

DOCUMENTO FINAL DEL GRUPO DE TRABAJO

GT-12

Teledetección y sensores ambientales

Coordina: Instituto de la Ingeniería de
España

CONAMA2014
CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Madrid. Del 24 al 27 de noviembre de 2014
www.conama2014.org



Documento Final del Grupo de Trabajo de Conama 2014
TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

ENTIDAD ORGANIZADORA: Instituto de la Ingeniería de España

Miembros del Comité de Edición:

Coordinador: José Javier Martínez Vázquez
Instituto de la Ingeniería de España.
Comité de Ingeniería y Desarrollo Sostenible

Relatores: Adolfo Comerón Tejero
Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

Fernando Davara Rodríguez
Asociación Vertidos Cero

Colaboradores técnicos: Michaël Sicard
Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

Jorge del Valle
GALTEL - Sensor Intelligence S.L.

Josefina de la Fuente
TechNet, S.L.

Eduardo M. de Rioja y del Nido
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

***Otros Miembros
del Comité Técnico:***

Raquel Antón Revuelta
Instituto Superior del Medio Ambiente (ISM)

Diego Hidalgo del Cid
Inmaculada Martín Fernández
Esri España

Pilar Rueda de la Puerta
Escuela Andaluza de Salud Pública

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN: LAS FUTURAS REDES DE ACCESO RADIO

José Javier Martínez Vázquez. Coordinador. IIES

2. ACTIVIDADES ESPAÑOLAS EN EL MARCO DEL PROYECTO CHARMEX DESDE 2009: UN RESUMEN

Michäel Sicard y Adolfo Comerón Tejero. UPC

3. EL PROYECTO ZEWS

Fernando Davara. Asociación Vertidos Cero

4. SISTEMAS INTELIGENTES DE GESTIÓN DE RIEGO PARA ESPACIOS VERDES URBANOS: PARQUES Y JARDINES

Jorge del Valle. GALTEL - Sensor Intelligence S.L.

5. CASO DE BUENAS PRÁCTICAS DE USO DE LA TECNOLOGÍA DE DETECCIÓN A DISTANCIA DE EMISIONES EN LA FLOTA DE AUTOBUSES DE GRAZ (AUSTRIA)

Josefina de la Fuente. Technet, S.L.

6. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE POTENCIA EN REDES LTE

Eduardo M. de Rioja y del Nido. ETSIT. UPM.

7. REDES DE FEMTOCELDA

José Javier Martínez Vázquez. IIES

BREVE RESEÑA PROFESIONAL DE LOS PONENTES

Relatores

Adolfo Comerón i Tejero. Ingeniero de Telecomunicación de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Barcelona, doctorado en la Universidad Paris-XI (Orsay, Francia). Catedrático del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Cataluña. Actividad de investigación actual: teledetección atmosférica mediante lidar y comunicaciones ópticas no guiadas.

Fernando Davara Rodríguez es General de Artillería (R) y Doctor “cum laude” en Ingeniería Informática. Ha sido Director del Centro de Satélites de la Unión Europea. Actualmente es Director y Patrono de la Fundación España Digital y Director de los Foros de Educación Digital y de Ciberseguridad, Presidente de la Asociación Vertidos Cero y de APIC (Asociación para la Protección de las Infraestructuras Críticas).

Colaboradores Técnicos

Michael Sicard (MS'95, PhD'00) is an Associate Professor at the Universitat Politècnica de Catalunya in Barcelona, Spain. He obtained his PhD degree in 2000 in the field of "physical methods for remote sensing" at the Service d'Aéronomie from the Institut Pierre – Simon - Laplace in París, France. His main research interests are twofold: (i) on a technical point of view, the development of lidar techniques and instruments in all their aspects for aerosols observations, and (ii) the study of aerosols. The latter includes aerosol optical and microphysical characterization thanks to data fusion, aerosol transport models, atmospheric boundary layer study and modeling. He is coordinator of the Spanish/Portuguese lidar network.

Jorge del Valle. Ingeniero de Telecomunicación por la ETS de Ingenieros de Telecomunicación de la UPM. Es fundador y director gerente de Galtel, una ingeniería especializada en sistemas de monitorización y control con tecnologías inalámbricas aplicadas al sector agrícola y medioambiental, con especial enfoque en el uso de nuevas tecnologías para optimización del uso de los recursos e insumos.

Josefina de la Fuente Egado. Consejera Delegada y fundadora de la empresa Technet, Sostenibilidad en el Transporte. Formación académica: Ciencias Químicas (1994 – 2000) y Administración y Dirección de Empresas (1997-2000). Su vida profesional siempre ha estado vinculada con las nuevas tecnologías, posee un máster en E-Business y otro en Gestión de la Ciencia y la Tecnología. Antes de fundar la compañía, fue la responsable del Centro de la Transferencia de Conocimiento (CDT) de la zona Sur-Este de la Comunidad de Madrid. Desde hace más de cinco años se dedica de manera exclusiva a la explotación de esta tecnología y sus distintas aplicaciones.

Eduardo Martínez de Rioja y del Nido. Ingeniero de Telecomunicación por la ETS de Ingenieros de Telecomunicación de la UPM. Realiza sus estudios universitarios con una Beca de Excelencia de la Comunidad de Madrid. Es autor de varias publicaciones sobre redes LTE en entornos ferroviarios de Alta Velocidad. Actualmente cursa estudios de doctorado en el Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones de la UPM. Martínez de Rioja y del Nido es *member of the IEEE*.

José Javier Martínez Vázquez es vocal del Comité de Ingeniería y Desarrollo Sostenible del Instituto de la Ingeniería de España en representación de la Asociación Española de Ingenieros de Telecomunicación. En 1996 comienza su participación en el Congreso Nacional del Medio Ambiente y desde el año 2000 coordina este Grupo de Trabajo sobre Teledetección y Sensores Medioambientales.

RESUMEN DE CONTENIDO**INTRODUCCIÓN: LAS FUTURAS REDES DE ACCESO VÍA RADIO*****José Javier Martínez Vázquez***

Coordinador

Comité de Ingeniería y Desarrollo Sostenible. Instituto de la Ingeniería de España

La puesta en servicio de la última generación de redes celulares, la denominada LTE, ha supuesto algunos cambios de funcionamiento respecto de las redes anteriores como GSM y UMTS. Por enumerar rápidamente algunos de estos cambios, pueden citarse: La conectividad exclusivamente IP de los elementos que forman la red, la modulación OFDM y el acceso múltiple OFDMA en la interfaz radio que permiten, junto con las técnicas MIMO, velocidades de transmisión elevadas, la aplicación del concepto de calidad del servicio, la utilización de subportadoras como sondas para explorar el canal de transmisión, la posibilidad para los operadores de ofrecer servicios de banda ancha, la aparición de las estaciones base domésticas, la reducción de la potencia emitida por los equipos de abonado que además, pasan a ser terminales de datos más que terminales de voz. Ante los cambios que se acaban de reseñar, algunos de ellos de gran calado como la desaparición de los métodos convencionales de modulación o la utilización de dispositivos de abonado orientados a la transmisión de datos soportados por estaciones base de baja potencia, cabe preguntarse a qué aspectos tanto técnicos como funcionales de LTE afectará la 5G.

Desde un punto de vista tecnológico, los sistemas MIMO han de adquirir un gran desarrollo para mejorar las tasas de transmisión que se irán incrementando hasta los 300 Mb/s en el enlace descendente y los 60 Mb/s en el ascendente. Las latencias se estima que serán del orden de 2 a 5 milisegundos, lo que aproxima las comunicaciones de este tipo a las realizadas en tiempo real. Las pequeñas celdas, que se analizan en el Grupo de Trabajo, mejoran y complementan la cobertura de las macro estaciones base y pueden llegar en número a los 100 millones en todo el mundo. Estas celdas situadas en el interior de edificios ya sean viviendas u oficinas, reciben el nombre de femtoceldas y constituyen una solución para dar cobertura de alta calidad a usuarios en ambientes interiores cerrados. Otro problema de la telefonía móvil, la escasez de ancho de banda disponible, se tendrá que resolver con la utilización de bandas de frecuencias más altas, en la zona del espectro de las ondas milimétricas, y que se prevé que estará en torno a los 28-38 GHz.

Funcionalmente, las futuras redes celulares llevarán a cabo tareas de sincronización y señalización en las comunicaciones entre una gran diversidad de dispositivos móviles: smartphones, superphones y tablets, que estarán orientados a funcionar en

la red pública de Internet, lo que casi obliga a una arquitectura de las redes celulares muy similar a la de Internet, con varios niveles de funcionamiento. Esta orientación hacia la red pública de Internet ha dado lugar a un nuevo campo de trabajo en el panorama actual de las telecomunicaciones, las llamadas Human Centric Communications Networks (HCCN), que giran en torno a servicios de Internet móvil para grupos de usuarios unidas por lazos de amistad, profesionales, aficiones, etc. o basados en las redes sociales. Aunque, en principio, el hecho de que la información vaya dirigida a un determinado grupo de personas podría facilitar el trasiego de datos a través de Internet, se plantea como necesario el desarrollo de nuevos algoritmos y aplicaciones que eviten la congestión de la red cuando sea preciso transmitir tramas muy largas como es el caso de las señales de video.

Por último y desde una perspectiva medioambiental, hay distintos puntos en los que se puede focalizar el interés de las futuras redes celulares. La reducción del consumo conjunto de las redes celulares y del entramado de Internet a nivel global se plantea en estos momentos como uno de los retos más importantes de los próximos años. El avance en la utilización de las distintas técnicas de energías de cultivo, el denominado harvesting, y su aplicación a los terminales de abonado, es también un área de estudio intensivo en estos momentos. Conviene aclarar que las energías de cultivo apuntan a una reducción drástica del uso de baterías en los terminales móviles, de hecho en las redes de sensores vía radio (WSN), cuyo único mantenimiento se centra exclusivamente en la alimentación de los terminales, ya se atisban dispositivos sin batería. El empleo conjunto de sistemas de acceso radio y redes distribución de señal de fibra óptica supone un ahorro energético importante y elimina señales radiadas que generan ruido eléctrico, interferencias y contaminación radioeléctrica. También, y aunque ya se ha dicho en este foro en ediciones anteriores, un aumento de la frecuencia de utilización de las interfaces radio se traduce en un nivel de referencia mayor y en consecuencia, menores distancias de protección.

ACTIVIDADES ESPAÑOLAS EN EL MARCO DEL PROYECTO CHARMEX DESDE 2009: UN RESUMEN

Michaël Sicard^{1,2}, Jorge Pey^{3,4}, Jose Carlos Cerro⁵, Diego Lange^{1,2}, Sandra Caballero⁶, Antonio Tovar-Sanchez⁷, Rafael Morales-Baquero⁸, Adolfo Comerón¹, Carles Bujosa⁹, Xavier Querol⁴, Begoña artiñano¹⁰, Lucas Alados-Arboledas¹¹, Andres Alastuey⁴, Francesc Rocabdenbosch^{1,2}, Alvaro Muñoz¹, Constantino Muñoz¹, David García-Vízcaíno¹, Jordi Bach¹, Xavier Bush¹

¹*Remote Sensing Laboratory, Universidad Politécnica de Cataluña, c/ Jordi Girona, 1-3, Barcelona, Spain; msicard@tsc.upc.edu; lange@tsc.upc.edu; comeron@tsc.upc.edu; roca@tsc.upc.edu; alvaro.munoz@etu.unistra.fr; constan@tsc.upc.edu; dgarcia@tsc.upc.edu; jordi.bach@gmail.com; xavier.bush@gmail.com*

²*Centre de Recerca de l'Aeronàutica i de l'Espai - Institut d'Estudis Espacials de Catalunya, Universidad Politécnica de Cataluña, c/ Jordi Girona, 1-3, Barcelona, Spain*

³*Aix-Marseille Université, CNRS, LCE FRE 3416, 13331, Marseille, France; jorge.pey@univ-amu.fr*

⁴*Institute of Environmental Assessment and Water Research, IDAEA-CSIC, Barcelona, Spain; xavier.querol@idaea.csic.es; andres.alastuey@idaea.csic.es*

⁵*Illes Balears University, Spain; jccerro@dgqal.caib.es*

⁶*Atmospheric Pollution Laboratory, Miguel Hernández University, Spain; san.cab@umh.es*

⁷*Department of Global Change Research, IMEDEA (CSIC-UIB), Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, C/ Miguel Marqués 21, Esporles, Spain; atovar@imedea.uib-csic.es*

⁸*Departamento de Ecología, Universidad de Granada, Granada, Spain; rmorales@ugr.es*

⁹*ENDESA, Spain; carlesbu@gmail.com*

¹⁰*CIEMAT, Madrid, Spain; b.artinano@ciemat.es*

¹¹*Andalusian Centre for Environmental Research, Junta de Andalucía / Applied Physics Department, University of Granada, Granada, Spain; alados@ugr.es*

RESUMEN. El proyecto ChArMEx (Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment) es una iniciativa francesa cuyo objetivo es desarrollar y coordinar las acciones de investigación regionales para una evaluación científica de la situación actual y el futuro del medio ambiente atmosférico en la cuenca mediterránea. Los grupos españoles que participan en ChArMEx llevan a cabo investigaciones en varios campos. Entre ellos cabe señalar: un estudio in-situ de 3 años (2010-2012) en un entorno regional de fondo en Mallorca; la instalación en Mallorca y Granada de dos nuevos colectores de deposición autónomos que colectan la deposición de polvo semanalmente; mediciones intensivas in situ y de teledetección en Barcelona en el verano 2012 durante la pre-campaña ChArMEx; y mediciones de teledetección intensivos en Barcelona y Granada en el verano de 2013 durante la campaña ChArMEx / ADRIMED. Este manuscrito da un resumen de todas las actividades conducidas por investigadores españoles hasta ahora en el marco de ChArMEx. Se presentan resultados preliminares del estudio in-situ de 3 años en Mallorca y parte de las campañas de verano de 2012 y 2013.

1. INTRODUCCIÓN.

El proyecto internacional ChArMEx (Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment) es una iniciativa francesa, cuyo objetivo es la evaluación científica de la situación actual y el futuro del medio ambiente atmosférico en la cuenca del Mediterráneo, y de sus impactos en el clima regional, la calidad del aire, y la marina biogeoquímica.



Fig. 1. Centros de investigación españoles involucrados en ChArMEx.

El objetivo de ChArMEx es el seguimiento de las partículas de corta vida y gases traza troposférico. El objetivo final es la comprensión del futuro de la región mediterránea en un contexto de fuertes presiones antropogénicas y climáticas regionales [1]. A través de siete paquetes de trabajo (workpackages), ChArMEx aborda los temas siguientes: emisiones y distribución de las fuentes; envejecimiento químico de las masas de aire con un enfoque en la formación de aerosoles orgánicos secundarios; los procesos de transporte y sus efectos sobre la calidad del aire; forzamiento radiativo directo de los aerosoles y sus consecuencias sobre el balance de agua y el clima regional; deposición atmosférica de nutrientes y contaminantes; tendencias recientes y la variabilidad en la composición atmosférica; y la evolución futura de la química atmosférica en el horizonte de 2030 y 2050. Desde 2009 varios centros españoles participan en el proyecto, en particular los workpackages sobre emisiones, forzamiento radiativo directo y deposición. Los centros españoles involucrados en ChArMEx se muestran en la Figura 1. Este manuscrito se centra en las actividades españolas conducidas en esos 3 workpackages.

1. WORKPACKAGE 1: EMISIONES

La aportación más relevante en el workpackage 1 es la implementación en una estación de seguimiento de fondo regional en Can Llompart en Mallorca ya existente de instrumentación adicional para cumplir con algunos de los siguientes objetivos: caracterización química completa de los aerosoles atmosféricos y la identificación de sus principales fuentes; evaluación de los niveles de contaminantes gaseosos y aerosoles atmosféricos en diferentes tamaños de partículas; y cuantificación y caracterización química de los flujos de deposición. La instrumentación adicional se instaló durante un periodo de 3 años comprendidos entre 2010 y 2012. Tres campañas de medidas intensivas tuvieron lugar en la primavera y en el verano de 2011 y en el verano de 2012.

La instrumentación ya existente en Can Llompart permitió medir los niveles horarios de NO, NO₂, SO₂, O₃, PM₁₀, temperatura, dirección y velocidad del viento, presión atmosférica y precipitación. La instrumentación adicional consistió en:

- Un contador de partículas óptico (OPC) para determinar las concentraciones en tiempo real de PM₁₀, PM_{2.5} y PM₁.

- Dos muestreado secuencial de alto volumen (HV) para la recuperación de PM₁₀ y PM₁ en filtros de microfibra de cuarzo.
- Un colector automático de deposición seca y húmeda de partículas atmosféricas.
- Un contador de partículas ultra-finas (5-1000 nm).
- Un fotómetro de absorción de múltiples ángulos (MAAP) para el monitorización continua de las concentraciones de black carbon.
- Mediciones de concentración de NH₃.

En la Tabla 1 se dan más detalles acerca del período de funcionamiento de los diferentes instrumentos. En total durante el período 2010-2012 se han recogido más de 450 muestras válidas de PM₁₀ y PM₁.

	OPC	HV sampler PM10	HV sampler PM1	D/W deposition	Number	MAAP	NH3
Routine	Non stop (1 hour)	Non stop (1 sample/4 day)		Non stop (weekly)			
Spring and summer 2011	Non stop (1 hour)	15/03-15/09 (143 samples)	16/03-21/07 (83 samples)	Non stop (weekly)	15/03-28/04 (44 days)	15/03-15/09 (185 days)	
Summer 2012	Non stop (1 hour)	06/06-15/08 (45 days)	06/06-15/08 (45 days)	Non stop (weekly)	06/06-06/08 (40 days)		06/06-15/08 (50 days)

Tabla 1. Instrumentación adicional instalada en Can Llopart durante el periodo 2010-2012.

Hasta ahora, más de 400 de ellos han sido analizados para 60 compuestos inorgánicos, así como carbono orgánico y elemental [2]. La concentración PM10 diaria durante el período de 2010 a 2012 se muestra en la Fig. 2.

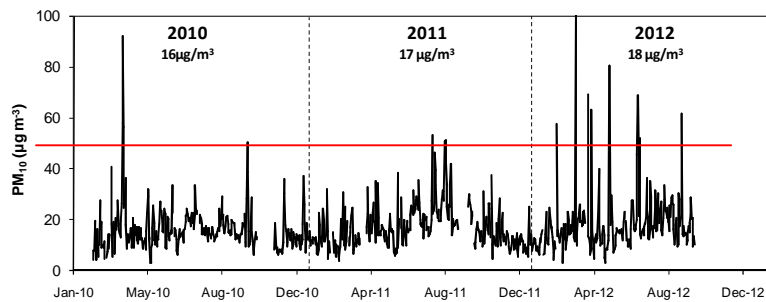


Fig. 2. Concentración de PM₁₀ durante el periodo 2010-2012 en Can Llompart.

La concentración de PM₁₀ media anual en todo el período varía entre 16 y 18 g·m⁻³. Todos los picos diarios de PM₁₀ superiores al valor límite de 50 g·m⁻³ están relacionados con intrusiones de polvo desértico del Sahara.

La composición química media durante todo el período está formado predominantemente por el 23% de materia orgánica, 17% de polvo de mineral, el 14% de SO₄²⁻ (central térmica de carbón), el 10% de sal marina, y en menor medida de nitrato y amonio (5% cada componente).

Sin embargo, variaciones estacionales significativas se observaron para la mayoría de estos componentes, especialmente para el sulfato y el polvo mineral, claramente más intensas en verano, y para el nitrato, significativamente mayor en invierno debido a la ocurrencia de NH₄NO₃ que no es estable en condiciones atmosféricas calientes.

2. WORKPACKAGE 4: FORZAMIENTO RADIATIVO E IMPACTO CLIMÁTICO.

En el contexto de la pre-campaña de ChArMEx de 2012, dos campañas de medida se llevaron a cabo: TRAQA (Long distance transport and air quality in the Mediterranean Basin) y VESSAER (VERTical Structure and Sources of AERosols in the Mediterranean Region). La comunidad española participo principalmente en la campaña TRAQA (25 junio-12 julio). Los principales objetivos de la campaña eran [3]:

- Caracterización de los procesos dinámicos de exportación de las masas de aire contaminado de las regiones de origen de todo el litoral mediterráneo.

- Cuantificación de los intercambios entre la capa límite y la troposfera libre en la cuenca del Mediterráneo.
- Seguimiento lagrangiano del envejecimiento y la mezcla de los penachos contaminados (aerosoles y gases) en la baja troposfera.
- Análisis de la representatividad de los casos de estudio y de las series temporales largas para evaluar el impacto de los penachos contaminados en la calidad del aire.

Las condiciones meteorológicas permitieron definir un total de 7 Periodos de Observación Intensiva (IOP) con aproximadamente, 60 horas de vuelo del avión de investigación instrumentado ATR-42.

Medidas lidar intensivas se realizaron en Barcelona para dar apoyo durante una intrusión de polvo sahariano (29 de junio), un evento de recirculación de contaminación (3-4 de julio) y la IOP de investigación sobre la estructura de la contaminación a lo largo de la costa mediterránea (10-11 de julio).

La campaña de medida de 2013 se llevó a cabo entre el 10 de junio y el 10 de agosto de 2013. Las actividades fueron principalmente en el Mediterráneo occidental. Al igual que en la pre-campaña de 2012, los investigadores fueron desplegados en una docena de sitios de tipo: estación de medición de tierra, plataforma de lanzamiento de globos sondas o base de los aviones de investigación instrumentados. Las operaciones en tierra fueron continuas entre el 10 de junio hasta el 10 de agosto mientras que las operaciones aerotransportadas fueron organizadas en dos períodos de observación: del 12 de junio al 5 de julio y del 23 de julio hasta el 9 de agosto.

3. WORKPACKAGE 5: DEPOSICIÓN

La deposición es un parámetro fundamental para estimar el balance de materia particular atmosférica lejos de su fuente. En los modelos de transporte de aerosoles regionales este parámetro no está constreñido debido a la falta de mediciones adaptadas [4] [5]. En el ciclo biogeoquímico marino, los efectos de la deposición en

procesos tales como la floración de fitoplancton o el aumento de la concentración de metales disueltos, entre otros, no están bien caracterizados [6].

Para llenar esos vacíos, una red de instrumentos para evaluar el flujo de deposición insoluble total de materia particulada atmosférica, y en especial de polvo del Sahara, se ha creado en la región mediterránea con un nuevo tipo de colector. Este nuevo colector es un muestreador de deposición autónoma llamado CARAGA (Collecteur Automatique de Retombées Atmosphériques à Grande Autonomie). Entre los siete instrumentos instalados actualmente en el Mediterráneo occidental, dos de ellos se encuentran en España, uno en Ses Salines (al nivel del mar y en funcionamiento desde enero de 2012), en el sureste de Mallorca y otro en Cádiz (a 1729 m asl y en funcionamiento desde agosto de 2012), en el suroeste de Sierra Nevada. Los análisis químicos de los primeros filtros recogidos están en curso.

4. CONCLUSIONES

La participación de la comunidad española de aerosoles, ya sea en campañas de campo o en las reuniones y grupos de trabajo relacionados con el proyecto ChArMEx es notable. Investigadores españoles participan activamente en el workpackage 1 (emisión), 4 (forzamiento radiativo y el impacto climático) y 5 (deposición). Su participación también contribuye de manera indirecta a cuestiones científicas de los workpackages 2 (envejecimiento) y 3 (calidad del aire y transporte). En particular, la ubicación de las Islas Baleares en el medio de la cuenca del Mediterráneo occidental, donde las condiciones de fondo son generalmente limpias es un punto estratégico para la investigación de la química, el envejecimiento y el transporte de los aerosoles transportados sobre largas distancias. Todas las actividades dirigidas por investigadores españoles y sus colaboradores internacionales llevarán a un mejor conocimiento de los aerosoles del Mediterráneo, en particular de su química, lo que tendrá un impacto sobre la fiabilidad de los modelos climáticos en la región mediterránea.

5. AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo está financiado por el proyecto del 7º Programa Marco Aerosols, Clouds, and Trace Gases Research Infrastructure Network (ACTRIS) (grant

agreement no. 262254); por el Ministerio español de Ciencia e Innovación y los fondos FEDER en los proyectos TEC2012-34575, TEC2009-09106 / TEC, CTM2011-14036-E y CGL2011-13580-E / CLI; y la beca del Programa Severo Ochoa SEV-2011-00.067. Las campañas de medida de ChArMEx (<http://charmex.lsce.ipsl.fr>) están principalmente financiadas por el programa MISTRALS (ADEME, INSU, CEA, Météo-France) y el CNES. Las mediciones de deposición en Sierra Nevada son financiadas por el proyecto CEI-BioTic-UGR 20F12 / 24. ENDESA, a través de AMBILINE, se hizo cargo de los instrumentos de rutina en Can Llompart. Los autores desean agradecer a GESA-ENDESA y la Direcció General de Canvi Climàtic i Educació Ambiental de las Illes Balears, para el uso de sus instalaciones y el soporte técnico.

