simultáneas.

$$\text{Conexiones: } \frac{4.216 \text{ conexiones/hora}}{3600 \text{ segundos/hora}} = 1,17 \text{ conexiones/segundo} \quad (2.4)$$

$$1,17 \text{ conexiones/segundo} \times 41,6 \text{ segundos} = 48,7 \text{ conexiones simultáneas} \quad (2.5)$$

Teniendo en cuenta el número de usuarios de cada compañía, habrá 51.958 llamadas simultáneas en Barcelona y 91.219 conexiones de datos (Tabla 2.6).

Tabla 2.6. Número de conexiones simultáneas por operador.

Operadora	Voz	Datos
Movistar	21.978	38.585
Vodafone	17.751	31.165
Orange	12.229	21.469
TOTAL	51.958	91.219

2.4. Estaciones Base Actuales

Las estaciones base están formadas por:

- Equipos de radio, transmisión, energía, etc.: pueden situarse en una caseta prefabricada, en un cuarto interior, o a la intemperie.
- Sistema radiante: conjunto de elementos y antenas que proporcionan la cobertura radio a los terminales móviles de las inmediaciones.

La figura 2.5 identifica los principales componentes de una estación base común. La mayoría de estaciones base en las ciudades son indoor, es decir, poseen una caseta donde se instalan todos los equipos necesarios, aunque en algunas zonas pueden hallarse dentro de armarios de intemperie, abaratando así los costes.

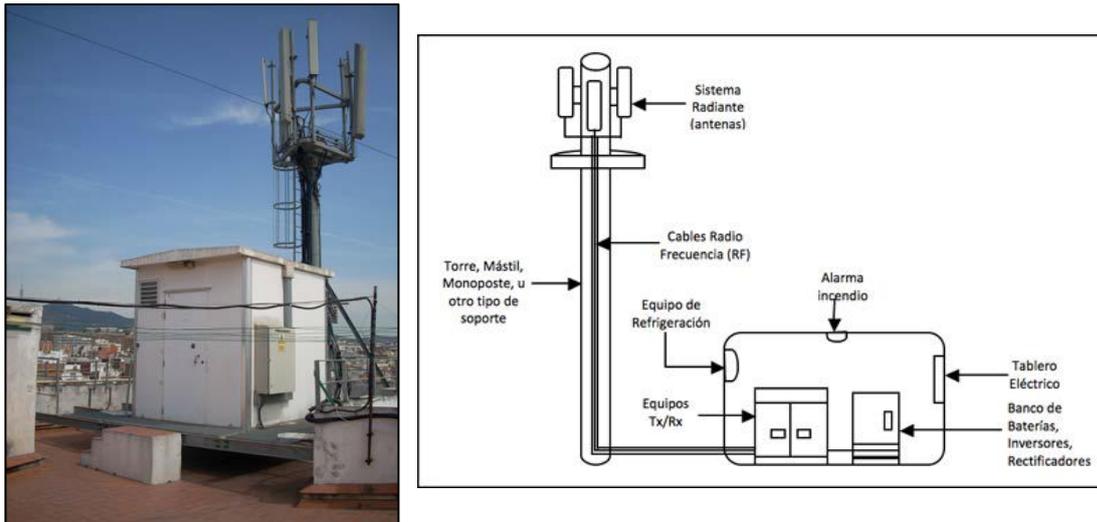


Fig. 2.5. Estación base común

2.4.1. Instalaciones necesarias

2.4.1.1. Instalación caseta

Normalmente se tiende a instalar casetas prefabricadas para reducir tiempo y mano de obra, aun así, habitualmente es necesaria una adecuación del terreno, como la construcción de una bancada de hormigón donde ubicar el bastidor del equipo, si se trata de un equipo de intemperie, o la instalación de unas vigas de apoyo si se trata de una caseta en una azotea.

Estas tareas de obra civil suponen un considerable gasto que hay que sumar al coste de arrendamiento del espacio, que en zonas céntricas se puede llegar a pagar 7.000 € anuales, mientras que en zonas poco pobladas o rurales la cifra queda por debajo de los 1.000 €. Los emplazamientos, además, han de permitir el acceso del personal las 24 h.

2.4.1.2. Instalación eléctrica

En cada estación base es necesario hacer una instalación trifásica de baja tensión con un contador propio, normalmente de doble tarifa, que se ubica en la propia caseta o en la sala de contadores del edificio.

Además, para el suministro de energía de los equipos de procesamiento que utilizan alimentación en continua y para asegurar el funcionamiento en caso de fallo del suministro eléctrico, es necesaria la instalación de un rectificador y un banco de baterías.

2.4.1.3. *Instalación equipos refrigeración*

Con el objetivo de mantener dentro de las estaciones de telefonía móvil unas condiciones de temperatura, humedad y ventilación óptimas para el correcto funcionamiento de los equipos, es necesaria la instalación de un sistema de climatización y ventilación.

Según los equipos instalados, la disipación de calor puede llegar a 10.000 KJ/h, siendo necesario instalar dos equipos de aire acondicionado, uno principal y otro de respaldo, de igual o más potencia. Estos equipos tienen un consumo medio aproximado de 2.780 Wh.

2.4.1.4. *Instalación equipos alarma*

Al tratarse de casetas no vigiladas, es preciso monitorizar el sistema. Para ello habitualmente se instalan alrededor de 15 alarmas encargadas de controlar desde una intrusión o un incendio, hasta un fallo de suministro [10].

2.4.1.5. *Instalación equipos de transmisión*

La RRU (Remote Radio Unit) es la unidad encargada de la parte de radiofrecuencia, que se conecta a las antenas mediante cable RF. La RRU tiene como funciones principales:

- Traslado de las señales a frecuencia intermedia, amplificación, filtrado, conversión analógico-digital y transmisión a los equipos de procesamiento.
- Recepción, filtro y conversión digital-analógico de señales en banda base procedentes de los equipos de procesamiento del Nodo B y transformación de las señales de RF a la banda de frecuencia de transmisión.
- Además, para que las señales de transmisión y recepción compartan el mismo camino, se encarga de multiplexar y filtrar las señales en el enlace ascendente y descendente.

Como norma general la RRU se instala lo más próximo a las antenas de radio para evitar la atenuación.

Comúnmente las RRU son de 40 o 60 W, con dos versiones de alimentación tanto a 48 V DC como 230 V AC y un consumo de 240 Wh [10].

2.4.1.6. *Instalación equipos de procesado de señal*

La BBU (Base-Band Unit) es la unidad que realiza el procesado en banda base del nodo B. Cada unidad es capaz de controlar hasta 3 RRUs conectadas mediante fibra óptica. Todos los emplazamientos acostumbran a equipar dos unidades, la maestra y la esclava que es un backup de la primera.

Las BBUs disponen habitualmente de 2 versiones de alimentación: una a 48 V DC y otra a 24 V DC y tienen un consumo de 60 Wh [10].



Fig. 2.6. Interior caseta estación base común [10]

2.4.2. Estimación coste estaciones base actuales

2.4.2.1. Coste instalación

Las operadoras tienen diferentes acuerdos con las principales marcas suministradoras de equipos como Huawei, Ericsson, Nokia o Alcatel entre otras, con precios que dependen del historial del volumen de compra a nivel corporativo, lo que hace difícil estimar el coste de instalación de las estaciones base.

La implantación de la tecnología 3G en muchos casos resultó más económica al poder aprovechar emplazamientos y equipos de la red GSM y DCS (Digital Cellular Service – GSM 1800), necesitando únicamente la instalación o sustitución de las antenas por antenas tribanda e instalando los nuevos equipos en el bastidor de la caseta.

Analizando licitaciones de diferentes compañías, el coste medio de instalación de una nueva estación base representa una inversión de 86.000 € de media si únicamente se quiere dar servicio UMTS y 124.000 € si se incluyen, además, equipos GSM/DCS (Tabla 2.7).

Tabla 2.7. Coste instalación estación base [10]

Elementos		Precio [€]
Emplazamiento	Adecuación terreno y caseta	12.000
Instalación eléctrica	Acometida y cuadro eléctrico	5.000
Equipos de fuerza	Bastidores, baterías y rectificadores	12.000
Equipos refrigeración	Aire acondicionado + redundancia	8.000
Sistema alarma	15 sistemas alarma	1.000
Sistema radiante	Antena, divisores, triplexores, diplexores, combinadores y cables	8.000
Equipo transmisión y procesamiento	RRU y BBUs	40.000
TOTAL UMTS		86.000
Equipo procesamiento	GSM / DCS	38.000
TOTAL UMTS-GSM-DCS		124.000

2.4.2.2. Coste operacional

El principal gasto de mantenimiento de las estaciones base es el consumo eléctrico, particularmente de los equipos de refrigeración. Los equipos de procesamiento han de trabajar a una temperatura inferior a 25 °C. Por ese motivo el consumo varía en función de la estación del año (Tabla 2.8).

Tabla 2.8. Estimación consumo equipos refrigeración de una estación base [11]

Estación	Nivel medio de potencia	Horas de funcionamiento al día (media)	Consumo mensual [kWh/mes]	Consumo temporada [kWh/temp.]
Invierno	10 %	6	50,4	151,2
Primavera y Otoño	30 %	18	453,6	2.721,6
Verano	60 %	24	1.209,6	3.628,8

Sin tener en cuenta los posibles acuerdos entre operadoras y empresas suministradoras de electricidad, y en base a las tarifas eléctricas del presente año (Tabla 2.9), un emplazamiento equipado con un equipo UMTS tiene un gasto eléctrico aproximado anual de 13.000 €, mientras que si también ofrece servicio GSM/DCS asciende a 13.750 € (Tabla 2.10).

Tabla 2.9. Tarifa eléctrica

Tarifa	Potencia contratada [€/kW día]	Coste energía 12h-22h [€/kWh]	Coste energía 22-12h [€/kWh]	Impuesto Electricidad
Potencia < 10 kW	0,06312	0.164896	0.067697	4.864% de (P+E) * 1.05

Fuente: Ministerio de Industria, Energía y Turismo [12].

Tabla 2.10. Coste operacional de una estación base

Elementos		Consumo hora	Coste mensual	Coste anual
Emplazamiento	Alquiler terreno	0	500 €	6.000€
Sistema de refrigeración	Consumo	2780 Wh	537,93 €	6.455,16 €
Sistema transmisión	Consumo	240 Wh	39,83 €	477,94 €
Sistema procesamiento	Consumo	60 Wh	9,96 €	119,49 €
TOTAL con impuestos			1.087,72 €	13.052,58 €
Sistema GSM/DCS y refrigeración	Consumo	350 Wh	58,08 €	697,00 €
TOTAL UMTS-GSM-DCS			1.145,80	13.749,58

Acorde con los datos de la tabla 2.10 se estima que el coste operacional del conjunto de las estaciones base en Barcelona supera los 15 millones de euros.

