

## BIOGRAFÍA



**Ramón Martínez Rodríguez-Osorio** nació en Madrid, en 1975. Recibió los títulos de Ingeniero de Telecomunicación y de Doctor Ingeniero por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) en 1999 y 2004, respectivamente.

En 1999 se incorporó como investigador al Grupo de Radiación del Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones de la ETSI de Telecomunicación de la UPM. Para la realización de su Tesis Doctoral, disfrutó de una beca de investigación predoctoral de Formación de Personal Investigador (FPI). Desde 2002, desarrolla su labor docente e investigadora en el mismo grupo de investigación como Profesor Asociado. Ha dirigido seis Proyectos Fin de Carrera y participa en diversos proyectos de investigación de financiación pública (CICYT, MCYT, CE) y privada (Sice, Indra, Sogecable).

En la actualidad, es miembro de la Red Europea de Antenas (ACE), donde colabora en las actividades relacionadas con antenas inteligentes y sistemas MIMO, y la impartición de cursos de formación.

Sus temas de investigación de interés son el análisis de prestaciones de antenas inteligentes en sistemas de comunicaciones móviles, estudios de planificación y dimensionado de redes móviles con sistemas avanzados de antenas, implementación en DSPs de algoritmos de conformación de haz, y el análisis y modelado de interferencias de ruido impulsivo.

---

*Estudio sobre las Prestaciones de Antenas  
Inteligentes en Sistemas de Comunicaciones Móviles  
de Tercera Generación (UMTS)*

– RESUMEN –

*Autor:* Ramón Martínez Rodríguez-Osorio

*Director de Tesis:* Prof. Leandro de Haro Ariet

Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación  
Universidad Politécnica de Madrid

*E.T.S.I. de Telecomunicación  
Ciudad Universitaria s/n  
28040 Madrid-ESPAÑA*

*Fecha de lectura:* 8 de Enero de 2004

*Calificación:* Sobresaliente Cum Laude

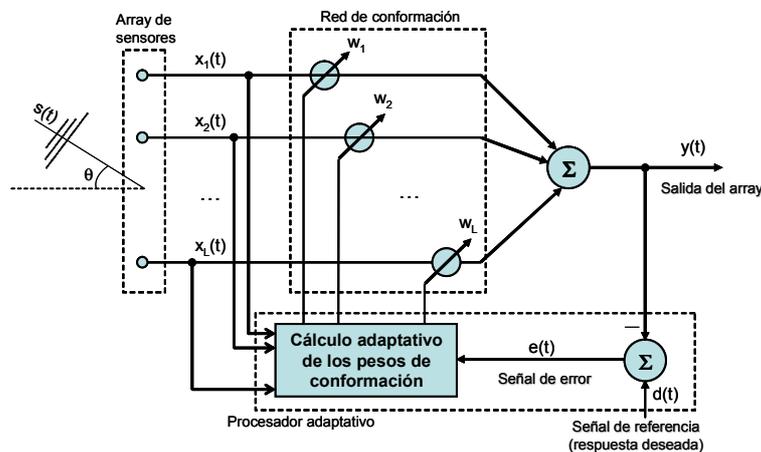
## ÍNDICE

1.	Introducción. Motivación y objetivos.....	3
2.	Estudio de prestaciones en escenarios de despliegue a nivel de enlace.....	4
3.	Cancelación de ruido impulsivo con antenas inteligentes .....	6
4.	Definición de un interfaz enlace-sistema.....	8
5.	Prestaciones de antenas inteligentes a nivel de sistema.....	9
6.	Aplicación a un prototipo real: ADAM .....	12
7.	Conclusiones y principales aportaciones de la Tesis Doctoral .....	13
8.	Referencias .....	15
9.	Lista de publicaciones de Ramón Martínez relacionadas con la Tesis Doctoral .....	16
10.	Desarrollo industrial: el prototipo ADAM.....	20

## 1. INTRODUCCIÓN. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

El despliegue de redes 3G lleva implícito la demanda de servicios de comunicaciones móviles de alta tasa binaria que demandan muchos recursos de la red. A medida que la demanda de servicios multimedia crezca, la capacidad de las redes móviles se verá colapsada, haciendo necesario el desarrollo de nuevas tecnologías que maximicen la eficiencia espectral [Tsoulos00]. La tecnología de antenas inteligentes se presenta como una alternativa viable frente a otras soluciones como es el aumento en la densidad de estaciones base por área de servicio [Godara97].

Como se muestra en la Figura 1, una antena inteligente está formada por un conjunto de elementos radiantes, alimentados por unos coeficientes o pesos de conformación, que sintetizan un diagrama de radiación de acuerdo con un determinado criterio de optimización. El algoritmo de conformación es el encargado de calcular este vector de pesos, y pueden ser de diferentes tipos: antenas adaptativas basadas en un criterio MMSE o basadas en la maximización de la potencia recibida del usuario, o pueden mantenerse constantes y sintetizar un conjunto de haces fijos, como son las antenas de haces conmutados. Como se aprecia en la figura, es necesario disponer de una señal de referencia para el cálculo de los pesos. Dicha señal depende de cada sistema.



**Figura 1. Esquema básico de una antena inteligente.**

Algunas de las principales ventajas que ofrece la tecnología de antenas inteligentes son:

- **Aumento de la cobertura:** gracias a la directividad obtenida con un array de antenas con respecto de una antena sectorial, se puede incrementar el radio celular. Por ello, es necesario instalar un menor número de estaciones base por unidad de área, lo que supone un ahorro en los costes asociados al despliegue y mantenimiento de la red.
- **Aumento de capacidad por reducción de interferencia:** en zonas densamente pobladas, donde las señales de los usuarios es la mayor fuente de interferencias, una antena adaptativa produce un aumento en la relación señal a interferencia (SINR), por el efecto conjunto de cancelación de los usuarios interferentes y el aumento en el nivel de la señal deseada.
- **Mejora de la eficiencia espectral:** gracias a la separación angular de los usuarios dentro de la celda, se pueden reutilizar los canales dentro de la misma celda. Este nuevo esquema de separación de usuarios recibe el nombre de multiplexación por división espacial (SDMA). Con ello, en un sistema TDMA, se podría reutilizar el mismo slot de tiempo por varios usuarios, mientras que en CDMA la ventaja se obtiene por reutilizar el código de ensanchamiento dentro de la celda.
- **Reducción en la potencia transmitida:** gracias al aumento de la ganancia, se reduce la contaminación electromagnética y los terminales móviles transmiten menos potencia, lo que se traduce en una mayor duración de las baterías y la posibilidad de diseñar terminales de

menor tamaño. En el lado de la estación base, supone una disminución del tamaño de los amplificadores de potencia utilizados en las cadenas de RF asociadas a cada elemento del array.

- Desarrollo de nuevos servicios: con la utilización de antenas inteligentes, se dispone de información espacial de los usuarios, lo que permite establecer con mucha exactitud la posición de los usuarios; esta capacidad facilita el establecimiento de servicios de localización para emergencias o facturación.

Las antenas inteligentes son especialmente adecuadas para las redes de Tercera Generación basadas en UMTS, ya que emplean un esquema de acceso basado en la multiplexación por división de código o CDMA. Este método de acceso al medio es muy sensible al nivel de interferencia presente en el despliegue, de modo que la capacidad del sistema es inversamente proporcional al nivel de interferencia presente en el escenario.

A pesar de las ventajas comentadas, el despliegue de antenas inteligentes en los sistemas de comunicaciones móviles no ha sido una realidad. En parte, este hecho se deriva de que no se ha podido cuantificar ni valorar el impacto de la antena inteligente sobre la red. La instalación de la antena inteligente en la estación base supone una modificación en las etapas de planificación y dimensionado de la red celular, un cambio en la gestión de los recursos radio (control de potencia, traspasos entre celdas) y, finalmente, un cambio en la tecnología necesaria en el receptor (por ejemplo, el criterio y algoritmo de conformación empleados impondrá unos determinados requisitos de procesado digital).

En cuanto a los cambios en la etapa de planificación, la introducción de la antena inteligente supondrá una reducción en el número de estaciones base necesarias para dar cobertura a una zona de servicio y un aumento en el número de usuarios que puede atenderse [Boukalov00]. Por otro lado, es necesario definir y cuantificar un conjunto de parámetros que caractericen las prestaciones de la antena inteligente en diferentes entornos, para poder seleccionar el esquema de conformación más apropiado en cada caso.

Hasta la fecha, no se conocen estudios de planificación con antenas inteligentes, puesto que la mayoría de análisis existentes se hace a nivel de enlace para evaluar el algoritmo de conformación, sin entrar en aspectos de sistema. Por ello, el principal objetivo de esta Tesis Doctoral es el desarrollo de una herramienta de simulación a nivel de sistema con la que poder realizar estudios de planificación y dimensionado con antenas inteligentes. Para llegar a este objetivo, se han definido un conjunto de hitos adicionales, como la especificación de los parámetros de prestaciones, la selección de un conjunto de escenarios representativos y la definición de un interfaz entre las simulaciones de enlace y sistema.

## 2. ESTUDIO DE PRESTACIONES EN ESCENARIOS DE DESPLIEGUE A NIVEL DE ENLACE

Para evaluar las prestaciones ofrecidas por una antena inteligente, hay que definir un conjunto de escenarios de despliegue realistas que pueden encontrarse habitualmente en la práctica [Goransson00]. Estos escenarios vienen caracterizados por una determinada distribución espacial de usuarios, servicios demandados (voz, datos de baja y alta tasa binaria), canal de propagación (multitrayecto, dispersión angular y temporal, velocidad de los usuarios móviles). En particular, se ha estudiado el comportamiento de las antenas inteligentes en los entornos definidos en la Tabla I.