6. REFERENCIAS.

1. F. Dulac et al., "An update on ChArMEx (the Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment) activities and plans for aerosol studies in the Mediterranean region", European Aerosol Conference, Granada, Spain, L. Alados Arboledas and F. J. Olmo Reyes (Eds.), 2 – 7 September 2012.
2. J. C. Cerro, J. Pey, C. Bujosa, S. Caballero, A. Alastuey, M. Sicard, B. Artíñano, X. Querol, "Regional background aerosols over the Balearic Islands over the last 3 years: ground-based concentrations, atmospheric deposition and sources", European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 7 - 12 April 2013.
3. F. Dulac et al., "The summer 2012 Saharan dust season in the western Mediterranean with focus on the intense event of late June during the Pre-ChArMEx campaign" , European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 7 - 12 April 2013.
4. C. Textor, et al., "Analysis and quantification of the diversities of aerosol life cycles within AeroCom", Atmos. Chem. Phys., 6, 1777-1813, 2006.
5. C. Textor et al., "The effect of harmonized emissions on aerosol properties in global models - an AeroCom experiment", Atmos. Chem. Phys., 7, 4489-4501, 2007.
6. A. Jordi, G. Basterretxea, A. Tovar-Sánchez, A. Alastuey, X. Querol, "Copper aerosols inhibit phytoplankton growth in the Mediterranean Sea", Proc. National Academy Sciences, doi:10.1073/pnas.1207567110, 2012.

EL PROYECTO ZEWS (ZEro Waste at Sea; Cero Basuras en el Mar)

Fernando Davara Rodríguez (Relator)*

Presidente de la Asociación Vertidos Cero

(*) f.davara@spatialdav.com;

www.fernandodavara.com

Colaboración técnica: Asociación Vertidos Cero y KAI Marine Services

RESUMEN. *Desarrollo de un programa piloto en la Región Macaronésica (Canarias y Madeira), con especial atención a zonas de alto valor ecológico, en apoyo a la estrategia de observación del problema de las basuras marinas. Investigación y desarrollo de un nuevo método de observación y toma de datos de basuras marinas en superficie (flotantes) basado en el uso combinado de técnicas de observación de la tierra por satélite y aeronaves no tripuladas (DRONES) y datos e información colaterales, optimizando el control de grandes áreas como la cuenca Atlántica.*

1. INTRODUCCIÓN

Las basuras marinas constituyen una amenaza grave, creciente y global para el medioambiente y el desarrollo económico y social.

El término abarca todo tipo de materiales fabricados o tratados por la acción humana, de naturaleza sólida y persistentes, que han sido depositados o abandonados en el medio marino por diferentes medios

La mayor parte de ellos se degradan lentamente, como en el caso de los plásticos, causando una cada vez mayor acumulación de grandes cantidades de basuras en el medio marino y costero con consecuencias importantes para la diversidad biológica, la economía, la salud e incluso el equilibrio de los hábitats, como por ejemplo mediante la introducción de especies no indígenas.

Y el problema se agrava continuamente como lo indican los diferentes estudios que se llevan a cabo sobre el tema, debido principalmente a las actividades indiscriminadas y la falta de concienciación y sensibilización sobre las consecuencias de tales acciones.

Para hacer frente al mismo se han puesto en marcha diferentes iniciativas tanto internacionales como locales o regionales. Por ejemplo, la Asamblea General de Naciones Unidas (Resolución A/60/L.22-Océanos y Ley del Mar; noviembre de 2005) reconoce la gravedad del problema y destaca que uno de los obstáculos para hacer frente a la contaminación por basuras marinas es la ausencia de programas de seguimiento y evaluación que aporten información sobre su abundancia e impactos.

Asimismo, la Unión Europea, en la Directiva Marco sobre la Estrategia Marina (Directiva 2008/56/CE) y en la Ley de protección del medio marino (Ley 41/2010) considera las basuras marinas como uno de los factores que pueden afectar negativamente el buen estado ambiental del medio marino. En la propia Directiva se requiere el desarrollo de criterios y metodologías para evaluar la situación ambiental marino donde las basuras marinas son uno de los descriptores a utilizar.

En lo que respecta a España, los diferentes acuerdos regionales instituidos para la protección del medio marino (Convenio de Barcelona para la protección del medio marino y de la región costera del Mediterráneo y Convenio OSPAR para la protección del medio marino del Atlántico Nororiental) han comenzado a establecer diversas acciones para mejorar el conocimiento del problema de las basuras marinas y contribuir a su prevención y eliminación.

Según el documento de evaluación inicial de la Estrategia marina de la Demarcación marina del Estrecho y Alborán (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente; julio de 2012) no existen datos sobre las basuras en playas y no hay establecido ningún programa de seguimiento estandarizado al respecto. Esta situación de falta de información sobre evaluación y seguimiento de las basuras en playas es similar en el resto de las Demarcaciones marinas españolas.

Como contribución a estas y otras iniciativas que se están adoptando para hacer frente al problema y tomando como referencia la aplicación de la mencionada Directiva Marco sobre la Estrategia Marina en las aguas españolas, la Asociación Vertidos Cero puso en marcha en 2013 un proyecto, denominado MARNOBA (no basuras en el mar o mar sin basuras) con la colaboración de la Fundación Biodiversidad del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente y de KAI Marine Services.

Su objetivo era el diseño y difusión de un protocolo de caracterización y gestión de las basuras marinas en las playas del litoral español para el buen estado ambiental del medio marino, con especial atención a la conservación de la biodiversidad marina, tomando como referencia la Demarcación marina del Estrecho y Alborán.

Con él se pretendía llenar el vacío que existe en cuanto a datos sobre esta materia en las costas españolas y, en consecuencia, a la falta de información necesaria para promover medidas que aborden el problema. En este sentido, la Asociación consideró que las numerosas iniciativas de limpiezas voluntarias de playas podrían aportar información para el análisis y la definición del origen de las basuras, de forma que pudiesen ponerse en marcha acciones de eliminación de las fuentes, si bien para ello era necesario contar con una metodología de caracterización que aportara información contrastable.

En apoyo a la obtención de datos y con objeto de favorecer la participación y conciencia ciudadana en el marco del proyecto MARNOBA se desarrolló una aplicación para los dispositivos móviles de uso más extendido en la actualidad que permiten que cualquier persona pueda contribuir a dicha caracterización.

Ante los positivos resultados de la primera fase, en 2014 se decidió dar continuidad al proyecto mediante una segunda dedicada a la elaboración de una plataforma Web donde se integre y presente la información obtenida permitiendo el libre acceso a la misma para fomentar la concienciación ciudadana sobre las basuras marinas en las playas de todo el litoral español y ayude a la elaboración de propuestas dirigidas a evitar su generación o al menos minimizar su impacto.

La experiencia adquirida y la favorable acogida del proyecto MARNOBA condujo a los responsables de la Asociación Vertidos Cero a estimar que sería conveniente ampliar el ámbito de actuación a otros medios, tanto en tierra, como en mares y flotantes y en fondos.

En base a estas consideraciones se ha diseñado un nuevo proyecto, denominado ZEWS (Zero Waste at Sea) por medio del cual la Asociación trata de introducir nuevas estrategias para hacer frente al problema de las basuras marinas en el mar.

En este documento que se ha elaborado expresamente para la presentación del Proyecto en el Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA 14; Madrid 27 de noviembre de 2014)) se presentan algunas de las características principales del mismo incluyendo sus objetivos, enfoque y fases, concluyendo con unas reflexiones finales del autor y colaboradores de esta ponencia.

2. DEFINICIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

El proyecto ZEWS (Zero Waste at Sea) se define como una estrategia innovadora de observación y acción frente al problema de las basuras marinas en la cuenca Atlántica, limitando en su primer prototipo las zonas de estudio a las reservas marinas en islas atlánticas de España y Portugal que definan explícitamente los potenciales socios del mismo.

El objetivo principal del proyecto es mejorar y ampliar el conocimiento sobre el problema de las basuras marinas en la cuenca atlántica para una mejor gestión y explotación sostenible de los recursos marinos en base a un enfoque eco sistémico innovador.

Para alcanzarlo objetivo se propone lograr los siguientes objetivos intermedios:

- Desarrollo de un programa piloto de observación in situ del problema de las basuras marinas, con especial atención a zonas de alto valor ecológico con recursos tales como pesca o turismo, tomando como referencia la metodología recomendada por el Subgrupo técnico de basuras marinas de la

Comisión Europea en desarrollo de la Directiva Marco sobre la Estrategia Marina (DMEM).

- Investigación y desarrollo de un nuevo método de observación y toma de datos de basuras marinas en superficie (flotantes) basado en el uso de aeronaves no tripuladas (Drones o UAV,s) optimizando el control de grandes áreas, como la cuenca atlántica.
- Puesta en marcha de un programa de medidas para la minimización de las basuras marinas en origen que permita el establecimiento de porcentajes de reducción para la definición de los objetivos ambientales de la DMEM.
- Difusión de los resultados a nivel social, técnico y científico para avanzar en la eliminación de las basuras marinas y la sostenibilidad de las actividades en áreas costeras.
- Complementar el proyecto MARNOPA de caracterización de las basuras marinas en playas del litoral español (actualmente en su Fase II).

3. ENFOQUE

El enfoque para el desarrollo de los modelos conceptual y operativo del proyecto ZEWS se basa en las siguientes ideas principales:

- ***Llenar los vacíos de datos de observación***

El proyecto demanda un enfoque holístico para optimizar la aplicación de las metodologías recomendadas por la Unión Europea para cada compartimento ambiental marino (playa, superficie del agua y fondo marino) y facilitar el intercambio interoperable de datos de observación de los océanos, como promueve el GEO (Grupo de Observación de la Tierra).

Tal enfoque se plasmará en un modelo conceptual mediante el análisis de datos y la integración de información. Los resultados del mismo tratarán de las fuentes de desechos marinos, las vías de circulación y acumulación y zonas de deposición.

- ***Elaboración de un modelo predictivo.***

Para la implementación del proyecto se desarrollará un modelo del transporte de los desechos marinos en la cuenca del Atlántico basándose en parámetros oceánicos pertinentes y datos calibrados a través de observación in-situ.

En él se definirán las vías de circulación principales de la basura marina optimizando los esfuerzos de caracterización de los desechos marinos en el océano abierto.

- ***Desarrollo de un método rentable de observación global de la basura marina***

Asimismo se trata de desarrollar un método innovador de observación basado en Drones (UAV,s) equipados con sensores en visible e infrarrojo (IR) que implique la reducción de costes y el aumento de las áreas de observación. También se identificarán las posibilidades de control de la basura marina flotante con apoyo de sensores a bordo de satélites de observación de la Tierra y otros datos colaterales.

- ***Integración del componente biológico***

Por medio de este proyecto se trata también de definir una metodología para el control de la introducción y vías de propagación de especies no indígenas (ENI / NIS) asociadas a los desechos marinos in-situ.

Utilizando esta metodología se podrían evitar los efectos de dichas ENI / NIS en los recursos marítimos (pesca, acuicultura, turismo, etc.)

- ***Implicación de las partes interesadas, enfoque ascendente y sensibilización ciudadana***

La implicación de las partes interesadas se estima clave para detectar deficiencias y cuellos de botella en los sectores que puedan estar contribuyendo a resolver el problema, así como para aumentar la viabilidad y eficacia de las posibles soluciones.

Asimismo se considera esencial la concienciación y participación ciudadana que permitirá evaluar el impacto social y técnico de las medidas de mitigación de los desechos marinos y estudiar los cambios de comportamiento para asesorar en el establecimiento de prioridades a nivel mundial.

Finalmente se juzga necesaria la colaboración en la transferencia intersectorial de conocimiento y de los resultados de cada etapa a través de diferentes programas de coordinación y gestión para asegurar el correcto desarrollo del proyecto.

4. DESARROLLO

El proyecto se llevará a cabo en diferentes etapas a desarrollar sin solución de continuidad, algunas de las cuales pueden incluso solaparse en el tiempo.

- ***ETAPA 1. Programa piloto en la zona elegida de la estrategia de observación del problema de las basuras marinas***

Esta etapa comprende las campañas de toma de datos in situ y su tratamiento y análisis para la identificación del origen de las basuras marinas y de sus vías de transporte preferentes.

Como herramienta de apoyo a la evaluación y análisis de las diferentes variables se diseñará e implementará un Sistema de Información Geográfica (SIG /GIS) que integrará los datos de campo y de laboratorio obtenidos. Este SIG servirá también de soporte al Geoportal a desarrollar en el proyecto.

Entregable: al finalizar la etapa se deberá disponer de un informe de caracterización de las basuras marinas y definición de su origen.

- ***ETAPA 2. Puesta en marcha de un prototipo innovador de observación de basuras flotantes en grandes áreas y a nivel global***

En esta etapa se abordará la toma de datos de basuras flotantes mediante la observación remota con vehículos no tripulados (Drones o UAV,s).

Se utilizarán tanto sensores en el espectro visible como multiespectrales para tratar de determinar las bandas que mejor respuesta dan a este tipo de información de manera que sirvan como calibración para un futuro control mediante observación por satélite.

Entre sus diferentes tareas se incluyen las de definición de las áreas a observar, las campañas de reconocimiento de flotantes mediante Drones y el análisis de los datos obtenidos.

Entregable: al finalizar la etapa se deberá disponer de un informe de los resultados del análisis y se habrá integrado la base de datos en el SIG / GIS.

- ***ETAPA 3. Programa de medidas para la eliminación de basuras marinas en origen***

En atención a la definición de objetivos cuantificados de eliminación de basuras marinas demandado por la DMEM, en esta etapa se analizarán las posibles actividades de minimización en origen de las basuras marinas caracterizadas.

Para ello se procederá a analizar las presiones e impactos, se propondrá la implantación de medidas en diferentes sectores económicos y sociales y el seguimiento de la evolución de la sensibilidad social hacia el problema de las basuras marinas.

Entregable: finalizará la etapa con un informe de los resultados obtenidos mediante la evaluación de los datos aportados por las personas que hayan colaborado rellenando los cuestionarios elaborados al efecto.

- **ETAPA 4. Difusión**

En esta etapa se procederá a la comunicación institucional del proyecto así como a la difusión científico-técnica de los resultados del mismo sin olvidar la importante tarea de la concienciación ciudadana.

Entregable: la documentación disponible al finalizar la etapa será muy variada incluyendo programas e informes de los resultados de los diferentes eventos a realizar, una galería gráfica de los mismos, resultados de los datos del voluntariado, etc.

- **ETAPA 5. Coordinación**

Esta etapa se solapa con todas las anteriores con objeto de asegurar durante todo el proyecto tanto la armonización del conjunto como la de cada participante.

Para la adecuación y planificación de cada una de las acciones se establecerá una coordinación general del proyecto, responsable de la gestión y seguimiento de este en todas sus fases.

Asimismo, cada uno de los participantes designará un responsable de las labores de gestión de las acciones a su cargo y centralizará la relación con la coordinación general del proyecto.

Igualmente se designará un coordinador técnico en dependencia directa del responsable del seguimiento técnico del proyecto.

5. CONCLUSIONES Y REFLEXIONES

El proyecto ZEWS representa un avance significativo en aspectos muy diversos. En primer lugar por la obtención de datos in-situ sobre los indicadores de la basura marina, en la región elegida, en cuanto a su caracterización, fuentes e impactos.

También por implicar el estudio de la contaminación biológica de los desechos marinos y la identificación de especies no indígenas potencialmente introducidas por las basuras que posibilitará definir aquellas especies que representan una amenaza mayor para los ecosistemas y recursos marinos.

De igual forma se considera innovadora la generación de un modelo de las vías de transporte de los desechos marinos en el Océano Atlántico Norte y la implementación de un Geoportal que proporcionará información cuantitativa en apoyo a la objetivos de minimización de la basura marina requeridos por la DMEM. (consulta pública de la Comisión Europea sobre este aspecto; 2013).

Finalmente por el desarrollo de un proyecto piloto para la observación de los desechos marinos por medio de UAV,s obteniendo datos en grande zonas con menores costes, complementado por una metodología para el control sistemático de la basura marina mediante técnicas de teledetección. Los sensores de los UAV,s (instrumentos de detección en diferentes bandas del espectro visible e IR) permitirán evaluar la posibilidad de detectar la basura marina por medios de satélites de observación de la Tierra, aspecto que en la actualidad no se ha desarrollado para el Atlántico Norte.

A modo de reflexiones personales es posible afirmar que con la experiencia adquirida en el Proyecto MARNOBA y la puesta en marcha de ZEWS, la Asociación Vertidos Cero trata de apoyar la definición de los objetivos ambientales de la DMEM y mostrar:

- La necesidad de integrar los datos con origen en diferentes medios (playas, fondos, flotantes) para generar una base de conocimiento sólida dirigida al diseño de medidas de gestión y la necesidad de metodologías de caracterización estandarizadas.
- La importancia de la colaboración tanto individual como institucional para acometer la problemática de las basuras marinas.
- La relevancia de desarrollar en paralelo acciones de investigación y concienciación ciudadana rentabilizando las sinergias de ambas.

SISTEMAS INTELIGENTES DE GESTIÓN DE RIEGO PARA ESPACIOS VERDES URBANOS: PARQUES Y JARDINES

Jorge del Valle Arias
GALTEL - Sensor Intelligence S.L.

Las nuevas tecnologías permiten diseñar sistemas inteligentes de riego para parques y jardines públicos que redunden en importantes ahorros de agua en el mantenimiento de los mismos. Para ello es necesario establecer unos procedimientos de medida de datos y cálculo de necesidades hídricas específicamente adaptados a estos espacios verdes, e integrarlos en sistemas inteligentes de control de riego que adapten la irrigación a la necesidad específica de cada zona y de cada especie vegetal. Se presentan los resultados de un proyecto innovador realizado en parques públicos de La Coruña, donde se definen las necesidades hídricas de distintas especies vegetales especialmente adaptadas a la zona, y su control mediante un sistema de riego por hidrozonas diferenciadas por el binomio espacio - variedad vegetal.

El Internet de las Cosas (IoT)

El Internet de las Cosas (IoT – Internet of Things) se puede definir con la interconexión de objetos cotidianos a la red, de manera que estos objetos, por medio de dispositivos electrónicos asociados a ellos, o instalados en ellos, reporten información sobre su estado y, del análisis de estos datos, se infieran acciones o recomendaciones de acción para optimizar cualquier tipo de proceso que deba ser realizado con y/o para esos objetos.

Si uno mira a su alrededor, se da cuenta de que este concepto lleva entre nosotros mucho tiempo, y especialmente se ha disparado su aplicación con la disponibilidad de dispositivos inteligente con costes cada vez más reducidos y la

mejora continua de las redes de comunicación y su capacidad para transmisión de datos.

Se trata ya de un concepto que afecta no sólo a aplicaciones industriales, sino a prácticamente cualquier sector de nuestro entorno, y que ha permitido evolucionar de una situación en la que sólo las industrias estaban conectadas a una en la que múltiples dispositivos informan de su estado en base a datos de sensores integrados en los mismos.

Las redes inalámbricas de sensores

Para que el Internet de las Cosas sea una realidad es necesario que los objetos sean capaces de enviar información. Esto se conoce como comunicaciones máquina-a-máquina, M2M o machine-to-machine.

Una de las tecnologías clave en la evolución de las comunicaciones M2M y del IoT ha sido el desarrollo de las redes inalámbricas de sensores (WSN - Wireless Sensor networks).

Una red inalámbrica de sensores es un conjunto de dispositivos, generalmente de bajo coste y bajo consumo energético, denominados *nodos*, a los que se conectan sensores para obtener información, y que disponen de capacidades de comunicación inalámbrica con otros nodos hasta alcanzar un nodo central, colector de datos o gateway, que coordina y enruta las comunicaciones entre los distintos nodos inalámbricos.

Los propios nodos inalámbricos ayudan a formar la infraestructura de red necesaria para el envío de información, gracias a la capacidad que tienen de reenviar los mensajes recibidos de otros nodos hacia el coordinador de la red. Es decir, todos los nodos, al menos en una red WSN ideal, actuarían como medidores de datos de sensores y como repetidores de la información del resto de nodos.

Las redes WSN tienen, como principales características, las siguientes:

- Usan dispositivos de muy bajo consumo energético, lo que las hace especialmente útiles en aplicaciones que requieran nodos de medida desatendidos y/o en lugares sin alimentación.
- Son capaces de re-encaminar las rutas de comunicación de datos, de manera que, en caso de que algún nodo quede fuera de servicio, los demás nodos inalámbricos son capaces de reconfigurar las líneas de transmisión para alcanzar al coordinador de la red.

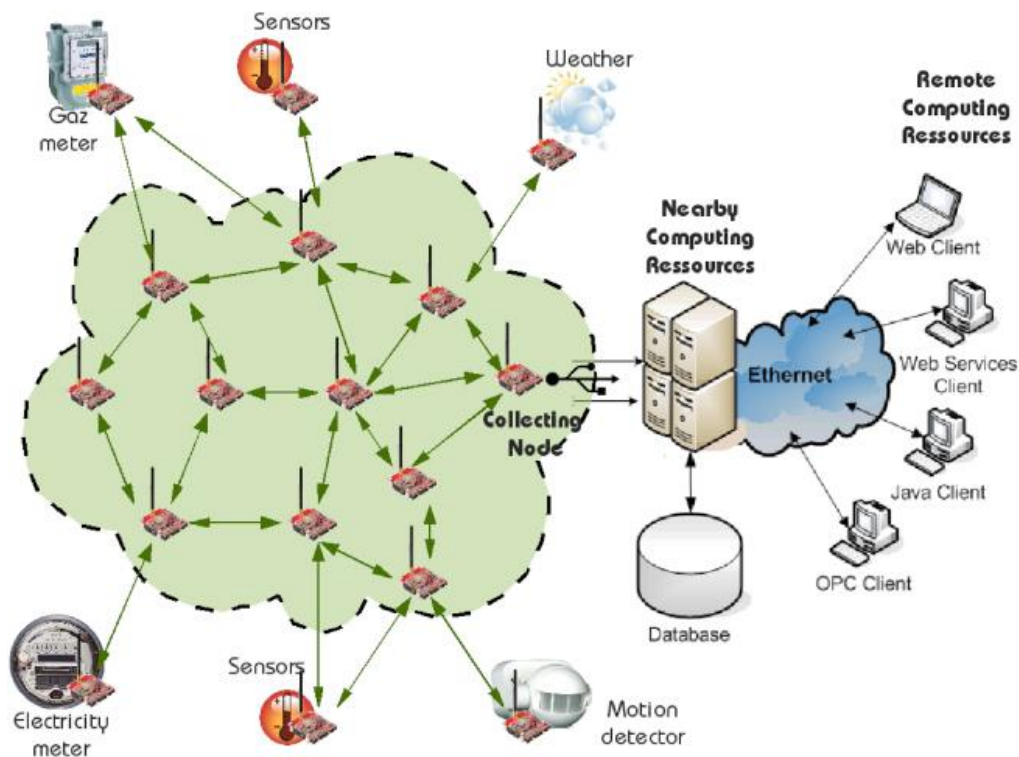


Fig. 1. Arquitectura de una red inalámbrica de sensores WSN

Aplicaciones medioambientales de las WSN: Smart Agriculture

Las características indicadas anteriormente de las redes inalámbricas de sensores (WSN) hacen que estos dispositivos y redes encajen a la perfección en aquellas aplicaciones que requieren de despliegues de múltiples puntos de medida y

recogida de datos, dispersados espacialmente, pero dentro de una zona geográfica controlada.

Wireless Sensor Applications

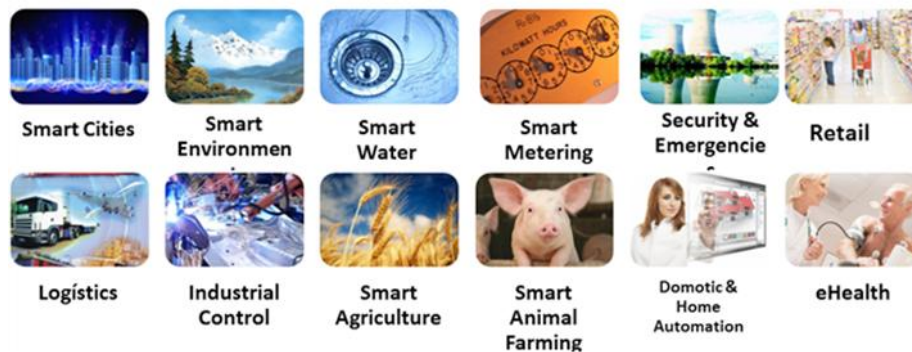


Fig. 2. Aplicaciones de WSN

En particular, las WSN presentan un alto potencial de uso en aplicaciones agrícolas, para la optimización de los insumos (agua, fertilización, etc.). Para ello, es necesario revisar algunos conceptos agrícolas que nos ayudarán a entender cómo las WSN pueden ayudar a optimizar la gestión, especialmente en lo que respecta al agua de riego.

Necesidades hídricas de los cultivos. Variabilidad espacial.

Cualquier cultivo tiene una necesidad hídrica que puede ser modelada mediante un sistema de “tanque”, en la que el espacio en el que se desarrolla el cultivo se comporta como un recipiente o tanque, y en el que todo el agua que entra o se consume o se pierde, de manera que se mantiene una ecuación de igualdad entre las entradas y salidas.

Las entradas al sistema son debidas principalmente a riego o a precipitación (lluvia), con aportaciones menores también debidas a infiltración y a influjo capilar osmótico.

Las salidas del sistema se producen por transpiración, escorrentía, evaporación y por percolación a capas de terreno inferiores.