2.5. Resumen capítulo

En este capítulo se ha analizado la población de Barcelona, con la finalidad de determinar, a través de las cuotas de mercado de las operadoras, el número estimado de usuarios de telefonía móvil que hay en la ciudad, llegando a una estimación de 1.916.847 usuarios.

Una vez determinado el número de usuarios de la red, se ha hecho un análisis de consumo concluyendo que los usuarios usan las comunicaciones móviles con mayor frecuencia los días laborables.

Ante estos datos se ha estimado el volumen de tráfico simultáneo de la red, que asciende a 51.958 llamadas y 91.219 conexiones de datos, y que servirá como base para determinar la capacidad de procesamiento necesaria de la red.

Por último se ha hecho una tasación del coste de instalación de una estación base UMTS estándar, que es alrededor de 124.000 €, así como una aproximación del coste anual de operación que oscila entre 13.000 y 13.750 € dependiendo si se ofrece, también, servicio de segunda generación. Con esta estimación el gasto operacional del conjunto de estaciones base de la ciudad asciende a cerca de 16 millones de euros.

Tabla 2.11. Conclusiones capítulo

Llamadas y conexiones de datos simultáneas	51.958 llamadas y 91.219 conexiones
Instalación de una estación base UMTS	124.000 €
Coste de operación anual de los emplazamientos	15.839.520,10 €

CAPÍTULO 3: EQUIPOS Y TECNOLOGIA SDR CLOUD

3.1 Centro de datos

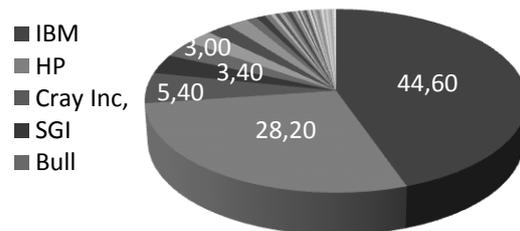
Uno de los objetivos del proyecto es el diseño de un centro de datos capaz de gestionar las comunicaciones de la ciudad de Barcelona.

Cada vez más empresas y gobiernos deciden crear su propio Data Center, es por ello que en los últimos años han crecido los proveedores de estos sistemas. Empresas como Hp, Dell, o IBM entre otras, ofrecen diferentes sistemas adaptados a las necesidades de cada empresa, institución o gobierno.

Tabla 3.1. Ranking por cuota de mercado

Proveedor	Número Data Centers	Mercado (%)
IBM	223	44.6
HP	141	28.2
Cray Inc.	27	5.4
SGI	17	3.4
Bull	15	3

Fuente: TOP500 [13]



Actualmente IBM se muestra como líder del mercado con una cuota del 44,6 % de los Data Centers más potentes y ecológicos del mundo (Tabla 3.1).

Debido a la proliferación de estos superordenadores, se inició en 1993 el proyecto TOP500, una lista con los sistemas más potentes del mercado, pensado para proporcionar una base fiable para el seguimiento y la detección de las tendencias de la computación de alto rendimiento. Dado el éxito del proyecto, en 2005 se propuso crear otro ranking llamado Green500, con las supercomputadoras con mayor eficiencia energética.

España tiene 3 supercomputadoras dentro del TOP500 (Tabla 3.2) y lidera la lista de los países con los Data Centers más eficientes del mundo, proporcionando una media de 609,12 MFlops (Million Floating point operations per second) por vatio, en segundo lugar se encuentra Taiwán con 603,85 MFlops/W e Italia en tercer lugar con 390,66 MFlops/W.

Tabla 3.2. Centro de datos españoles

Ranking	Ubicación	Sistema	Número de Cores	TFlop/s
114	Barcelona Supercomputing Center	Bullx B505, Xeon E5649	5544	103.2
228	Centro de Supercomputación y Visualización de Madrid	IBM BladeCenter PS702, Power7	3920	72.0
299	Barcelona Supercomputing Center	IBM BladeCenter JS21, PPC 970	10.240	63.8

Fuente: Green500 [14]

3.1.1 Procesadores

Respecto a la eficiencia de los procesadores se creó una corporación sin ánimo de lucro llamada Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC) con la misión de establecer un conjunto estandarizado de indicadores a aplicar a la nueva generación de ordenadores de alto rendimiento.

SPEC somete a las computadoras a diferentes pruebas de procesado de datos. Para este estudio se han recogido dos bloques de resultados, que describimos a continuación:

- “CPU rates”: destinado a medir las prestaciones de los sistemas en operaciones de coma flotante para tareas múltiples.

Entre las aplicaciones que recorren el sistema están las de: dinámica de fluidos, química cuántica, bioquímica, dinámica molecular, análisis de elementos finitos, mecánica estructural, electromagnetismo computacional, meteorología y reconocimiento de voz, entre otros.

- “CINT rates”: destinado a medir las prestaciones de los sistemas en operaciones de enteros para tareas múltiples. Para el análisis de los procesadores tendremos en cuenta esta métrica dado que las operaciones de procesado de la señal digital se realizan con coma fija.

Entre las aplicaciones que someten a los procesadores están las de: compresión de ficheros, compilación de C, optimización combinatoria, inteligencia artificial, computación cuántica, compresión de vídeo, algoritmos de búsqueda de caminos o procesado de XML, entre otros.

En este apartado se han analizado los diferentes procesadores que recoge SPEC añadiendo otros parámetros importantes desde el punto de vista del estudio, como el precio del chip o el consumo.

Tabla 3.3. Ranking procesadores

Ranking por CINT					
Modelo Chip	CPU	CINT	Precio [€]	Consumo [Wh] [15]	CINT / consumo
Intel Xeon E7-2870	35,5	180	3.382	130	1,385
Intel Xeon E7-8837	32,15	172,25	3.070	130	1,325
Intel Xeon X5675	31,625	155,75	1.669	105	1,483
Intel Xeon X5672	29,65	148	985	130	1,138
Intel Xeon X5670	28,5	144	776	95	1,516
Ranking por CINT / Consumo					
Intel Xeon X5670	28,5	144	776	95	1,516
Intel Xeon X5675	31,625	155,75	1.669	105	1,483
Intel Xeon E7-2870	35,5	180	3.382	130	1,385
Intel Xeon E7-8837	32,15	172,25	3.070	130	1,325
Intel Xeon X5672	29,65	148	985	130	1,138
Ranking por CINT / Precio					
Modelo Chip	CPU	CINT	Precio [€]	Consumo [Wh] [15]	CINT / Precio
Intel Xeon X5670	28,5	144	776	95	0,186
Intel Xeon X5672	29,65	148	985	130	0,150
Intel Xeon X5675	31,625	155,75	1.669	105	0,093
Intel Xeon E7-8837	32,15	172,25	3.070	130	0,056
Intel Xeon E7-8837	32,15	172,25	3.070	130	0,053

Fuente: SPEC [16]

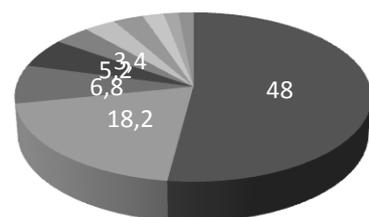
Como se puede observar en la Tabla 3.3, Intel se sitúa en lo más alto de los rankings, por eso no es de extrañar que sus procesadores estén presentes en más del 73 % de los centros de computación, seguido por los AMD Opteron (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Cuota mercado por tipo de procesador

Procesador	Número Data Centers	Mercado (%)
Xeon 5600	240	48
Xeon 5500	91	18.2
Opteron 6100	34	6.8
Xeon 5400	26	5.2
Opteron QC	17	3.4

Fuente: TOP500

- Xeon 5600-series
- Xeon 5500-series
- Opteron 6100-series
- Xeon 5400-series
- Opteron Quad Core



3.1.2 Sistemas Blade

Con la misión de crear un centro de procesamiento de datos, analizamos las diferentes opciones teniendo en cuenta la capacidad de procesamiento y el precio de adquisición, resultando la mejor solución el sistema dx360 M3 (Tabla 3.5), que aunque no proporcione la mejor relación velocidad – precio, admite mayor cantidad de Blades por bastidor, lo que reduce de forma considerable los costes de otros equipos necesarios para el funcionamiento del centro de datos.

Tabla 3.5. Estudio sistemas Blade por velocidad – precio.

Sistema	GOPS	Chips / blade	Cores / blade	Blades / bastidor	Precio [€]	GOPS / precio
dx360 M3 (Xeon X5670)	145	2	12	100	1.763	0,082
dx360 M3 (Xeon X5667)	130	2	8	100	1.599	0,081
x3550 M3 (XeonE5606)	127	2	8	42	1.199	0,106
HS22 (Xeon E5606)	126	2	8	42	1.459	0,086
dx360 M3 (Xeon E5620)	104	2	8	100	1.309	0,079

Fuente: Green500 e IBM [17]

3.2 Red de fibra óptica

La fibra óptica es un medio de transporte de datos de gran capacidad. Debido a sus propiedades físicas permite la transmisión de una señal óptica modulada a varios cientos o incluso miles de kilómetros dependiendo del tipo de fibra que se utilice. La señal generalmente se inserta a través de un laser y se recupera en el otro extremo mediante un foto receptor.

La aparición de la tecnología WDM (Wavelength Division Multiplex), ha conseguido una reducción significativa en los costes de instalación de fibra y un uso mucho más eficiente de los recursos. WDM se basa en el transporte de varios flujos de información, cada uno codificado sobre una longitud de onda distinta y multiplexados dentro de una única fibra. De esta manera se logra incrementar, de manera considerable, la capacidad de las redes de fibra óptica que pueden alcanzar fácilmente decenas de Gigabytes.

Aun así, los sistemas de banda ancha requieren una gran necesidad de espectro, lo que encarece, aun más, su transmisión de forma digital. Ante esta situación, y con la aparición de futuros estándares con mayores anchos de banda, cabría estudiar la posibilidad de transmitir la señal de forma analógica a través de la red de fibra. La ventaja principal de este sistema es la posibilidad de transportar múltiples canales con la misma frecuencia a través de un solo enlace. Además, los equipos necesarios para la transmisión analógica son más

económicos y consumen menos energía. En contrapartida, tal como se ha comentado, este sistema presenta limitaciones de rango dinámico, con lo que es necesario realizar control de potencia, o bien, control de ganancia [18].

En este proyecto, asumiremos tecnología digital, es decir, la conversión de datos se realizará en las antenas.