En cuanto a la señal de referencia empleada en la conformación, para el sistema W-CDMA puede obtenerse los bits piloto presentes en el canal de control DPCCH que transmite cada usuario hacia la estación base [3GPP]. Para el cálculo de los pesos, debe demodularse dicho canal físico para cada usuario, primero haciendo un descrambling (para separar las contribuciones de los distintos usuarios) y posteriormente desensanchando del canal DPCCH (para separarlo respecto de los canales de datos o DPDCH).

Tabla I. Escenarios de despliegue.

Escenario #	Tipo de servicio y % de usuarios			Velocidad	Distribución espacial en sector angular de 120°
	voz (12.2 kbit/s)	datos LBR (64 kbit/s)	datos HBR (144 kbit/s)		
Urbano con usuarios de voz	100	0	0	0 km/h	uniforme
Urbano con usuarios de datos	50	30	20	0 km/h	uniforme
Hot Spot	50	30	20	voz: 3 km /h LBR: 0 km/h HBR: 0 km/h	voz: uniforme LBR: hot spot HBR: hot spot
Rural	50	50	0	50-120 km/h	uniforme

Por otro lado, el comportamiento de la antena inteligente dentro de cada escenario viene condicionado por el algoritmo de conformación. Sus prestaciones tienen, por tanto, un alto componente estadístico que hace que valores medios de las prestaciones no ofrezcan una caracterización completa y precisa de la antena inteligente. Por ello, en esta Tesis se propone el uso de funciones de distribución acumuladas de los parámetros de prestaciones como son la ganancia, la mejora de SINR respecto de una antena sectorial convencional o la capacidad de cancelación de interferencias.

Los algoritmos de conformación estudiados en la Tesis Doctora son de distintos tipos:

- Basados en el criterio MMSE: algoritmos iterativos NLMS y RLS [Haykin96].
- Basados en maximizar la SNR: algoritmos EIGEN y LPM, partiendo del cálculo de los autovalores de la matriz de autocorrelación de las señales recibidas [Ahn01].
- Antenas de haces conmutados: SWB-G y SWB-SIR, cuyos criterios de selección de haz son la máxima potencia recibida y la máxima relación señal a interferencia (SIR), respectivamente [Liberti99].

La Figura 2 muestra los resultados para el servicio de voz y datos con distribución espacial uniforme y en presencia de hot spot. En primer lugar, destaca la gran varianza de las curvas, lo que hace inviable el uso de valores medios para caracterizar las prestaciones. Para los usuarios de voz, existe una gran dependencia con el escenario, y para los algoritmos basados en el cálculo de autovalores, empeora el comportamiento respecto de la antena sectorial.

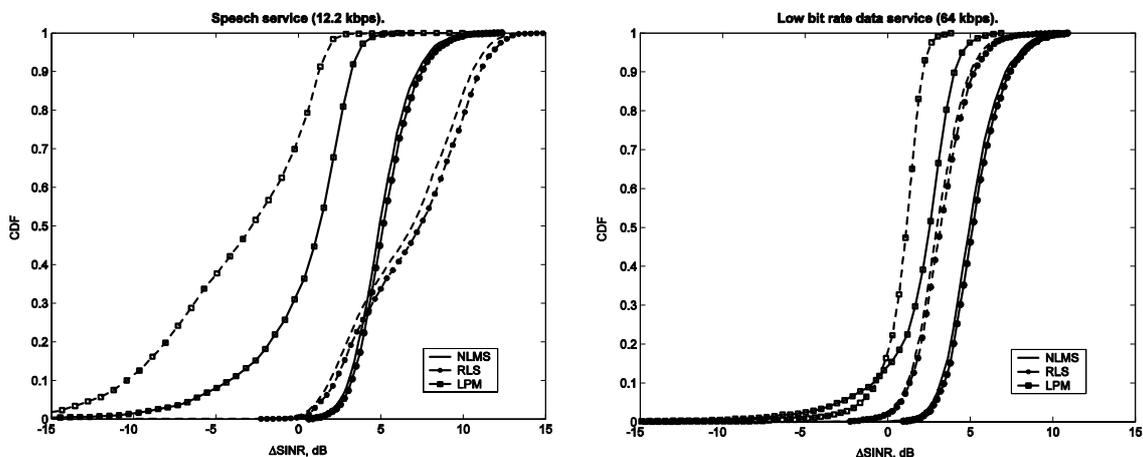


Figura 2. Funciones de distribución de probabilidad de la mejora de SINR para usuarios de voz y de datos a 64 kbit/s (línea continua: distribución uniforme; discontinua: hot spot).

La Tabla II presenta los valores medios de mejora de SINR en los escenarios de referencia. Estos valores deben ser empleados únicamente en primera aproximación para evaluar las prestaciones, ya que sólo una caracterización estadística completa nos ofrece resultados precisos. Destacan las prestaciones de los usuarios de voz en el caso de tener un hot spot de tráfico, donde la mejora está muy por encima de la ganancia por apuntamiento, gracias a la cancelación de las contribuciones de los usuarios de datos. En el resto de casos, cuando no existen direcciones preferentes de interferencia, las mejoras de SINR son muy similares a la ganancia obtenida

**Tabla II. Valores de medios de la mejora de SINR en los escenarios de referencia.**

Escenarios		$\Delta$ SINR media (dB)					
		NLMS	RLS	SWB-G	SWB-SIR	EIGEN	LPM
<b>Voz</b>	<b>voz</b>	5.30	5.41	4.33	4.37	2.27	2.53
	<b>Datos</b>						
<b>Datos</b>	<b>voz</b>	5.50	5.72	4.54	4.61	1.29	1.44
	<b>LBR</b>	5.53	5.70	4.45	4.52	2.46	2.69
	<b>HBR</b>	5.49	5.64	4.42	4.49	2.34	2.62
<b>Hot spot</b>	<b>voz</b>	7.84	8.26	6.12	6.37	-1.36	-1.55
	<b>LBR</b>	3.47	3.69	2.57	2.98	1.22	1.23
	<b>HBR</b>	3.63	3.88	2.70	3.06	1.17	1.17
<b>Rural</b>	<b>voz</b>	5.49	5.71	4.56	4.61	1.46	1.62
	<b>LBR</b>	5.62	5.77	4.50	4.56	2.69	2.95

La principal conclusión de este punto es que las prestaciones de una antena inteligente dependen, al menos, de los siguientes factores: algoritmo de conformación, distribución espacial de la interferencia, y del servicio demandado por los usuarios.

Por tanto, para un mismo escenario puede ser necesario el uso de diferentes esquemas de conformación, en función del tipo de servicio. Por ello, es importante disponer de una herramienta que evalúe las distintas alternativas y seleccione la mejor en función de las prestaciones. Por otro lado, el sistema de procesado debe ser además flexible para poder actualizar el algoritmo de conformación de acuerdo con las características del entorno.

En el Capítulo 3 y Anexos de la Tesis Doctoral pueden encontrarse resultados de todos los escenarios y distribuciones de servicios, para todos los esquemas de conformación estudiados.

### 3. CANCELACIÓN DE RUIDO IMPULSIVO CON ANTENAS INTELIGENTES

Habitualmente, el análisis de las prestaciones de una antena inteligente se hace en presencia de interferencias procedentes de otros usuarios que emplean el mismo canal sin considerar otras fuentes de señal no deseadas. No obstante, el sistema WCDMA está limitado por cualquier fuente de interferencia presente en el entorno. En particular, como demuestran las campañas de medida presentadas en [García02], la contribución de las fuentes de ruido impulsivo en la banda de UMTS puede ser significativa en comparación con la potencia recibida de otros usuarios.

En esta Tesis se ha realizado un estudio para evaluar el efecto del ruido impulsivo sobre el sistema UMTS y, además, se propone como novedad el uso de antenas inteligentes para cancelar esta contribución. Las simulaciones realizadas se han realizado para diferentes niveles de potencia de ruido impulsivo dada por la relación entre su potencia y la recibida de otros usuarios (SSNR). Para modelar el ruido impulsivo se han empleado las distribuciones estadísticas de amplitud, duración y separación entre pulsos de ruido obtenidas en la campaña de medidas en un escenario urbano recogida en [García02]. Se trata por ello de un análisis en condiciones reales.

Como se desprende de la Figura 3, el ruido impulsivo afecta a la comunicación, incrementando el valor de BER. Si se emplea una antena inteligente, el número de errores disminuye drásticamente, puesto que el algoritmo de conformación intenta cancelar la contribución de la interferencia impulsiva. De ello se concluye que un sistema de antena inteligente puede contribuir a reducir el efecto degradante del ruido impulsivo.

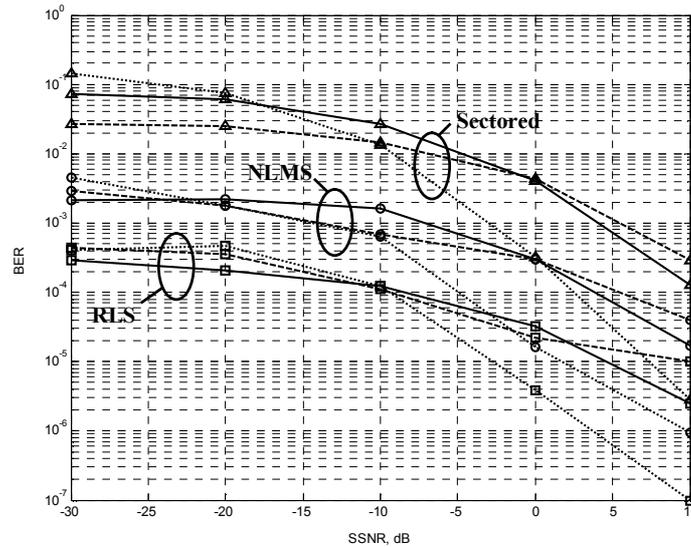


Figura 3. BER en presencia de ruido impulsivo en función de la SSNR y la ganancia de procesado (línea de puntos: 12.2 kbit/s; sólida: 64 kbit/s; discontinua: 144 kbit/s).