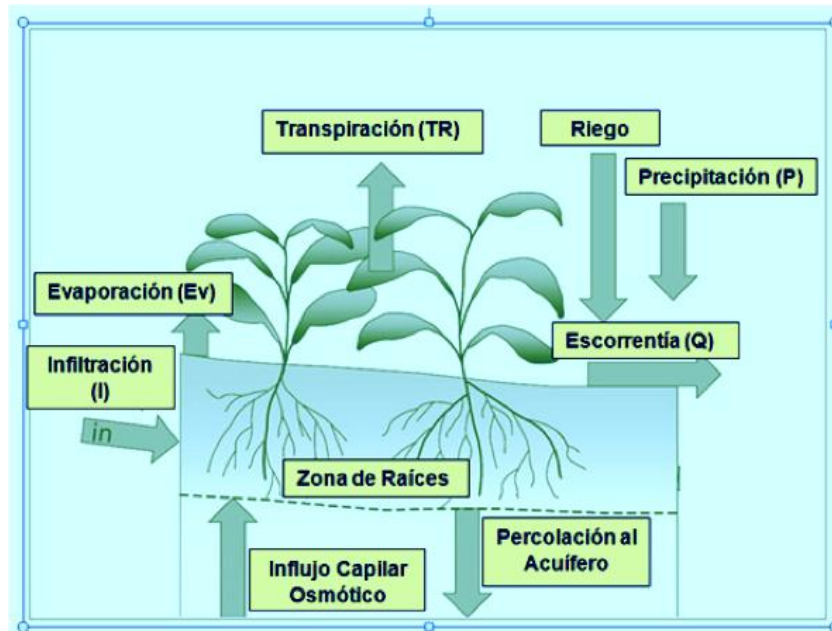


Fig. 3. Modelo de balance hídrico

En función de parámetros climáticos es posible estimar la necesidad hídrica teórica mediante el cálculo de la evapotranspiración, que tiene en cuenta factores como la radiación solar, la humedad, la temperatura y la velocidad del viento, y se adapta a cada tipo de cultivo por medio de un factor o coeficiente de cultivo, específico para cada variedad.

Este cálculo es teórico, y por tanto no representativo al 100% de la necesidad hídrica del cultivo en toda su extensión superficial, ya que, como se ha indicado anteriormente, influyen también otros factores que están relacionados con el terreno, como la percolación, la escorrentía o la infiltración.

Cabe entonces hablar de la influencia de la variabilidad espacial del terreno, que se plasma en una variabilidad, también espacial (e incluso temporal), del propio cultivo. Este concepto tiene relación con el hecho de que las necesidades hídricas de un mismo cultivo, en una misma área, sean distintas de una zona a otra de la parcela, debido a que las propiedades del terreno cambian de un punto a otro.

Este fenómeno se aprecia muchas veces a simple vista, con una vista cenital de un cultivo, en el que se observan diferencias de vigor de la planta, que responden a esas variaciones del suelo. Y se hace más patente, y sobre todo cuantificable, cuando se aplican técnicas de teledetección y análisis de señal, para calcular por ejemplo índices de vigor vegetativo, que indican de una forma gráfica y cuantitativa la cantidad de vegetación de la planta, relacionados directamente con las variaciones del suelo (considerando que el resto de factores se mantienen uniformes: riego, variedad de cultivo, orientación de la plantación, insolación, etc.).



Fig. 4. Variabilidad espacial del cultivo

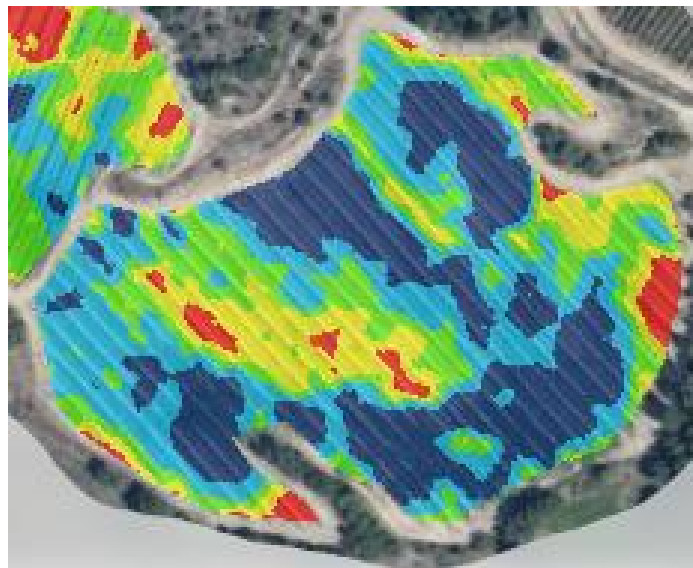


Fig. 5. Variabilidad espacial. Índice de vigor

Es en este punto donde la aplicación de nuevas tecnologías, y en particular de las redes inalámbricas de sensores, ofrecen a los gestores agrícolas una útil herramienta para monitorizar el estado de los cultivos, en toda su extensión y siguiendo las variaciones propias de la variabilidad espacial, para monitorizar, en tiempo real, parámetros que afecten al desarrollo vegetativo e, incluso, a la producción, sirviendo como herramienta de ayuda a la toma de decisiones para optimizar la gestión del cultivo, facilitando la adopción de prácticas de agricultura y producción sostenible e integrada, ya que:

- Permiten monitorizar en cada punto el estado hídrico de la planta y adaptar las cantidades de riego a la necesidad.
- Permiten evaluar algunos riesgos del cultivo, relacionados con plagas y/o enfermedades fúngicas.
- Ofrecen información para aplicar, en cada momento y en cada lugar, las cantidades precisas y óptimas de insumos, obteniendo un doble ahorro:
 - De insumos, por la utilización de las cantidades necesarias (no más).

- Energético: derivado de la optimización de insumos, por la energía necesaria para su aplicación (energía eléctrica asociada al riego, por extracción de agua y/o distribución en el sistema de riego; combustible asociado a tareas de fertilización).

Caso práctico. Proyecto WATER: Sistema de Riego Sostenible en Parques y Jardines

El proyecto WATER se ha desarrollado en el marco de un consorcio de empresas:

- Galtel Sensor Intelligence, que aporta su experiencia en el diseño y desarrollo de sistemas de monitorización agro-ambiental en tiempo real y en el tratamiento de los datos como ayuda a la toma de decisiones.
- Malvecín, ingeniería especializada en el diseño y mantenimiento de espacios verdes urbanos.
- ABN Pipe, empresas especializada en la fabricación de sistemas de riego y la electrónica de control para los mismos.

La actividad investigadora ha estado apoyada por dos centros de investigación:

- El grupo de Fertirriego y XXX, de la Universidad de Santiago de Compostela.
- CETIM, Centro Tecnológico Multisectorial.

Los objetivos del proyecto eran:

- Establecer procedimientos de medida de datos y cálculo de necesidades hídricas específicamente adaptadas a la variabilidad de especies vegetales plantadas y a las condiciones ambientales de las mismas.
- Cálculo de coeficientes de cultivo **Ks** específicos para cada variedad y adaptados a la variabilidad espacial.

- Integración automática con un sistema de control de riego para irrigación bajo demanda.

El proyecto se ha desarrollado en la ciudad de A Coruña, en dos parques de la ciudad, buscando dos entornos vegetativos distintos:

- Parque de Monte de San Pedro, con una extensión de 78 hectáreas y de reciente formación (1999).
- Parque de Santa Margarita, de 52 hectáreas y de formación antigua (1977)



Fig. 6. Proyecto WATER. Parques de A Coruña en los que se ha desarrollado.

En cada parque se definieron dos hidrozonas, con 3 tratamientos hídricos en cada hidrozona, de manera que en el Monte de San Pedro se definieron 84 parcelas experimentales, y en Santa Margarita 96 parcela experimentales. En ambos casos se plantaron 4 especies vegetales típicas de la zona (camelia japónica, coprosma, hydrangea y metrosidero), además de una mezcla de césped, y en ambos casos combinando zonas de sol y de sombra.



Fig. 7. Proyecto WATER. Parcelas experimentales.

Para adaptar el sistema de medida a la variabilidad espacial del suelo, definida por las parcelas experimentales, se ha diseñado un sistema de monitorización basado en redes inalámbricas de sensores, con nodos a los que se pueden conectar hasta 8 sensores de suelo, estableciendo una comunicación inalámbrica mallada de corto alcance, usando la banda libre de 868 MHz. La información de los nodos llega a un gateway – concentrador, al que se incorpora una comunicación de largo alcance GPRS.

El principal parámetro medido ha sido la humedad del suelo (potencial hídrico del terreno), con sensores tipo Watermark. En fases posteriores del proyecto está previsto incorporar también sensores de conductividad eléctrica, temperatura de suelo y contenido volumétrico de agua.



Fig. 8. Sensor de potencial hídrico del suelo tipo Watermark.

Conclusiones

- Las redes inalámbricas de sensores WSN y la comunicación M2M se adaptan perfectamente, por su estructura de intercambio de datos, a las necesidades de monitorización de espacios verdes (cultivos, parques), ya que permiten medir “siguiendo” la variabilidad espacial de la zona de interés.
- En general, los sistemas de riego actuales no tienen en cuenta las necesidades hídricas reales, y frecuentemente se aplica más agua de la necesaria.
- El cálculo de coeficientes específicos para cada variedad y situación permitiría ajustar las cantidades de agua de riego, obteniendo importantes ahorros en coste y en cantidad, con beneficios medioambientales asociados.
- Además de monitorizar parámetros en tiempo real, es necesario avanzar en el desarrollo de algoritmos de análisis de datos masivos para generar información útil al usuario final.

APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA RSD: EJEMPLO PRÁCTICO DE LA CIUDAD DE GRAZ (AUSTRIA)

Josefina de la Fuente
TechNet, S.L.

Las emisiones del tráfico rodado son el factor el más relevante de la contaminación atmosférica urbana (hasta un 80%) cuyos efectos sobre el medio ambiente y la salud son muy graves. Sus consecuencias suponen un coste muy elevado para las instituciones públicas. Por lo tanto, es imprescindible reducir estas emisiones, las cuales se consideran aún como "difusas". Hasta el momento, los intentos de mejoras se centran en la realización de inventarios a través de modelos teóricos y el control periódico de las emisiones de cada vehículo en ITV. Estos métodos no permiten monitorear las emisiones reales de los vehículos, que pueden variar con las condiciones de conducción y el estado del vehículo, y son las que provocan la contaminación atmosférica.

Al día de hoy, la única forma de medir emisiones reales (CO₂, CO, NO, HC y PM) de una flota circulante, de forma masiva y no intrusiva, se basa en la tecnología remota RSD. Esta tecnología es centrada en la caracterización de la composición de la pluma de escape de cada vehículo mediante espectroscopia óptica, asociada a la grabación de su placa de matrícula y a la medición de sus condiciones cinéticas. RSLAB es el único laboratorio acreditado por ENAC para realizar mediciones remotas de emisiones basadas en la tecnología RSD (ISO 17025; 1035/LE2117).

Como ejemplo práctico ilustrando el potencial de la tecnología RSD, RSLAB desarrolló una campaña de medidas de 5 semanas en Graz, Austria (Mayo 2014).

Se realizaron medidas en 5 emplazamientos en toda la ciudad, en un total de 11 600 vehículos: turismos, furgonetas y camiones en todos tipos de vías. A partir del análisis de los datos obtenidos, se observó que la flota de vehículos (relativamente nueva) tiene niveles bajos en PM. Para los demás contaminantes, se obtuvieron valores comparables a los de otras ciudades de Europa como Zúrich, pero más bajos que en Madrid y Barcelona. Se mostró que un pequeño porcentaje de la flota (los "altos emisores") contribuye mayoritariamente al total de emisiones (por ejemplo, un 5% contribuye con un 61% del total de emisiones de CO).

También se midieron las emisiones de los autobuses de la línea de buses urbanos (142 vehículos). Se trataba de una flota en buen estado, con niveles de PM más bajos que los autobuses urbanos de Barcelona y Madrid. Al contrario, se midieron niveles más altos de emisiones de HC en la flota de autobuses de Graz. Se identificaron y se arreglaron los 10 autobuses más contaminantes, permitiendo una reducción relevante de sus niveles de HC (77%) y de CO (84%).

Estos resultados demuestran el potencial de la tecnología RSD para monitorear el estado de una flota circulante y para identificar a los altos emisores, para conseguir una reducción de las emisiones y también del consumo de combustible de los vehículos.

CONCLUSIONES. Gracias a la evaluación en tres días de la flota municipal de autobuses de la ciudad de Graz con el sistema de detección remota de emisiones, se identificaron a los 10 vehículos que más contribuían en emisiones e ineficiencia sobre el resto de la flota. La reparación de estos diez autobuses ha supuesto un ahorro en consumo de combustible anual de 6.000 euros y evitar un promedio de emisión de 5 toneladas de emisiones al ambiente.

ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE POTENCIA EN REDES LTE

Eduardo Martínez de Rioja y del Nido (*)
José Javier Martínez Vázquez (**)

(*) Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. ETSIT - UPM.

(**) Comité de Ingeniería y Desarrollo Sostenible. Instituto de la Ingeniería de España.

Resumen – *Este trabajo analiza el funcionamiento de los sistemas de control de potencia desarrollados para su implantación en redes móviles celulares. Desde el punto de vista medioambiental, estos sistemas pueden tener un impacto clave en temas como el ahorro en el consumo energético, el control de las potencias máximas de emisión, etc. El análisis se centrará en la tecnología LTE (Long Term Evolution), máximo exponente de la denominada cuarta generación de las comunicaciones móviles o 4G, por lo que previamente se realizará una breve descripción de sus principales características.*

1. Aspectos medioambientales del control de potencia

La implantación de mecanismos de control de potencia dentro de las redes móviles celulares permite reducir la potencia máxima de emisión de los terminales, adaptándola en cada momento a las condiciones del canal y a las necesidades de los usuarios. De esta forma, se logra reducir las interferencias en la interfaz radio entre los propios terminales de la red, así como con otros sistemas de comunicación, proporcionando un nivel aceptable de calidad de servicio a los usuarios.

El control de potencia es, por tanto, parte fundamental de los denominados mecanismos de gestión de recursos radio, o *Radio Resource Management (RRM)*, como se conoce dentro de los sistemas LTE. Su impacto medioambiental más directo es el efecto que ejercen sobre la potencia media de emisión de las instalaciones radioeléctricas y dispositivos móviles, que desde el año 2001 se encuentra regulada por ley para asegurar que no se superen unos valores máximos permitidos.

La información al respecto se puede encontrar en el Real Decreto 1066/2001 del Ministerio de la Presidencia, de 28 de Septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece las condiciones de protección del dominio radioeléctrico público, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitarias frente a emisiones radioeléctricas. En él se fijan los niveles de referencia que marcan los límites de exposición del público en general a los campos electromagnéticos, de acuerdo con las recomendaciones europeas [1].

Los operadores que establezcan redes de soporte para servicios de radiodifusión sonora y de televisión, presentarán un estudio detallado que indique los niveles de exposición radioeléctrica en las áreas próximas a sus instalaciones en las que puedan permanecer habitualmente personas. Dichos niveles deberán cumplir los límites establecidos en el Reglamento anterior. Una consecuencia de esta normativa es que los emplazamientos compartidos por los operadores (*site sharing*) podrían verse afectados por la consiguiente concentración de emisiones radioeléctricas.

El principal parámetro que se emplea para marcar los niveles máximos de exposición a las emisiones radioeléctricas es la Tasa Específica de Absorción (TAE, o SAR por sus siglas en inglés), que se relaciona con la energía absorbida por el cuerpo humano [2]. La normativa establece una relación entre la TAE y el nivel de densidad de potencia del campo electromagnético, fijando unos límites máximos para los valores de TAE unas 50 veces inferiores a los considerados inocuos.

Gama de frecuencia	Inducción magnética (mT)	Densidad de corriente (mA/m ²) rms	SAR medio de cuerpo entero (W/kg)	SAR Localizado (cabeza y tronco) (W/kg)	SAR Localizado (miembros) (W/kg)	Densidad de potencia S (W/m ²)
0 Hz	40	—	—	—	—	—
>0-1 Hz	—	8	—	—	—	—
1-4 Hz-	—	8/f	—	—	—	—
4-1.000Hz	—	2	—	—	—	—
1.000 Hz-100 kHz	—	f/500	—	—	—	—
100 kHz-10 MHz	—	f/500	0,08	2	4	—
10 MHz-10 GHz	—	—	0,08	2	4	—
10-300 GHz	—	—	—	—	—	10

Tabla 1. Restricciones básicas para campos electromagnéticos [1].

Gama de frecuencia	Intensidad de campo E (V/m)	Intensidad de campo H (A/m)	Campo B (μ T)	Densidad de potencia equivalente de onda plana (W/m ²)
0-1 Hz	—	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	
1-8 Hz	10.000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	
8-25 Hz	10.000	$4.000/f$	$5.000/f$	
0,025-0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	—
0,8-3 kHz	$250/f$	5	6,25	—
3-150 kHz	87	5	6,25	—
0,15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	—
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	—
10-400 MHz	28	$0,73/f$	0,092	2
400-2.000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f/200$
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

Tabla 2. Niveles de referencia para campos electromagnéticos [1].

Otro impacto medioambiental del control de potencia es que puede conseguir un ahorro importante en el consumo medio de energía de los equipos, tanto en el caso de los dispositivos móviles como en el de las estaciones base. No hay que olvidar que la energía eléctrica, aunque pueda considerarse como limpia, conlleva un impacto en el entorno medioambiental relacionado con los procesos de producción, transporte y distribución de la misma. Este ahorro energético se traduce en un aumento en la duración de la batería de los terminales.

En la actualidad, el uso cada vez más extendido de dispositivos como los *smartphones*, las *tablets* y los ordenadores portátiles, que soportan servicios de conectividad a Internet en banda ancha, ha dado lugar a unas expectativas cada vez mayores por parte de los consumidores. Las altas velocidades a las que se produce la transmisión o recepción de datos mediante un dispositivo móvil, requieren de un consumo de potencia que va a ser también mayor. Esto se traduce lógicamente en un agotamiento rápido de la batería.

Para contrarrestar este inconveniente, las tecnologías 4G desarrollan mecanismos de ahorro de energía que permiten operar a los terminales durante largos periodos de tiempo, sin tener que recargar. Entre ellos podemos encontrar el modo de Reposo o *Idle*, el modo de Recepción Discontinua (DRX) y, como hemos

mencionado previamente, el control de la potencia transmitida por el terminal, principal objetivo de nuestro análisis.

2. Fundamentos de la tecnología LTE

Antes de pasar a describir los aspectos técnicos del control de potencia, presentamos brevemente la tecnología LTE, cuyas siglas hacen referencia a *Long Term Evolution*, la evolución a largo plazo de los sistemas móviles de tercera generación. Empezaremos describiendo cómo fue el proceso que llevó a la elaboración del estándar por el 3GPP, cuáles son las principales características de la capa física (las modulaciones utilizadas en la interfaz radio: OFDMA, SC-FDMA), y a qué se hace referencia con el término bloque de recursos, que constituye la unidad mínima de recursos asignable a un usuario.

2.1 La evolución hacia LTE

A lo largo de los últimos veinte años, las redes de telefonía móvil han evolucionado hasta llegar a lo que hoy en día se conoce como la cuarta generación o 4G, de la que los sistemas LTE y su evolución *LTE-Advanced* son dos de los principales exponentes. Para ello han tenido que atravesar por diferentes etapas: empezando por una primera generación analógica orientada únicamente a los servicios de voz, siguiendo con la introducción de los sistemas digitales, la conmutación de paquetes y los servicios de datos, y terminando con una serie de técnicas que han permitido incrementar las tasas de datos soportadas por la red a través de lograr una mayor eficiencia espectral y de operación de los equipos.

El estándar LTE fue definido en el año 2009 por el organismo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) como continuación natural a los sistemas móviles de tercera generación basados en UMTS (*Universal Mobile Telecommunications Systems*). En el caso de España, el despliegue de redes LTE se ha producido de forma más lenta que en otros países, entre otras razones debido a los problemas relacionados con la liberación de la banda de frecuencias de 800 MHz, destinada a alojar dichos sistemas. A pesar de todo, hoy en día es cada vez mayor el número de operadores de telefonía móvil que comienzan a ofrecer servicios de conectividad 4G sustentados en LTE.

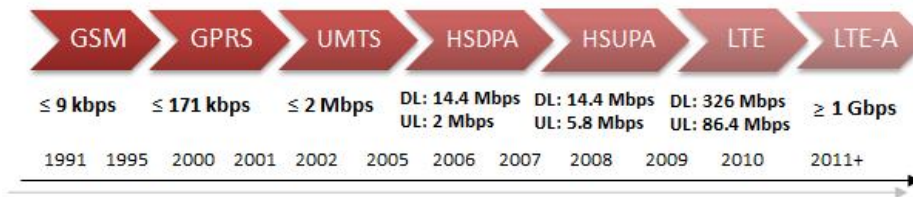


Figura 1. Evolución de los sistemas de telefonía móvil hacia la 4G.

El proceso que acabaría llevando a la definición de la tecnología LTE comenzó en el año 2004, cuando se empezó a estudiar la creación de una nueva red de acceso a partir de UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*). El objetivo era lograr su optimización para la transmisión de paquetes, aumentando la velocidad de transmisión (hasta 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el ascendente), reduciendo la latencia (menor de 10 ms), mejorando la eficiencia espectral hasta en un factor 4 con respecto a la *Release 6*, utilizando anchos de banda escalables y asegurando la interoperabilidad con otros sistemas [3].

Para el año 2006 ya se habían añadido otras características, como el acceso radio mediante OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) en el enlace descendente y SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) en el enlace ascendente, el soporte de la planificación de paquetes en el dominio temporal y frecuencial, los mecanismos de retransmisión HARQ (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*), la descentralización de la red, etc. El resultado de todo este trabajo fue bautizado como *Evolved-UTRAN* o E-UTRAN.

La primera versión completa de las especificaciones de LTE llegó en la *Release 8*, aprobada por el 3GPP en el año 2007. Estaba basada en la implementación de la red de acceso E-UTRAN, junto con un núcleo o red troncal que recibe el nombre de EPC (*Evolved Packet Core*), cuyos elementos presentan una arquitectura completamente IP. Después llegarían las *Releases 9* y *10*, que añadirían nuevas funcionalidades: el empleo de MIMO, los sistemas *Dual Carrier*, las femtoceldas, el uso de *relays*, etc. Por ejemplo, la tasa máxima que se podría alcanzar en el enlace descendente, para una configuración MIMO 4x4 con una modulación 64-QAM y 20 MHz de ancho de banda, ascendería a los 326 Mbps.

El contrapunto a LTE en el marco del organismo IEEE es el sistema WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), conocido también por el estándar IEEE 802.16e y su última versión, el IEEE 802.16m. Las prestaciones de ambas tecnologías, LTE y WiMAX, son bastante similares, siendo aceptadas por la Unión

Internacional de Telecomunicaciones como tecnologías viables para la cuarta generación de redes móviles.

Las redes UTRAN y E-UTRAN pertenecen a la familia de tecnologías IMT-2000, definida por la ITU, en la que también se encuentran WiMAX, CDMA-2000 y UMB (*Ultra Mobile Broadband*). Los dos últimos constituyen el equivalente a UMTS y LTE en el marco del grupo 3GPP2, pero su desarrollo ha ido dejándose de lado en favor del de los sistemas LTE. Mientras se completaban las especificaciones de UMTS en la *Release 99*, la ITU comenzó a considerar la concepción de soluciones más allá del IMT-2000, lo que sería conocido como *IMT-Advanced*, o más comúnmente, 4G.

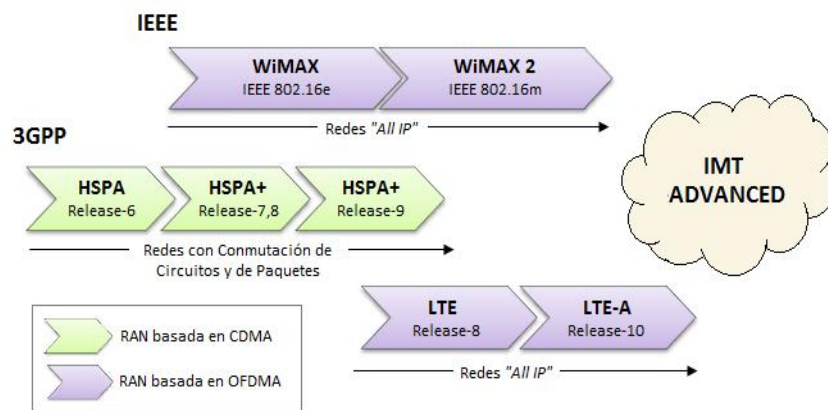


Figura 2. Progresión de las tecnologías móviles hacia *IMT-Advanced*.

Durante el año 2009, el 3GPP elaboró un estudio en el que se concretaron una serie de mejoras para LTE que le permitieran cumplir con los requisitos impuestos por el *IMT-Advanced*. A consecuencia de ello, en Septiembre se presentó la propuesta "*LTE Release 10 & beyond (LTE-Advanced)*", en la que se planteó que a partir de la *Release 10*, todas las *Releases* deberían ser evaluadas como candidatas para *IMT-Advanced*. En Octubre de 2010, la ITU aceptó la propuesta y admitió a la tecnología *LTE-Advanced* dentro de la familia *IMT-Advanced*.

Ambos sistemas han de ser compatibles espectralmente, es decir, que *LTE-Advanced* debe poder ser desplegado en las mismas bandas ocupadas por LTE, y los equipos de LTE deben poder incorporar las funcionalidades propias de *LTE-Advanced* con unos costes y complejidad razonables. La descripción del sistema *LTE-Advanced* se incluyó por primera vez en la *Release 10*, que vio la luz en el año 2011. Dentro de sus propuestas, se encuentran la utilización de anchos de banda de

hasta 100 MHz y de soluciones MIMO de hasta 8 niveles en el enlace descendente y 4 en el ascendente. Esto ayudaría a conseguir velocidades de transmisión de hasta 1 Gbps en el enlace descendente.