3.2.1 Topologías de red

Existen diferentes configuraciones de redes según el servicio que se desea prestar:

- Punto a punto: esta arquitectura utiliza una o más fibras ópticas dedicadas de la central al cliente. Esta configuración puede ser adecuada para usuarios que requieren grandes anchos de banda y alta seguridad.
- Estrella: Se trata de una red que comparte la fibra entre varios clientes utilizando multiplexores electroópticos activos en la red.
- Anillo: La configuración en anillo o bucle comienza y termina en la misma central, la oportunidad que ofrece para el encaminamiento alternativo es particularmente ventajosa en cuanto a la fiabilidad y el mantenimiento.
- Malla: Conecta todas las centrales entre sí. Se utiliza cuando no puede existir absolutamente ninguna interrupción en las comunicaciones, como por ejemplo el núcleo de red.

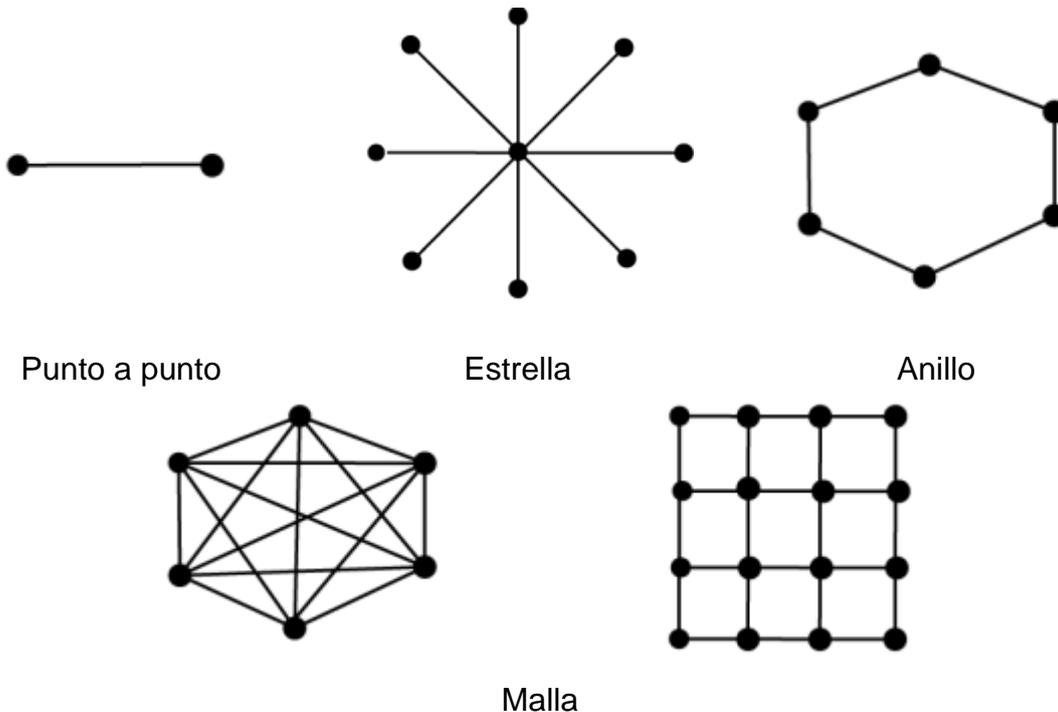


Fig. 3.1. Topologías redes de fibra óptica

3.2.2 Elementos de la red

Las redes ópticas están formadas principalmente por fibras y conectores que forman la propia red de distribución y por Terminales de Línea Ópticos y Terminales de Red Ópticos que constituyen los nodos:

- **Equipo concentrador u OLT (Optical line Terminal):** es un equipo activo situado en un extremo. Del OLT parten las fibras ópticas que unen el resto de elementos de la red.
- **Equipo terminal u ONT (Optical Network Terminal):** es el elemento activo situado al final de la red.

En el siguiente capítulo veremos estos elementos y su uso para interconectar las antenas con el data center del SDR Cloud.

3.3 Resumen capítulo

En este capítulo se ha realizado un estudio de mercado de los diferentes proveedores que lideran el sector de los equipos de procesado. Hemos visto que IBM proporciona unos equipos muy eficientes y potentes. También hemos analizado el rendimiento de diferentes procesadores, seleccionando el Intel Xeon X5670 que ofrece una capacidad de procesado de 72,1 GOPS.

Con este análisis se ha seleccionado para el diseño del Data Center el sistema dx360 M3 de IBM con un coste de 1.763 € por tarjeta de procesamiento. Cada tarjeta está equipada con dos procesadores Xeon X5670, ofreciendo 144,2 GOPS.

También hemos introducido los principales elementos de una red de fibra óptica, así como las diferentes topologías de conexión.

CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN SDR CLOUD

Las ventajas de la red SDR Cloud son principalmente la adaptabilidad del sistema a nuevos estándares, la optimización de recursos de procesamiento, el ahorro energético y, por lo tanto, la reducción de los costes de operación.

Para la implementación del sistema, asumimos, la compartición de las antenas y la red de fibra óptica entre las operadoras de la ciudad. En base a esto se realizará el diseño del sistema.

Para la implementación de la nueva red de telecomunicaciones basada en SDR Cloud, son necesarios los elementos siguientes:

- RRH (Remote Radio Head), que comprende la antena y el equipo de radio frecuencia, para la transmisión y recepción de la señal
- Red de fibra óptica, que está encargada del transporte de la señal entre el centro de datos y los RRHs
- Data Center, donde se realiza el procesamiento digital de la señal

4.1 Remote Radio Head

La tendencia actual de los sistemas radiantes se basa en la reconfiguración de parte del circuito de radiofrecuencia y en la deslocalización de los elementos de procesamiento de la señal. Estos nuevos emplazamientos son conocidos como Remote Radio Head (RRH) (Fig. 4.1).

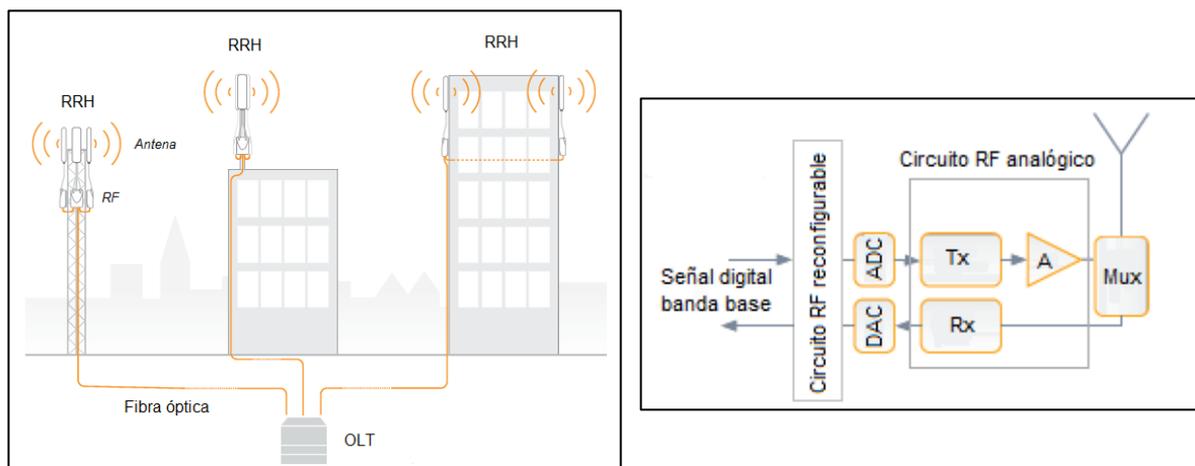


Fig. 4.1. Remote Radio Head [19]

Los RRHs proporcionan un menor impacto visual y disminuyen los costes de alquiler e instalación, debido a la reducción de su tamaño y a su fácil instalación.

Con la posibilidad de reconfigurar la frecuencia y el ancho de banda mediante software ofrecen mejor flexibilidad ante actualizaciones de tecnologías de transmisión y un mayor rendimiento al poder adaptar la capacidad, dado que pueden asignar dinámicamente los recursos en función de la demanda.

Además se mejora la eficiencia energética de los emplazamientos debido a la reducción de los equipos necesarios, principalmente los equipos de refrigeración que generan casi el 50% del consumo energético en las estaciones base actuales [19].

La instalación de la antena y el equipo de transmisión tiene un coste estimado de 21.000 € (Tabla 4.1) y un gasto de operación de 4.316,91 € anuales (Tabla 4.2).

Tabla 4.1. Coste instalación de un RRH

Elementos		Precio [€]
Emplazamiento	Adecuación terreno	1.000
Bastidor	Acometida y cuadro eléctrico	2.000
	Baterías y rectificadores	1.000
	Estructura y alarma	2.000
Sistema radiante	Antena, divisores, triplexores, diplexores, combinadores y cables	8.000
Equipo transmisión	Equipo RF	7.000
TOTAL		21.000

Tabla 4.2. Coste operacional

Elementos		Consumo medio	Coste mensual	Coste anual
Emplazamiento	Alquiler terreno	-	300* €	3.600* €
Sistema transmisión	Consumo	360 Wh	59,74 €	716,91 €
TOTAL con impuestos			359,74 €	4.316,91 €

* Reducción del 40% del coste de alquiler del emplazamiento debido a la reducción de tamaño [20]

4.2 Data Center

4.2.1 Estándares diseño Data Center

Para el diseño de un Data Center existen varios estándares: el TIA-942 estipulado por la Telecommunication Industry Association (TIA) [21] que ofrece

orientación sobre la distribución de los centros de datos y el TIER [22] creado por el Uptime Institute Inc, que determina, según sus características de configuración, el nivel de disponibilidad (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Disponibilidad (%) del centro de datos según TIER

	Tier I	Tier II	Tier III	Tier IV
Tiempo de caída anual	28.8h	22.0h	1.6h	0.4h
Disponibilidad	99.671%	99.741%	99.982%	99.995%

Bajo esta clasificación y dado el carácter del servicio es necesario ceñirnos a las recomendaciones del Tier IV, donde destacan:

Nivel eléctrico

- Respaldo servidores mediante baterías 5 - 30 minutos
- Generadores eléctricos con combustible diesel dado que permite un arranque más rápido que con gas natural
- UPS (Uninterruptible Unit Supply) con diseño 2(N+1)
- Un sistema remoto de monitoreo de todos los elementos del centro

Configuración de pasillos

- Pasillos fríos: con una anchura de 1,2 m, donde se realiza el cableado de potencia.
- Pasillos calientes: con una anchura de 0,8 - 1 m, donde se sitúa el cableado de datos.