Para completar el estudio, se desarrolló un prototipo generador de interferencias de ruido impulsivo, partiendo de los parámetros obtenidos en campañas de medidas. El prototipo está basado en tecnología DSP, lo que permite generar ruido impulsivo de diferentes características (potencia, ancho de banda, etc.) cambiando únicamente los ficheros fuente de datos. Su arquitectura es modular y muy flexible, como se recoge en la Figura 4, lo que permite sintetizar ruido impulsivo en cualquier banda de frecuencia sin más sustituir la etapas de RF.

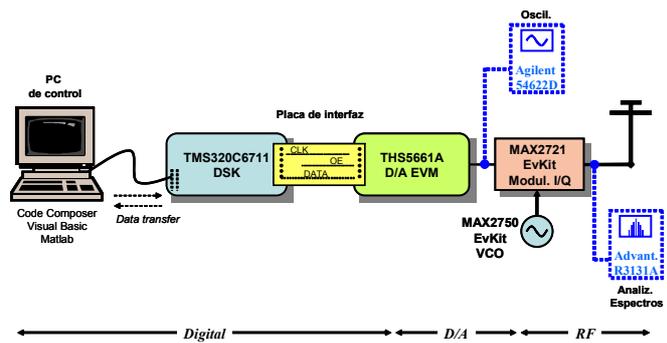


Figura 4. Diagrama de bloques del generador de ruido impulsivo.

La Figura 5 muestra el prototipo y algunas medidas del ruido impulsivo sintetizado.

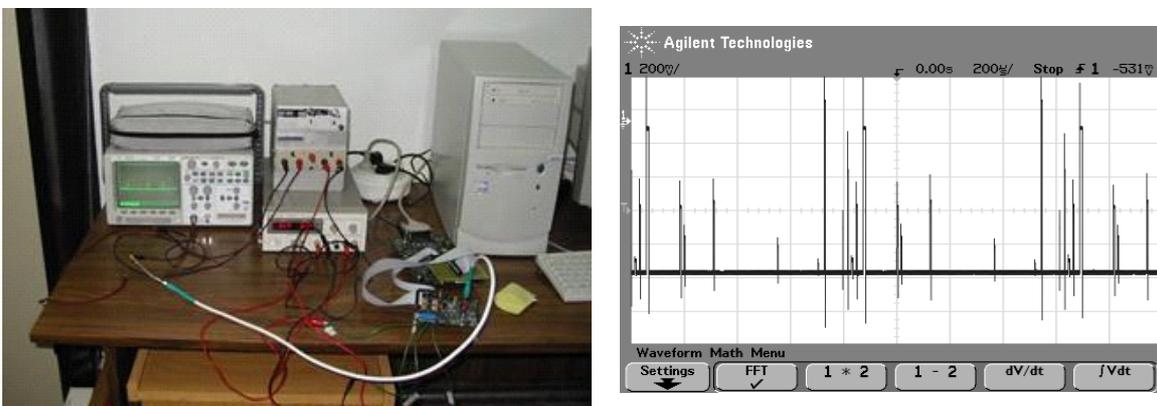


Figura 5. Montaje de laboratorio y trenes de pulsos sintetizados (200  $\mu$ seg/div).

#### 4. DEFINICIÓN DE UN INTERFAZ ENLACE-SISTEMA

El principal inconveniente con el que nos encontramos a la hora de introducir una antena inteligente en un simulador de sistema es que, a diferencia de una antena sectorial, no se conoce el diagrama de radiación a priori, puesto que éste depende de un gran número de parámetros: algoritmo de conformación, canal de propagación, tipo de servicio demandado y distribución espacial de usuarios. Por ello, la ganancia de la antena no puede introducirse de manera directa en las expresiones del balance de enlace características del simulador de sistema.

En estas condiciones, debe plantearse la búsqueda de un parámetro que caracterice las prestaciones de la antena inteligente y pueda introducirse en el simulador de sistema. Como se ha comprobado, las prestaciones de la antena inteligente no pueden caracterizarse mediante los valores medios de parámetros como la ganancia o la mejora de SINR, por lo que el interfaz a definir debe considerar la estadística completa de dichos parámetros.

Por ello, en estos casos se define el parámetro de ganancia estadística para indicar la mejora de prestaciones estadística que puede obtenerse con una antena inteligente sobre una antena sectorial convencional. Todas las curvas de mejora de SINR o de ganancia expresadas por funciones de distribución de probabilidad constituyen ejemplos de ganancias estadísticas. Para cada escenario, tipo de servicio y algoritmo de conformación, se obtendrá una curva de prestaciones diferente.

La definición del interfaz enlace-sistema dependerá del objetivo del estudio [Hämäläinen97]. Así, si se desea analizar cuánto puede incrementarse el radio de las celdas y evaluar la disminución del número de estaciones base, bastaría con incluir en las ecuaciones de balance de enlace la mejora de ganancia que se obtiene con la antena inteligente. Por otro lado, si lo que se desea estudiar es el aumento de capacidad obtenido, el parámetro que debe introducirse en las simulaciones a nivel de sistema es la mejora de SINR respecto de la antena sectorial.

En esta Tesis, se propone definir el interfaz a partir de las distribuciones de probabilidad acumuladas de la mejora de SINR obtenidas a nivel de enlace, puesto que este es el parámetro que mejor evalúa la mejora en la capacidad del sistema. En el caso de antenas de haces conmutados, la mejora de SINR puede calcularse directamente a partir del diagrama de los haces y la distribución espacial de los usuarios, aunque en las simulaciones se ha empleado la misma metodología de simulación e interfaz enlace-sistema para antenas conmutadas y antenas adaptativas.

La construcción del interfaz comienza con la selección de las distribuciones de probabilidad de la mejora de SINR para cada escenario de despliegue, tipo de servicio y algoritmo de conformación empleado. A cada usuario presente en el sistema, se le asignan dos valores de mejora de SINR (para los enlaces ascendente y descendente) aplicando el método de la transformada inversa [Law91], como se muestra en la Figura 6. De esta forma, los valores de SINR seleccionados representarán fielmente la estadística real obtenida de las simulaciones de enlace si el número de usuarios de la simulación es lo suficientemente grande.

Una vez obtenidos los valores de mejora de SINR, éstos se introducirán en las ecuaciones de balance de enlace para cada usuario dentro del simulador de sistema W-CDMA. Por otro lado, destacar que existirá un valor de mejora de SINR para cada uno de los enlaces activos móvil-estación base, ya que el usuario puede encontrarse en situación de traspaso blando y establecer comunicación con varios sectores simultáneamente.

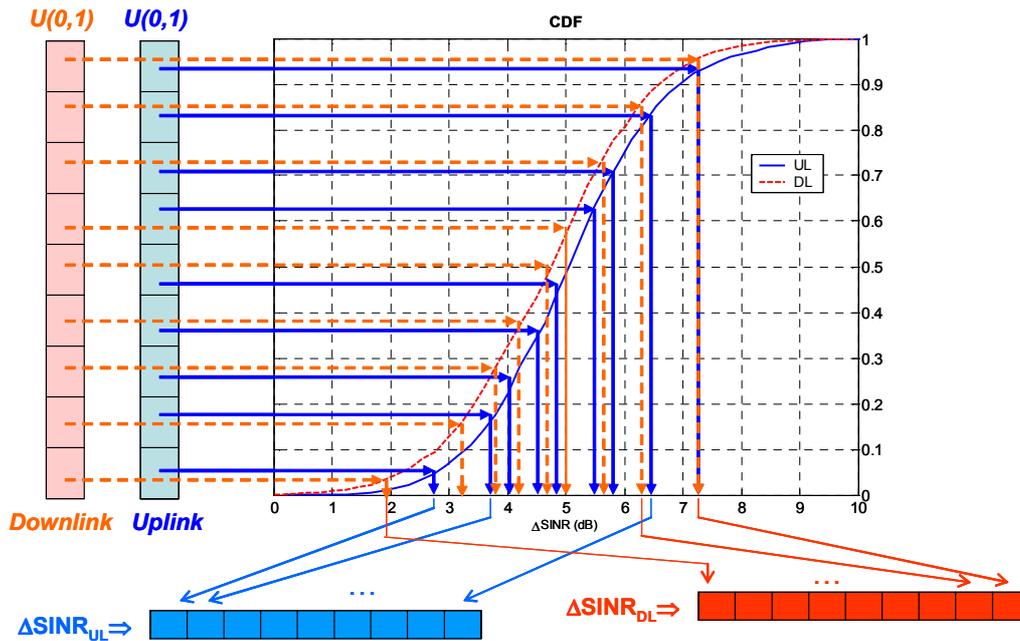


Figura 6. Definición del interfaz enlace-sistema para incluir antenas inteligentes a nivel de sistema.

## 5. PRESTACIONES DE ANTENAS INTELIGENTES A NIVEL DE SISTEMA

El objetivo de las simulaciones de sistema o de red es ajustar los niveles de potencia transmitida por móviles y estaciones base requeridos para satisfacer unos requisitos de calidad o  $E_b/N_0$  especificados, y evaluar el efecto del nivel de potencia requerido sobre las características del sistema: matrices de interferencia, carga de la red, o tráfico cursado [Laiho02].

El escenario de la simulación es un entorno macrocelular formado por una distribución uniforme de 19 estaciones base, cada una dando servicio a tres sectores celulares de  $120^\circ$  con forma hexagonal. La separación inicial entre estaciones base es de 3 km, con un radio celular de 1.5 km. La distribución espacial de los usuarios puede ser uniforme, como se muestra en la Figura 7, o incluir hot spots de tráfico.