2.2 Las modulaciones OFDMA y SC-FDMA

La interfaz radio de E-UTRAN está basada en la utilización de las modulaciones OFDMA en el enlace descendente y SC-FDMA en el ascendente. Las técnicas OFDMA se basan en el empleo de mecanismos de transmisión multiportadora que, gracias a las propiedades de ortogonalidad que presentan todas las subportadoras, permiten transmitir un conjunto de símbolos multiplexados sobre las mismas, así como facilitan su posterior recuperación en el receptor.

En el dominio de la frecuencia, el espectro de cada subportadora es una función *sinc* con el máximo situado en la frecuencia central de transmisión de dicha subportadora y ceros cada $1/T_S$ Hz, (siendo T_S el periodo de símbolo). La separación f entre cada pareja de subportadoras es igual al inverso de T_S . De esta forma, para cada una de las frecuencias centrales únicamente existe contribución espectral debida a una de las subportadoras. En el dominio temporal, cada subportadora podría formularse, en banda base, mediante la expresión:

$$x(t) = e^{j \cdot 2\pi \cdot k \Delta f \cdot t} \cdot \Pi_{T_S}(t) \quad (1)$$

Donde el producto $k \cdot f$ es la frecuencia central de transmisión de la subportadora k -ésima y $\Pi_{T_S}(t)$ representa un pulso rectangular con duración entre 0 y T_S segundos. En la Figura 3 se muestra una representación esquemática de la transmisión empleando OFDMA, indicando sus principales elementos.

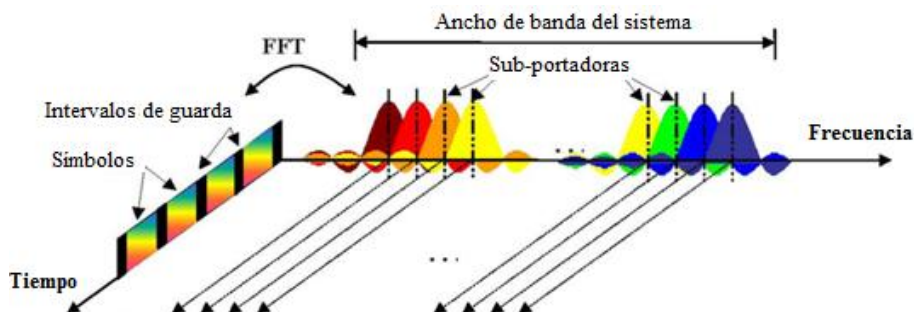


Figura 3. Esquema de transmisión de la modulación OFDMA.

Un fenómeno muy frecuente en los sistemas de comunicaciones móviles es la propagación multitrayecto, que conduce a la recepción de distintas réplicas de la señal transmitida originalmente, cada una de ellas con un retardo y unos valores de amplitud y fase diferentes. Los efectos de la propagación multitrayecto sobre los sistemas OFDMA son principalmente dos: pérdida de ortogonalidad entre subportadoras e interferencia entre símbolos (*Inter Symbol Interference*, ISI). Para combatirlos, se emplea la transmisión del denominado prefijo cíclico, que consiste en alargar el periodo de símbolo introduciendo al principio una réplica de la señal que se envía durante los últimos T_P segundos del mismo.

La duración total del símbolo será ahora de $T_S + T_P$, pero en recepción sólo se integrará la señal recibida en un intervalo de anchura T_S , sin considerar el prefijo cíclico. LTE ofrece la posibilidad de usar dos tipos de prefijo cíclico: el normal y el extendido. Si bien se consigue reducir en gran medida el efecto negativo de la propagación multitrayecto, la transmisión del prefijo cíclico supone una menor eficiencia en términos de potencia transmitida y de velocidad de transmisión, ya que no toda la señal enviada se convertiría en información útil.

Por otra parte, OFDMA no impone ninguna condición sobre los símbolos que se modulan sobre las diferentes subportadoras, por lo que el número de bits por símbolo puede ser variable. Si se quiere incrementar la velocidad de transmisión, resultará conveniente utilizar modulaciones con alta eficiencia espectral, como la 16-QAM o la 64-QAM. El problema para que esto pueda llevarse a cabo es que la relación señal a ruido (*Signal to Noise Ratio*, SNR) del canal radio debe ser suficientemente alta como para no provocar un aumento de la probabilidad de error de bit (*Bit Error Rate*, BER) o de bloque (*Block Error Rate*, BLER). Si éste no es el caso, lo recomendable es transmitir con una modulación más robusta, como la QPSK. Las denominadas estrategias de Adaptación del Enlace se encargan de extraer el máximo rendimiento del canal en términos de velocidad binaria mediante la elección de la modulación que permita enviar el mayor número de bits/símbolo para unas condiciones de SNR dadas.

En resumen, las ventajas que ofrece la utilización de OFDMA en este tipo de redes móviles son muy numerosas, siendo las más importantes:

- Diversidad multiusuario y multifrecuencia a la hora de asignar recursos físicos a los usuarios: permite realizar *scheduling* dinámico para conseguir una mayor eficiencia espectral, distribuyendo a los usuarios sobre las subportadoras en las que presenten unas mejores condiciones de propagación del canal.

- Flexibilidad en la banda asignada a cada usuario: permite conceder distintos anchos de banda a cada usuario, para poder suministrarles diferentes tasas de datos. También es posible asignar a un mismo usuario varios conjuntos de subportadoras no contiguas.
- Robustez frente a la propagación multitrayecto, que como hemos visto se logra gracias a la utilización del prefijo cíclico.
- Posibilidad de trabajar con un factor de reutilización de frecuencias igual a la unidad, mediante las propiedades de ortogonalidad y un *scheduling* apropiado de los usuarios en los bordes de las celdas.
- Sencillez de implementación en el dominio digital, mediante dispositivos electrónicos y chips que permiten efectuar rápidamente una IFFT en el módulo transmisor y una FFT en el receptor.

Pese a todo, también existen algunos inconvenientes, como son la elevada relación entre la potencia de pico y la potencia media (*Peak to Average Power Ratio*, PAPR), y la susceptibilidad frente a errores en frecuencia, como los provocados por el efecto Doppler (asociado al movimiento de los terminales), que requieren del diseño de mecanismos de sincronización específicos.

Las señales con un alto valor de PAPR requieren amplificadores de potencia muy lineales, para evitar la distorsión asociada a la intermodulación. Esto se traduce en que la eficiencia de los amplificadores, entendida como el cociente entre potencia transmitida y potencia consumida, se reduce.

Como el consumo de potencia y el coste de los equipos no son factores críticos de un eNodo-B, se decidió emplear la modulación OFDMA en el enlace descendente de la interfaz radio de LTE. A esto hay que añadir que el receptor OFDMA sólo requiere de una transformada FFT que no presenta gran complejidad para implementarse en el terminal móvil. Sin embargo, en el caso del enlace ascendente, nos vemos obligados a buscar otra alternativa que se adapte mejor a las características de los equipos de usuario.

En el enlace ascendente se necesita un procedimiento de acceso múltiple que permita simplificar al máximo el módulo transmisor, manteniendo la ortogonalidad entre los recursos asignados a los diferentes usuarios. La modulación finalmente escogida, SC-FDMA, cumple con estos requisitos y además posibilita la utilización de bloques de procesamiento comunes con el enlace descendente. Otra ventaja es que comparte la misma estructura de subdivisión de recursos en tiempo y frecuencia que la utilizada en el enlace descendente.

En definitiva, las características de SC-FDMA son muy similares a las de OFDMA, pero cuenta con una serie de propiedades que hicieron que fuera finalmente la modulación escogida para transmitir en el enlace ascendente: valor reducido de PAPR, ecualización sencilla en el dominio de la frecuencia y capacidad para proporcionar una asignación de banda flexible a los usuarios. La principal restricción que impone SC-FDMA, inexistente en OFDMA, es que las subportadoras asignadas a los usuarios deben ser contiguas en frecuencia.

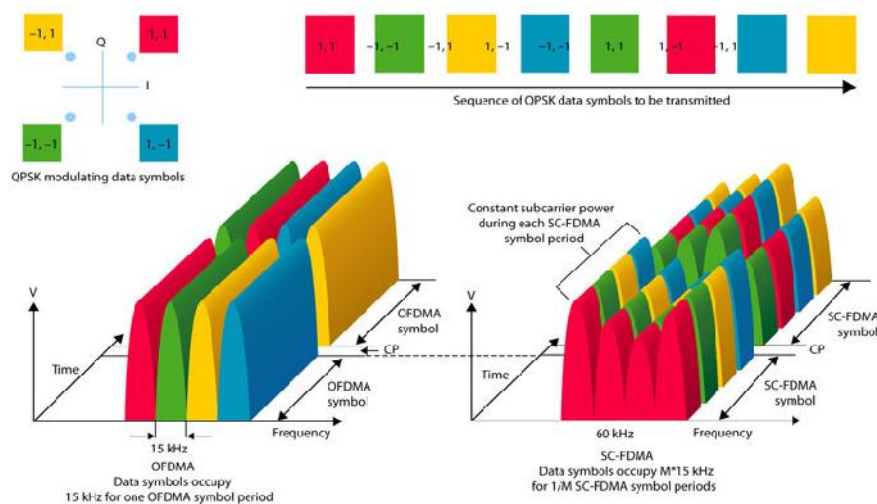


Figura 4. Diferencias de la transmisión mediante OFDMA y SC-FDMA.

En la Figura 5 se representa el diagrama de bloques de un sistema SC-FDMA para un canal SISO. Los símbolos de la modulación se generan de forma muy similar a los de un sistema OFDM. En principio, la modulación QPSK es la que presenta una mejor relación PAPR. Las modulaciones QAM de mayor nivel presentan un mayor rendimiento espectral, pero requieren un transmisor más lineal que es menos eficiente desde el punto de vista energético. A partir de los símbolos obtenidos, se realiza una DFT seguida de una IDFT. Puede parecer que estos dos procesos se anulan entre sí, pero en realidad cumplen con los siguientes objetivos:

- Conseguir un bloque de señal circular adecuado para ser extendido mediante la inserción del prefijo cíclico.
- Asociar la señal a las subportadoras asignadas al usuario para la siguiente transmisión.

- Obtener un sobre-muestreo de la señal en el dominio tiempo: La primera DFT es de P puntos y la IDFT siguiente es de $N > P$ puntos.
- Conformar el espectro para no interferir en las subportadoras vecinas asignadas a otros usuarios.

El número P de muestras de la primera DFT es igual al número de subportadoras asignadas al usuario para la siguiente transmisión. Para facilitar la implementación de forma eficiente, P sólo contiene los enteros 2, 3 y 5 como factores primos. Tras la DFT, las muestras obtenidas se ubican en las frecuencias subportadoras concretas asignadas al usuario.

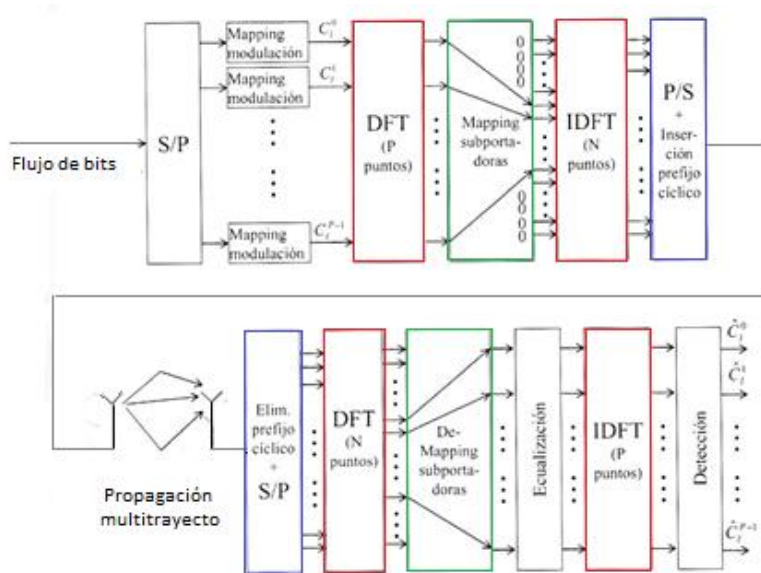


Figura 5. Diagrama de bloques de un transmisor SC-FDMA [4].

Por último, se hace una IDFT de tamaño N muestras, siendo N el número total de subportadoras, que dependerá del ancho de banda total del sistema y de la separación entre las citadas subportadoras. Las subportadoras no utilizadas se rellenan con ceros, para no emitir fuera de banda. Normalmente N suele escogerse potencia de 2, para simplificar la aplicación del algoritmo IFFT.

Por su parte, el receptor de SC-FDMA es más complejo que el de OFDMA, ya que requiere una DFT de N puntos previa a la ecualización, y una IDFT de P puntos para volver a pasar al dominio tiempo y detectar los símbolos enviados. En el caso del eNodo-B, la ecualización y posterior IDFT son específicas para cada usuario, ya que cada uno tiene un canal diferente.

La diferencia fundamental con OFDMA es que las componentes de frecuencia se encuentran ahora correladas (en OFDMA las componentes espectrales son incorreladas, pues se modulan de forma independiente). Por este motivo, las portadoras piloto para la estimación del canal en el receptor no pueden ser portadoras discretas colocadas de forma dispersa sino que deben utilizarse bloques enteros de SC-FDMA como señales piloto. Esta es la causa de que no sea posible la ecualización independiente de las subportadoras, sino que esta operación debe hacerse de forma conjunta para todo el bloque correspondiente a un usuario.

2.3 El bloque físico de recursos

El ancho de banda total de un sistema LTE varía en función de las características o limitaciones impuestas por el despliegue a realizar, pudiendo tomar los valores de {1.4, 3, 5, 10, 15, 20} MHz. Como ya se ha comentado, la separación existente entre las subportadoras es de 15 kHz, por lo que el número de subportadoras disponibles variará en función del tamaño de la banda de frecuencias empleada. Sin embargo, no todo el ancho de banda se utiliza para la transmisión de subportadoras, ya que en los bordes del espectro se sitúan unos espacios de guarda en los cuales no se envía ninguna información.

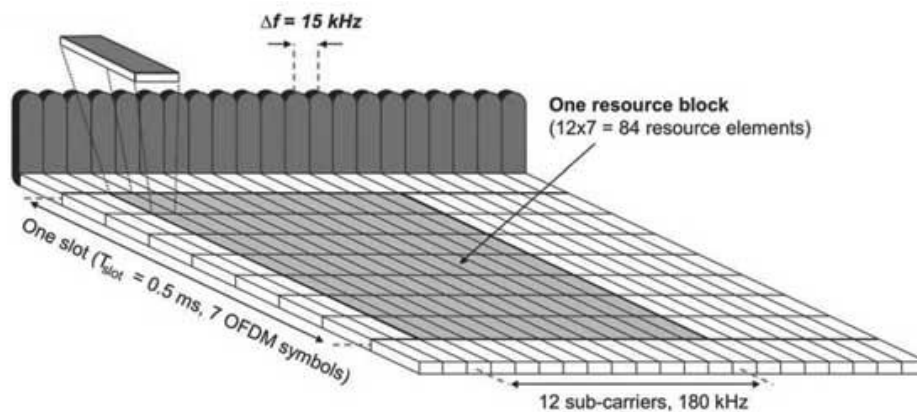


Figura 6. Ilustración del concepto de PRB [5].

Se denomina bloque de recursos físicos (PRB), a la unidad mínima de recursos en el dominio tiempo-frecuencia que puede ser asignada por el eNodo-B a un terminal móvil. Un PRB ocupa una banda de 180 KHz, equivalente a 12 subportadoras equiespaciadas 15 kHz entre sí, y en él se transmiten 6 o 7 símbolos OFDMA,

dependiendo de la longitud del prefijo cíclico utilizada (normal o extendida). La duración temporal de un PRB es igual a 0.5 ms, que se corresponde con la de un *slot* o ranura temporal.

El número de subportadoras útiles (*subcarriers*, SCs) y de PRBs disponibles en función del ancho de banda del sistema, así como el tamaño de la FFT que es necesario realizar para llevar a cabo la modulación, puede observarse en la Tabla 3.

Ancho de banda	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Nº de SCs útiles	73	181	301	601	901	1201
Nº de PRBs	6	15	25	50	75	100
Tamaño FFT	128	256	512	1024	1536	2048

Tabla 3. Parámetros básicos en función del ancho de banda.

Si consideramos que en un PRB podemos mandar 7 símbolos en cada una de las 12 subportadoras, podemos ver que en total habría 84 recursos disponibles para ubicar los símbolos, ya sean QPSK, 16-QAM o 64-QAM (las tres modulaciones empleadas en LTE). Suponiendo que utilizamos la modulación 64-QAM, que presenta la mayor eficiencia espectral de todas (transmite 6 bits/símbolo), tendríamos que en un PRB se podrían mandar hasta 504 bits cada 0.5 ms, lo que proporcionaría una velocidad de transmisión de aproximadamente 1 Mbps.

Por lo tanto, tomando en consideración el número de PRBs indicados en la Tabla 3, podemos calcular las velocidades de pico globales en la interfaz radio para los distintos anchos de banda existentes. Estas velocidades no estarían referidas únicamente al tráfico de datos de usuario, sino que incluirían también la señalización e información de control intercambiada entre los equipos. Si estimamos que los recursos destinados a estas funciones oscilan aproximadamente alrededor de un 15% del total disponible, podemos entonces fijar una cota a las velocidades de pico brutas, o a nivel de capa física, por usuario del sistema.

Estas velocidades se corresponden a un sistema que no emplea técnicas de multiplexado espacial (*Multiple Input Multiple Output*, MIMO). En el caso de considerar una estructura MIMO 2x2 se pueden alcanzar los 150Mbps en el enlace descendente y 75 Mbps en el ascendente, si dispone de un ancho de banda de 20 MHz. Por otro lado, las velocidades de pico reales alcanzadas por un usuario dependen de muchos factores, como pueden ser: la calidad del canal radio, el

número de usuarios simultáneos en la celda, el tipo de despliegue realizado por el operador, el tipo de servicio considerado y su calidad asociada, la capacidad del terminal móvil, etc.

Ancho de banda	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Velocidad de pico total (Mbps)	6	15	25	50	75	100
Velocidad de pico bruta (Mbps)	5.1	12.8	21	42.5	63.7	85

Tabla 4. Velocidades de pico estimadas, en función del ancho de banda.

3. El Control de Potencia en redes LTE

En los sistemas basados en OFDMA, donde la ortogonalidad entre subportadoras elimina la interferencia interna que pueda producirse en las celdas (*Intra-Cell Interference*), la función de control de potencia permite fijar la potencia de transmisión de los canales físicos para cada terminal conectado a la red, con el fin de asegurar que la información se reciba con un cierto nivel de SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) y de mitigar, en la medida de lo posible, las interferencias con otras celdas vecinas (*Inter-Cell Interference*).

Concretamente, el control de potencia se encuentra relacionado con los procesos de sondeo del canal, reparto de recursos y adaptación del enlace. El primero de ellos tiene como objetivo llevar a cabo una estimación de la calidad del canal (en términos de SINR) que experimenta un usuario, tanto en el sentido ascendente como descendente. Para ello se emplean una serie de señales de referencia o pilotos intercambiadas entre el terminal y la estación base. Esa información es utilizada posteriormente durante el proceso de planificación de paquetes y reparto de recursos a los usuarios (*Scheduling*), a los que se asignará un cierto número de bloques de recursos para transmitir sus datos en cada subtrama de 1 ms. El formato en que se envía la información (tipo de modulación, tasa de codificación, etc.) depende de los procesos de adaptación del enlace, que también se encargan de controlar que se fije una potencia de transmisión adecuada en el terminal móvil.

La estimación de las pérdidas de propagación que realiza el terminal móvil a partir de los pilotos enviados por la estación base, constituye la base para el control de potencia en lazo abierto. Mediante este mecanismo, el propio terminal es capaz de obtener una referencia según la cual ajustar su potencia de transmisión. Este proceso tiene la ventaja de ser bastante rápido, al no esperar ningún tipo de realimentación por parte de la estación base. Sin embargo, aunque los valores de las pérdidas de propagación y el desvanecimiento lento pueden considerarse prácticamente iguales para los enlaces ascendente y descendente, no se tiene en cuenta correctamente el efecto del desvanecimiento rápido.

Por otro lado, el terminal puede recibir una serie de comandos procedentes de la estación base que le permitan corregir errores en la estimación del canal y adecuar su potencia de transmisión a las condiciones del mismo. A este procedimiento se le conoce como control de potencia en lazo cerrado. El eNodo-B se encarga de determinar el valor del ajuste necesario para lograr un cierto valor de potencia recibida o SINR a la entrada del receptor, que asegurará una probabilidad de error en la decodificación de la información dentro de los límites tolerados. Este proceso cuenta con una precisión mayor que el anterior, pero obliga al terminal a esperar la llegada de los comandos desde la estación base.

Las técnicas de control de potencia en lazo abierto y lazo cerrado ya fueron definidas en otros sistemas de comunicaciones móviles anteriores a LTE, como por ejemplo UMTS. La evolución y el aumento de complejidad de los mismos, buscando siempre una mayor eficiencia en el funcionamiento de la red, han conducido a que en los sistemas LTE actuales se utilice una combinación de ambos métodos, como veremos más adelante.

3.1 Evolución de los sistemas de control de potencia

El control de potencia fue introducido en los sistemas GSM como mecanismo básico para preservar en la medida de lo posible la batería del terminal y reducir el nivel de interferencia entre los usuarios. El valor de la potencia transmitida se fijaba de forma que asegurara contar con una buena relación SINR en el receptor, pero sin que llegaran a alcanzarse valores demasiado altos, que podrían aumentar la interferencia.

Se definían una serie de niveles de potencia, cada uno de ellos identificado a través de un número entero denominado *power level number*, que generalmente diferían entre sí en unos 2 dB. La estación base comunicaba a cada terminal móvil el nivel de potencia a emplear en sus transmisiones mediante el envío de los *power level*

numbers, y después el terminal ajustaba su potencia según esa información. De acuerdo con la banda de frecuencias que estemos utilizando para el despliegue de la red GSM, se producen variaciones entre los niveles de potencia y su indicador asociado. Podemos comprobar la correspondencia entre unos y otros en la Tabla 5.

GSM 900		GSM 1800		GSM 1900	
<i>Power Level Number</i>	<i>Power Level (dBm)</i>	<i>Power Level Number</i>	<i>Power Level (dBm)</i>	<i>Power Level Number</i>	<i>Power Level (dBm)</i>
2	39	29	36	30	33
3	37	30	34	31	32
4	35	31	32	0	30
5	33	0	30	1	28
6	31	1	28	2	26
7	29	2	26	3	24
8	27	3	24	4	22
9	25	4	22	5	20
10	23	5	20	6	18
11	21	6	18	7	16
12	19	7	16	8	14
13	17	8	14	9	12
14	15	9	12	10	10
15	13	10	10	11	8
16	11	11	8	12	6
17	9	12	6	13	4
18	7	13	4	14	2
19	5	14	2	15	0
-	-	15	0	-	-

Tabla 5. Niveles de potencia para cada banda de GSM.

Por otro lado, no todos los dispositivos móviles presentan la misma potencia máxima de transmisión. Resulta fundamental el que la estación base conozca esa potencia máxima, para que pueda asignar al terminal niveles de potencia acordes con su limitación. De esta manera, se definen diferentes clases de potencia o categorías, recogidas en la Tabla 6, para indicar la capacidad de transmisión de cada terminal.

<i>Power Class Number</i>	GSM 900	GSM 1800	GSM 1900
	Potencia Máxima	Potencia Máxima	Potencia Máxima
1	-	30 dBm	30 dBm
2	39 dBm	24 dBm	24 dBm
3	37 dBm	36 dBm	33 dBm
4	33 dBm	-	-
5	29 dBm	-	-

Tabla 6. Categorías de terminales GSM según su limitación en potencia.

Lo mismo que sucede con la potencia de transmisión de los terminales en el enlace ascendente, sucede con las estaciones base en el descendente. En este caso se definen 15 niveles de potencia separados entre sí por saltos 2 dB, de manera análoga a como sucede con los terminales. La propia estación base puede regular su potencia de transmisión para ajustarla a las condiciones de la comunicación. El valor máximo de potencia alcanzable por una estación base depende de su categoría, pudiendo ir desde los 320 W de la clase 1, hasta los 2 W de la clase 2. Para terminar con los sistemas GSM, cabe reseñar que el período de integración para medición y corrección de potencia es de 13 tramas (60 ms).

En los sistemas UMTS, el control de potencia se configuraba mediante los mecanismos en lazo abierto y en lazo cerrado, al estilo de lo que más adelante se explicará para LTE. La componente en lazo cerrado se basaba en la estimación de las pérdidas de propagación para el enlace descendente llevada a cabo en el terminal, conocida la potencia con que se emitían los pilotos desde el Nodo-B. A ello se sumaba el valor de la interferencia recibida en la estación base y el valor de SINR necesario, valores que eran comunicados a todos los terminales de la celda mediante los canales de difusión.

$$P_{tx}[\text{dBm}] = L_{DL} + \text{SINR} + I + \text{cte} \quad (2)$$

Como la separación entre las frecuencias portadoras del enlace ascendente y descendente de UMTS es relativamente grande, superior a la anchura de banda de coherencia del canal radio, es muy probable que exista desvanecimiento selectivo en frecuencia, con lo que las pérdidas variarían de un sentido a otro. Esto provocaría que la señal llegase a la estación base con un nivel de potencia exagerado (causando interferencia) o insuficiente (degradándose la calidad).