4.2.2 Equipos e instalaciones necesarias

4.2.2.1 Racks de procesamiento

Para implantar el diseño de la red de comunicaciones basada en SDR, es necesario detallar los requerimientos del diseño. En apartados anteriores se ha visto que el diseño ha de ser capaz de atender la demanda de pico de cada compañía. Teniendo en cuenta que los recursos de procesado necesarios para un usuario de voz son del orden de 6,9 GFlops/s, y para un usuario de datos de 9,4 GFlops/s [5].

En base a los cálculos realizados en la sección 2.3.3, donde se estiman 51.958 llamadas y 91.219 conexiones de datos simultáneas, será necesario proporcionar 1.216 TFlops (Tabla 4.4) para dar servicio a todos los usuarios de Barcelona en momentos de máxima demanda.

Tabla 4.4. Recursos necesarios del servicio

Operadora	Llamadas	Recursos voz [Gops]	Datos	Recursos datos [Gops]	Total Recursos [Gops]
Movistar	21.978	151.648,2	38.585	362.699	514.347,20
Vodafone	17.751	122.481,9	31.165	292.951	415.432,90
Orange	12.229	84.380,1	21.469	201.808,6	286.188,70
TOTAL	51.958	358.510,2	91.219	857.458,6	1.215.968,80

Anteriormente hemos elegido el IBM dx360 M3 equipado con dos procesadores Intel Xeon X5670 de 6 núcleos. El procesador es capaz de realizar 4,1 instrucciones por segundo y trabaja a una frecuencia de 2,93 GHz [23]. Con estas características podemos determinar que cada Blade ofrece una capacidad de procesamiento en torno a los 144,2 GOPS (4.1).

$$4,1 \text{ instrucciones} / \text{ciclo} \times 2,93 \text{ GHz} \times 6 \text{ núcleos} = 72,08 \text{ GOPS} \quad (4.1)$$

Teniendo en cuenta la elección de este equipo serán necesarios 8.427 Blades para proporcionar servicio a los usuarios de las diferentes operadoras, con un coste de 14.856.801€ [24].

4.2.2.2 Bastidores

El IBM dx360 M3, forma parte de la línea de productos intelligent cluster de la marca, especializada en optimizar el espacio y los recursos de refrigeración gracias al sistema iDataPlex que a diferencia de los bastidores convencionales de 42U, cuenta con 100 unidades de espacio, conseguidos uniendo dos bastidores de 42U y proporcionando 16 bahías verticales adicionales para los conmutadores de red, PDUs, y otros aparatos como los de alimentación.

En este caso, se han destinado 64 bahías para los equipos de procesamiento, reservando 36 para otros equipos necesarios para asegurar un servicio sin interrupciones, como los sistemas de alimentación redundante y los sistemas UPS individuales que ocupan 16U, tal y como veremos más adelante. Las 20 bahías restantes se reservan para los Switch y otros equipos necesarios que no se han tenido en cuenta en el proyecto.

Para albergar las 8.427 tarjetas de procesamiento son necesarios 132 bastidores, con un precio total de 817.080 € [25].

4.2.2.3 Sistemas de alimentación

Sistema de alimentación DC para los equipos

Las tarjetas de procesamiento se concentran en grupos de 2 mediante un chasis que incorpora ventiladores y un sistema de alimentación de 900 W. Para garantizar el servicio, se ha de añadir, además, un sistema de alimentación redundante de 750 W, que se activa si hay alguna anomalía en el sistema de alimentación principal del chasis.

Teniendo en cuenta que en cada bastidor hay 64 tarjetas de procesado y por tanto 32 chasis, cada bastidor necesita $32 \cdot 900 \text{ W} = 28.8 \text{ kW}$ de potencia para funcionar con capacidad máxima. Por lo tanto la potencia necesaria para alimentar los equipos de procesado será de $132 \cdot 28.8 \text{ kW} = 3.801,6 \text{ kW}$.

Siguiendo las recomendaciones del fabricante, se han de instalar 4 equipos por bastidor. El precio de los 316 equipos necesarios asciende a 1.140.450 € [26].

Sistema UPS (Uninterruptible Power Supply)

Cada bastidor incorpora dos sistemas UPS individuales de alta eficiencia (96 %) con alarma y control remoto. Formados por un rack de 5U que proporciona 10.000 W y una ampliación de 3U con 10.000 W más, con los que se garantiza 14 minutos de servicio al máximo rendimiento y 35 con un rendimiento del 50 %.



Fig. 4.2. Rack 5U UPS10000 [27]

Contando que cada bastidor contiene dos sistemas independientes UPS, cada armario podrá funcionar sin suministro eléctrico durante 28 minutos al máximo rendimiento, tal y como estipulan los estándares de diseño. Los 264 UPS y sus ampliaciones, tienen un coste de 1.098.240 € [27].

Motor electrógeno diesel

Para asegurar el servicio en caso de caída del suministro eléctrico de forma prolongada es necesario instalar dos grupos electrógenos diesel independientes alimentados por dos depósitos de combustible.

Si el centro de datos está ubicado dentro de la ciudad se ha de instalar un grupo electrógeno insonorizado, que ofrece de media, unos niveles de ruido de

70 dB a una distancia de 10 metros, garantizando el nivel de ruido máximo permitido en Barcelona (Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Nivel de ruido permitido en Barcelona

Horario	Nivel máx. Zona residencial [dB]	Nivel máx. resto [dB]
Diurno	75	75
Nocturno	25	50

Fuente: Ajuntament de Barcelona [28]

Para alimentar el centro de datos serán necesarios cuatro equipos de 1800 kW, dos para dar servicio a los equipos y los otros dos de respaldo. Cada equipo tiene un depósito interno de 1000 l y ha de ir equipado con uno externo de 5000 l que asegura el servicio a pleno rendimiento durante 23 h (Tabla 4.6).

Los equipos vienen con sistemas de monitoreo, alarma y control remoto tal y como se estipula en el estándar.

Tabla 4.6. Equipos electrógenos y precio medio

Operadora	Grupo electrógeno [kW]	Depósito combustible [l]	Consumo [l/h]	Tiempo funcionamiento [h]	Precio equipos [€]
TOTAL	1800 (4)	5000 (4) + 1000	404	23.25	1.392.000

Fuente: Estudio mercado [31]

4.2.2.4 Sistemas de refrigeración

Los equipos de refrigeración requieren un nivel de potencia muy elevado y en consecuencia son los principales responsables del elevado consumo energético de los centros de datos. Por eso se recomienda equipar cada bastidor con una puerta refrigerada por agua, que según las características ofrecidas por el fabricante, es capaz de retirar 30 kWh trabajando al 90 %, que ya es más del calor generado por los equipos de procesamiento. Estos equipos tienen un coste de 1.380.720 € [29].

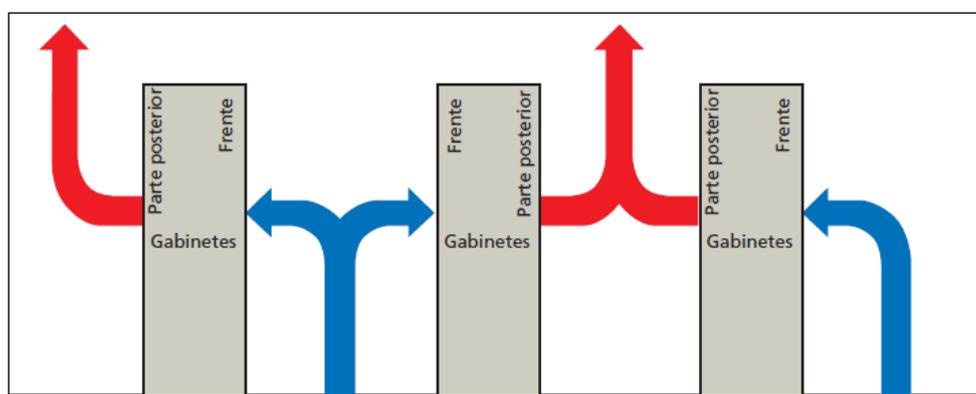
Cada bastidor genera 0.95 kW (Tabla 4.7) de calor que no puede absorber, con lo que es necesario equipar la sala de computación con un sistema de refrigeración principal y otro redundante, con una capacidad de 75 kW (88 Kfrigorías) cada uno. Esto tiene un coste de adquisición de aproximado de unos 190.000 € [30].

Tabla 4.7. Balance calor por bastidor

Equipo	Calor [kW]
Bastidores	28.8
Alimentación	0.650
Otros	1.5
Puerta refrigerada por agua	(-) 30
Total	0.95

Fuente: IBM - EE.UU

Para seguir los estándares, los equipos de refrigeración han de estar compuestos por un sistema de aspiración de calor ubicado en el techo de los pasillos calientes y un sistema de inserción de aire frío que ha de ubicarse en el falso suelo de los pasillos fríos, tal y como muestra la Figura 4.3.

**Fig. 4.3.** Ubicación sistemas refrigeración

Los equipos utilizados habitualmente son de agua, evitando los gases tóxicos de los equipos estándar. Con este sistema se reduce el consumo eléctrico y se consigue una temperatura media de la sala de 22° C con límites de 18° C y 25° C. Además incorporan un sistema de filtrado de aire para mantener el ambiente libre de polvo, dado que puede ocasionar daños en los equipos.

Hay numerosos equipos destinados específicamente a estos usos, las características de los cuales vienen estipuladas en la norma ETS-300019 (European Telecommunication Standard) [32].

4.2.2.5 Sistema antincendios

Los métodos de extinción recomendados para los centros de datos se basan en la utilización de gases como el FE-13 o el FM-200 que no dañan los equipos ni el medio ambiente.

Este sistema de extinción requiere de un sistema de canalización y una sala de almacenamiento del gas, que se ubica en cilindros de alta presión evitando así el uso de nitrógeno para su dispersión. El tiempo medio de actuación es inferior a 10 segundos y dado que es inerte no es necesaria la evacuación ni el corte de suministro eléctrico, lo que permite continuar con el servicio.

4.2.2.6 Sala de control

La sala de control, que no se ha tratado de forma detallada en este proyecto, ha de estar equipada con un sistema de monitoreo que centralice todos los datos sobre la situación y el estado de la infraestructura y reciba y procese las alarmas.

La mayoría de dispositivos vienen equipados con sus propios sistemas de monitoreo, pero es imprescindible tener un control de forma centralizada. Los sistemas principales conectados y gestionados han de ser:

- Grupos electrógenos y cuadros eléctricos principales.
- Sistemas de alimentación ininterrumpida.
- Sistemas de climatización y detección de humedad
- Detección y extinción de incendios.