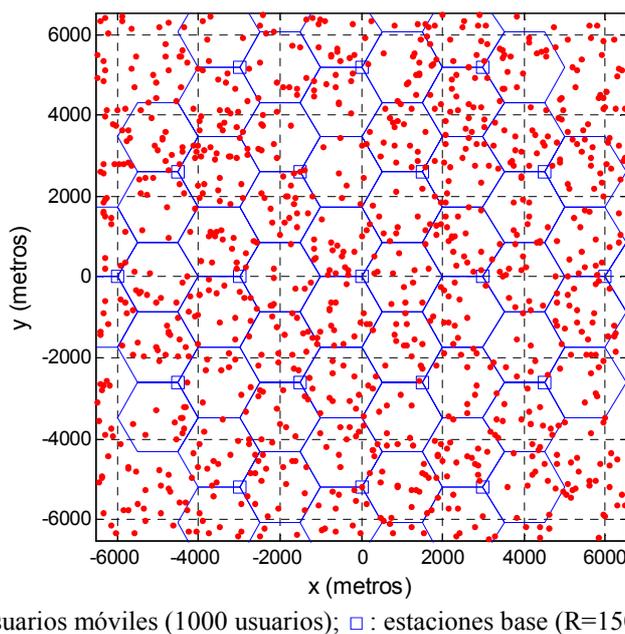


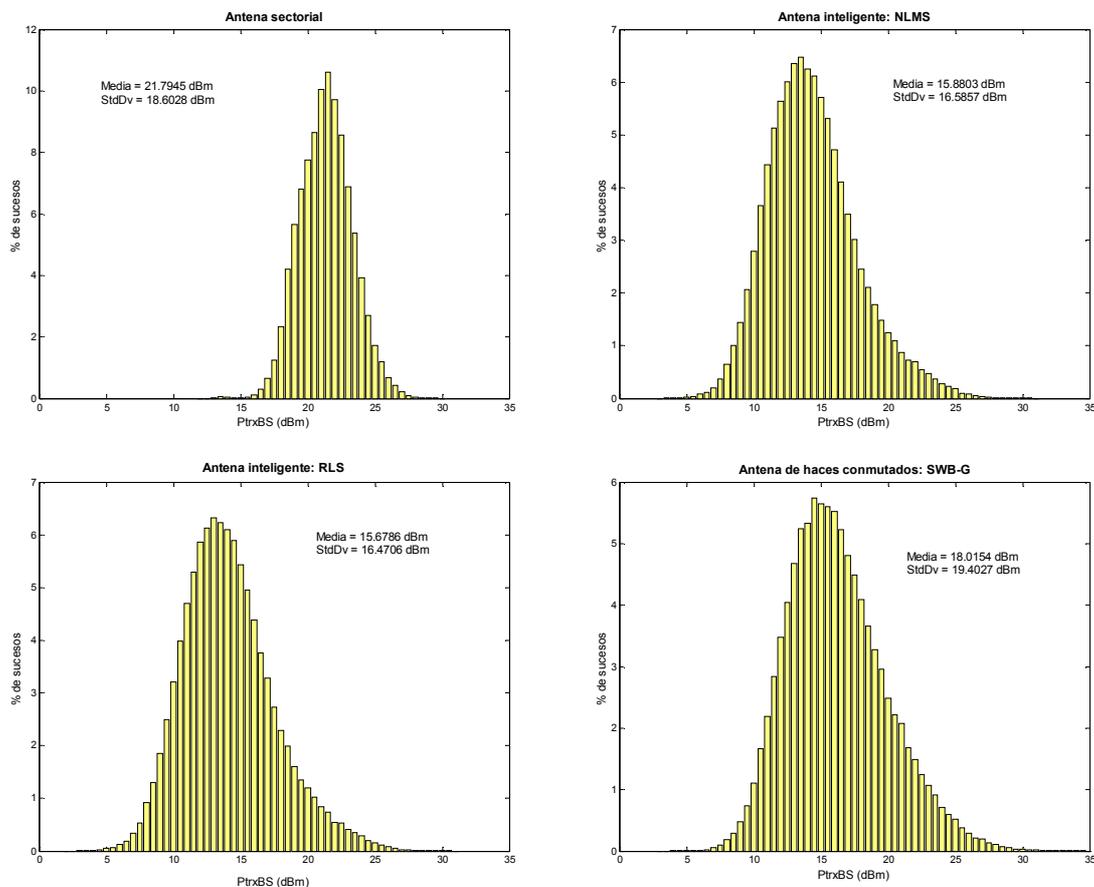
Figura 7. Entorno macrocelular típico con celdas hexagonales y distribución uniforme de usuarios.

La simulación de sistema es un proceso iterativo que consta de los siguientes pasos:

- 1) Inicialización: se dan los valores iniciales de todas las variables del sistema, importación de las prestaciones con antena inteligente (mejora de SINR) de los resultados de enlace, y asignación del mejor servidor (según los niveles del canal piloto CPICH).
- 2) Iteración en enlace ascendente: se calcula la potencia de transmisión de los terminales móviles, el nivel de carga de cada estación base (efecto cerca-lejos), y las contribuciones de interferencia intra y extracelda.
- 3) Iteración en enlace descendente: cálculo de la potencia transmitida por las estaciones base para satisfacer los umbrales  $E_b/N_0$  especificados, y análisis de la interferencia en las posiciones de los terminales.
- 4) Post-procesado y generación de resultados: cuando la situación en la red es estable y los niveles de potencia han llegado a la convergencia, se obtienen estadísticas sobre las potencias transmitidas, así como mapas de carga, cobertura y tráfico cursado. Todo ello nos dará información sobre el aumento de capacidad y del radio de cobertura.

Para que el proceso iterativo llegue a converger, en cada iteración se actualizan los niveles de potencia en ambos enlaces y se bloquean aquellos enlaces base-móvil que no puedan establecerse. Las causas del bloqueo vienen dadas por los niveles de máximo de transmisión por enlace activo, potencia disponible y niveles de carga en sectores por encima de los umbrales.

La Figura 8 muestra la potencia transmitida por las estaciones base en forma de histogramas. La reducción del nivel de potencia obtenido con antenas adaptativas (NLMS y RLS) está en torno a 6 dB, y con antenas de haces conmutados, la disminución es de 3 dB. Similares resultados se obtienen cuando se analiza la potencia transmitida por los terminales móviles, lo que se traduce en una reducción en los niveles de carga de los sectores y, por tanto, en un aumento de la capacidad del sistema (se puede dar servicio a un mayor número de usuarios manteniendo el mismo nivel de carga).



**Figura 8. Histogramas de la potencia transmitida por las estaciones base (escenario urbano con 3000 usuarios de voz).**

La Figura 9 muestra cómo varía el porcentaje de usuarios que quedan fuera de servicio, a medida que se incluyen más usuarios de voz dentro del entorno. Las antenas controladas mediante NLMS y RLS son las menos sensibles al aumento en el número de usuarios. Entre éstos y las antenas sectoriales, se encuentran las antenas de haces conmutados, presentando unas prestaciones intermedias (ligeramente superiores si se utiliza el criterio de selección de haz basado en la máxima SIR). Finalmente, los algoritmos EIGEN y LPM ofrecen prestaciones más limitadas, debido a la sensibilidad del cálculo de autovalores al incrementarse el ruido o interferencia del sistema. En todos los casos, a medida que aumenta el número de usuarios se reduce el porcentaje de usuarios activos a que se puede ofrecer un servicio de calidad, reduciéndose por tanto la capacidad neta del sistema al aumentar la carga.

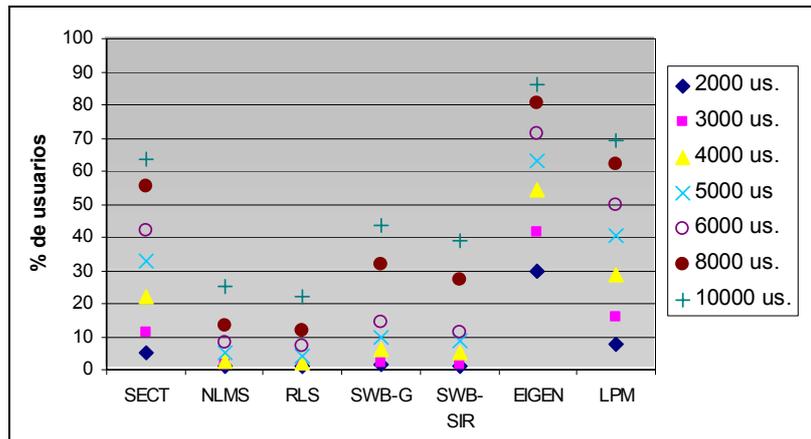


Figura 9. Porcentaje de usuarios bloqueados en función de la carga del sistema.

Es interesante analizar también cómo puede incrementarse el radio celular cuando se emplea una antena inteligente en la estación base. Para ello, se repiten las simulaciones aumentando dando cobertura a la misma región de  $6.5 \times 6.5 \text{ km}^2$ , pero únicamente con 7 emplazamientos, lo que equivale a aumentar el radio celular en un 67 % (hasta 2.5 km). Cuando se emplean las antenas sectoriales, haces conmutados y antenas adaptativas, el porcentaje de usuarios bloqueados alcanza el 40, 23 y 10 %, respectivamente. La Figura 10 muestra cómo se distribuyen espacialmente los usuarios bloqueados.