Para contrarrestar este efecto, se incorporó un control de potencia en lazo cerrado, constituido por un comando enviado desde el Nodo-B hacia cada terminal, con el que se le indicaba un ajuste a realizar sobre su potencia de transmisión,

normalmente con un paso fijo de 0.5-2 dB. El valor del ajuste se determinaba a partir de la SINR medida en el receptor de la estación base y de la SINR requerida para asegurar un cierto nivel de probabilidad de error (también denominada SINR objetivo).

En los sistemas UMTS, al proceso que determina la relación entre el objetivo de SINR y la probabilidad de error originada en el receptor al decodificar la información, se le denomina control de potencia en lazo externo. Con ello se pretende mantener un cierto nivel de calidad de servicio (QoS) en las comunicaciones de todos los usuarios, empleando la menor potencia posible. En LTE, este mecanismo forma parte de los procesos de adaptación del enlace, dentro de lo que se denomina gestión de los recursos radio.

Uno de los principales retos a los que deben hacer frente las redes UMTS es el conocido como problema “cerca-lejos” o *Near-Far Problem*, que tiene lugar cuando un receptor captura una señal muy potente que no le permite detectar otras señales más débiles. Este fenómeno es muy común en sistemas de comunicaciones inalámbricos, especialmente en los que emplean técnicas CDMA de espectro ensanchado (como es el caso de UMTS), dado que los terminales móviles de usuario pueden compartir las mismas frecuencias de transmisión y los intervalos de tiempo en que se emite. Los sistemas con FDMA o TDMA, como LTE, son menos vulnerables.

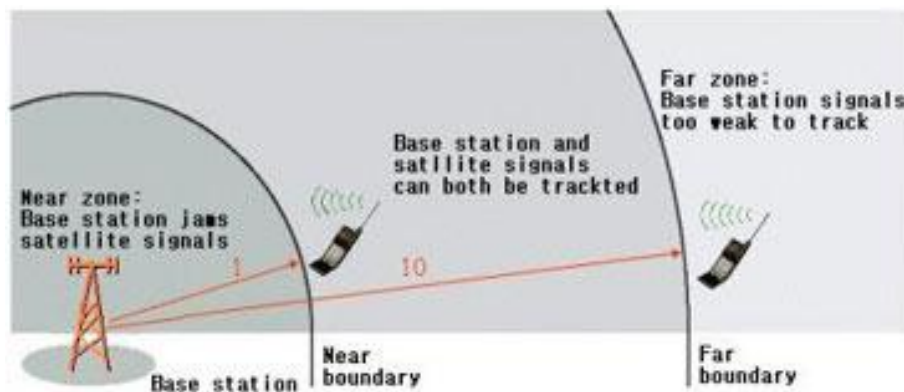


Figura 7. Ilustración del problema “cerca-lejos”.

Una situación muy común en la que podríamos encontrar el problema “cerca-lejos” sería aquella en la que dos terminales transmitieran simultáneamente y con la misma potencia hacia la estación base, estando uno situado cerca del Nodo-B y el otro cerca del borde de la celda. Dado que las pérdidas de propagación serían

mucho mayores en un caso que en otro, la señal transmitida por el usuario más cercano enmascararía la señal del usuario lejano, al llegar al Nodo-B con una potencia mucho mayor. Esto haría que la SINR medida para el segundo usuario tomara un valor muy por debajo del umbral de detección, de forma que no pudiera demodularse correctamente la información.

Por tanto, queda de manifiesto la importancia de desarrollar una estrategia de control dinámico de potencia que permita ajustar la potencia de transmisión de los dispositivos. De esta manera, los usuarios con peores condiciones del canal de propagación serán los que transmitan con niveles de potencia más altos, mientras que los situados en las proximidades de la estación base reducirán los suyos. El objetivo que se persigue es que todas las señales lleguen al Nodo-B con un valor parecido de SINR.

3.2 Control de potencia en el enlace descendente de LTE

El control de potencia en el enlace descendente está totalmente regulado por la estación base, que conoce en todo momento la potencia disponible para la transmisión. Como el consumo de potencia no es un factor crítico del eNodo-B, suele optarse por distribuir uniformemente entre todos los RBs la potencia disponible para la transmisión, asumiendo que existe suficiente capacidad como para ocupar todo el ancho de banda.

Un aspecto que merece la pena resaltar es el relacionado con los distintos niveles de potencia con que se transmiten cada uno de los símbolos dentro de una subtrama. Las señales de referencia, dada su importancia en los procesos de estimación del canal y demodulación, son las componentes que presentan los niveles más altos de potencia. Cada celda configurará dichas señales con un valor constante para todo el ancho de banda y determinará la potencia del resto de símbolos a partir de ellas. Por ejemplo, los *slots* en que se transmiten sólo datos de usuario se aplicará una reducción de P_A dB, y si los datos de usuario coinciden con señales de referencia, su potencia se disminuirá P_B dB adicionales.

En contraposición con lo que sucede en el eNodo-B, en el enlace ascendente no es deseable que los terminales transmitan con su máxima potencia, ya que como consecuencia se produciría una rápida reducción de la duración de la batería y se incrementarían los fenómenos de interferencia inter-celular. Esto hace del control de potencia en el enlace ascendente una actividad fundamental.

Como conclusión, casi podría decirse que el control de potencia en el enlace descendente es prácticamente inexistente. Con todo, existen algunas propuestas

como las denominadas *Water-Filling* que persiguen asignar dinámicamente una mayor potencia a las subportadoras con mejores condiciones de propagación.

3.3 Control de potencia en el enlace ascendente de LTE

En el enlace ascendente, el control de potencia funciona como un proceso centralizado supervisado por el eNodo-B, que emplea una combinación de dos métodos: un ajuste en lazo abierto y un ajuste en lazo cerrado. El ajuste en lazo abierto permite compensar las pérdidas de propagación en el enlace entre el UE y el eNodo-B, a partir del valor estimado para las mismas en el enlace descendente. Por su parte, el ajuste en lazo cerrado sirve para que la red envíe al terminal comandos específicos de control de potencia a través del PDCCH.

El valor de potencia transmitida nunca podrá superar un cierto valor máximo, que vendrá determinado por las características del equipo de usuario. Para los terminales de categoría 3, única definida hasta el momento, el 3GPP ha fijado un límite superior de 23 dBm. También existe una limitación inferior de potencia, que se encuentra en -40 dBm [6].

Para calcular la potencia exacta con la que debería transmitir un terminal, se emplea un algoritmo que tiene en cuenta los siguientes factores:

- Número de RBs (N_{RB}) asignados al usuario durante un TTI para transmitir datos, información de control o señales de sondeo. El incremento en la potencia transmitida debe ser proporcional al mismo, para poder asegurar que la densidad espectral de potencia es constante independientemente del número de RBs.
- Potencia base por cada RB (P_0), obtenida a partir de la suma de dos factores: uno debido a las características del terminal y otro que es específico de la celda en que éste se encuentra. Valores típicos para el primero serían entre -8 y 7 dBm, y para el segundo, entre -126 y 24 dBm, con una resolución de 1 dB.
- Pérdidas de propagación (L_{prop}) que experimenta el usuario, compensadas con un aumento en la potencia transmitida proporcional a un cierto factor

comprendido en el conjunto $\{0, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$ y que viene indicado por un parámetro de 3 bits, específico de cada celda, fijado por las capas superiores. Este concepto es lo que da lugar a la denominación de control de potencia fraccional (*Fractional Power Control, FPC*), en contraposición al esquema clásico de compensación completa del *path-loss* (equivalente al caso particular de $\alpha=1$, como veíamos en UMTS).

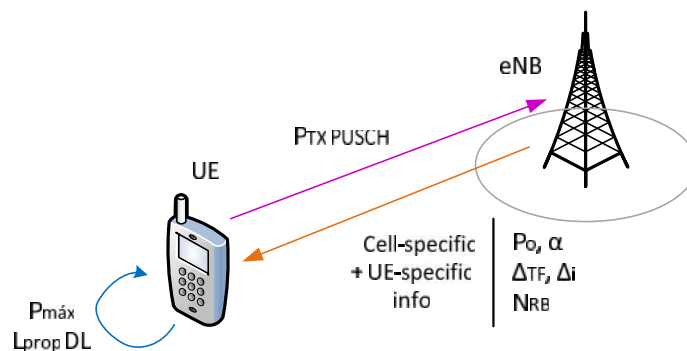


Figura 8. Elementos que intervienen en el control de potencia.

Estos factores constituyen lo que se ha denominado el ajuste de potencia en lazo abierto. A continuación, se añaden un par de contribuciones más que pasarían a formar parte del llamado ajuste en lazo cerrado, utilizado para compensar los efectos del desvanecimiento rápido, el nivel variable de interferencias, posibles errores de medida, imprecisiones, etc.

- Ajuste según el esquema de modulación y codificación utilizado, o compensación por *Transport Format* (T_F). Se calcula en función de la densidad espectral efectiva, obtenida a partir del cociente entre el tamaño del bloque de transporte y el número de símbolos SC-FDMA por cada subtrama en el conjunto de RBs asignado. Su activación depende de un parámetro específico de la celda (K_S).
- Ajuste del eNodo-B, a partir de la información enviada por éste a los terminales a través del PDCCH, en los denominados comandos de control de potencia transmitida (*Transmitted Power Control, TPC*). Normalmente existe un cierto retardo (el valor típico suele ser de unas 4 subtramas) entre el momento en que se recibe el TPC y el momento en que se emplea para realizar el ajuste de potencia. Existen dos modos distintos de funcionamiento:

- Absoluto: el valor de ajuste se actualiza cada vez que se recibe uno de los comandos transmitidos por el eNodo-B. Los posibles saltos de potencia que puede ordenar el eNodo-B a través de un TPC son de $\{-4, -1, 1, 4\}$ dB.
- Acumulativo: el ajuste de potencia se obtiene sumando o restando una cierta cantidad, codificada dentro de un TPC, al valor de ajuste anterior. Los valores específicos para el modo acumulativo son de $\{-1, 0, 1, 3\}$ dB.

Todos estos factores se combinan para dar lugar a la ecuación de control de potencia definida en el estándar LTE, que se aplica de manera muy similar a las transmisiones por el PUSCH, el PUCCH y las SRS, y que presentamos a continuación:

$$P_{tx}[\text{dBm}] = \min\{P_{max}, P_0 + 10\log_{10} N_{RB} + \alpha \cdot L_{prop} + \Delta_{TF} + f(\Delta_i)\}$$

(3)

La configuración de los valores de P_0 y α constituye un compromiso de diseño del operador de la red, pudiendo escogerse entre diferentes alternativas. Algunas parejas de valores comúnmente empleadas son: -81 dBm y 0.8, -58 dBm y 0.6, -36 dBm y 0.4, etc. Como se puede observar, si se decide aumentar el valor de P_0 , se deberá reducir el de α , y viceversa. El efecto de ambos parámetros en la SINR de la señal recibida en el eNodo-B puede observarse en las siguientes gráficas:

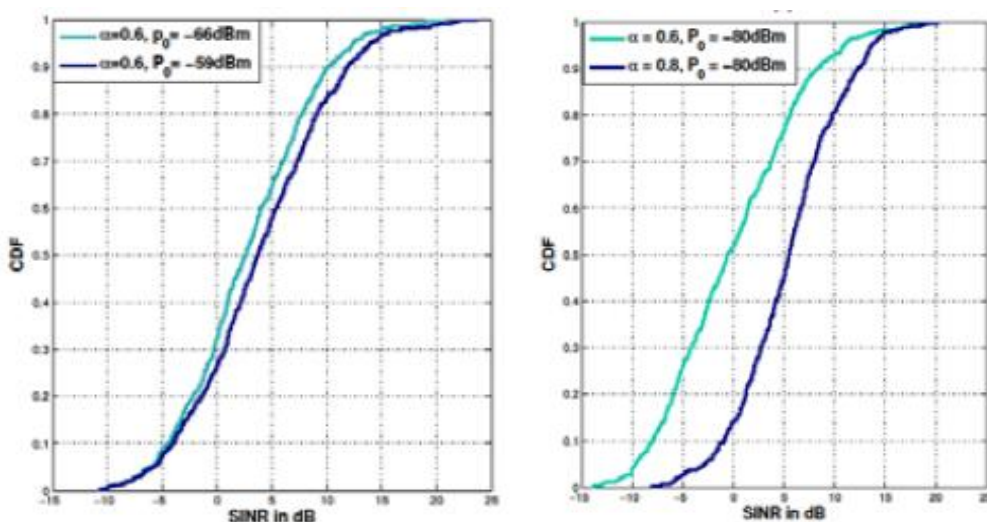


Figura 9. Influencia de los parámetros P_0 y α en la SINR medida en el receptor [7].

De acuerdo con la fórmula (3), la utilización de un valor alto de P_0 tiene como finalidad favorecer a los usuarios situados en los bordes de la celda, que serán los que

presenten mayores valores de L_{prop} . Su densidad espectral de potencia se verá incrementada en mayor medida que la de los usuarios cercanos al eNodo-B, como podemos ver en la Figura 10. El inconveniente de este método es que el nivel de interferencias también aumenta.

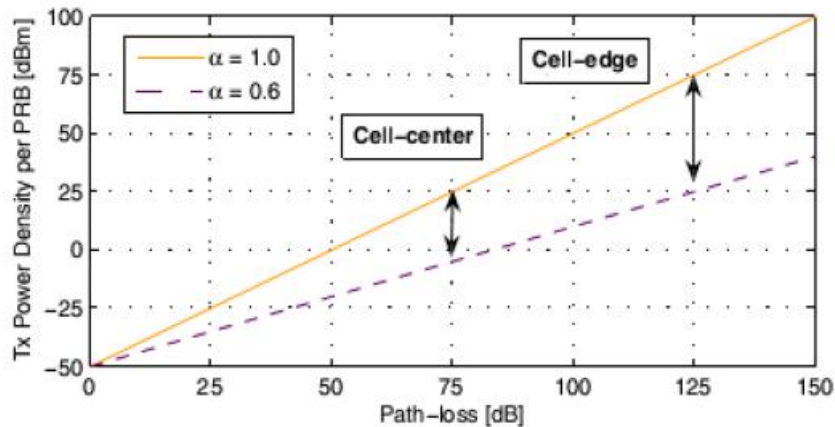


Figura 10. Efecto de α en la densidad espectral de potencia transmitida [8].

Por otro lado, la utilización de un valor menor de α conlleva un aumento de la diferencia de SINR que existe entre un usuario en el borde de la celda y un usuario cercano al eNodo-B, ya que las pérdidas de propagación se compensan en menor medida que en el caso anterior. Esto beneficia a los usuarios situados cerca de la estación base, que podrían alcanzar tasas de datos elevadas, puesto que su SINR también lo es. A diferencia de ellos, los usuarios más alejados presentarán un rendimiento que irá empeorando progresivamente.

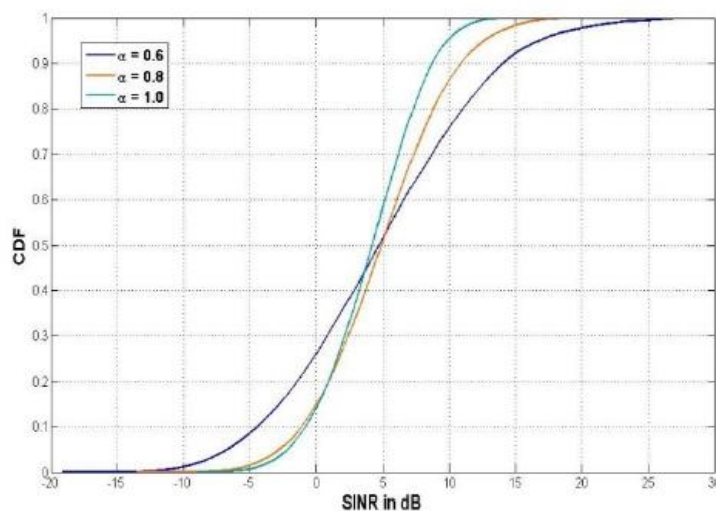


Figura 11. Efecto de α en la SINR para todos los usuarios de la celda [8].

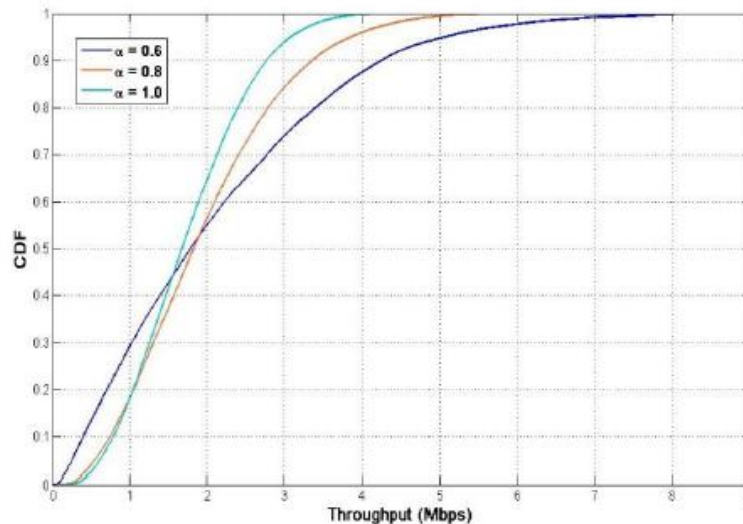


Figura 12. Efecto de α en el *throughput* para todos los usuarios de la celda [8].

Como podemos ver en las Figuras 11 y 12, el empleo de valores de α próximos a 1 trae como consecuencia una mayor igualdad entre los usuarios del sistema en cuanto a tráfico de datos y SINR estimada en el receptor. A medida que el valor de α se reduce, las diferencias entre los usuarios centrales y los usuarios limítrofes son cada vez mayores, de manera que unos mejoran considerablemente sus prestaciones en detrimento de los otros. Nos encontramos pues ante un compromiso de diseño que debe ser abordado por el operador de la red móvil: o bien se opta por ofrecer un servicio lo más equitativo posible a todos los usuarios, o bien se tiende a maximizar el *throughput* del sistema, asegurando un nivel de calidad de servicio mínimo a los usuarios con peores condiciones de canal.

El factor de ajuste de la estación base, denominado $f(i)$, toma inicialmente un valor nulo. Después, se va modificando según la información recibida del eNodo-B. Conviene indicar que existen ciertos acontecimientos que pueden dar lugar a que el factor de ajuste retorne a cero: un cambio de celda del terminal, la entrada o salida del mismo en el estado activo, el paso de modo acumulativo a modo absoluto, etc.

La manera en que se calcula el incremento a aplicar consiste en la utilización de un valor de SINR objetivo o SINR *target*, que se compara con la SINR recibida en el eNodo-B cuando el usuario realiza un transmisión. La diferencia entre ambas se usa como parámetro de entrada a una función encargada de llevar a cabo la correspondencia con los posibles valores del salto en potencia. Podemos observar este proceso en la Figura 13.

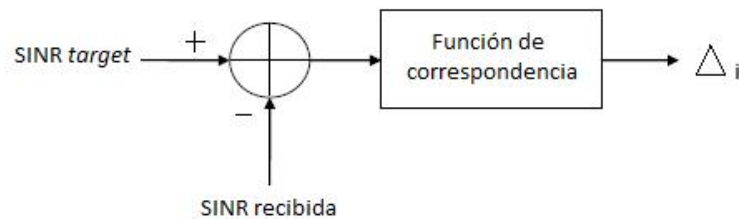


Figura 13. Proceso de cálculo de los comandos TPC.

El objetivo de SINR puede ser común a todos los terminales o sufrir modificaciones en función de la cuantía de sus pérdidas de propagación. De esta manera, se asignarían mayores valores de *SINR target* a aquellos terminales con mejores condiciones de canal, generalmente próximos al eNodo-B (que podrían transmitir con una potencia mayor), y se reduciría la *SINR target* de los terminales en los bordes de la celda. Esto reduciría la interferencia inter-celular y contribuiría a aumentar el *throughput* total del sistema, constituyendo de por sí un sencillo método de control de interferencias [9].

$$SINR_{Target_{adj}} = \begin{cases} (\alpha - 1) * (PL - PL_{max}) + SINR_{Target} & , PL < PL_{max} \\ SINR_{Target} & , PL \geq PL_{max} \end{cases} \quad (4)$$

Uno de los problemas que podrían aparecer funcionando en modo acumulativo, consistiría en la recepción de sucesivos comandos de aumento de potencia cuando ésta haya superado el valor máximo establecido. Si de repente tuviera lugar una disminución de las pérdidas del trayecto que no hiciera necesario transmitir con tanta potencia, la disminución del valor de ajuste del eNodo-B se produciría de forma muy lenta. Una situación parecida se podría dar cuando la potencia calculada por el algoritmo fuera menor que la mínima y se estuvieran recibiendo comandos con ajustes decrecientes.

Por último, los parámetros N_{RB} y TF están relacionados con los procesos de reparto de recursos y adaptación del enlace, respectivamente, que tienen lugar dentro de la red móvil. Su valor va a venir impuesto con anterioridad al cálculo de la potencia transmitida, por lo que no constituyen variables configurables por el operador de red. El único grado de libertad del que éste dispone es la activación o desactivación del ajuste TF .

3.4 Mecanismos de control de interferencias

Los sistemas LTE están libres de interferencia intracelular, debido a que tras el proceso de *scheduling* cada usuario recibe un determinado número de RBs sobre los que transmitir durante una subtrama. Estos recursos son ortogonales en frecuencia gracias a la utilización de las técnicas OFDMA, de manera que la asignación es única, evitándose así posibles colisiones entre los usuarios que accedieran al mismo tiempo a los canales compartidos de datos (PDSCH y PUSCH).

Sin embargo, cuando dos usuarios situados en celdas distintas transmiten a la vez sobre los mismos recursos (es decir, los mismos RBs), pueden producirse interferencias inter-celulares que degraden las prestaciones del sistema, especialmente si las dos celdas son vecinas. Concretamente, algunos de los factores que contribuirían a este empeoramiento de la calidad serían:

- La reducción de la SINR, que provocaría la selección de un MCS más robusto, con baja eficiencia espectral, de forma que se reduciría la tasa binaria transmitida por el usuario.
- El aumento de la potencia de transmisión del UE a través del enlace ascendente, que conduciría a mayor consumo de energía en el terminal y a una reducción de la duración de su batería.
- Un mayor número de retransmisiones HARQ, por culpa de la disminución en el número de paquetes entregados correctamente, que incrementaría la carga de señalización sobre la celda.

Otros sistemas celulares anteriores a LTE, como GSM-R, llevaban a cabo una planificación previa al despliegue, empleando estrategias de agrupación de celdas y reutilización de frecuencias, por las que asignaban diferentes conjuntos de portadoras a las celdas vecinas. Esto traía como consecuencia una reducción de la capacidad potencial en cada celda al no poder utilizar todo el ancho de banda disponible, algo que hubiera dificultado el poder proveer la QoS requerida a los usuarios en términos de tasa de pico y *throughput*.

En lo que respecta al caso que nos ocupa, el sistema LTE persigue obtener velocidades de pico elevadas y alta eficiencia espectral, por lo que su despliegue debería llevarse a cabo con una reutilización universal de frecuencias. De esta manera, se aprovecharía la máxima capacidad potencial disponible en cada celda. El principal inconveniente que esto generaría es una fuerte interferencia inter-celular, que afectaría a los usuarios más alejados del eNodo-B, situados en las proximidades de las celdas adyacentes.

Para combatir este problema, se define una función especial de los sistemas LTE denominada *InterCell Interference Coordination* (ICIC), encargada de la gestión dinámica de interferencias. Esta función reside en cada eNodo-B y su cometido es fijar una serie de restricciones en el uso y la potencia transmitida por cada RB, que deberán ser tenidas en cuenta durante el proceso de *scheduling* de paquetes. Para ello, se requiere de una buena coordinación entre los eNodos-B vecinos, que se intercambian fragmentos de información denominados indicadores de interferencia [10].

Es importante resaltar el hecho de que los métodos de ICIC trabajan en el dominio de la frecuencia en lugar de hacerlo en el dominio temporal, mediante el establecimiento de preferencias y restricciones sobre los RBs. En el otro caso, se traduciría en una alternancia temporal de las transmisiones de distintos eNodos-B, pudiendo afectar gravemente a los procesos de HARQ del enlace ascendente, que como se explicará más adelante son síncronos y requieren de una cuidadosa temporización.

Al igual que sucede con las estrategias de reparto de recursos, el estándar del 3GPP no especifica ningún procedimiento concreto para determinar las restricciones o preferencias que maneja la función de ICIC a partir de la información de los indicadores, quedando todo supeditado a la decisión de quien implemente la red. Una forma de proceder sería empleando mecanismos con factores de reutilización de frecuencias dinámicos (en lugar de la reutilización estática presente en los sistemas GSM), de manera que un eNodo-B tendría disponible todo el ancho de banda en frecuencia en caso de necesitarlo. Entre las estrategias de ICIC más conocidas que cumplen con lo anterior, se encuentran las denominadas *Partial-Frequency Reuse* (PFR) y *Soft-Frequency Reuse* (SFR).