4.2.2.7 Requerimientos de espacio

Cada armario tiene una profundidad de tan sólo 600 mm (840 mm con la puerta refrigerada) en comparación con el rack de 42U, que es de 1050 mm de profundidad.

Incluyendo la puerta refrigerada por agua, cada bastidor ocupa 1 m² (840 mm de largo por 1200 mm de ancho, Fig.4.4).

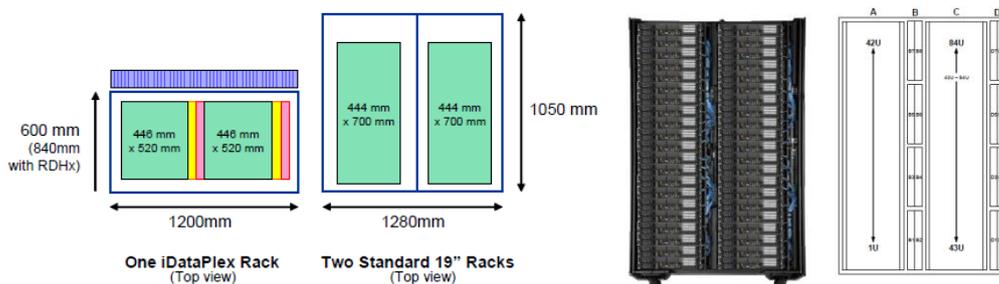


Fig. 4.4. Comparación bastidor iDataPlex – Estándar

Siguiendo el estándar de diseño, que estipula el ancho del pasillo frío entre 1 y 1.2 m y los pasillos calientes entre 0.8 y 1 m, necesitamos una sala con un

espacio mínimo de 350 m², siendo recomendable disponer de más espacio para posibles ampliaciones de equipos.

Teniendo en cuenta las dimensiones de los diferentes sistemas necesarios para el centro, es necesario como mínimo 770 m² (Tabla 4.8).

Tabla 4.8. Espacio mínimo necesario.

Espacio	Número necesario	Tamaño mínimo [m2]
Sala de computación	1	350
Sala equipos electrógenos	2	80
Sala de control	1	30
Sala de distribución eléctrica	2	50
Sala de distribución de datos	2	50
Sala de equipos de extinción	2	15
TOTAL		770

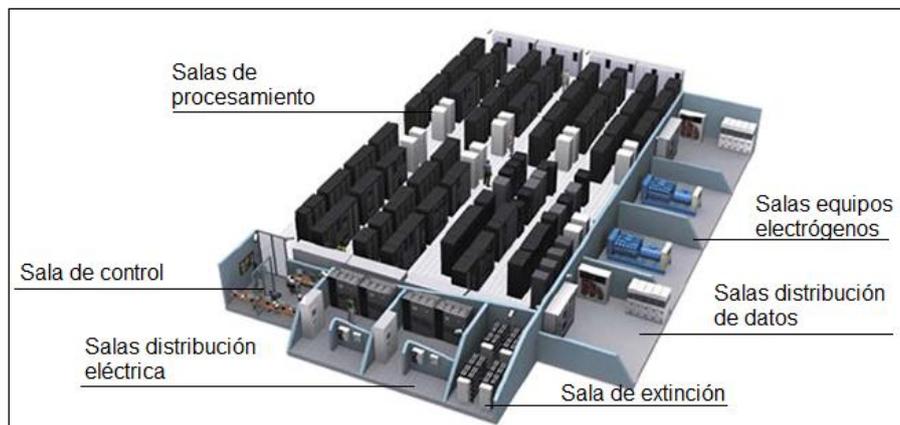


Fig. 4.5. Ejemplo distribución centro de datos

4.2.2.8 Ubicación

Este tipo de centro de datos, a diferencia de otros que precisan de un cerco de alta seguridad, no precisa más vigilancia que una central telefónica estándar, dado que no contiene información almacenada de valor.

Por ello puede plantearse su instalación donde económicamente sea más rentable, teniendo en cuenta siempre la latencia de las comunicaciones que vendrán determinadas por la atenuación de la red (Tabla 4.9).

Tabla 4.9. Distancia y latencia del centro de Barcelona y precio m²

Población	Distancia [Km]	Latencia [ms]	Venta [€/m ²]	Alquiler [€/m ²]
Barcelona	-	-	3.641	12,33
Sant Adrià del Besós	6,9	1,47	2.688	9,62
Hospitalet de Ll.	7,4	1,58	2.385	10,29
Sant Just Desvern	7,6	1,62	3.156	10,22
Sta. Coloma de Gramanet	7,7	1,64	2.478	9,53
Esplugues de Ll.	7,9	1,69	3.120	10,75
Cornellà de Ll	8	1,71	2.644	10,31

Fuente: Diputació de Barcelona [33]

La transmisión de datos debe procesarse en tiempo real y por lo tanto, la latencia de extremo a extremo de las comunicaciones de voz no debe ser superior a los 100 ms [34], por ello, será necesario un análisis más exhaustivo de las latencias de otros elementos presentes en la red.

Un aspecto que también debe tenerse en cuenta antes de determinar su ubicación, son las características técnicas del emplazamiento, que entre otras cosas ha de ser capaz de soportar cargas de 1.500 kg/m² e incluso la instalación de vigas de carga de hasta 2500 kg/m² para que aguanten el peso de los equipos electrógenos y los depósitos de gasoil, además de otras infraestructuras necesarias como las instalaciones de agua y electricidad o suelo técnico.

4.2.3 Presupuesto equipos

La inversión total para el equipamiento del centro de datos se estima en 21 millones de euros (Tabla 4.10).

Tabla 4.10. Presupuesto

Total operadoras	
Procesamiento	
Blades	14.856.801 €
Almacenamiento	
Bastidores	817.080 €
Alimentación	
Alimentación redundante 750W para bastidor	1.140.480 €
UPS + Ampliación para bastidor	1.098.240 €
Grupos electrógenos diesel y depósitos	1.392.000 €
Refrigeración	
Puertas	1.380.720 €
Sala y aspiración	190.000 €
TOTAL	20.875.321 €

4.3 Coste de operación

4.3.1 Medidas de eficiencia

El PUE (Power Usage Effectiveness) es una variable que sirve como instrumento para medir la eficiencia de los centros de datos. En ella se compara el total de energía consumida con la cantidad de energía que consume el equipamiento de procesamiento de datos, lo que permite conocer la cantidad de energía usada por otros equipos, como los sistemas de refrigeración.

$$PUE = \frac{\text{Potencia total}}{\text{Potencia equipos}} \quad (4.2)$$

El OCE (Overall Consumption Effectiveness) es la razón porcentual que sirve para medir la eficiencia de los consumos energéticos.

$$OCE = \frac{1}{PUE} \times 100 \quad (4.3)$$

La tabla 4.11 muestra la clasificación de PUE y OCE. La eficiencia energética de los data centers del TopGreen500 oscila entre el 95,66 % del centro de datos de la Japan Atomic Energy Agency (JAEA) y el 42,59 % del centro de datos nacional de Shenzhen (China) [14]. La eficiencia media es de 66,4 %.

Tabla 4.11. Clasificación PUE y OCE

PUE	OCE	Leyenda
3	33 %	Muy ineficiente
2.5	40 %	Ineficiente
2	50 %	Medio eficiente
1.5	67 %	Eficiente
1.2	83 %	Muy eficiente

4.3.2 Estimación del consumo y costes

Un centro de datos con capacidad suficiente para procesar todas las comunicaciones móviles de la ciudad se estima que tiene un gasto energético de 4.078,2 kWh (Tabla 4.12).

Tabla 4.12. Consumo y coste de operación

Conjunto de operadoras de Barcelona			
Equipos	Consumo [kWh]	Coste mensual [€]	Coste anual [€]
Bastidor			
Blades, UPS, etc.	3.801,6	630.882,06	7.675.731,71
Refrigeración			
Equipos aire acondicionado y aspiración	75*	12.446,38	151.430,94
Otros			
Iluminación, sistemas de control y pérdidas en equipos	201,6	26.042,66	316.852,41
TOTAL	4.078,2	669.371,10**	8.144.015,07**

* Trabajando al 80% 24h/365; ** Impuestos incluidos

Teniendo en cuenta los consumos de la tabla anterior, se obtiene un PUE de 1,07 (4.4), que representa un 93,2% de eficiencia energética (4.5):

$$PUE = \frac{\text{Potencia total}}{\text{Potencia IT}} = \frac{4.078,2 \text{ [kW]}}{3.801,6 \text{ [kW]}} = 1,07 \quad (4.4)$$

$$OCE = \frac{1}{PUE} \times 100 = \frac{1}{1,07} \times 100 = 93,2\% \quad (4.5)$$

Con esta eficiencia, el Data Center se sitúa dentro del Top5 del ranking de centros de datos eficientes (Tabla 4.13). Analizando el ranking se observa que la capacidad de procesamiento disminuye a medida que aumenta la eficiencia. La media de capacidad de cómputo por vatio se sitúa en 307,36 Mops/W y la eficiencia media es de 66,4%.

Tabla 4.13. Ranking centros de datos eficientes

Ranking	Data Center	Eficiencia (%)	Mops/W
1	BX900 Xeon X5570 2.93GHz	95,66	230,32
2	SGI Altix 8200 Xeon X5560	93,9	200
3	iDataPlex dx360 M3 Xeon X5670	93,2	298,17
4	SPARC64 Vlllfx 2.0GHz	93,17	830,18
5	SGI Altix 8200 Xeon X5560	93,12	206,98
6	iDataPlex, Xeon E55xx	92,2	300,36
7	Intel Cluster, Xeon E55xx	91,91	619,05
8	Fujitsu FX1 SPARC64 VII	91,19	108,43
9	Altix 4700 1.6 GHz	90,78	57,09
10	iDataPlex, Xeon E55xx	90,77	295,78

Fuente: Green500

Los costes de operación de la red de antenas y el centro de datos (Tabla 4.14) asciende a 430.191,4 € anuales.

Tabla 4.14. Coste operacional

Equipos	Coste	
	Mes [€]	Año [€]
Data center	653.841,01	7.955.223,84
Antenas	172.676,46	2.072.117,49
TOTAL	826.530,47	10.027.341,33

4.4 Red fibra óptica

Las antenas de telefonía no se distribuyen de forma simétrica, sino que su ubicación depende de dos factores: la superficie a la que dan servicio y el tráfico de la zona. Esto provoca una masificación de antenas en el centro de la ciudad, donde las antenas de cada operadora están separadas por 800 m (radio 400 m) de media. En zonas residenciales, en cambio, donde hay menos densidad de usuarios, las antenas aparecen más distantes con una separación media de 2 km (radio 1 km).