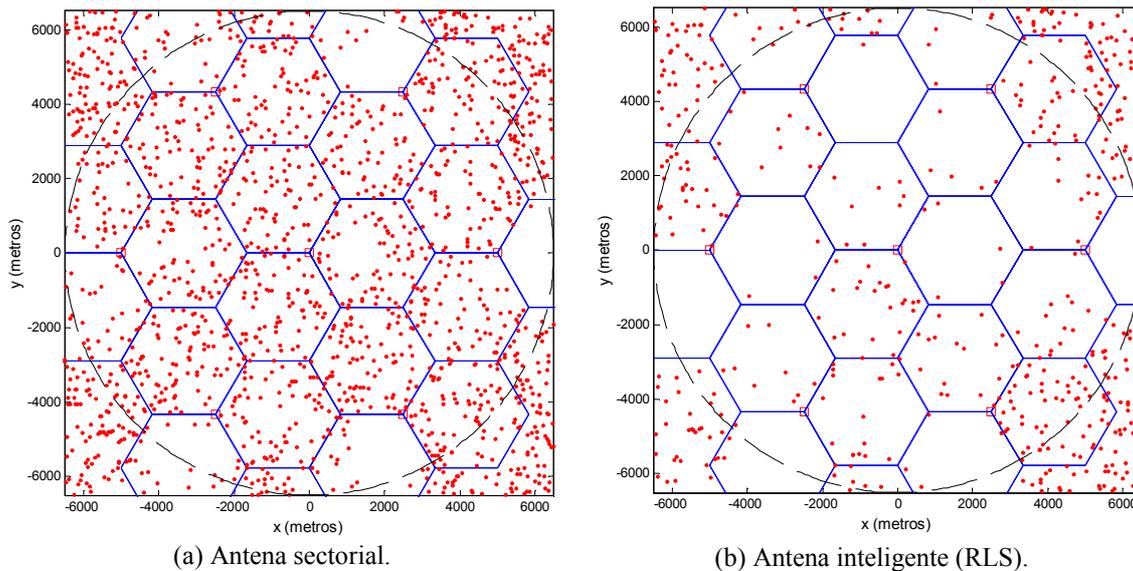
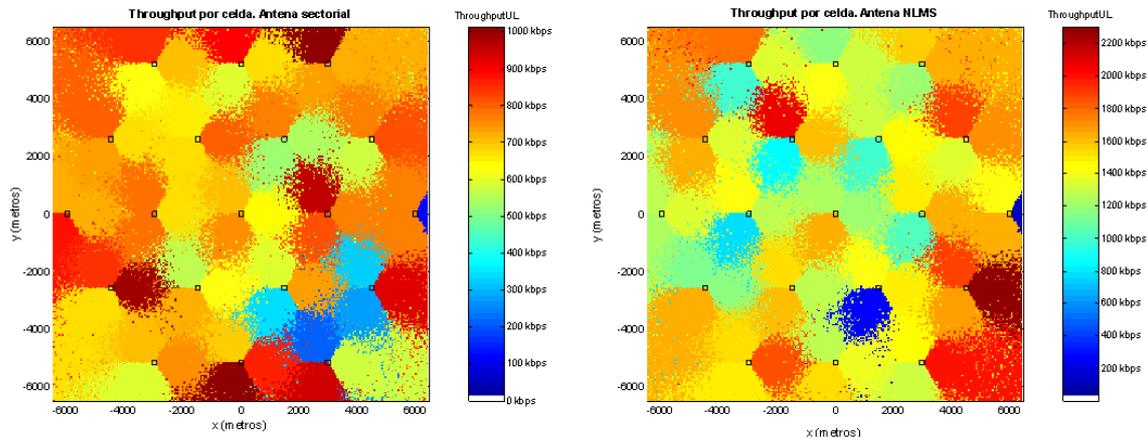


Figura 10. Distribución espacial de usuarios bloqueados cuando se reduce el número de emplazamientos.

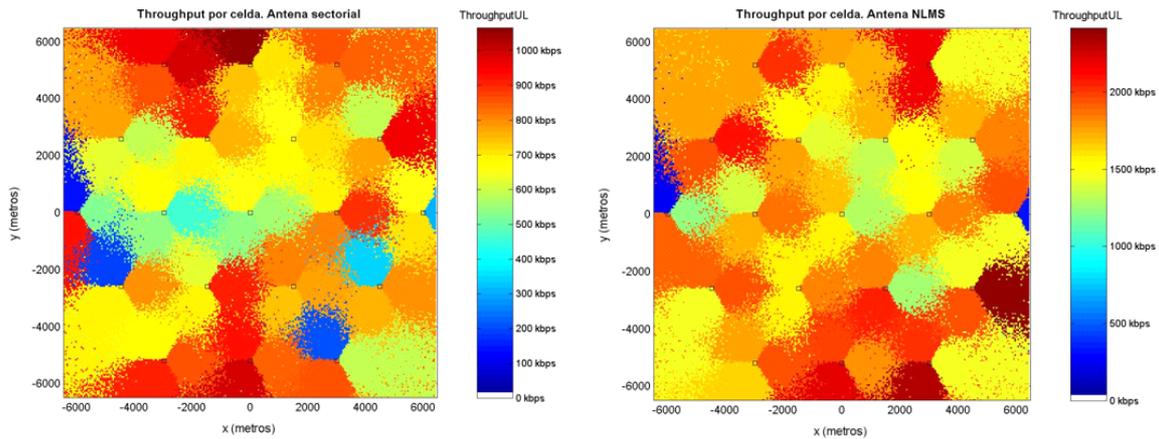
Se puede analizar qué sucede en escenarios con mezcla de servicios de voz y datos. La Figura 11 muestra el mapa del tráfico por celda en un escenario con 2000 usuarios de voz y 1000 usuarios de datos a 64 kbit/s. Como se puede ver, existe una reducción significativa del

tráfico cursado cuando se utiliza la antena sectorial, debido al bloqueo de un gran número de usuarios de datos, el 57.6 % (y el 49.6 % de los usuarios de datos). Por el contrario, utilizando una antena inteligente con un algoritmo de conformación basado en NLMS únicamente se bloquean el 9.3 % de los usuarios de datos, y el 8.25 % de los usuarios de voz.



**Figura 11. Mapa del throughput cursado por celda en un escenario con usuarios de voz (2000) y datos a 64 kbit/s (1000).**

El aumento del *throughput* es todavía más significativo si se duplica el número de usuarios de datos. Los resultados se muestran en la Figura 12, donde se ve cómo el tráfico cursado se duplica en algunas celdas. La mejora de capacidad depende, por tanto, del escenario de despliegue y las características de los usuarios.

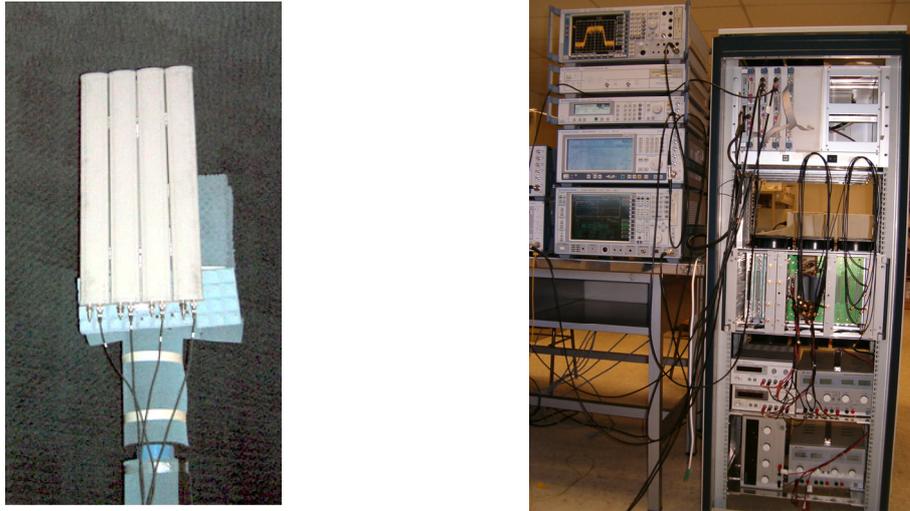


**Figura 12. Mapa del throughput cursado por celda en un escenario con usuarios de voz (2000) y datos a 64 kbit/s (2000).**

En el Capítulo 6 de la Tesis Doctoral se incluyen más resultados sobre las prestaciones a nivel de red, como por ejemplo mapas con el factor de carga en enlace ascendente.

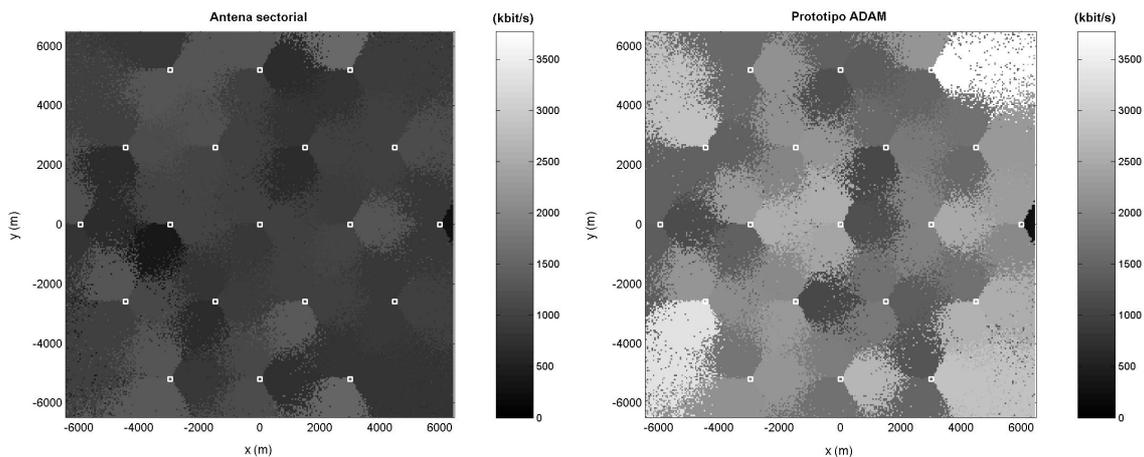
## 6. APLICACIÓN A UN PROTOTIPO REAL: ADAM

La herramienta de simulación desarrollada en esta Tesis Doctoral ha sido aplicada a un prototipo de antena inteligente para los sistemas UMTS denominado ADAM (Antena aDaptativa para entornos Multioperador) [Sierra01]. Como muestra la Figura 13, el prototipo ADAM está formado por un array de cuatro antenas, y una plataforma de procesamiento digital basada en una arquitectura software radio. La principal característica de ADAM es la posibilidad de instalarlo en cualquier estación base comercial, sin más que sustituir el subsistema radiante por un módulo ADAM. Se trata, por tanto, de un sistema de tipo “plug and play”.