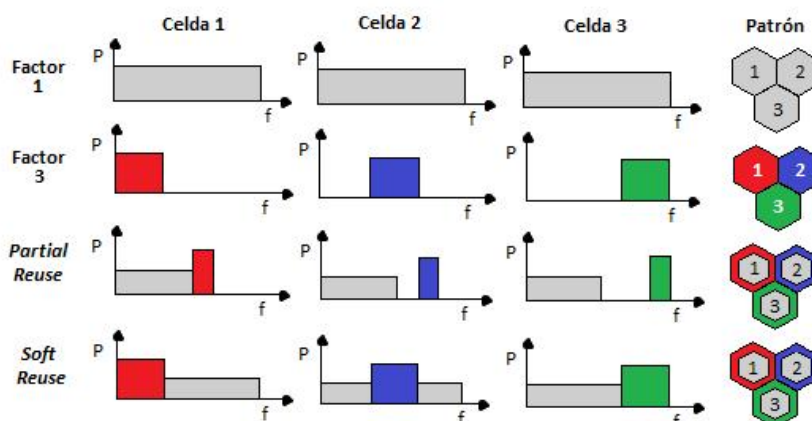


Figura 14. Potencia vs ancho de banda para distintos métodos de reutilización de frecuencias.

En el caso de las técnicas PFR, pueden definirse como una combinación de los esquemas de reutilización de frecuencias de orden 1 y 3. Los usuarios situados en las proximidades del eNodo-B realizarán un reuso completo y exclusivo de una porción del ancho de banda total, mientras que los situados en los bordes emplearán la fracción restante del ancho de banda con factor de reuso 3. Por otro lado, las estrategias SFR procuran una reutilización total del espectro en todas las celdas, pero se aseguran de distribuir a los usuarios de manera que aquellos que se encuentren en los bordes de la celda reciban interferencia de los usuarios centrales de las celdas vecinas y viceversa.

Los indicadores de interferencia, necesarios para implementar todos estos mecanismos, se intercambian a través de la interfaz X2 que existe entre cada pareja de eNodos-B. Se encuentran definidos en el TS 36.423 del 3GPP, clasificándose como de tipo reactivo o de tipo proactivo. Los indicadores reactivos sirven para avisar a otros eNodos-B de la detección de una interferencia intercelular elevada, instándoles a tomar medidas para lograr reducirla. En el caso de los indicadores proactivos, se utilizan para notificar a los eNodos-B vecinos de una determinada celda la potencia con que se transmitirá en cada RB y dónde se planificarán las transmisiones de los usuarios más próximos al borde de dicha celda. Con esta información, en las celdas vecinas se puede realizar una estimación de la interferencia intercelular que se produciría, tomando las decisiones oportunas para prevenirla o evitarla.

En el caso del enlace descendente, el principal indicador de interferencia estandarizado por el 3GPP se denomina *Relative Narrowband Transmit Power* (RNTP). Su función es indicar de manera anticipada el valor máximo de potencia con que el eNodo-B transmite en cada RB por el enlace descendente. La forma de hacerlo es bastante sencilla: se envía un vector con tantos bits como RBs haya disponibles, de forma que si la potencia transmitida para un RB supera un cierto umbral de peligro se rellena con un 1, y si no es así, con un 0. Los eNodos-B que reciban este vector saben que en los RBs donde figura un 1 es muy probable que se experimenten interferencias intercelulares, por lo que de cara a una futura asignación de recursos darán preferencia a los RBs con el bit a 0.

Para el enlace ascendente, existen dos indicadores principales: uno proactivo denominado *High Interference Indicator* (HII) y otro reactivo llamado *Overload Indicator* (OI). El HII presenta un formato similar al RNTP, siendo utilizado por el eNodo-B para advertir a sus vecinos de en qué RBs planea situar las transmisiones de los usuarios en el borde de la celda a través del UL. Los RBs utilizados para este propósito se indicarán con un bit a 1, ya que son susceptibles de causar

interferencia. Por otro lado, el OI sirve para indicar si los niveles medidos de interferencia más ruido para cada RB son altos o bajos.

La manera en que cada eNodo-B utiliza esta información, como ya se ha mencionado antes, no se encuentra estandarizada, por lo que en último término dependerá de cómo lo implemente cada fabricante. El OI puede emplearse para ajustar el mecanismo de control de potencia en lazo abierto, de manera que se asegure un nivel bajo de interferencia más ruido en la celda, mientras que el HII serviría para establecer una serie de restricciones en los recursos asignados a cada usuario en el UL.

Por último, cabe mencionar que existen diferentes técnicas propuestas para control de interferencias cuyas prestaciones están siendo analizadas junto con los mecanismos de ICIC. Nos referimos, por ejemplo, a la cancelación y la aleatorización de interferencias, la diversidad espacial (*beamforming*), los esquemas de transmisión MIMO, las estrategias dinámicas, etc.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una descripción de los sistemas de control de potencia empleados en las redes móviles LTE, basados en una combinación de las técnicas de ajuste en lazo abierto y en lazo cerrado (dependiendo de si existe alguna realimentación entre estación base y el terminal). Hemos mostrando su evolución desde GSM y UMTS, explicando cada uno de los elementos que forman parte del proceso de control de potencia y sus posibles modos de configuración.

La importancia de estos sistemas como mecanismo de gestión de recursos radio reside no sólo en la posibilidad de evitar o reducir las interferencias sobre la interfaz aire, algo para lo que también se emplean las estrategias de ICIC descritas, sino también en la capacidad de los mismos para adaptar en cada momento la potencia de transmisión de los terminales a las condiciones del canal de propagación. De esta manera se evita tener que transmitir siempre con la máxima potencia que permite el dispositivo.

Esto último provoca una reducción importante en el consumo medio de los dispositivos, con el ahorro energético que ello conlleva, y el aumento en la duración de la batería. También permite ejercer un cierto control sobre los niveles de emisión de las instalaciones radioeléctricas de telefonía móvil, minimizando el impacto medioambiental de los mismos y ajustándolos a los límites establecidos según la normativa vigente (R.D. 1066/2001).

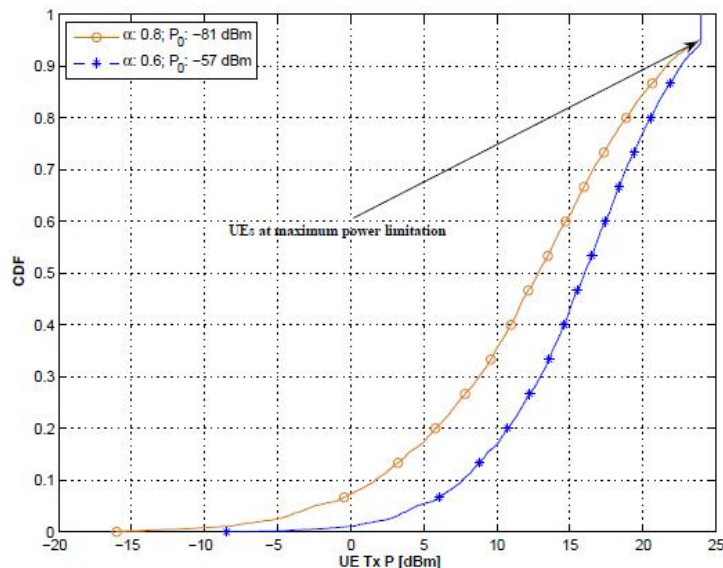


Figura 15. Distribución de potencia transmitida por un terminal utilizando dos configuraciones distintas de P_0 y α .

Todas estas funcionalidades de la red radio deben suministrarse asegurando siempre el cumplimiento de unos ciertos niveles de calidad de servicio en las comunicaciones, contratados por el usuario al operador de telefonía móvil encargado de proveer el servicio. El sistema deberá almacenar esta información, relativa a cada usuario, para poder actuar conforme a ella durante los procesos de gestión de recursos.

5. Bibliografía

- [1] Real Decreto 1066/2001, de 28 de Septiembre, del Ministerio de la Presidencia (BOE nº 234, de 29 de Septiembre).
- [2] Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT). "Informe sobre emisiones electromagnéticas de los sistemas de telefonía móvil y acceso fijo inalámbrico". Versión web: <http://www.coit.es/web/servicios/tecnologia/emision/index.html>
- [3] R. Agustí Comes, F. Bernardo Álvarez, F. Casadevall Palacio, R. Ferrús Ferre, J. Pérez Romero y O. Sallent Roig. "LTE. Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles", Fundación Vodafone, Septiembre 2010.

- [4] N. Cardona, J. J. Olmos, M. García, J. F. Monserrat. "3GPP LTE: Hacia la 4G Móvil", Editorial Marcombo, 1ª Edición, Abril 2011.
- [5] Harry Holma, Antti Toskala. "LTE for UMTS. Evolution to LTE-Advanced", John Wiley & Sons, 2nd Edition, March 2011.
- [6] Nestor J. Quintero. "Advanced Power Control for UTRAN LTE Uplink", Master Thesis, Department of Electronic Systems, Aalborg University (Denmark), June 2008.
- [7] Bilal Muhammad. "Closed Loop Power Control for LTE Uplink", Master Thesis, Blekinge Institute of Technology (Sweden), November 2008.
- [8] E.Tejaswi, B. Suresh. "Survey of Power Control Schemes for LTE Uplink", International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 4, pp. 369-373, 2013.
- [9] Amira M. Yehia. "A Radio Resource Management Framework for the 3GPP LTE Uplink", PhD Thesis, Cairo University (Gyza, Egypt), 2011.
- [10] Francesco D. Calabrese. "Scheduling and Link Adaptation for Uplink SC-FDMA Systems", PhD Thesis, Aalborg University (Denmark), April 2009.

REDES DE FEMTOCELIDAS

José Javier Martínez Vázquez (*)
Eduardo Martínez de Rioja y del Nido ()**

(*) Comité de Ingeniería y Desarrollo Sostenible. Instituto de la Ingeniería de España.

(**) Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. ETSIT – UPM.

Resumen. *El despliegue de celdas de pequeño tamaño está aceptado como la solución más adecuada para aumentar tanto la cantidad de tráfico a cursar como la calidad del servicio en las redes celulares. Sin embargo, la reducción en el tamaño de las celdas origina un incremento considerable de los costes de equipamiento, instalación, mantenimiento y operación. Al margen de su posible funcionamiento como redes de datos medioambientales, constituyen un área de la telefonía móvil con aspectos de gran interés dentro del ámbito del desarrollo sostenible. Las previsiones para el año 2020 sitúan el número de celdas de pequeño tamaño en 100 millones, con más de 500 millones de usuarios. Este trabajo pretende analizar la sostenibilidad de los sistemas celulares que emplean celdas de pequeño tamaño.*

1. Introducción.

Hoy en día, los operadores de telefonía móvil tienen que hacer frente tanto a la proliferación de servicios de datos como al incremento total de la demanda de tráfico de datos. En principio, un aumento de la capacidad en las redes de comunicaciones móviles puede afrontarse de tres formas diferentes: 1. *Un aumento del ancho de banda utilizado.* 2. *Una mayor eficiencia espectral en la interfaz radio.* 3. *Mayor densidad de la red, incrementando el factor de reutilización espacial de la banda de frecuencias asignada y disminuyendo la distancia entre transmisor y receptor.* Elevar el factor de reutilización mediante el despliegue de un mayor número de puntos de acceso ha venido siendo hasta ahora el medio más efectivo de mejorar la capacidad de las redes celulares de comunicaciones. Se ha comprobado que la tercera vía es mejor que las otras dos combinadas, de forma que el despliegue de células de pequeño tamaño está considerado como la solución más adecuada para un drástico aumento de la cantidad de tráfico a cursar y de la calidad del servicio en las redes móviles futuras. Así, en las grandes ciudades en donde hay edificios enteros dedicados a oficinas empresariales, la única respuesta para dar cobertura a un gran

número de pequeñas empresas situadas en locales interiores cerrados, son las celdas de pequeño tamaño.

Con el uso generalizado de los terminales de abonado tipo **smartphone**, la necesidad de una buena cobertura en el interior de edificios se ha multiplicado debido sobre todo a la demanda de altas tasas de transmisión por los usuarios de esta clase de terminales. Por otra parte, desde que el servicio de voz sobre LTE (**VoLTE**) comenzó a reemplazar a la telefonía móvil convencional basada en la tecnología de conmutación de circuitos, la demanda de cobertura móvil para servicios de banda ancha y alta calidad no ha hecho más que crecer. A todo ello hay que añadir que una gran parte de este aumento de la demanda de los servicios de datos se produce en las áreas residenciales suburbanas donde la cobertura de celdas con grandes radios de cobertura es pobre, abriéndose otra aplicación de las celdas de pequeño tamaño.

Como es lógico, la reducción en el tamaño de las celdas se traduce en un incremento considerable de los costes de equipamiento, instalación, mantenimiento y operación de las redes móviles. No obstante, hoy en día, se han desarrollado algunas soluciones eficientes como pueden ser las femtoceldas y los sistemas de radio distribuidos (Remote Radio Heads, **RRH**) que han contribuido en buena medida a mejorar los costes de esta división celular. Los sistemas distribuidos de radio **RRH** han mejorado el rendimiento de las estaciones base, superando las prestaciones de los repetidores existentes en las redes GSM y UMTS. Con un consumo reducido, respecto a las estaciones base convencionales, se pueden instalar hasta cinco cabezas remotas de manera que cada **RRH** tiene las mismas características que una BTS desde el punto de vista del acceso radio. De esta forma se amplía en gran medida el radio de cobertura de la estación base. Las cabezas remotas pueden estar dotadas de varios transceptores y están unidas a la estación base mediante una fibra óptica oscura que se utiliza tanto para el transporte como para la gestión de la cabeza remota.

Las femtoceldas son estaciones base de baja potencia que los usuarios ponen en funcionamiento conectándolos a su propio bucle de abonado. El equipamiento de una femtocelda consiste en un terminal de abonado de tipo **plug and play** de tal forma que cualquier persona con un escaso conocimiento técnico es capaz de dar los pasos necesarios para que el dispositivo entre en funcionamiento. Para configurar una femtocelda se empieza por adquirir de un operador de telefonía móvil una dirección IP, realizar la descarga de la versión correcta de software y de los parámetros de configuración de la base de datos del operador, por último el proceso continúa con el ajuste de estos parámetros de configuración durante el funcionamiento del equipo. Estos puntos de acceso, en el caso de las redes UMTS,

CDMA 2000 y LTE, son funcionalmente similares a una estación base convencional, estando ya estandarizado y comercializado el denominado **HeNB** (Home evolved Node B) que viene a ser algo parecido a una estación base doméstica. Además, el coste ha de ser similar al de un **wifi router** y también, como un **wifi router**, puede ser desplegado de forma **ad hoc** sin planificación previa. Esta es una característica diferencial de las celdas de pequeño tamaño. Mientras que el despliegue de macro celdas suele ser planificado de forma muy concienzuda, las celdas de pequeño tamaño son instaladas generalmente, con carácter urgente y sin ningún tipo de previsión.

2. Análisis ambiental.

A continuación se revisan los niveles de referencia y el consumo de energía eléctrica de los diferentes tipos de células con el objeto de establecer un análisis comparativo entre las mismas.

2.1. Tipos de celdas.

Las celdas se vienen clasificando de acuerdo con su tamaño, denominándose como macroceldas, microceldas, picoceldas y femtoceldas. Se diferencian en la potencia media transmitida y en consecuencia por el área de cobertura de la celda. Esta división de las celdas en función de la potencia media transmitida también la convierte en una clasificación medioambiental.

TIPO DE CELDA	POTENCIA MÁXIMA POR ANTENA	GANANCIA TÍPICA	PIRE POR ANTENA
MACRO	50 w	17 dBi	2500 w
MICRO	5 w	17 dBi	250 w
PICO	1 w	17 dBi	50 w
FEMTO	20 mw	12 dBi	16 w

En el caso de las *macrocelas*, la potencia media transmitida es de 10 a 50 vatios por antena sectorial y su radio de cobertura oscila entre 5 y 10 kilómetros. Para las *microcelas*, la potencia media transmitida es de 2 a 5 vatios por antena sectorial y el radio de cobertura estimado puede tener una longitud máxima de 2 kilómetros aproximadamente. La potencia media transmitida por una *picoceleta* es de 1 vatio por antena sectorial, siendo su alcance aproximado de 1 kilómetro. Si se trata de *femtocelas*, la potencia media transmitida es de 12 a 20 milivatios por antena con radios de cobertura de algunas decenas de metros.

2.2. *Bandas de frecuencia utilizadas por los operadores públicos.*

La televisión analógica utilizó las frecuencias de las bandas VHF (47 a 230 MHz) y de UHF (470 a 862 MHz) para su difusión. Con la llegada de la televisión digital, el ancho de banda necesario para difundir un canal de televisión es seis veces menor que el empleado por la televisión analógica. Hay por lo tanto, un ahorro y una mejora en la gestión del espectro radioeléctrico. La parte del espectro que ya no es necesario utilizar puede emplearse para otros servicios (DVB-H, telefonía móvil, etc.). Este excedente de espectro radioeléctrico es lo que se ha denominado el Dividendo Digital.

SISTEMA DE TELEFONÍA MÓVIL	UL Mhz	DL Mhz
DIVIDENDO - DIGITAL	790-862	790-862
UMTS 100	880-890	925-935
GSM	890 - 915	935 - 960
DCS 1800	1710-1785	1805-1880

SISTEMA DE TELEFONÍA MÓVIL	UL Mhz	DL Mhz
LTE 1800	1710-1785	1805-1880
UMTS	1920-1980F 1900-1920T	2110-2170 2010-2025
LTE 2600	2500 - 2570	2620-2680

Dado que el proceso de *refarming* consiste en que el operador de telefonía móvil elige la tecnología a utilizar en cada una de las bandas de frecuencia que tiene asignadas y que las pérdidas de propagación son menores a frecuencias bajas, se

tiende a utilizar la banda de los 800 Mhz del dividendo digital. Por otra parte, al tratarse de la frecuencia más baja es la que tiene los niveles de referencia más restrictivos.

2.3. Niveles de referencia.

El Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, establece las restricciones básicas como las restricciones de la exposición a los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos de tiempo variable, basadas en los efectos conocidos sobre la salud y en consideraciones biológicas. Además, señalan que el cumplimiento del nivel de referencia garantizará el respeto de la restricción básica pertinente.

Habrà de tenerse en cuenta que, si bien en las restricciones básicas se incluye la absorción específica, en los niveles de referencia no es así, por lo que debe considerarse que al cumplir los niveles de referencia de densidad de potencia o de intensidad de campo se cumplen las restricciones básicas relativas a la absorción específica de los tejidos del organismo humano.

Dado que las competencias en materia de Medio Ambiente se han transferido a las Comunidades Autónomas, algunas de estas han regulado niveles de referencia más restrictivos que los incluidos en la legislación nacional o en la correspondiente a la Unión Europea. Así por ejemplo, Cataluña tiene niveles de referencia reducidos en un factor mayor que 2 con respecto a nuestro Real Decreto 1066/2001.

a) Niveles de referencia de densidad de potencia.

Para frecuencias situadas entre los 800 Mhz y los 300 Ghz, el nivel de referencia oscila entre los 4 y los 10 vatios / metro 2. El nivel más restrictivo es el correspondiente a los 800 Mhz, 4 ó 1,77 vatios / metro 2.

RECOMENDACIÓN CONSEJO 1999/519/CE	del	RD 1066/2001 Mº PRESIDENCIA	DE LA	DECRETO GENERALITAT	148/2001
f /200		f /200		f /450	
4 vatios /metro 2		4 vatios /metro 2		1,77 vatios /metro 2	

Teniendo en cuenta que la densidad de potencia viene expresada por :

$$S = \frac{PIRE}{4\pi r^2} \text{ vatios/metro}^2$$

Se obtienen las distancias respecto de las antenas para las cuales se cumple el nivel de referencia:

TIPO DE CELDA	PIRE POR ANTENA	NIVEL DE REFERENCIA (1)	NIVEL DE REFERENCIA (2)
MACRO	2500 w	7 METROS	10,6 METROS
MICRO	250 w	2,23 METROS	3,35 METROS
PICO	50 w	1 METRO	1,5 METROS
FEMTO	0,32 w	0,08 METROS	0,12 METROS

b) Niveles de referencia de intensidad de campo eléctrico.

Los niveles de referencia contenidos en la legislación actual, dados en voltios por metro son los que figuran en la siguiente tabla, donde la frecuencia está en MHZ:

RECOMENDACIÓN del CONSEJO 1999/519/CE	RD 1066/2001 Mº DE LA PRESIDENCIA	DECRETO 148/2001 GENERALITAT
1,375·f ½	1,375·f ½	0,9·f ½
38,9 v/m	38,9 v/m	25,45 v/m

La estimación del campo eléctrico se obtiene, por medio del vector de Poynting, a través de la expresión:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot PIRE}}{r} \text{ voltios/metro}$$

Resultando las siguientes distancias respecto de las antenas para las cuales se cumple el nivel de referencia:

TIPO DE CELDA	CAMPO ELÉCTRICO MÁXIMO POR ANTENA v / m	NIVEL DE REFERENCIA (1)	NIVEL DE REFERENCIA (2)
MACRO	$274 / r$	7 METROS	10,6 METROS
MICRO	$86,6 / r$	2,23 METROS	3,35 METROS
PICO	$38,7 / r$	1 METRO	1,5 METROS
FEMTO	$3,1 / r$	0,08 METROS	0,12 METROS

Los resultados son coherentes con los obtenidos a través de los niveles de densidad de potencia y se comprueba que el campo eléctrico varía de acuerdo con la raíz cuadrada de la ley de variación de la densidad de potencia, ya que la densidad de potencia es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo eléctrico.

3. Consumo eléctrico.

Las previsiones para el año 2020 sitúan en 100 millones el número de celdas de pequeño tamaño con más de 500 millones de usuarios. El consumo actual de una femtocelda es de 10 vatios aproximadamente. No obstante, parece lógico pensar que este consumo irá disminuyendo progresivamente de forma que en el año 2020

podría llegar a ser la mitad. De esta forma, los 100 millones de femtoceldas consumirán al año 4,4 TWh, suponiendo que se mantengan en servicio durante 24 horas al día. Algunas estimaciones sitúan esta cifra en un 5% del consumo total del conjunto de las macro estaciones base. Por esta razón, se está trabajando actualmente sobre una serie de líneas de actuación para tratar de disminuir los niveles de consumo de los sistemas celulares. Algunas de estas líneas de actuación son las siguientes:

1. Mejora del rendimiento energético de los equipos de telefonía celular. Como se verá más adelante en este documento, para obtener en antena una potencia de 50 vatios se necesitan hasta 500 vatios a la salida del transceptor y sólo el equipo de radio consume en total 2 kW.
2. Estudio de nuevos protocolos de ahorro de energía para que las estaciones base adopten un modo inactivo de funcionamiento en horas o periodos de tiempo de baja demanda. Hay que tener en cuenta que algunas horas de inactividad de las estaciones base, dado lo elevado de los consumos, pueden suponer muchos kWh durante un año.
3. Otra opción consistiría en variar el tamaño de la celda, y por tanto el consumo de energía de la estación base, en función de la intensidad de tráfico y del nivel de interferencia, con el mismo objetivo que el punto anterior.
4. El uso de energías renovables como la energía solar o la eólica podría abaratar costes de instalación de nuevos emplazamientos para redes móviles, sobre todo en aquellos puntos de difícil acceso para las líneas de las compañías suministradoras de energía eléctrica.
5. La utilización de repetidores o cabezas remotas en las redes celulares, reduce en gran medida el consumo de energía eléctrica, lo que hace aconsejable su implantación siempre que las estimaciones de tráfico y las infraestructuras existentes lo permitan.

A continuación se muestran algunos datos de consumo en función del tipo de celda:

Macro celda: 50 vatios por antena, 500 vatios a la salida del transceptor

BTS	Pot. Max. Consumida (W)	Pot. Media Consumida (W)
EQUIPO RADIO	1845	1845
CAPA DE TRANSPORTE	240	240
Switch	15	15
BMU	50	
Eq. rectificador + String baterías -100Ah	1200	
A/A	2000	
Total	3350 + AA	2100 + AA

Micro celda: 5 vatios por antena y 70 a la salida del transceptor

BTS	Pot. Max. Consumida (W)	Pot. Media Consumida (W)
EQUIPO RADIO	600	600
CAPA DE TRANSPORTE	240	240
Switch	15	15
BMU	50	
Eq. rectificador + String baterías -100Ah	1200	
A/A	2000	
Total	2105 + AA	855 + AA

Pico celda: 1 vatio por antena y 20 a la salida del transceptor

Macro celda con RRH: hasta 40 vatios por antena (No necesita A/A)

BTS/FOR	Pot. Max. Consumida (W)	Pot. Media Consumida (W)
Equipo radio	250	250
Switch	15	15
Luminaria + ventiladores	75	75
Eq. rectificador + String baterías - 30Ah	360	
Total	700	340

Femto celda: 10 mw por antena

HeNb	Pot. Max. Consumida (W)	Pot. Media Consumida (W)
Equipo radio	5	5
Switch Router,	5	5
Acumuladores – 0,5 Ah	2	
Total	12	10

El consumo anual de una celda puede calcularse a través de la siguiente expresión:

$$\text{Energía en kWh/año} = \text{Potencia} \times f(t) \times \text{Nº de días/año}$$

f(t) : número de horas al día de funcionamiento

Para las femtoceldas, teniendo en cuenta el consumo actual, se tiene:

$$10 \text{ w} \times 24 \times 365 / 1000 = 87,6 \text{ kWh/año por celda}$$

Según las previsiones de consumo para el año 2020, se tiene:

$$5 \text{ w} \times 24 \times 365 / 1000 = 43,8 \text{ kWh/año por celda}$$

Si consideramos los 100 millones de femto-celdas:

$$\text{Energía en TWh/año} = 4,38 \text{ TWh/año}$$

Como es lógico, todos los escenarios contemplados afectan al enlace descendente. En relación al enlace ascendente, los sistemas de control de potencia (bucle cerrado

y bucle abierto) han mejorado mucho el rendimiento de los terminales de abonado, consiguiéndose consumos unas diez veces más bajos que los primeros equipos de abonado de GSM.