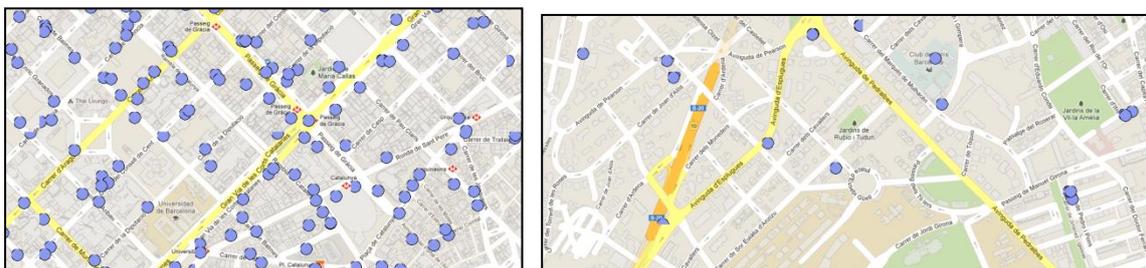


Fig. 4.6 Distribución antenas centro ciudad (izq.) y zona residencial (drcha.) [8].

Teóricamente la topología ideal para la conexión de las antenas es la de anillo, dado que ofrece encaminamiento alternativo en caso de caída y su mantenimiento es más asequible. La inversión necesaria para su implementación es muy superior de las que disponen las operadoras, por este motivo esta topología se emplea para el diseño de redes que engloben pocos nodos o que estos se distancien cientos de kilómetros. Considerando el gran número de antenas que hay en la ciudad y el elevado tráfico que han de transportar, es recomendable usar una topología híbrida, compuesta por una subred en malla que une los diferentes OLTs de la red y otra subred con topología estrella para conectar los ONTs a la central.

Una posible estructuración de la red, sería la división de la red en distritos, cada uno equipado con una OLT que da servicio a la red de antenas usando una topología estrella.

El uso de Splitters (divisores) reduce en gran medida los costes de despliegue debido al ahorro en cables de fibra óptica. Los Splitters suelen situarse de forma centralizada (un solo elemento que divide la señal en N) o bien en cascada (instalando varios módulos que permiten la conexión de más elementos), tal y como se ve en la Figura 4.7.

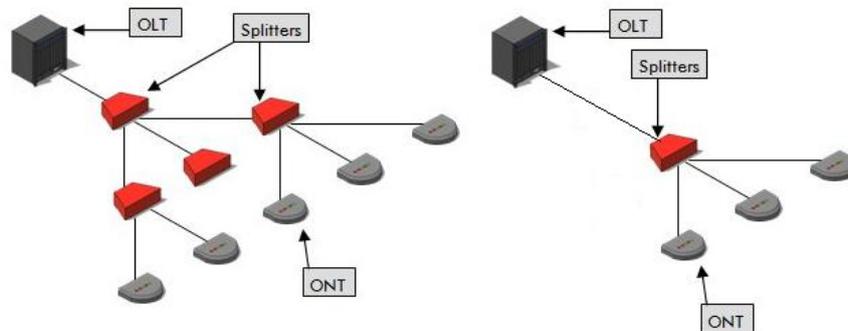


Fig. 4.7. Splitters en cascada (izq.) y de forma centralizada (drcha.)

4.4.1 Diseño de la red

4.4.1.1 Subred topología estrella

Esta subred se encarga de unir las antenas equipadas con una ONT con la central OLT. Pese a que este tipo de redes permiten que los enlaces ascendente y descendente se transmitan por la misma fibra, usando longitudes de ondas diferentes, el elevado volumen de tráfico que puede haber en un solo sector, sugiere conectar cada sector con 2 fibras, una para cada sentido de la comunicación.

Como se ha comentado en la sección 2.2.2, las principales operadoras tienen alrededor de 480 antenas en la ciudad para dar servicio a su conjunto de clientes. Con la compartición de emplazamientos entre operadoras, se reduciría considerablemente el coste de despliegue de la red de fibra a la vez que se minimizaría el coste operacional y el impacto medio ambiental de los equipos de transmisión. Asumimos que 480 antenas serán suficientes para servir a todos los usuarios.

Partiendo de esta base y dividiendo la ciudad en sus 10 distritos, cada OLT deberá absorber el tráfico asociado a unas 48 antenas. Cada antena ha de estar conectada por 6 fibras, 2 por sector, por lo que si se decidiera hacer conexiones punto a punto harían falta 288 fibras por OLT.

Para reducir el coste de estos enlaces se podría introducir un nivel de división usando Splitters. Actualmente estos elementos permiten la división hasta en 32 canales con lo que permitiría unir 5 antenas, reduciendo significativamente los kilómetros de fibras. Sin embargo este sistema reduce el ancho de banda lo que podría provocar una saturación de la red, por lo que es preferible realizar conexiones punto a punto.

Según las conclusiones de un estudio, donde se tienen en cuenta las latencias de la red y de los equipos de procesamiento, la distancia máxima que atraviesa una señal entre la antena y el data center no debe ser superior a 20 km [5].

Con conexiones punto a punto, sin elementos intermedios en la red, y teniendo en cuenta que la distancia máxima del centro al límite de un distrito en Barcelona no es superior a 3 kilómetros (Tabla 4.15), se puede afirmar que no habrá problemas de atenuación ni latencia en la red de un Data Center cercano al centro de la ciudad.

Equipos

Colocando la OLT en un punto próximo al centro de cada distrito y situándonos en la peor situación, la distancia máxima que habrá entre la OLT y la ONT será el radio del distrito. Ante la imposibilidad de determinar con exactitud la situación de las antenas, ubicamos la mitad de las antenas a la máxima distancia, es decir, en el radio del distrito, y la otra mitad a media distancia. Bajo este modelo pesimista serán necesarios 621,7 km de fibra óptica.

Tabla 4.15. Estimación fibra óptica necesaria

Distrito	Radio [Km]	Fibra [Km]
Ciutat Vella	1,20	43,2
Eixample	1,54	55,44
Sants-Montjuïc	2,61	93,96
Les Corts	1,39	50,04
Sarrià-Sant Gervasi	2,53	91,08
Gràcia	1,15	41,4
Horta-Guinardó	1,95	70,2
Nou Barris	1,60	57,6
Sant Andreu	1,45	52,2
Sant Martí	1,85	66,6
TOTAL		621,72

Además de la fibra cada subred dispondrá de un OLT donde partirán los enlaces punto a punto de las antenas y de un ONT donde finalizan las conexiones en la antena. Por lo tanto, serán necesarios 10 equipos OLT, uno por distrito y 480 equipos ONT, uno por antena.

4.4.1.2 Subred topología malla

La subred en malla, une todos los ONT de la ciudad (Fig.4.8). Esta topología se usa cuando no puede existir ninguna interrupción en las comunicaciones. Al estar todas las OLT conectadas entre sí, si cayera una central permitiría

redirigir el tráfico y ser asumido por el resto, evitando cortes en las comunicaciones.



Fig. 4.8. Subred topología malla

Para determinar el despliegue de cable para la subred, tenemos en cuenta la distancia que existe entre los diferentes centros de los distritos.

Sumando las distancias de los 50 enlaces necesarios, determinamos que la cantidad de fibra necesaria para unir los diferentes OLTs de la red asciende a 238,8 km (Tabla 4.16)

Tabla 4.16. Distancia entre distritos

DISTRITOS	Ciutat Vella	Eixample	Sants - Montjuïc	Les Corts	Sarrià-S. Gervasi	Gràcia	Horta	Nou Barris	Sant Andreu	Sant Martí
Ciutat Vella	0	2,7	3,8	4,1	7,7	5,4	8,7	9,2	7,8	3,1
Eixample	2,7	0	4,1	2,9	5,2	2,7	6,6	4,6	3,1	3,5
Sants-Montjuïc	3,8	4,1	0	4	7,9	6,3	8,6	8,7	7,2	6,4
Les Corts	4,1	2,9	4	0	3,9	2,9	5	4,7	6	6,3
Sarrià-S. Gervasi	7,7	5,2	7,9	3,9	0	3,6	4,5	7,9	7,4	8,7
Gràcia	5,4	2,7	6,3	2,9	3,6	0	3,1	4,7	4,5	6,1
Horta-Guinardó	8,7	6,6	8,6	5	4,5	3,1	0	3,5	3,4	5,8
Nou Barris	9,2	4,6	8,7	4,7	7,9	4,7	3,5	0	3	6,2
Sant Andreu	7,8	3,1	7,2	6	7,4	4,5	3,4	3	0	3,3
Sant Martí	3,1	3,5	6,4	6,3	8,7	6,1	5,8	6,2	3,3	0
∑ [Km]	52,5	32,7	49,1	28,8	32,1	18,4	12,7	9,2	3,3	0
TOTAL [Km]	238,8									

4.4.2 Costes red fibra óptica

Para estimar el coste de implementación de la fibra óptica se ha considerado el coste de instalación de la fibra en 45 €/m [35]. El coste de los equipos, se ha determinado a partir del precio medio que ofrecen los principales fabricantes: Zhone, Huawei, Tyco electronics y Alcatel-Lucent [36], [37], [38], [39]. El despliegue de la red asciende a 39.553.600 € (Tabla 4.17).

Tabla 4.17. Balance costes red fibra óptica

Equipo	Coste equipos	Número necesarios	Coste total [€]
Subred Estrella			
Fibra óptica G.652	45 €/m	621,72 km	27.977.400
ONT	490 €	480	235.200
Subred Malla			
Fibra óptica G.652	45 €/m	238,8 km	10.746.000
OLT ITU G.984 (rack, alimentación y UPS)	59.500 €	10	595.000
TOTAL			39.553.600

Dado el elevado coste que supone la instalación de una red de fibra óptica, y teniendo en cuenta que Barcelona dispone de redes de fibra óptica oscuras (Fig. 4.9), es decir, que ya han sido desplegadas y no están en uso, no debería descartarse la opción de arrendar la red. Para ello hace falta analizar la capacidad disponible, lo que está fuera del alcance de este proyecto.