**Figura 13. Subsistema radiante y de procesamiento del prototipo ADAM.**

El esquema de conformación empleado hace que funcione especialmente en los escenarios de tráfico asimétrico que aparecerán durante el despliegue de UMTS, donde los usuarios demandarán a la red un mayor ancho de banda en el enlace descendente. La Figura 14 muestra una comparativa entre el tráfico cursado en sentido descendente cuando se emplea una antena sectorial convencional y el sistema ADAM, donde puede apreciarse el incremento del tráfico en los diferentes sectores, en muchos de cuales se triplica.



**Figura 14. Tráfico total cursado en cada celda en el downlink.**

## 7. CONCLUSIONES Y PRINCIPALES APORTACIONES DE LA TESIS DOCTORAL

En esta Tesis Doctoral se han analizado las posibilidades de diferentes esquemas de antenas inteligentes dentro de los sistemas de comunicaciones móviles de Tercera Generación basados en W-CDMA. Todas las conclusiones derivadas de este estudio están basadas en los resultados de simulación presentados a lo largo de los capítulos de la Tesis.

Los resultados presentados se basan en las características de un array adaptativo de referencia, que responde a un prototipo que está siendo desarrollado en el Grupo de Radiación de la Universidad Politécnica de Madrid. Como conclusión principal, se puede afirmar que la utilización de antenas inteligentes en las estaciones base de un despliegue celular del sistema W-CDMA supondrá la mejora de la capacidad del sistema (en términos de tráfico cursado y aumento del número de usuarios) y el incremento del alcance celular.

En la parte de procesamiento, se han utilizado algoritmos de conformación bien conocidos y recogidos en la literatura. La aportación realizada en este punto se basa en la realización de un estudio comparativo entre ellos a nivel de enlace y sistema, lo que permite evaluar las

prestaciones de diferentes arquitecturas de antena inteligente basadas en conformación de haz dentro del sistema W-CDMA.

Las simulaciones se han realizado en una doble vertiente complementaria. En primer lugar, se ha analizado, a nivel de enlace, el comportamiento de las familias de antena inteligente consideradas en diferentes escenarios de despliegue que pueden encontrarse en un entorno real. La principal aportación de este punto es la caracterización estadística de las prestaciones ofrecidas por las antenas inteligentes en todos los escenarios.

Dentro de este nivel de simulación, se recoge una de las aportaciones más significativas de esta Tesis, como es el análisis del efecto de las interferencias de ruido impulsivo sobre las señales del sistema W-CDMA. Se ha cuantificado la degradación de la calidad que tiene lugar, y se ha demostrado que una antena inteligente puede aportar una reducción significativa del efecto perjudicial producido por la interferencia impulsiva. Dentro de este apartado, destaca la presentación de un generador de ruido impulsivo desarrollado en tecnología DSP, con el que es posible realizar pruebas de calidad de servicio de diferentes aplicaciones sobre W-CDMA en presencia de ruido impulsivo. Todas las simulaciones dentro de este campo se han realizado empleando modelos realistas de las interferencias de ruido impulsivo basados en resultados obtenidos de campañas de medidas, lo que apoya la fiabilidad de los resultados presentados.

Los principales resultados de las simulaciones a nivel de enlace son la obtención de un conjunto de parámetros en diferentes escenarios de despliegue, como son las distribuciones estadísticas de ganancia, cancelación de interferencias y mejora de relación señal a interferencia más ruido. La cuantificación de estos parámetros para distintos sistemas de antena inteligente se hace necesaria como paso previo a las etapas de planificación del sistema, de cara a analizar cuál es la mejor solución de conformado en cada escenario de despliegue.

Dentro de un segundo nivel de simulación, se han evaluado las prestaciones de las antenas inteligentes dentro de un despliegue celular del sistema W-CDMA. Para llevar a cabo estas simulaciones, ha sido necesario desarrollar un interfaz apropiado entre los niveles de enlace y de sistema. La definición de este interfaz es otra de las aportaciones novedosas de esta Tesis Doctoral. Su utilización se hace necesaria para poder incluir los resultados del nivel de enlace en las simulaciones de sistema para que los resultados obtenidos incluyan todos los aspectos relacionados con el comportamiento de las antenas inteligentes, los algoritmos de control de potencia y el canal de propagación.

Gracias a la definición del interfaz enlace-sistema, es posible introducir los parámetros de planificación obtenidos en el nivel de enlace (ganancia estadística y nivel de cancelación) dentro del simulador de sistema. Los resultados presentados de mejora de cobertura y aumento en el tráfico cursado suponen una primera aproximación al proceso de planificación de sistema que debería seguirse para analizar el despliegue más adecuado que puede realizarse en un escenario determinado.

Los dos niveles de simulación han permitido abordar un estudio comparativo entre varias soluciones de antena inteligente de diferente complejidad. Así, se han estudiado las prestaciones de antenas de haces conmutados (bajo dos criterios de conformación), de complejidad reducida, frente a la solución con antenas totalmente adaptativas (con algoritmos basados en los criterios MMSE y de máxima ganancia), cuyas prestaciones y dificultad de implementación son superiores. No obstante, se ha comprobado que en la mayoría de escenarios estudiados, las prestaciones de los algoritmos basados en subespacios están por debajo de las antenas de haces conmutados. Además, la simulación del despliegue de las mismas en distintos escenarios característicos permite evaluar su comportamiento desde la perspectiva del compromiso entre prestaciones y complejidad.

Por tanto, el desarrollo de los capítulos de esta Tesis Doctoral ha ido evolucionando siguiendo un esquema lógico y coherente, que ha finalizado con la inclusión de las antenas inteligentes como un elemento más dentro del sistema W-CDMA. Finalmente, decir que las herramientas y métodos desarrollados en esta Tesis han sido aplicados sobre la arquitectura del sistema ADAM, de cara a evaluar la mejora de prestaciones ofrecida por un prototipo de antena inteligente real respecto de una antena sectorial convencional.

## 8. REFERENCIAS

A continuación, se presentan las referencias citadas en la realización de este resumen. Una lista completa de referencias puede encontrarse en la Tesis Doctoral (páginas 293 a 312).

- [3GPP] 3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group, Radio Access Network, 25 series, Release 5.
- [Ahn01] S. Ahn, S. Choi, T.K. Sarkar, "A linearized power method for adaptive beamforming in a multipath fading CDMA environment", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 31, no. 5, pp. 361-365, Diciembre 2001.
- [Boukalov00] A.O. Boukalov, S-G. Häggman, "System Aspects of Smart-Antenna Technology in Cellular Wireless Communications-An Overview", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 48, no. 6, pp. 919-929, Junio 2000.
- [Hämäläinen97] S. Hämäläinen, P. Shanina, M. Hartman, A. Lappeteläinen, H. Holma, O. Solonaho, "A novel interface between link and system level simulations", *Proc. ACTS'97*, pp. 599-604, Aalborg, Dinamarca, Octubre 1997.
- [García02] M. García, I. Cuiñas, A. Vázquez, "Shot Noise in Actual Urban and Industrial Environments", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 34, no. 2, pp. 112-115, Julio 2002.
- [Goransson00] B. Goransson, B. Hagerman, J. Barta, "Adaptive Antennas in WCDMA Systems—Link Level Simulation Results Based on Typical User Scenarios", *Proc. 52nd IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 1, pp. 157-164, Boston, MA, USA, Septiembre 2000.
- [Haykin96] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 3<sup>o</sup> ed., London, UK: Prentice-Hall International, 1996.
- [Godara97] L.C. Godara, "Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part II: Beamforming and Direction of Arrival Considerations", *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 8, pp. 1195-1245, Agosto 1997.
- [Laiho02] J. Laiho, A. Wacker, T. Novosad, ed., *Radio network planning and optimisation for UMTS*, Chichester: John Wiley & Sons, 2002.
- [Law91] A. M. Law, W. D. Kelton, *Simulation modeling and analysis*, 2nd ed., New York: Mac Graw-Hill, 1991, pp. 350-353, 494-495.
- [Liberti99] J.C. Liberti, T.S. Rappaport, *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*, New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [Sierra01] Manuel Sierra Pérez, Miguel Calvo Ramón, José Luis Fernández Jambrina, Leandro de Haro Ariet, María Belén Galocha Iragüen, Manuel Sierra Castañer, Ramón Martínez Rodríguez-Osorio, Luis Enrique García Muñoz, "Antena Inteligente Compatible Modular Multiestandard para Comunicaciones Celulares en Entornos Multioperador", No. P200102780, España, Diciembre 2001.
- [Tsoulos00] G.V. Tsoulos, G.E. Athanasiadou, R.J. Piechocki, "Low-Complexity Smart Antenna Methods for Third-Generation W-CDMA Systems", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 6, pp. 2382-2396, Noviembre 2000.