4. Arquitectura de las redes de femtoceldas.

El elevado número de celdas de pequeño tamaño que aparecen simultáneamente así como su despliegue, plantea una gran variedad de alternativas desde el punto de vista de la topología y la gestión de red. En consecuencia, el despliegue de nodos de pequeña potencia empieza a ser de una importancia clave para los operadores de telefonía móvil, hasta el punto de modificar el núcleo de la red celular con el objeto de que el despliegue o la retirada de celdas de pequeño tamaño no afecte al funcionamiento normal del resto de la red.

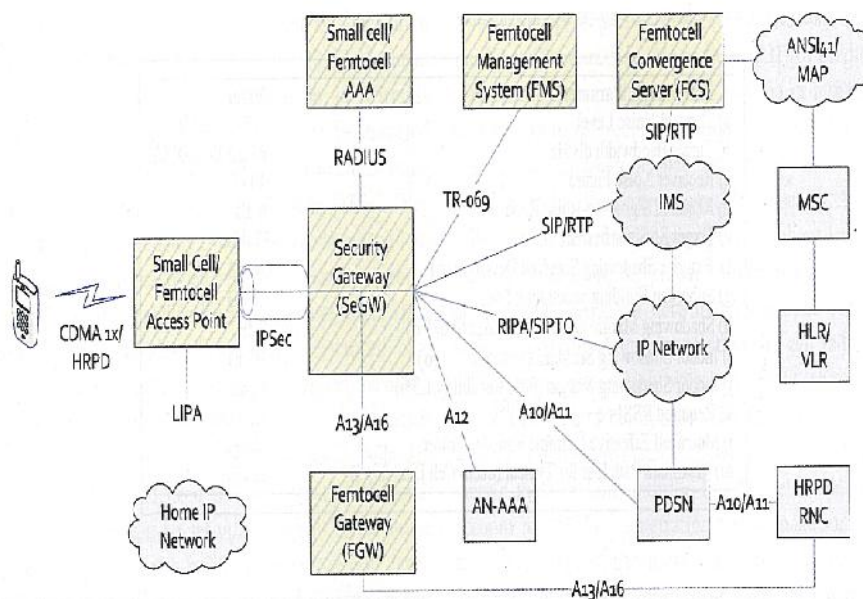


Fig. 2. CDMA2000 IMS-based small-cell network.

Las celdas de pequeño tamaño tienen que estar dotadas de las mismas características que cualquier estación base de una macrocelda, diferenciándose de estas en que dan servicio a un número reducido de usuarios y que transmiten una potencia media muy baja. También, es necesario que suministren cobertura de alta calidad sin interferir con la red de macroceldas existente, ni con celdas de pequeño tamaño vecinas.

La conexión de las femtoceldas a la red celular a través del bucle de abonado implica que se accede directamente a Internet que actúa como enlace troncal por lo que se necesita una conexión segura entre el abonado y el núcleo de la red del operador. Este enlace seguro lo proporciona, mediante la implantación de protocolos IPSec, el servidor Gateway de Seguridad (Se GW) que se encuentra en el núcleo de la red celular del operador de telefonía móvil correspondiente, consiguiendo así una identificación recíproca entre el servidor y el acceso de la femtocelda. Este servidor Se GW también realiza funciones de concentrador ya que es el punto de acceso de todos los nodos domésticos de las femtoceldas.

El servidor de pequeñas celdas AAA se encarga del registro e identificación de los abonados (Authenticación), verificación de los recursos de los que puede hacer uso ese abonado (Autorización), así como el almacenamiento de datos de la conexión a realizar: dirección IP de destino, encaminamiento de la conexión, duración de la conexión, etc (Accounting). Está conectado al servidor de la red de acceso AAA del núcleo de la red celular del operador a través de la pasarela de seguridad. Los datos de identificación y autorización quedan grabados en el HLR.

Lo habitual en este tipo de redes es que se utilice el registro de situación de visitantes VLR mucho más dinámico y versátil que el registro base HLR para registrar a los abonados, no solo por el carácter aleatorio del despliegue o retirada de los equipos de acceso sino además, por el hecho de que pueden ser desconectados durante las horas que no estén en funcionamiento.

Ante un protocolo de inicio de sesión (SIP) enviado por un abonado, el servidor de convergencia de pequeñas celdas (FCS) recibe del IMS el tipo de servicio que se pretende establecer y actúa como una central de conmutación móvil para las celdas de pequeño tamaño, estando conectado tanto a la estación base doméstica como a la MSC, procediendo a identificar al abonado en los registros de situación base y de visitantes HLR/VLR. La conexión se establece a través del equipo Radio Network Control (RNC) y el nodo de conmutación de paquetes Packet Data Service Node (PDSN) hacia la red IP. El servicio de llamadas entrantes se encamina desde la red IP a la Se GW, siendo el bloque de convergencia el que establece el destino de la llamada.

Otro servidor, el de gestión (FMS) estaría ligado al subsistema de operación (OMC-R) y mantenimiento de la red de macroceldas y permite el control de la operación mediante el ajuste de parámetros de las estaciones base domésticas así como el mantenimiento y la detección de fallos en la red de pequeñas celdas.

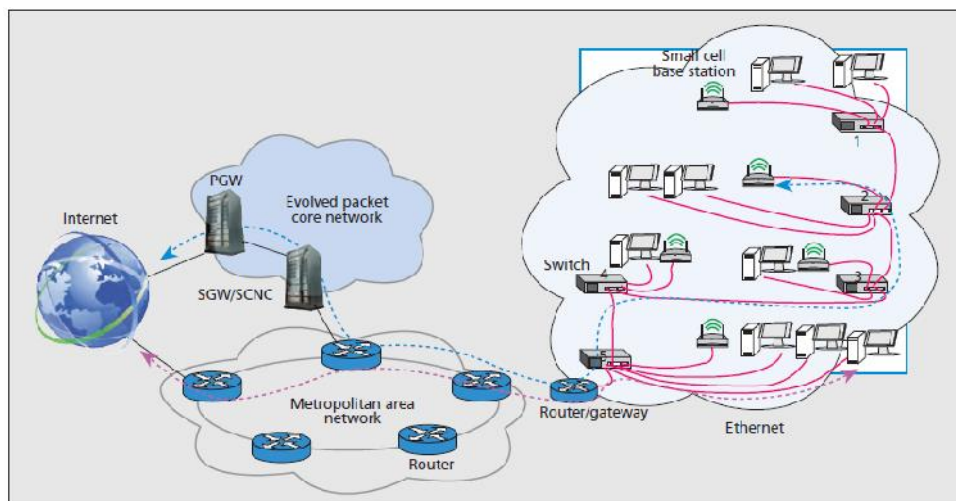
4.1. Topologías de red.

En áreas suburbanas y rurales, dotar de cobertura de alta calidad a las viviendas es un reto considerable. En estas áreas no es viable económicamente dar una cobertura fiable desde la red de macroceldas a todas las viviendas y a todas las poblaciones, sobretodo cuando los usuarios demandan altas tasas de transmisión.

Las soluciones propuestas, son en general más flexibles y menos costosas que las RRH, y en algunos casos se contempla la posibilidad de que sea el propio usuario el que instale su propia estación base.

a) Áreas urbanas.

Este primer caso contemplado, estudia la conexión de estaciones base LTE para pequeñas celdas en un edificio de oficinas, mediante una red Ethernet 1G. El conexionado se realiza de acuerdo a la normativa de categorías CAT 5 (100 Mb/s) / 5e (1 Gb/s) / 6 (10 Gb/s). El sistema de telefonía celular empleado es LTE de 10 MHz de ancho de banda, 1024 portadoras OFDM de las que 600 se utilizan para transmisión de datos.



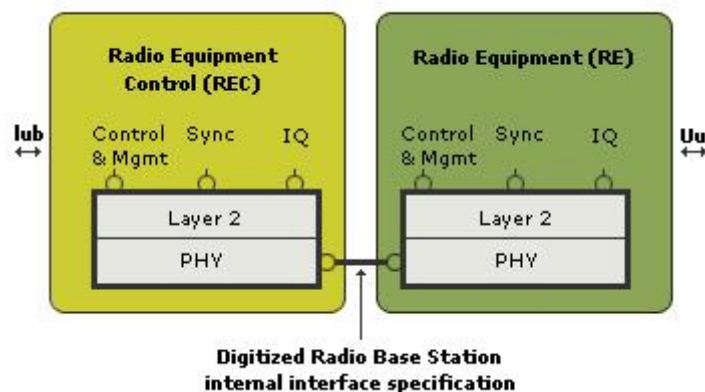
El núcleo de la red está compuesto por un controlador de pequeñas celdas SCNC y una pasarela hacia Internet (Packet Data Network Gateway, PGW), de acuerdo a los criterios de la 3GPP.

El interfaz interno de la red Ethernet extrae señales cuantificadas con 4 bits (I/Q) de las 600 subportadoras de servicio, con tasa de codificación de 1:2, por lo que se tendría para un switch, una tasa de transmisión:

$$600 \times 4 \times 2 \times 2 / 66,7 \text{ useg} = 144 \text{ Mbits/seg}$$

Es decir, cada nodo HeNB envía a la red 144 Mb/s, lo que implica que la red Ethernet 1 G podría soportar el funcionamiento de 6 estaciones base. Teniendo en cuenta un número máximo de 8 terminales de usuario por nodo HeNB, la capacidad del sistema es de 48 usuarios.

Si en lugar de una red Ethernet se instalara **CPRI** (Common Public Radio Interface), que proporciona un enlace entre un equipo de control, Radio Equipment Control (**REC**) y equipos de acceso radio Radio Equipment (**RE**). Las especificaciones del sistema permiten que los puntos de acceso radio sean LTE Advanced. El equipo de control puede ser conectado a una red Ethernet 1G.



Para una conexión interna de red **CPRI** se tendrían en cuenta no sólo todos los bits de la trama, incluido el prefijo cíclico de 16,7 us dentro de cada trama de 66,7 us, sino además las 1024 portadoras:

$$(1 + 16,7/66,7) \times 1024 \times 4 \times 2 \times 2 / 66,7 \text{ useg} = 307,14 \text{ Mbits/seg}$$

En consecuencia, la capacidad del sistema se limitaría en una proporción de 1:3 aproximadamente, con respecto a la utilización de Ethernet 1G.

Actualmente se explora la utilización de software de implantación en los switch Ethernet denominado DSC (**Distributed Switching and Combining**) todavía en fase

experimental, que podría disminuir el tráfico en este tipo de redes en un 64%, sobre todo empleando más de ocho bits de cuantificación.

Desde un punto de vista económico, el coste estimado por cada 5 nodos sería de 4.000 euros. Los switch Ethernet previstos son los más económicos del mercado con 8 puertos de conexión.

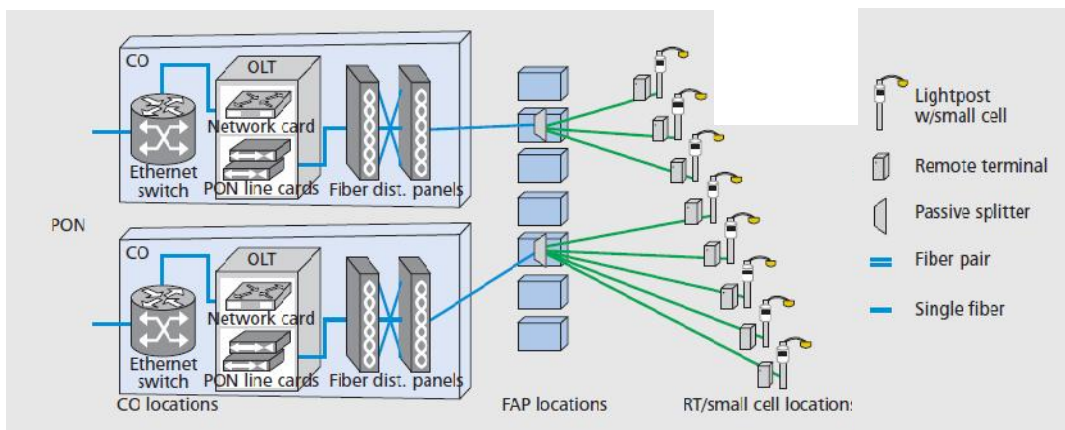
Ya se ha calculado el consumo por nodo, por lo que para 5 nodos, se tendría:

$$5 \times 10 \text{ w} \times 24 \times 365 / 1000 = 438 \text{ kWh/año por cada 5 celdas}$$

Donde se ha supuesto un periodo de funcionamiento diario de 24 horas por cada estación base.

b) Áreas suburbanas: Fiber To The Node (FTTN)

La AT&T tiene en los Estados Unidos una extensa red de fibra óptica para distribución de señales de banda ancha, con un número aproximado de 90.000 puntos de acceso. Utilizando las conexiones por fibra existentes entre las centrales de conmutación y las zonas residenciales suburbanas, se ha puesto en marcha un estudio en fase experimental para aumentar la red celular con pequeñas celdas de bajo coste. Esta configuración de red se ha denominado Fiber To The Node, con las siglas FTTN.



La red de fibra es muy sencilla desde el punto de vista funcional. Una fibra óptica une la central de conmutación con los puntos de acceso de fibra. El punto de acceso ha de ser una cámara de registro con un empalme o segregación del cable de fibra óptica. Un **splitter** permite unir varias fibras oscuras en el mismo punto de acceso

dando servicio a varios terminales de línea. Estos terminales están provistos de alimentación de la compañía suministradora de energía eléctrica y convierten la señal para que pueda ser radiada por un transceptor.

Cada celda, de tecnología LTE 700 MHz y dotada de suministro eléctrico, entrega a la antena una potencia de 250 mW, con ganancias de antena de 8 dBi's y un radio de cobertura que varía entre los 200 y los 400 metros. Dado que la banda de frecuencias a utilizar está en los 700 MHz, se tienen los siguientes niveles de referencia:

RECOMENDACIÓN del CONSEJO 1999/519/CE	RD 1066/2001 Mº DE LA PRESIDENCIA	DECRETO 148/2001 GENERALITAT
f /200	f /200	f /450
3,5 vatios /metro 2	3,5 vatios /metro 2	1,55 vatios /metro 2

Teniendo en cuenta que, como se ha indicado anteriormente, la densidad de potencia viene expresada por:

$$S = \frac{PIRE}{4\pi r^2} \text{ vatios/metro}^2$$

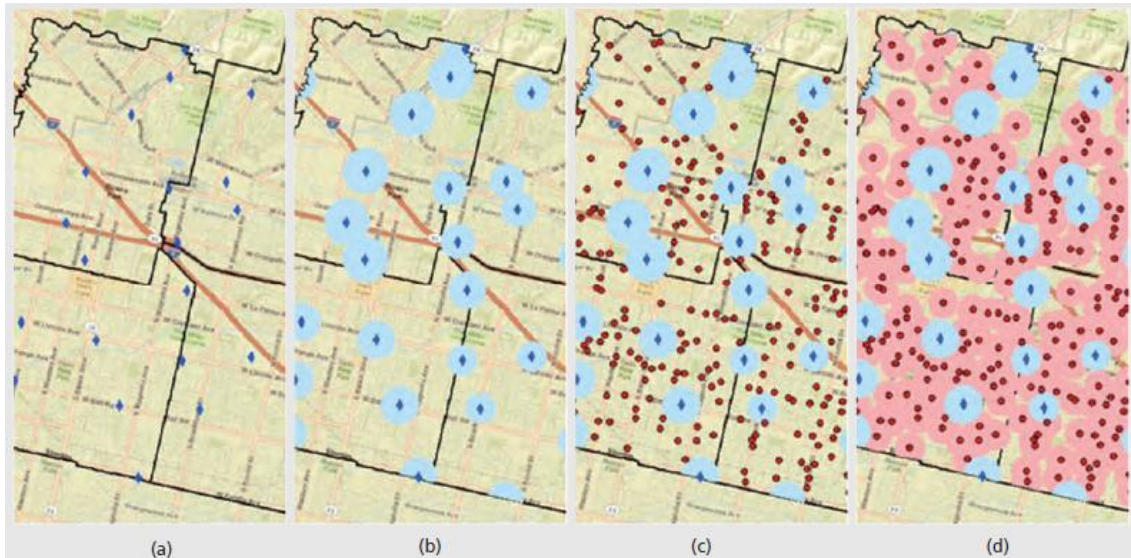
La PIRE por antena de cada femtocelda es:

Ganancia: 8 dBi's (6)

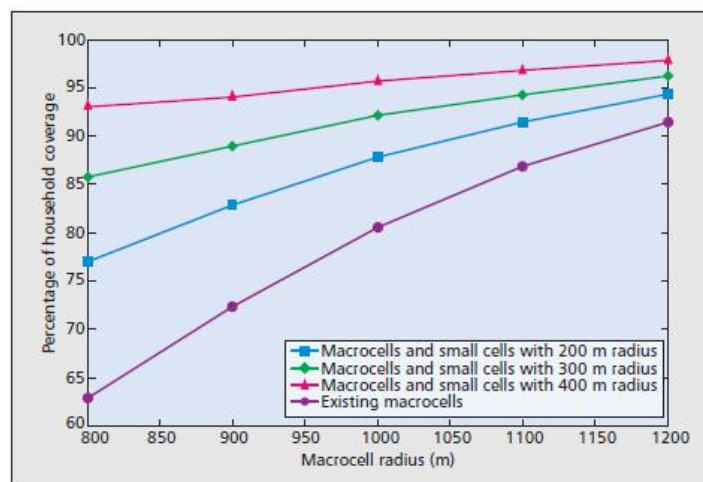
Potencia entregada a la antena: 250 mvatios

PIRE: 1,5 vatios

El nivel de referencia se alcanza por encima de los 20 centímetros para el Reglamento nacional y de los 28 centímetros considerando la reglamentación catalana, es decir el sistema es inocuo para distancias mayores de 20 y 28 centímetros respectivamente.

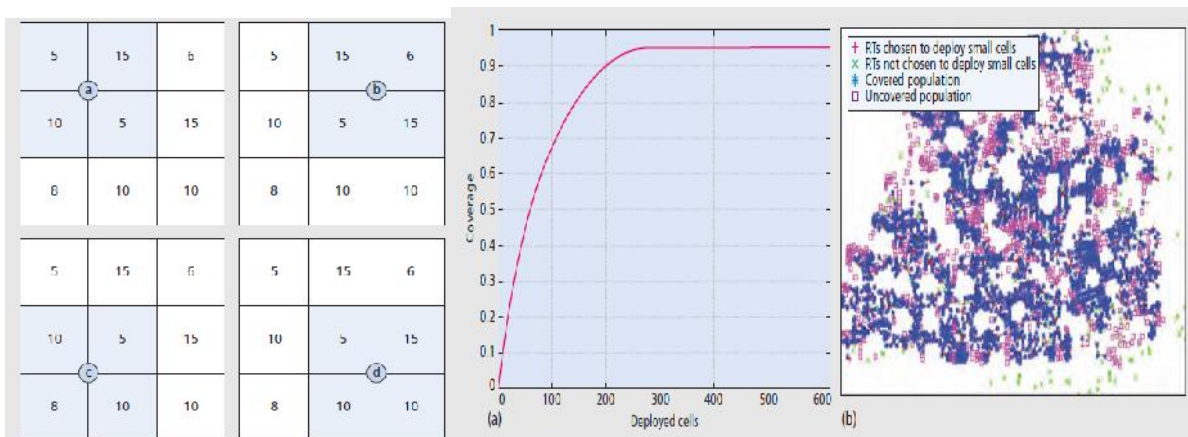


El número de viviendas a las que se da servicio en este proyecto es de 208.000, teniendo en cuenta las macroceldas existentes y las pequeñas celdas proyectadas con posterioridad. En la imagen anterior puede observarse la red inicial de macroceldas (a), la zona en estudio está dividida en cuatro áreas cada una de las cuales depende de una central de conmutación. La distancia entre los emplazamientos de las macroceldas y las centrales de conmutación, oscila entre los 800 y los 1200 metros. Se ha supuesto que las áreas servidas por las macroceldas con un radio de cobertura de 400 metros tienen una relación SINR satisfactoria (b), es decir que no necesita ser mejorada. La situación de las pequeñas celdas siempre está fuera del mencionado radio de las macroceldas (c). Finalmente, se muestra la cobertura total obtenida (d).



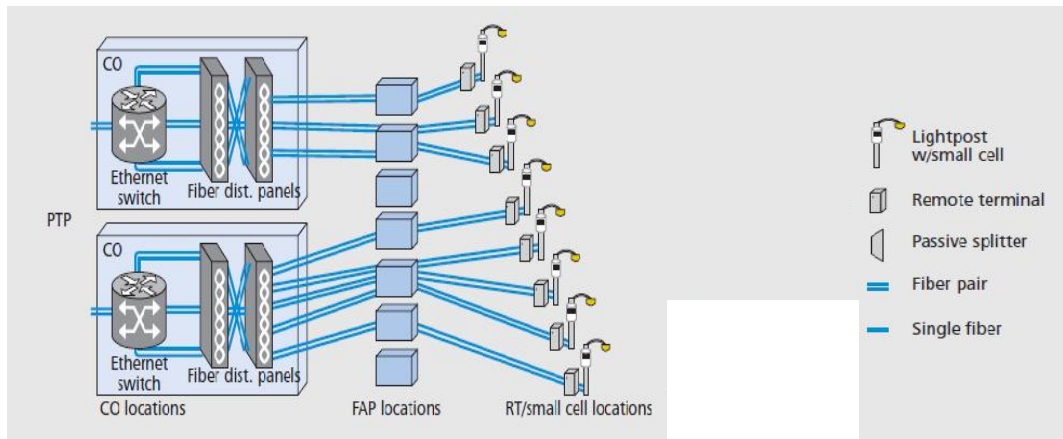
Desde un punto de vista práctico el resultado se muestra en la gráfica siguiente. La cobertura con la red de macroceldas existente oscila entre un 60% y un 90%. Si se añaden pequeñas celdas de 200 metros de radio, la cobertura aumenta a una franja entre el 75% y el 95%. Por último, combinando la red de macroceldas con pequeñas celdas de 400 metros de radio, la cobertura mínima se sitúa en el 93 % y la máxima en el 97 %.

Según la estimación realizada en el apartado a), parece evidente que los sistemas Ethernet 1 G no serían adecuados para un despliegue de red con estas características. Es más, los estándares GPON de 2,4 G darían servicio a 16 estaciones base, por lo que también serían insuficientes. Finalmente, se decidió sustituir los splitters en los puntos de acceso por multiplexadores de longitud de onda **WDM** que no encarecen en exceso la instalación y resuelven el problema de la capacidad de la red.

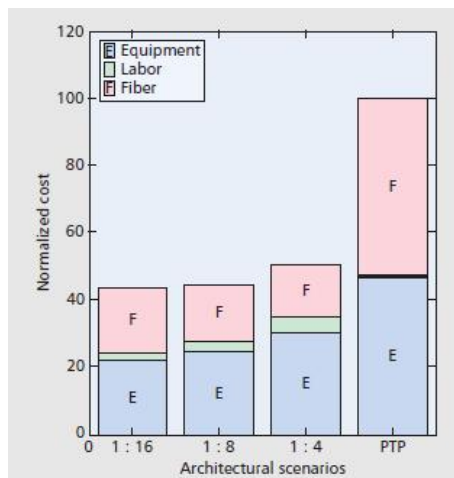


La ubicación de los emplazamientos se distribuye en función de los bloques de viviendas y el censo de población de la Costa Oeste. En la figura anterior, p.e. la mejor posición sería la b. Se estudiaron 4.212 bloques de viviendas y 613 posibles puntos para ubicar las estaciones base de pequeñas celdas, con la condición de que la distancia entre el punto elegido y su posible situación no hubiera una distancia mayor de 400 metros. Posteriormente, se optimizó el número de emplazamientos con un simulador y los 613 puntos inicialmente seleccionados se rebajaron finalmente a 300.

También, y para mejorar la calidad del servicio, se pensó en la posibilidad de utilizar enlaces punto a punto entre la central de conmutación y los terminales de línea. Los **splitter** desaparecen dando lugar a enlaces dedicados punto a punto, con una fibra oscura para transportar la señal del enlace ascendente y otra para la señal del enlace descendente.



Esta solución, se desestimó debido al elevado incremento de los costes de implantación. Como se refleja en el gráfico siguiente, en donde se toma como referencia el precio final de una red punto a punto, el coste de una red con enlaces punto a punto duplicaba al de la red pasiva con splitter de tipo 1:16, 1:8 e incluso 1:4.



Se duplican tanto los costes de equipamiento como los de tendido de cable de fibra óptica. La segregación de fibras en los puntos de acceso aumenta de forma considerable con el consiguiente coste adicional. Los repartidores de fibra óptica (**ODF**) de la central de conmutación han de tener mucha mayor capacidad y el número de equipos de multiplexado **WDM** también es mayor, fundamentalmente por estar separados el enlace ascendente y el descendente. Esta separación de los enlaces obliga al tendido de cables con mayor número de fibras e incluso, por razones de mantenimiento, a que existan cables diferentes para las fibras de enlace ascendente y del enlace descendente.