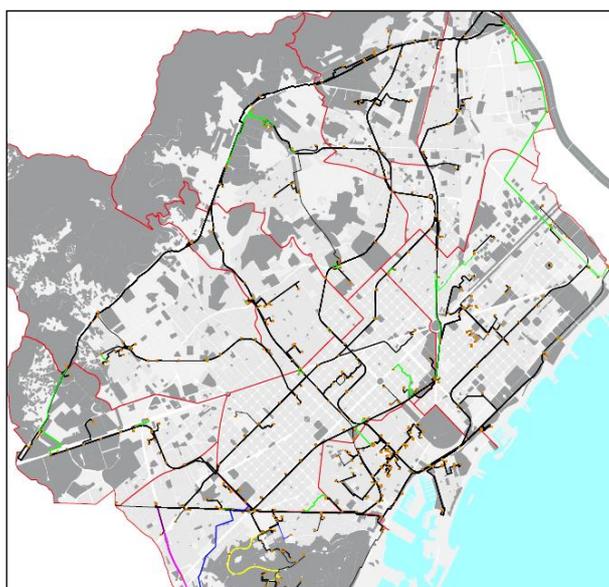


Fig. 4.9. Red municipal de fibra óptica [7]

El alquiler de redes de fibra óptica ya desplegadas tiene un coste aproximado de 2.000 €/km por año [33]. La inversión inicial para la red de fibra, que corresponde a los equipos de transmisión, asciende a 830.200 € y el alquiler anual 1.721.040 € (Tabla 4.18).

Tabla 4.18. Balance costes alquiler red fibra óptica

Equipo	Coste equipos	Número necesario	Coste despliegue [€]	Coste alquiler [€/año]
Subred Estrella				
Fibra oscura	2.000 €/Km	621,72 km	-	1.243.440
ONT	490 €	480	235.200	0
ONT con rack, alimentación, UPS y tarjetas.	59.500 €	10	595.000	0
Subred Malla				
Fibra oscura	2.000 €/Km	238,8 km	-	477.600
TOTAL			830.200	1.721.040

4.5 Resumen capítulo

Partiendo de los recursos necesarios para dar servicio a los clientes de Barcelona, que se han estimado en 1.216 Tflops, se ha presupuestado el coste de instalación de un Data Center en 20.875.321 €.

También se ha considerado el coste de consumo eléctrico del centro de procesado, que trabajando a máxima capacidad se ha estimado en 653.854 €.

En la segunda parte del capítulo, se ha realizado el diseño de la red de fibra óptica que ha de conectar las antenas con el centro de datos para realizar el procesado de la señal.

Para el diseño se ha utilizado una topología híbrida malla-estrella. Aprovechando la división de la ciudad por distritos se ha equipado cada uno con un OLT y se han interconectado todos mediante una topología en malla para asegurar una mayor disponibilidad de la red. A partir de la OLT se ha planteado una estructura en estrella para unir los diferentes ONT situados en las antenas.

Conscientes del elevado coste de instalación de la red, se han presupuestado dos alternativas. La primera asumiendo la inversión y realizando la instalación completa de la red, con un coste estimado de 60 millones de euros. El segundo modelo parte de la disponibilidad de fibra oscura existente en la ciudad. Asumiendo suficiente cobertura y capacidad para su uso en el SDR Cloud, este modelo reduce la inversión inicial a unos 23,5 millones de euros, más un gasto operacional anual de 1,7 millones en concepto de alquiler.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Comparación de los sistemas

5.1.1 Coste despliegue

El coste de instalación de un nuevo emplazamiento, para ampliar la capacidad o zona de cobertura, se reduce entre un 73 y un 83 % con el modelo SDR Cloud respecto al modelo actual (Tabla 5.1). Las diferencias principales se observan en las siguientes partidas:

- Acondicionamiento del emplazamiento, debido a la eliminación de la caseta y la reducción de coste de adecuación del terreno para la instalación del sistema radiante.
- Equipos de fuerza. Con la eliminación de los equipos de procesamiento se reducen las baterías necesarias para alimentarlos en caso de fallo en la red eléctrica.
- Sistema de refrigeración. Los emplazamientos de la red SDR Cloud concentran sus equipos en armarios de intemperie y por lo tanto no es necesaria la instalación de equipos de refrigeración.
- Equipos de procesamiento. Con la deslocalización del procesamiento de la señal, los emplazamientos no aumentan su coste si se precisa ofrecer servicios con diferentes tecnologías, como por ejemplo, UMTS y DCS. Además, al centralizar los recursos de procesado es posible compartirlos entre operadoras y radioceldas con lo cual, baja la cantidad necesaria de recursos de procesado.

Tabla 5.1. Coste emplazamiento

Concepto	Coste* [€] Sistema actual	Coste* [€] Sistema SDR Cloud	Diferencia [%]
Acondicionamiento emplazamiento	12.000	1.000	91,67
Instalación eléctrica	5.000	2.000	60,00
Equipos de fuerza	12.000	2.000	83,33
Equipos refrigeración	8.000	0	-
Sistema alarma	1.000	1.000	0,00
Sistema radiante	8.000	8.000	0,00
Equipo transmisión y procesamiento	40.000	7.000	82,50
TOTAL UMTS	86.000	21.000	73,08
Equipo procesamiento DCS	38.000	0	-
TOTAL UMTS y DCS	124.000	21.000	83,06

* Impuestos incluidos

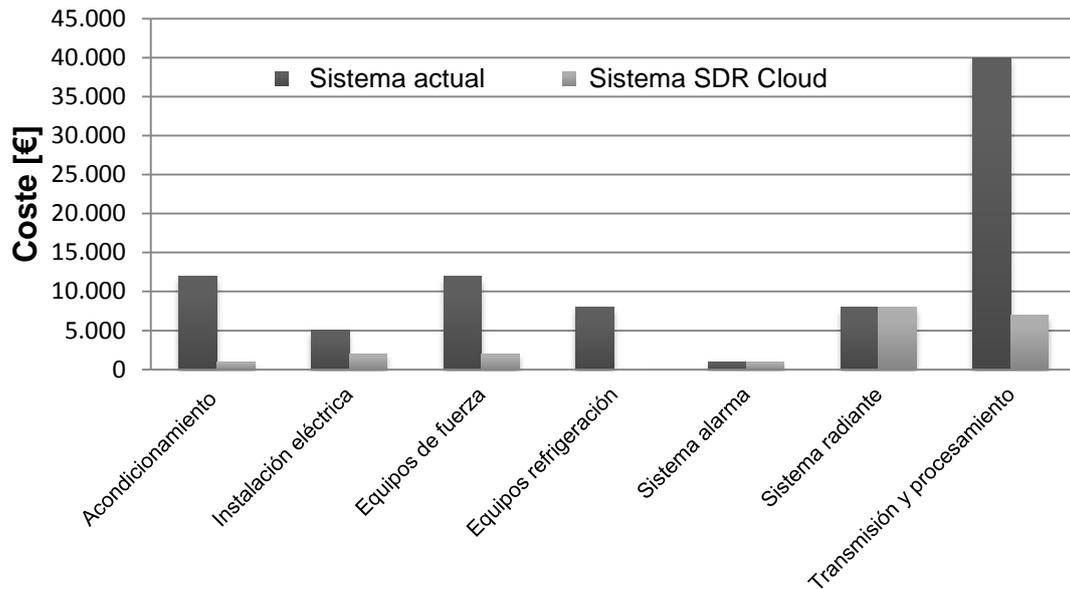


Fig. 5.1. Comparación del coste de emplazamiento

Para una comparación más exhaustiva, imputamos el coste total del centro de datos a cada uno de los emplazamientos dado que, a diferencia del sistema actual, el procesamiento de la señal no se realiza en el emplazamiento (5.1):

$$\frac{\text{Coste total centro de datos}}{\text{Número de emplazamientos}} = \frac{20.875.321 \text{ €}}{480} = 43.490,25 \text{ €} \quad (5.1)$$

De esta manera asociamos los costes de los equipos deslocalizados y podemos obtener una visión más objetiva de los costes de despliegue (Tabla 5.2).

Tabla 5.2. Costes directos e indirectos del emplazamiento

Concepto	Coste* [€] Sistema actual	Coste* [€] Sistema SDR Cloud	Diferencia [%]
TOTAL UMTS	86.000	64.490,25	33,4
TOTAL UMTS y DCS	124.000	64.490,25	48,0

* Impuestos incluidos

Teniendo en cuenta el coste del centro de datos, la diferencia de coste de los emplazamientos oscila entre el 33 y el 48%. Cabe comentar que si se decide aumentar el número de emplazamientos, una vez imputados los costes del centro de datos, el coste real sería el mostrado en la Tabla 5.1 más el coste de los Blades de procesamiento pero sin tener en cuenta de nuevo sus equipos asociados, lo que reduce de forma importante el coste de ampliación, una de las principales ventajas de la concentración de equipos.

5.1.2 Coste operacional

La diferencia entre los costes operacionales de los sistemas es de un 36,7 %, representando un ahorro de 5,8 millones de euros (Tabla 5.3).

Tabla 5.3. Coste operacional

Equipos	Coste anual*	
	Actual [€]	SDR Cloud [€]
Data center	-	7.955.223,84
Antenas	15.839.520,10	2.072.117,49
TOTAL	15.839.520,10	10.027.341,33

* Impuestos incluidos

Los cálculos anteriores han sido realizados sin tener en cuenta la reducción de consumos de los equipos de procesamiento que, con el nuevo sistema, permite su desconexión en función de la demanda. En función de las pruebas realizadas por China Mobile Research Institute, la reducción del coste de consumos energéticos podría ser superior al 10% [38].

5.1.3 Coste inversión y amortización

El coste de inversión de la red de telecomunicaciones SDR Cloud viene marcado por la red de fibra óptica. Como se ha comentado en el apartado 4.4.1, se ha de considerar la opción de alquilar fibra oscura o en su defecto, sobredimensionar el despliegue a realizar para cubrir parte de los costes de la red de fibra y reducir así el tiempo de amortización.

En la tabla 5.4 se analizan los diferentes costes de inversión necesarios para el funcionamiento de la red SDR Cloud. En el caso de alquilar la red de fibra el coste inicial de la inversión se reduce un 38,8 %.