## 9. LISTA DE PUBLICACIONES DE RAMÓN MARTÍNEZ RELACIONADAS CON LA TESIS DOCTORAL

### Capítulos de libro

- Miguel Calvo et al., Sistemas de Comunicaciones Móviles de Tercera Generación IMT-2000 (UMTS), Capítulo 12: “Simulación”, Fundación Airtel Vodafone, 2002.
- Nejat Ince et al., Modeling and Simulation Environment for Satellite and Terrestrial Communication Networks - Proceedings of the European COST Telecommunications Symposium, Chapter 12: “Tool for Satellite Mobile Communications Systems Simulation”, Chapter 20: “Simulated Performance of an OFDM Communications System: Noise Density Function for Quasi-Analytical Bit Error Rate Estimation”, Kluwer Academic Publishers of Boston, 2001.

### Artículos de revista publicados

- Ramón Martínez Rodríguez-Osorio, Laura García García, Alberto Martínez Ollero, F. Javier García-Madrid Velázquez, Leandro de Haro Ariet, Miguel Calvo Ramón, “ADAM: A Realistic Implementation for a W-CDMA Smart Antenna”, Eurasip Journal on Applied Signal Processing, número especial sobre “Advances in Smart Antennas”, vol. 2004, no. 9, pp. 1384-1406, Agosto 2004.
- Ramón Martínez Rodríguez-Osorio, Leandro de Haro Ariet, Miguel Calvo Ramón, “Statistical characterisation of adaptive antenna performance in WCDMA scenarios”, Electronics Letters, vol. 40, no. 15, pp. 923-924, Julio 2004.
- Ramón Martínez Rodríguez-Osorio, Leandro de Haro Ariet, Miguel Calvo Ramón, Manuel García Sánchez, “Analysis of W-CDMA performance in actual impulsive noise environments and its improvement using adaptive antennas”, IEE Proceedings Communications, vol. 151, no. 6, pp. 589-594, Diciembre 2004.

### Artículos en Congresos

#### 2004

- M. Sierra-Pérez, M. Calvo, L. de Haro, R. Martínez, M. Sierra-Castañer, L. García, A. Martínez, F.J. García-Madrid, J.L. Masa, J.M. Serna, “Measurements procedures for an adaptive antenna system: application to WCDMA”, 26th Annual Antennas Measurement and Technologies Association Meeting and Symposium, AMTA2004, Stone Mountain, GA, USA, Octubre 2004.
- Bazil Taha-Ahmed, Miguel Calvo-Ramón, Leandro de Haro-Ariet, Ramón Martínez Rodríguez-Osorio, “On the UMTS Macrocells Downlink Capacity in Open Rural Zone Near Shaded Deep Space Network (DSN) Installations”, 60th IEEE Vehicular Technology Conference, VTC2004-Fall, Los Angeles, CA, USA, Septiembre 2004.
- A. Martínez, L. García, R. Martínez, L. de Haro, M. Calvo, “Effects of implementation impairments in the performance of a W-CDMA smart antenna”, 60th IEEE Vehicular Technology Conference, VTC2004-Fall, Los Angeles, CA, USA, Septiembre 2004.
- Ramón Martínez, Álvaro D. Castro, Leandro de Haro, Manuel García, “A DSP-Based Impulsive Noise Generator for QoS and EMC Tests in Wireless Systems”, 60th IEEE Vehicular Technology Conference, VTC2004-Fall, Los Angeles, CA, USA, Septiembre 2004.
- Ramón Martínez, Leandro de Haro, Miguel Calvo, “Statistical Characterization of the Performance of Smart Antenna Systems in W-CDMA Mixed-Services Scenarios”, 60th IEEE Vehicular Technology Conference, VTC2004-Fall, Los Angeles, CA, USA, Septiembre 2004.
- R. Martínez Rodríguez-Osorio, L. García García, A. Martínez Ollero, F. J. García-Madrid Velazquez, L. de Haro Ariet, M. Calvo Ramón, “ADAM: a realistic smart antenna implementation for UMTS”, IEEE Radio & Wireless Conference 2004, RAWCON2004-Workshop on MIMO implementation aspects, Atlanta, GA, USA, Septiembre 2004.
- Juan José Parra Bonilla, Ramón Martínez Rodríguez-Osorio, Leandro de Haro Ariet, “Implementación en DSP de algoritmos de control de potencia en el enlace ascendente de UMTS

para estudios de capacidad”, XIX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2004, Universidad Ramón Llull, Barcelona, Septiembre 2004.

- C. L. Fernández Abad, Ramón Martínez Rodríguez-Osorio, Leandro de Haro Ariet, “Algoritmos de Cálculo de Espectro Angular de Potencia y Algoritmos Adaptativos para Conformación de Haz Aplicados a WCDMA: Complejidad vs. Prestaciones Medidas en una Implementación en DSP”, XIX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2004, Universidad Ramón Llull, Barcelona, Septiembre 2004.
- R. Martínez Rodríguez-Osorio, Álvaro D. Castro Urbina, Leandro de Haro Ariet, Miguel Calvo Ramón, “Montaje y prestaciones de un generador de ruido impulsivo en tecnología DSP”, XIX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2004, Universidad Ramón Llull, Barcelona, Septiembre 2004.
- M. Sierra-Pérez, M. Calvo, L. de Haro, R. Martínez, M. Sierra-Castañer, L. García, A. Martínez, F.J. García-Madrid, J.L. Masa, J.M. Serna, “Integration, measurements and calibration of a UMTS smart antenna”, 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Barcelona, España, Septiembre 2004.
- L. García García, L. de Haro Ariet, R. Martínez Rodríguez-Osorio, “Implementation of a Neural-Network based digital beamformer for a UMTS smart antenna”, IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop, SAM2004, Barcelona, España, Julio 2004.
- L. García García, F.J. García-Madrid Velázquez, A. Martínez Ollero, R. Martínez Rodríguez-Osorio, M. Calvo Ramón, “Implementation of a Digital Beamformer Module for a UMTS Smart Antenna”, 2004 IEEE AP-S USNC/URSI Symposium, Monterey, CA, USA, vol. 4, pp. 4000-4003, Junio 2004.
- M. Sierra-Pérez, M. Calvo, L. de-Haro, R. Martínez, L. García, A. Martínez, F. J. García, J. L. Masa, J. M. Serna, “Integration and Measurements of a UMTS Smart Antenna”, 2004 IEEE AP-S USNC/URSI Symposium, Monterey, CA, USA, vol. 3, pp. 2800-2803, Junio de 2004.

### 2003

- M. Sierra-Pérez, M. Calvo, L de Haro, J. L. Fernández, B. Galocha, M. Sierra-Castañer, R. Martínez, “Design and Implementation of an Adaptive Antenna for Mobile Communications (ADAM)”, International ITG Conference on Antennas, INICA2003, Berlín, Alemania, Septiembre 2003.
- D. de Castro Galán, R. Grande Baquero, R. Martínez Rodríguez-Osorio, M. Calvo Ramón, D. Segovia Vargas, “Prestaciones del algoritmo de potencia linealizado para un conformador de haz adaptativo en GSM-1800”, XVIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2003, Universidad de A Coruña, Septiembre 2003.
- F. J. García-Madrid Velásquez, R. Martínez Rodríguez-Osorio, L. de Haro Ariet, M. Calvo Ramón, “Subsistema MODEM de una antena adaptativa para GSM”, XVIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2003, Universidad de A Coruña, Septiembre 2003.
- M. Sierra Pérez, M. Calvo Ramón, J. Fernández Jambrina, B. Galocha Iragüen, E. García Muñoz, R. Martínez Rodríguez-Osorio, “Design and Implementation of an UMTS Smart Antenna”, Proc. 2003 IEEE AP-S International Symposium, vol. 4, pp. 188-191, Columbus, OH, USA, Junio 2003.

### 2002

- M. Sierra-Pérez, L. de Haro, M. Calvo, J.L. Fernández, B. Galocha, E. García, R. Martínez, M. Sierra-Castañer, “UMTS Smart Antenna Design and Implementation”, Journées Internationales de Nice sur les Antennes, JINA2002, vol. 2, pp. 379-381, Niza, Francia, Nov. 2002.
- Ramón Martínez, Augusto del Cacho, Leandro de Haro, Miguel Calvo, “Comparative Study of LMS and RLS Adaptive Algorithms in the Optimum Combining of Uplink W-CDMA”, Proc. 56th IEEE Vehicular Technology Conference, VTC2002-Fall, vol. 4, pp. 2258-2262, Vancouver, BC, Canadá, Septiembre 2002.
- M. Sierra-Pérez, L. de Haro, M. Calvo, J.L. Fernández, B. Galocha, E. García, R. Martínez, M. Sierra-Castañer, “Primeras etapas de la implementación de una antena inteligente para UMTS”, XVII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2002, pp. 177-178, Universidad de Alcalá de Henares, Septiembre 2002.

- Álvaro D. Castro, Ramón Martínez, Leandro de Haro, Miguel Calvo, Manuel García, “Implementación en DSP de un Generador de Ruido Impulsivo”, XVII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2002, pp. 333-334, Universidad de Alcalá de Henares, Septiembre 2002.
- Ramón Martínez, Leandro de Haro, Miguel Calvo, Manuel García, “Antenas Adaptativas para Cancelación de Fuentes de Ruido Impulsivo en un Sistema W-CDMA”, XVII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2002, pp. 75-76, Universidad de Alcalá de Henares, Septiembre 2002.
- Ramón Martínez, Laura García, Leandro de Haro, Miguel Calvo, “A DSP-Based Implementation of Adaptive Algorithms for a W-CDMA Reverse Link Beamformer”, Proc. 2002 IEEE Radio and Wireless Conference, RAWCON 2002, pp. 141-144, Boston, MA, USA, Agosto 2002.