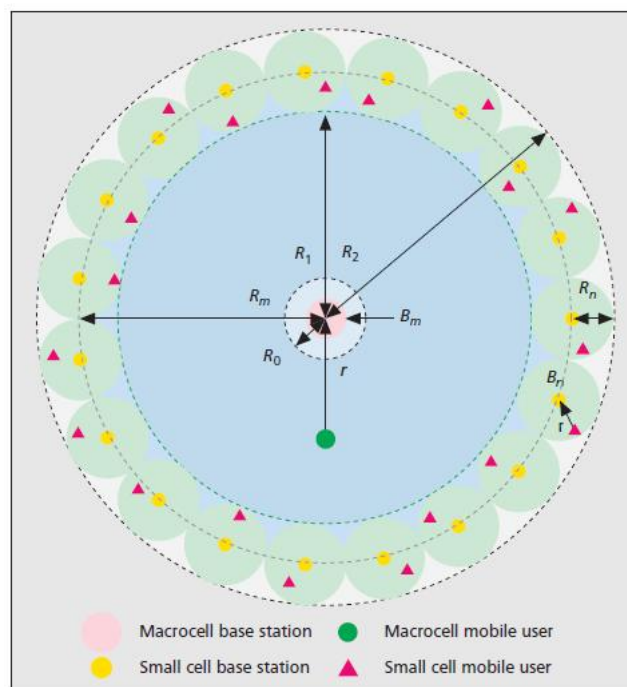
El consumo estimado por celda, de acuerdo con los consumos reseñados en el apartado 3, podría situarse en torno a los 15 vatios por celda, por lo que se tendría:

$$15 \text{ w} \times 24 \times 365 / 1000 = 131,4 \text{ kWh/año por cada celda}$$

donde se han supuesto un funcionamiento de las celdas de 24 horas al día. Un estudio de costes, establece el precio de cada emplazamiento en torno a los 12.000 euros.

c) Áreas suburbanas: Cell On Edge (COE).

En este ejemplo, se examina la ampliación de cobertura en el borde de una picocelda mediante el despliegue de pequeñas celdas a su alrededor, tal y como se muestra en la figura, con equipamiento LTE.



El radio de cobertura de la pico celda se amplía mediante la instalación de celdas de pequeño tamaño bordeando el perímetro la macrocelda.

Normalmente, es necesario un elevado número de pequeñas celdas para dotar de cobertura a estas zonas y al final los usuarios de teléfonos móviles que no tuvieran una celda de pequeño tamaño cerca de su casa, generalmente se verían obligados

a trasladarse a las proximidades de una ventana o salir a la calle para encontrar niveles satisfactorios de señal para su terminal telefónico.

La utilización de sistemas de radio distribuidos (RRH) que permiten construir una macrocelda sobre la base de múltiples celdas más pequeñas, requiere de una infraestructura que en muchos casos, sobre todo en zonas urbanas y suburbanas, es muy difícil y costosa de realizar, y además tiene limitado el número de cabezas remotas por cada estación base. En este caso, la implantación de RRH exigiría trabajos adicionales como la ejecución de zanjas y canalizaciones para el tendido de cable de fibra óptica o bien la instalación de radioenlaces dedicados punto a punto. Además, cada estación base puede equipar 5 cabezas remotas, por lo que serían necesarias hasta 8 estaciones base en la picocelda central. Por estas razones, las pequeñas celdas se implementan mediante repetidores con interfaz aire en lugar de enlaces dedicados de fibra óptica o microondas.

El número de pequeñas celdas necesario para la instalación es:

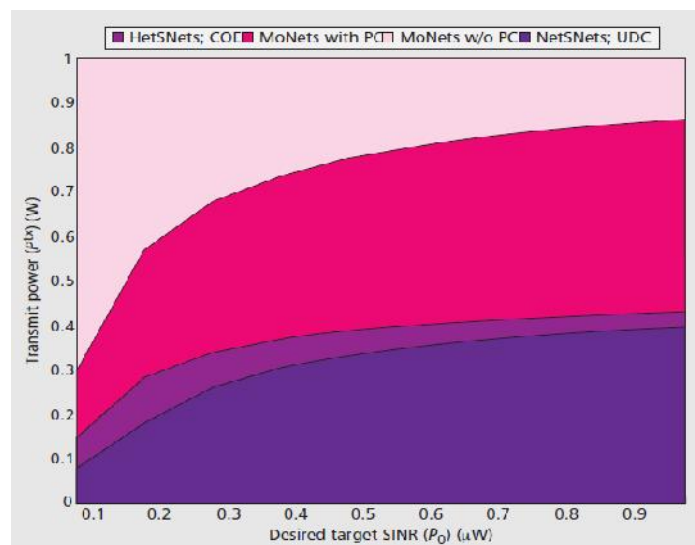
$$N = \begin{cases} \mu \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{R_n^2} = \mu \frac{4R_m}{R_n} & R_m > R_n \\ 0 & R_m \leq R_n \end{cases} \quad \mu = \begin{cases} 0 & \text{no active small-cells} \\ 1 & \text{maximum number of} \\ & \text{small-cells per macrocell.} \end{cases}$$

Donde, $R_1 = R_m - R_n$ y $R_2 = R_m + R_n$. En nuestro caso:

	Picocelda	Pequeña celda
Potencia transmitida	1 vatio	1 vatio
Radio de la celda	500 m	10,50,100 m
Altura de antena	25 m	12,5 m
Altura del terminal móvil	2m	2m
$R_n = 50$ mts		N = 40
$R_n = 100$ mts		N = 20

En el caso de situar las pequeñas celdas dentro del radio de la picocelda, situación reseñada como UDC (Uniformly Distributed Cell), se tendrían los siguientes inconvenientes:

- Se favorece la comunicación de los terminales situados dentro del radio de cobertura de la femtocelda, pero se dificulta el traspaso de celda, obligando a fraccionar la banda de frecuencias de utilización.
- Los abonados situados en el borde de la picocelda se verán seriamente perjudicados, necesitando que sus terminales emitan el máximo de potencia. Esto genera incremento de consumo de los terminales móviles y un aumento de la interferencia cocanal con la consiguiente degradación de la red.



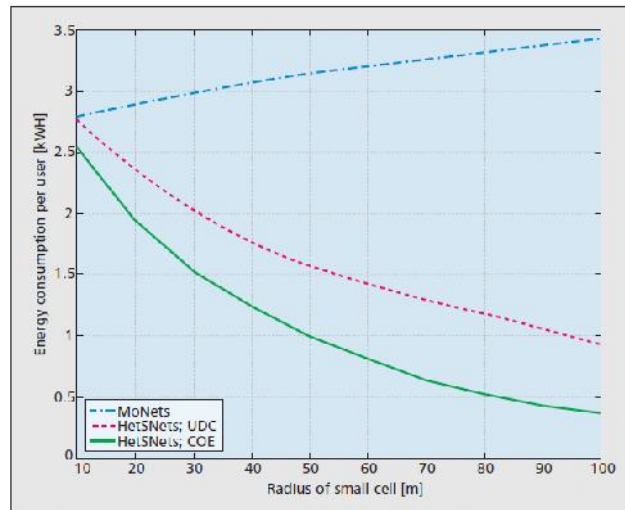
Puede observarse que para cualquier relación SINR la potencia transmitida necesaria es más favorable para los sistemas COE que para el resto de los sistemas estudiados: UDC y equipamiento de macroceldas ya sea con control de potencia o sin control de potencia. No obstante, conviene resaltar que para relaciones SINR bajas, p.e. 0,3 uW, la potencia transmitida disminuye a 0,25 vatios por cada pequeña celda en el caso COE, a 0,3 uW en UDC y mayor de 0,7 uW para redes de macroceldas.

El consumo de energía para una topología como esta es:

$$340 \times 24 \times 365 = 2,98 \text{ MWh/año por celda}$$

El coste de los equipos puede llegar a los 20.000 euros por celda.

De acuerdo con lo indicado en el apartado 2 de este estudio, los niveles de referencia se alcanzarían a distancias entre 1 metro y 1,5 metros. Dadas las alturas a las que están situadas las antenas, no existe ningún tipo de riesgo para los usuarios de este sistema.



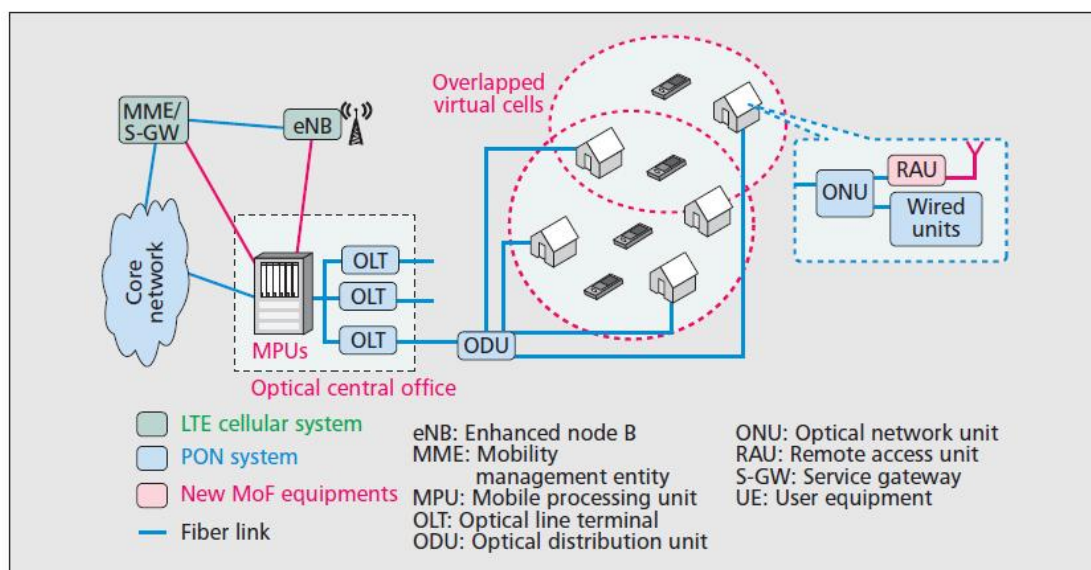
Respecto a los terminales de abonado, el consumo de un equipo de abonado LTE que tiene una potencia máxima de 250 milivatios:

$$0,25 \times 24 \times 365 = 2,2 \text{ kWh / año}$$

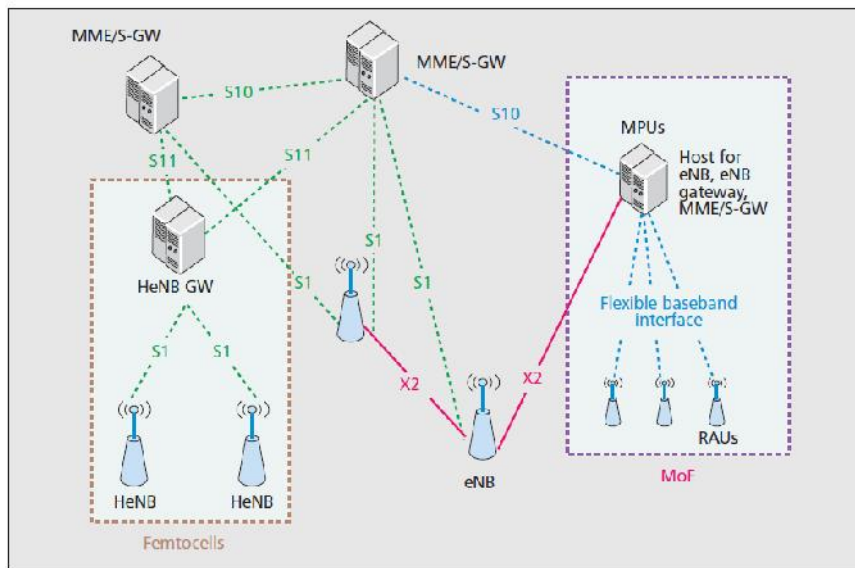
Puede observarse como a medida que aumenta el radio de las pequeñas celdas disminuye el consumo de los terminales de abonado, en el caso de las configuraciones COE, la más favorable, y UDC.

d) Áreas suburbanas: MOBILE OVER FTTX (MoF).

Esta es una propuesta de solución denominada MoF que consiste en una conexión de alta velocidad entre una Unidad de Acceso Remoto (RAU) instalada en las viviendas por los propios usuarios y un servidor Mobile Processing Unit (MPU) para acceso a la red móvil ubicado en la central de conmutación, a través de una red Fiber To The Home.



El planteamiento parte de LTE release 10 y redes **TDM PON FTTx**, ya que hoy en día casi todas las redes **FTTx** están basadas en redes ópticas pasivas **PON**. En una red pasiva de fibra óptica PON, los terminales ópticos de línea (**OLT**) están ubicados en la central de conmutación y conectados a una Unidad de Distribución Óptica (**ODU**) con capacidad para 128 fibras. La Unidad de Red Óptica (ONU) de la vivienda es la que conecta el equipo doméstico, a través de la fibra óptica, con la ODU. En el enlace descendente, la OLT envía información a todas las ONU que tiene conectadas y cada ONU captura su información por medio de un código de identificación. En el enlace ascendente, el acceso es TDMA para permitir su utilización por todas las ONU.



La MPU realiza las funciones de cualquier elemento de una red celular: eNB, HeNB gateway y MME, sin necesidad de crear nuevas interfaces, reduciendo de esta forma los tiempos de señalización en la red. Por el contrario, si se utiliza un nodo HeNB GW como concentrador es necesario establecer nuevas interfaces con el núcleo de red, aumentando los tiempos de respuesta.

5. Conclusiones.

Después del análisis de las redes de femtoceldas realizado en este trabajo, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

1. Las previsiones para el año 2020 sitúan en 100 millones el número de celdas de pequeño tamaño con más de 500 millones de usuarios y un consumo eléctrico anual de 4,4 TWh.
2. Las pequeñas celdas son económicas y fáciles de instalar.
3. Los niveles de referencia, para el caso general de equipos HeNB de 20 milivatios de potencia radiada, se alcanzan a escasos centímetros del transceptor. Para las celdas de 250 milivatios a 20 ó 30 centímetros del equipo emisor, por lo que puede concluirse que son inocuos.
4. Las cifras de consumo de energía eléctrica que se manejan fuerzan a plantear posibles líneas de actuación para reducir el consumo no sólo de las redes celulares sino también del entramado de la red pública de Internet que utilizan como red troncal.
5. La puesta en funcionamiento y retirada de los equipos sin planificación previa obliga a los operadores de telefonía móvil a unas arquitecturas de red específicas para los usuarios de pequeñas celdas.
6. La existencia de infraestructuras de fibra óptica facilita en gran medida la instalación de transceptores domésticos. Además, disminuye el nivel de campo radiado por lo que es incluso aconsejable desde el punto de vista medioambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. *Tentzeris, Georgiadis y Rosselli*. Scanning the Issue. PROCEEDINGS of the IEEE. NOVIEMBRE 2014. Págs. 1644 – 1647.
- [2]. *Weitzen, Li, Anderland y Eyuboglu*. Large Scale Deployment of Residential Small Cells. PROCEEDINGS of the IEEE. MARZO 2014. Págs. 2367 – 2380.
- [3]. *Weitzen, Li, Anderland y Eyuboglu*. Large Scale Deployment of Residential Small Cells. PROCEEDINGS of the IEEE. NOVIEMBRE 2013. Págs. 2367 – 2380.
- [4]. *Zhang, Collings, Chen y Roulet*. Evolving Small Cell Communications Towards Mobile over FTTx Networks. COMMUNICATIONS MAGAZINE DICIEMBRE DE 2013. Págs. 92 - 101
- [5]. *Ni, Liu and Collings*. Indoor Cooperative Small Cell over Ethernet. COMMUNICATIONS MAGAZINE SEPTIEMBRE DE 2013. Págs. 100 – 107.
- [6]. *Ranaweera, Resendre, Reichmann, Iannone, Henry y otros*. Design and Optimization of Fiber Optic Small-Cell Backhaul Based on an Existing Fiber To The Node Residential Access Network. COMMUNICATIONS MAGAZINE SEPTIEMBRE DE 2013. Págs. 62 – 69.
- [7]. *Shakir, Qaraqe, Tabassum, Alouini, Serpedin e Imram*. Green Heterogeneous Small Cell Networks. COMMUNICATIONS MAGAZINE JUNIO 2013. Págs. 52 – 61.

CONCLUSIONES

GRUPO DE TRABAJO Nº 12

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

CONCLUSIONES SOBRE EL PROYECTO CHARMEX (Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment).

La participación de la comunidad española de aerosoles, ya sea en campañas de campo o en las reuniones y grupos de trabajo relacionados con el proyecto ChArME_x es notable. Investigadores españoles participan activamente en el workpackage 1 (emisión), 4 (forzamiento radiativo y el impacto climático) y 5 (deposición). Su participación también contribuye de manera indirecta a cuestiones científicas de los workpackages 2 (envejecimiento) y 3 (calidad del aire y transporte). En particular, la ubicación de las Islas Baleares en el medio de la cuenca del Mediterráneo occidental, donde las condiciones de fondo son generalmente limpias es un punto estratégico para la investigación de la química, el envejecimiento y el transporte de los aerosoles transportados sobre largas distancias. Todas las actividades dirigidas por investigadores españoles y sus colaboradores internacionales llevarán a un mejor conocimiento de los aerosoles del Mediterráneo, en particular de su química, lo que tendrá un impacto sobre la fiabilidad de los modelos climáticos en la región mediterránea.

CONCLUSIONES SOBRE EL PROYECTO ZEWS (ZEro Waste at Sea).

El proyecto ZEWS representa un avance significativo en aspectos muy diversos. En primer lugar por la obtención de datos in-situ sobre los indicadores de la basura marina, en la región elegida, en cuanto a su caracterización, fuentes e impactos.

También por implicar el estudio de la contaminación biológica de los desechos marinos y la identificación de especies no indígenas potencialmente introducidas por las basuras que posibilitará definir aquellas especies que representan una amenaza mayor para los ecosistemas y recursos marinos.

De igual forma se considera innovadora la generación de un modelo de las vías de transporte de los desechos marinos en el Océano Atlántico Norte y la implementación de un Geoportal que proporcionará información cuantitativa en apoyo a la objetivos de minimización de la basura marina requeridos por la DMEM. (consulta pública de la Comisión Europea sobre este aspecto; 2013).

Finalmente por el desarrollo de un proyecto piloto para la observación de los desechos marinos por medio de UAV,s obteniendo datos en grande zonas con menores costes, complementado por una metodología para el control sistemático de la basura marina mediante técnicas de teledetección. Los sensores de los UAV,s (instrumentos de detección en diferentes bandas del espectro visible e IR) permitirán evaluar la posibilidad de detectar la basura marina por medios de satélites de observación de la Tierra, aspecto que en la actualidad no se ha desarrollado para el Atlántico Norte.

A modo de reflexiones personales es posible afirmar que con la experiencia adquirida en el Proyecto MARNOBA y la puesta en marcha de ZEWS, la Asociación Vertidos Cero trata de apoyar la definición de los objetivos ambientales de la DMEM y mostrar:

- La necesidad de integrar los datos con origen en diferentes medios (playas, fondos, flotantes) para generar una base de conocimiento sólida dirigida al diseño de medidas de gestión y la necesidad de metodologías de caracterización estandarizadas.
- La importancia de la colaboración tanto individual como institucional para acometer la problemática de las basuras marinas.
- La relevancia de desarrollar en paralelo acciones de investigación y concienciación ciudadana rentabilizando las sinergias de ambas.

CONCLUSIONES SOBRE SISTEMAS INTELIGENTES DE GESTIÓN DE RIEGO PARA ESPACIOS VERDES URBANOS: PARQUES Y JARDINES

- Las redes inalámbricas de sensores WSN y la comunicación M2M se adaptan perfectamente, por su estructura de intercambio de datos, a las necesidades de monitorización de espacios verdes (cultivos, parques), ya que permiten medir “siguiendo” la variabilidad espacial de la zona de interés.

- En general, los sistemas de riego actuales no tienen en cuenta las necesidades hídricas reales, y frecuentemente se aplica más agua de la necesaria.
- El cálculo de coeficientes específicos para cada variedad y situación permitiría ajustar las cantidades de agua de riego, obteniendo importantes ahorros en coste y en cantidad, con beneficios medioambientales asociados.
- Además de monitorizar parámetros en tiempo real, es necesario avanzar en el desarrollo de algoritmos de análisis de datos masivos para generar información útil al usuario final.

CONCLUSIONES SOBRE LA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA RSD: EJEMPLO PRÁCTICO DE LA CIUDAD DE GRAZ (AUSTRIA).

Gracias a la evaluación en tres días de la flota municipal de autobuses de la ciudad de Graz con el sistema de detección remota de emisiones, se identificaron a los 10 vehículos que más contribuían en emisiones e ineficiencia sobre el resto de la flota. La reparación de estos diez autobuses ha supuesto un ahorro en consumo de combustible anual de 6.000 euros y evitar un promedio de emisión de 5 toneladas de emisiones al ambiente.

CONCLUSIONES SOBRE EL ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE POTENCIA EN REDES LTE.

En este trabajo se ha presentado una descripción de los sistemas de control de potencia empleados en las redes móviles LTE, basados en una combinación de las técnicas de ajuste en lazo abierto y en lazo cerrado (dependiendo de si existe alguna realimentación entre estación base y el terminal). Hemos mostrando su evolución desde GSM y UMTS, explicando cada uno de los elementos que forman parte del proceso de control de potencia y sus posibles modos de configuración.

La importancia de estos sistemas como mecanismo de gestión de recursos radio reside no sólo en la posibilidad de evitar o reducir las interferencias sobre la interfaz aire, algo para lo que también se emplean las estrategias de ICIC descritas, sino también en la capacidad de los mismos para adaptar en cada momento la potencia de transmisión de los terminales a las condiciones del canal de propagación. De esta manera se evita tener que transmitir siempre con la máxima potencia que permite el dispositivo.

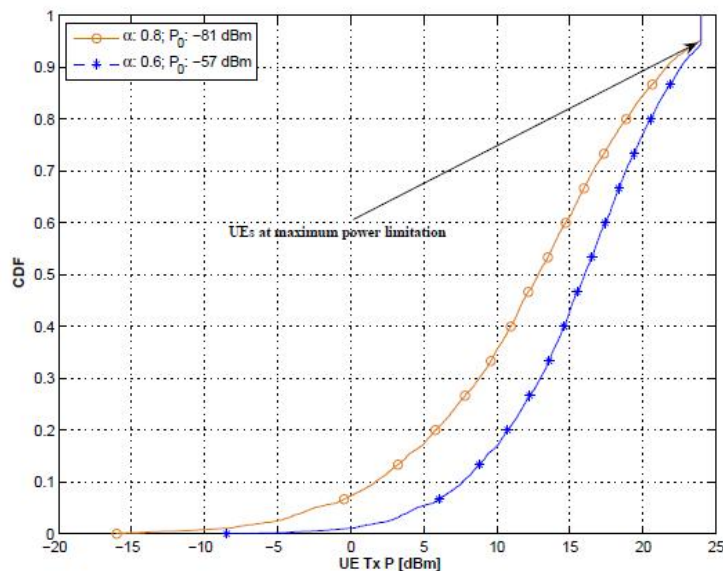


Figura 15. Distribución de potencia transmitida por un terminal utilizando dos configuraciones distintas de P_0 y α .

Esto último provoca una reducción importante en el consumo medio de los dispositivos, con el ahorro energético que ello conlleva, y el aumento en la duración de la batería. También permite ejercer un cierto control sobre los niveles de emisión de las instalaciones radioeléctricas de telefonía móvil, minimizando el impacto medioambiental de los mismos y ajustándolos a los límites establecidos según la normativa vigente (R.D. 1066/2001).

Todas estas funcionalidades de la red radio deben suministrarse asegurando siempre el cumplimiento de unos ciertos niveles de calidad de servicio en las comunicaciones, contratados por el usuario al operador de telefonía móvil encargado de proveer el servicio. El sistema deberá almacenar esta información, relativa a cada usuario, para poder actuar conforme a ella durante los procesos de gestión de recursos.

CONCLUSIONES SOBRE REDES DE FEMTOCELDA.

Después del análisis de las redes de femtoceldas realizado en este trabajo, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

1. Las previsiones para el año 2020 sitúan en 100 millones el número de celdas de pequeño tamaño con más de 500 millones de usuarios y un consumo eléctrico anual de 4,4 TWh.
2. Las pequeñas celdas son económicas y fáciles de instalar.
3. Los niveles de referencia, para el caso general de equipos HeNB de 20 milivatios de potencia radiada, se alcanzan a escasos centímetros del transceptor. Para las celdas de 250 milivatios a 20 ó 30 centímetros del equipo emisor, por lo que puede concluirse que son inocuos.
4. Las cifras de consumo de energía eléctrica que se manejan fuerzan a plantear posibles líneas de actuación para reducir el consumo no sólo de las

redes celulares sino también del entramado de la red pública de Internet que utilizan como red troncal.

5. La puesta en funcionamiento y retirada de los equipos sin planificación previa obliga a los operadores de telefonía móvil a unas arquitecturas de red específicas para los usuarios de pequeñas celdas.

6. La existencia de infraestructuras de fibra óptica facilita en gran medida la instalación de transceptores domésticos. Además, disminuye el nivel de campo radiado por lo que es incluso aconsejable desde el punto de vista medioambiental.