Tabla 5.4. Coste total SDR Cloud

Concepto	Coste* inversión [€]	Coste* inversión anual [€]
Opción 1: Alquiler red de fibra óptica		
Centro de datos	20.875.321	-
Red fibra óptica	2.551.240	1.721.040
TOTAL	23.426.561	1.721.040
Opción 2: Despliegue red fibra óptica		
Centro de datos	20.875.321	-
Red fibra óptica	39.553.600	-
TOTAL	60.428.921	0

* Impuestos incluidos

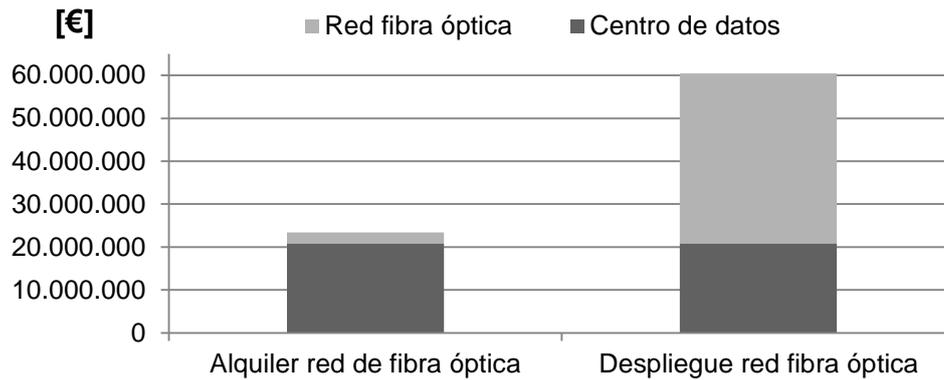


Fig. 5.2. Comparación del coste de inversión

La amortización del sistema (Tabla 5.5), que se ha realizado teniendo en cuenta los gastos operacionales, se produce en un tiempo relativamente corto teniendo en cuenta que solo se ha basado en la reducción de costes del consumo eléctrico. En el caso de alquiler de la red de fibra, la amortización se estima en 15,5 años y en el caso de despliegue se reduce hasta alrededor de los 11 años. De igual forma que el criterio anterior, tampoco se ha tenido en cuenta otros ingresos de explotación de la red de fibra óptica o del centro de datos.

Tabla 5.5. Amortización y proyección de beneficios

Amortización y beneficio							
Red F.O	Amortización [años]	Proyección de beneficios [M€]					
		5	10	15	20	25	30
Despliegue	10,7	-32,3	-4,2	23,9	52,0	80,2	108,3
Alquiler	15,5	-40,9	-21,4	-1,9	17,6	37,1	56,6

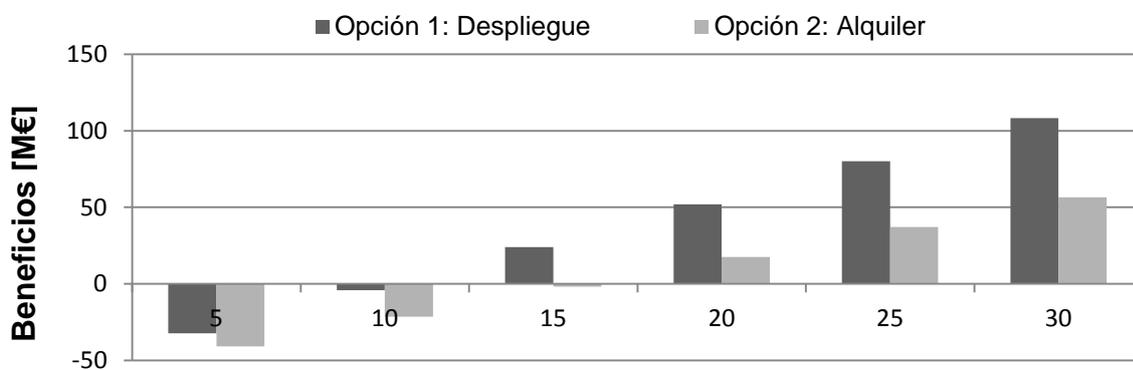


Fig. 5.3. Comparación del coste de emplazamiento

5.2 Conclusiones del proyecto

El sistema de comunicaciones móviles actual, basado en la diversificación de los equipos de procesamiento, provoca un excesivo gasto de recursos energéticos.

Con el sistema basado en SDR Cloud, que concentra todo el procesamiento de la señal en un único espacio, se ahorra un 37% de energía, reduciendo el coste operacional de 15,8 millones de euros a poco más de 10 millones.

Se ha de puntualizar que con el sistema actual los equipos de procesamiento están siempre operativos, en cambio en el Data Center, los equipos pueden conectarse o desconectarse en función de la demanda, lo que reduce aún más el gasto energético. De otro modo, los recursos del Data Center se podrán subalquilar a otros fines en momentos de baja demanda de servicios de telecomunicaciones.

Además del consumo, la diversificación provoca un alto coste de actualización a nuevas tecnologías. La posibilidad de adaptar los equipos, sin necesidad de sustituirlos, resolvería uno de los mayores problemas de las operadoras como es la amortización de los equipos, a la vez que podría ofrecer servicios más diversificados y personalizados a sus clientes.

Este proyecto lejos de entrar en detalle en los sistemas de telecomunicaciones, pretende ofrecer una visión de un nuevo sistema basado en la adaptación de equipos y en el ahorro energético. Consciente de la infinidad de dispositivos y tecnologías presentes en el mercado, este documento aspira a ser un análisis inicial para considerar el concepto de SDR Cloud como firme candidato de sistemas de telecomunicaciones de futuro.

5.3 Líneas futuras

En base a los datos de este proyecto una posible línea futura podría ser el estudio de adaptación del sistema a otras poblaciones con la finalidad de acotar las características necesarias para que el sistema sea viable. Entre otros aspectos el estudio podría basarse en las cotas de superficie o de población o poblaciones en el caso que una misma red procesara el tráfico de diferentes pueblos, por ejemplo.

Otra posible línea de trabajo, debido a la rapidez con que evoluciona el sector, podría ser la adaptación del sistema a nuevos productos o tecnologías que mejoran el diseño presentado, como por ejemplo la utilización de transporte analógico de datos a través de las fibras.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. I. Lackey y D. W. Upmal. "SpeakEasy: The military Software Radio". IEEE Communications Magazine, Vol.33 No.5. NuevaYork, mayo de 1995. p.56-61.
- [2] J. Mitola. Software Radio Architecture: Object oriented approaches to wireless systems engineering. John Wiley & Sons, Inc. Nueva York. 2000. 561p.
- [3] Abeyasinghe, R., "Enriching Communications", Alcatel-Lucent 2012. Disponible en: www.alcatel-lucent.com
- [4] Alcatel-Lucent press, 2011. Disponible en www.alcatel-lucent.com/press
- [5] Gómez, I., Marojevic, V. and Gelonch, A., "Resource Management for Software-Defined Radio Clouds", IEEE Micro, 2011.
- [6] Instituto Nacional de Estadística (INE), demografía y población. Disponible en: www.ines.es/inebmenu
- [7] Ayuntamiento de Barcelona, estadísticas. Disponible en: www.bcn.cat/estadistica/catala/dades/index.htm
- [8] Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones (CMT), informe 3r trimestre 2011. Disponible en: <http://informeannual.cmt.es/informe-sector/comunicaciones-moviles>
- [9] Fundación Orange, "Análisis banda ancha móvil". Disponible en: <http://fundacionorange.es/fundacionorange/analisisprospectiva.html>
- [10] Licitaciones estaciones base telefonía: núm. 2011/152 – Valencia, Movistar; núm. 2011/9495 – Lleida, Vodafone; núm. 2010/6007 – Tarragona, Yoigo – Movistar.
- [11] Vodafone España, "Plan Eficiencia Energética de Red", Foro Pro Clima, Madrid 2011.
- [12] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, tarifas eléctricas. Disponible en: <http://www.minetur.gob.es/energia/electricidad/tarifas>
- [13] TOP500, estadistics. Disponible en: www.top500.org
- [14] Green500, the Green List. Disponible en: www.green500.org/lists
- [15] Intel, Test Report Xeon series. Disponible en: www.intel.com/content/www/us/en/processors/xeon
- [16] Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC), SPEC CPU2006 Results. Disponible en: www.spec.org/cpu2006/results

- [17] IBM, Products and Services, Pre-Sales advisor EEUU. Disponible en: www.ibm.com/systems
- [18] Wake, D., Pato, S., Pedro, J., López, E., Gomes, N., Monteiro, P. "A Comparison of remote Radio Head Optical Transmission Technologies for Next Generation Wireless Systems". IEEE 978-1-4244-3681, 2009.
- [19] Lanzani, C. "Remote Radio Heads and the evolution towards 4G networks". Altera. Dinamarca, febrero 2009.
- [20] Kuilin, C. "The Road Towards Green RAN", China Mobile Research Institute. China, octubre 2011.
- [21] Telecommunication Industry Association (TIA), Technology&Standards, TIA-942: Data Center Standards. Disponible en: www.tiaonline.org/standards
- [22] Uptime Institute, Tier certification. Disponible en: www.uptimeinstitute.com/TierCertification
- [23] Intel, Products / Intel Xeon X5670. Disponible en: <http://ark.intel.com/products/47920/Intel-Xeon-Processor-X5670>
- [24] IBM, Productos / Racks. Disponible en: www.ibm.com/systems/es/bladecenter
- [25] IBM, Productos / Racks / Storage / iDataPlex. Disponible en: www.ibm.com/systems/in/x/hardware/rack/dx360m3/index.html
- [26] IBM, Products / Options and Upgrades / Rack and Power. Disponible en: www.ibm.com/systems/x/options/rackandpower/index.html
- [27] IBM, Products / Options and Upgrades / Rack and Power / UPS. Disponible en: www.ibm.com/systems/x/options/rackandpower/upsrack.html
- [28] Ajuntament de Barcelona, Mediambient, Normativa Urbanística / ordenança de soroll. Disponible en: www.bcn.cat/portal/site/MediAmbient
- [29] Taigüer, Dentz, Heimer, Hyundai y Honda Estudio de mercado de grupos electrógenos diésel de las marcas.
- [30] General, Daikin, Kaysun, Hitecsa y Fujitsu. Estudio de mercado de equipos de refrigeración industrial de las marcas.
- [31] IBM, Products / Options and Upgrades / Rack and Power / Cooling. Disponible en: www.ibm.com/systems/x/options/rackandpower/cooling.html
- [32] European Telecommunication Standard, ETS-30009 Environmental conditions and environmental tests for telecommunications equipment. Disponible en: www.etsi.org
- [33] Patronat Municipal de l'Habitatge – Diputació de Barcelona, "Xifres d'habitatge", Barcelona 2011.

- [34] Agusti, R., Bernardo, F., Casadevall, F., Ferrús, R., Pérez-Romero, J., Sallent, O. "LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles". Fundación Vodafone España, ISBN: 84-934740-4-5 D.L: M-34503-2010.
- [35] Apuntes XDSF, Departament de teoria del senyal i comunicacions, UPC 2011.
- [36] Zhone, Products. Disponible en: <http://www.zhone.com/products/>
- [37] Huawei, WDM products. Disponible en: <http://www.huawei.com/en/products/transport-network/wdm-otn/index.htm>
- [38] Tyco Electronics, Products / Fiber. Disponible en: <http://www.telecomosp.com/Fiber>
- [39] Alcatel-Lucent, Products / Optics. Diponible en: <http://www.alcatel-lucent.com>