## 2001

- Ramón Martínez, Davide Trosa, Leandro de Haro, Miguel Calvo, “Estudio Preliminar de Prestaciones de Antenas Inteligentes para UMTS”, XVI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2001, pp. 213-214, Universidad Europea de Madrid, Septiembre 2001.
- Ramón Martínez, Davide Trosa, Leandro de Haro, Miguel Calvo, “Antenas Inteligentes para Sistemas de Comunicaciones Móviles de Tercera Generación UMTS WCDMA”, XI Jornadas de I+D en Telecomunicaciones, Palacio de Comunicaciones de Madrid, Noviembre 2001.
- Ramón Martínez, David Martínez, Leandro de Haro, Miguel Calvo, “Switched Beam Antennas Performance Evaluation in UMTS Vehicular Environments”, Proc. 2001 USNC/URSI National Radio Science Meeting, pp. 214, Boston, MA, USA, Julio 2001.
- Ramón Martínez, Davide Trosa, Leandro de Haro, Miguel Calvo, “Smart Antennas Performance Evaluation and Capacity Increase for WCDMA UMTS”, Proc. 53rd IEEE Vehicular Technology Conference, VTC2001 Spring, vol. 1, pp. 147-151, Rodas, Grecia, Mayo 2001.

## 2000

- Ramón Martínez, David Martínez, Leandro de Haro, Miguel Calvo, “Switched Beam Antennas Performance Evaluation and Capacity Increase for UMTS Systems”, Proc. Symposium on Communications and Vehicular Technology SCVT-2000, IEEE Benelux Chapter on Vehicular Technology and Communications, pp. 82-87, Leuven, Bélgica, Octubre 2000.

## **Informes de Proyectos de Investigación**

En relación con la Tesis Doctoral, se han realizado informes para los siguientes proyectos de investigación, en las áreas de simulación y definición de algoritmos adaptativos e conformación:

### Financiación pública

- “Evaluación y medida de antenas inteligentes para sistemas de comunicaciones móviles (MAIN)”, financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, Septiembre 2002-Septiembre 2005.
- “Evaluación de la calidad de servicio en presencia de ruido impulsivo: implementación de un emulador de canal con ruido impulsivo”, financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, Junio 2000-Julio 2003.

### Financiación privada

- “Sistema de Estación Base Inteligente (SEBI)”, financiado por DYCTEL Infraestructuras de Telecomunicaciones, S.A., Mayo 2001-Diciembre 2001.
- “Prototipo Demostrador del Sistema de Antena Adaptativa Multioperador en Estándar UMTS (ADAM)”, financiado por Dragados Telecomunicaciones, S.A., Enero 2002-Diciembre 2004.
- “Estudio de Viabilidad, Especificación Técnica y Prototipado de Demostrador del Sistema de Antena Adaptativa Multiestándar UMTS-GSM1800 (EVA)”, financiado por Sistemas Radiantes Francisco Moyano, S.A., Junio 2002-Mayo 2003.

En el anexo sobre el desarrollo e interés industrial de prototipos, se detalla al resultado de estos proyectos.

### **Patentes**

- Manuel Sierra Pérez, Miguel Calvo Ramón, José Luis Fernández Jambrina, Leandro de Haro Ariet, María Belén Galocha Iragüen, Manuel Sierra Castañer, Ramón Martínez Rodríguez-Osorio, Luis Enrique García Muñoz. Título: “Antena Inteligente Compatible Modular Multiestandard para Comunicaciones Celulares en Entornos Multioperador”, No. P200102780, España, Diciembre 2001 (DYCTEL, S.A.).
- Leandro de Haro Ariet, Ramón Martínez Rodríguez-Osorio, Laura García García, Alberto Martínez Ollero, Francisco Javier García-Madrid Velázquez, Miguel Calvo Ramón, Manuel Sierra Pérez. Título: “Sistema de Antena Adaptativa Enchufable y Método de Operación”, PCT/ES 2004/000371, Agosto 2004 (Antennea Technologies, S.L.).

### **Referencias de otros investigadores**

- Andreas Czylik, Armin Dekorsy “System-Level Performance of Antenna Arrays in CDMA-Based Cellular Mobile Radio Systems”, Eurasip Journal on Applied Signal Processing, número especial sobre “Advances in Smart Antennas”, vol. 2004, no. 9, pp. 1321-1329, Agosto 2004 (Referencia [10]).
- Óscar Moreno, Ignacio J. Franco Martín, J.L. Miranda Sierra, “Introducción de la tecnología de antenas inteligentes. Aplicación a UMTS”, Comunicaciones de Telefónica I+D, no. 21, pp. 43-56, Junio 2001 (Referencia [11]).

### **Tesis Doctoral**

- “Estudio sobre las prestaciones de antenas inteligentes en sistemas de comunicaciones móviles de Tercera Generación (UMTS)” (Calificación: Sobresaliente Cum Laude), Universidad Politécnica de Madrid, Enero de 2004 (Director de la Tesis: Prof. Leandro de Haro).

## 10. DESARROLLO INDUSTRIAL: EL PROTOTIPO ADAM

Los trabajos de esta Tesis Doctoral han sido aplicados en los siguientes proyectos de Investigación. Todos ellos están relacionados con el desarrollo de prototipos de antenas inteligentes para diferentes sistemas de comunicaciones móviles (UMTS y GSM).

- “Sistema de Estación Base Inteligente (SEBI)”, financiado por DYCTEL Infraestructuras de Telecomunicaciones, S.A., Mayo 2001-Diciembre 2001.
- “Prototipo Demostrador del Sistema de Antena Adaptativa Multioperador en Estándar UMTS (ADAM)”, financiado por Dragados Telecomunicaciones, S.A., Enero 2002-Diciembre 2004.
- “Estudio de Viabilidad, Especificación Técnica y Prototipado de Demostrador del Sistema de Antena Adaptativa Multiestándar UMTS-GSM1800 (EVA)”, financiado por Sistemas Radiantes Francisco Moyano, S.A., Junio 2002-Mayo 2003.

La participación en estos Proyectos ha sido en cinco áreas fundamentales:

- 1) Estudio de viabilidad del sistema
- 2) Simulaciones a nivel de enlace y sistema
- 3) Definición de la estructura óptima de la antena inteligente
- 4) Selección de algoritmos adaptativos para la conformación de haz
- 5) Especificación del subsistema módem y de conformación

El resultado industrial ha sido una estrecha colaboración Universidad-Empresa y el desarrollo de un prototipo de antena inteligente para el sistema UMTS. Dicho prototipo se denomina ADAM.

Una de las características principales y más novedosas del prototipo ADAM es su funcionamiento transparente respecto del Nodo B, es decir, el sistema ADAM puede conectarse directamente a cualquier estación base de UMTS sin necesidad de que ésta esté preparada específicamente para trabajar con una antena inteligente o adaptativa.

Para ello, el interfaz de conexión entre ADAM y la estación base (nodo B en UMTS) debe ser común en todos los casos, esto es, debe estar estandarizado por el 3GPP. Se ha seleccionado el interfaz Uu especificado en 3GPP como interfaz de conexión. Dicho interfaz es el que regula el interfaz radio de W-CDMA: por tanto, la conexión entre ADAM y Nodo B se realiza directamente en RF, sustituyendo el subsistema radiante pasivo convencional por el prototipo ADAM. No es necesario sustituir las etapas de RF ni FI de la estación base, sino únicamente sus paneles radiantes. Además, el prototipo ADAM no interviene en los procesos de control de potencia o trasposos entre celdas, realizados por el nodo B o el controlador de red (RNC).

Gracias a su arquitectura basada en la tecnología software radio, el sistema ADAM es plenamente reconfigurable, por lo que puede cambiarse dinámicamente el algoritmo de conformación y otros parámetros del sistema.

Por ello, el despliegue del sistema ADAM en una red 3G puede ser muy rápido, ya que no debe hacerse en colaboración con ningún fabricante, gracias a sus características como sistema “plug and play”.

De cara a la explotación industrial del prototipo, cabe destacar las dos patentes desarrolladas como consecuencia de las investigaciones realizadas en la implementación del prototipo ADAM. La primera de ellas patenta la arquitectura de ADAM como sistema

compatible multioperador y multiestándar, mientras que la segunda hace referencia a la operación del software desarrollado.

- Manuel Sierra Pérez, Miguel Calvo Ramón, José Luis Fernández Jambrina, Leandro de Haro Ariet, María Belén Galocha Iragüen, Manuel Sierra Castañer, Ramón Martínez Rodríguez-Osorio, Luis Enrique García Muñoz. Título: “Antena Inteligente Compatible Modular Multiestandard para Comunicaciones Celulares en Entornos Multioperador”, No. P200102780, España, Diciembre 2001 (DYCTEL, S.A.).
- Leandro de Haro Ariet, Ramón Martínez Rodríguez-Osorio, Laura García García, Alberto Martínez Ollero, Francisco Javier García-Madrid Velázquez, Miguel Calvo Ramón, Manuel Sierra Pérez. Título: “Sistema de Antena Adaptativa Enchufable y Método de Operación”, PCT/ES 2004/000371, Agosto 2004 (Antennea Technologies, S.L.).

La colaboración realizada entre la Universidad y las empresas Dycetel, S.A, SICE, S.L, y Sistemas Radiantes Moyano, S.A., ha dado lugar a varios premios a la innovación tecnológica, que se citan a continuación:

- Premio “El Forjador” concedido por la Asociación Multisectorial de Empresas (AMEC) a SICE por el desarrollo de sistemas de antenas inteligentes para UMTS (Diciembre de 2004).
- Premio a la Innovación Tecnológica concedido por la Fundación Universidad-Empresa a las empresas Dycetel y Sistemas Radiantes Moyano, por el desarrollo y patente de *Antennea*, un nuevo concepto de estación base inteligente destinado a agilizar el despliegue y mejorar la operación de las redes de telefonía móvil (Premios Universidad Empresa 2002).