

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

DEPTO. TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES



TESIS DOCTORAL

Algoritmos en Transmisión y Recepción para OFDM en entornos Multi-usuario

Transmission and Reception Algorithms for OFDM in Multi-user Environments

Calificada como *Sobresaliente cum laude por unanimidad*

Mención *Doctor Europeus*

Autor: D. VÍCTOR PEDRO GIL JIMÉNEZ
Directora: DRA. ANA GARCÍA ARMADA

Madrid, 5 de Octubre 2005

Índice general

1. Resumen de la Tesis	5
1.1. Introducción	5
1.1.1. Origen	6
1.2. Objetivos	6
1.3. Desarrollo y contribuciones de la tesis	7
1.3.1. Metodología	7
1.3.2. Contribuciones	7
1.4. Conclusiones	8
1.5. Otros méritos de la Tesis	10
2. Originalidad del tema	11
2.1. Sincronización	11
2.2. Modulación Adaptativa	12
3. Resultados obtenidos	13
3.1. Sincronización	13
3.2. Modulación Adaptativa	14
4. Aplicabilidad práctica al área específica	17
4.1. Sincronización	17
4.2. Modulación Adaptativa	18

Capítulo 1

Resumen de la Tesis

1.1. Introducción

Las comunicaciones móviles han ido adquiriendo cada vez más protagonismo desde su incursión en la vida de los ciudadanos de forma cotidiana. Este auge en las comunicaciones móviles ha llevado consigo un aumento del número de usuarios de estos servicios, así como una mayor exigencia por parte de éstos en cuanto a velocidad de transmisión, seguridad, servicios, calidad ...

Por este motivo, se han ido introduciendo nuevas redes, así como mejoras en las ya existentes. Actualmente estamos asistiendo al inicio de la implantación de las redes denominadas de tercera generación (3G). No obstante, estas redes 3G fueron definidas a mediados de los años 90. En la actualidad nos encontramos en la definición de lo que será la cuarta generación móvil (4G) a la que probablemente preceda una intermedia, tal vez Super 3G.

Muchas son las tecnologías candidatas para esta Super 3G o para la 4G, pero es OFDM (Multiplexación por División en Frecuencias Ortogonales - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) una de las más prometedoras para terminar siendo la tecnología elegida, debido principalmente a la robustez que ofrece frente al multi-trayecto, la flexibilidad que proporciona por el hecho de dividir el ancho de banda en sub-portadoras que pueden ser moduladas independientemente para adaptarse a las condiciones específicas de los canales móviles y al aprovechamiento de la diversidad multi-usuario cuando se combina en OFDMA (Acceso múltiple por división en frecuencias ortogonales - *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*).

Sin embargo, para que estos sistemas OFDMA sean una realidad en redes futuras, es preciso reducir la complejidad que conllevan, en aspectos como la sincronización multi-usuario o la implementación de la modulación adaptativa. Esta Tesis presenta novedosas aportaciones para reducir la complejidad de implementación, para que la tecnología OFDMA pueda ser un hecho en las futuras redes inalámbricas.

La **sincronización en sistemas OFDMA**, principalmente en escenarios *ad-hoc*, plantea un reto importante a la hora de implementarla en este tipo de redes. Dado que existe una literatura extensa dedicada a resolver el problema de la sincronización en entornos OFDM mono-usuario, en esta Tesis se propone un procedimiento para reducir el problema de la sincronización multi-usuario al caso mono-usuario, lo que permite la reutilización de gran parte de las técnicas aportadas en la literatura. La propuesta, además de las buenas prestaciones, incluso en situaciones de saturación de la red, permite un ahorro de la energía necesaria para la realización de las tareas de sincronización. Asimismo, a la vez que se resuelve la sincronización multi-usuario, también se aporta un algoritmo para realizar el seguimiento de la desviación de frecuencia en sistemas tanto OFDM como OFDMA, de una forma sencilla y eficiente. Este algoritmo utiliza las sub-portadoras piloto de los símbolos, y ofrece unas buenas prestaciones, incluso cuando el número de estas sub-portadoras piloto es reducido.

La **modulación adaptativa** u otras técnicas avanzadas de comunicaciones como MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) o el conformado de haz (*beamforming*), que se hacen más atractivas cuando se

combinan con OFDM u OFDMA, requieren de cierta realimentación hacia el transmisor por parte del receptor, además de un conocimiento del canal bastante preciso. En esta Tesis se aportan algoritmos para la **compresión de esta información** (que puede ser muy elevada dependiendo de la granularidad de la adaptación y la variabilidad del canal), lo que permite un mejor aprovechamiento de los recursos radio, y simplifica la implementación de este tipo de sistemas. Se consiguen reducciones superiores a seis veces la tasa original, lo que implica grandes ventajas en todos los sentidos. Además, se realiza un estudio teórico sobre cómo afectan los errores en la estimación de canal en la capacidad del sistema, obteniéndose dos cotas numéricas para ésta, extremadamente fieles. Gracias a estas cotas se puede concluir que las técnicas actuales de estimación de canal son suficientemente buenas como para que las pérdidas producidas por los errores en esta estimación no sean muy significativas; No obstante, estas pérdidas aumentan a medida que se incrementa la relación señal a ruido, y, por tanto, es conveniente seguir mejorando la estimación de canal si se pretende que estos sistemas trabajen a altas relaciones señal a ruido.

Por último, destacar que las simulaciones llevadas a cabo para examinar las prestaciones de los algoritmos desarrollados han proporcionado datos prácticos que ayudarán al **diseño e implementación de futuras redes móviles 4G**.

1.1.1. Origen

Las comunicaciones inalámbricas se están haciendo un hueco cada vez más importante en nuestra sociedad y se prevé que en los próximos años su interés y su uso siga creciendo debido a la convergencia fijo-móvil que se está experimentando. Esto dará lugar también a un incremento en las exigencias que, sobre las prestaciones de los sistemas, se solicitarán por parte de los usuarios (al menos comparables a las tecnologías cableadas). Esto es debido a que cada vez son más accesibles por parte del público en general. No es difícil imaginar que existe una mayor variedad de problemas relacionados con el canal móvil que con un canal de cable (par trenzado, de cobre, fibra óptica ...). En concreto, el denominado efecto de desvanecimiento (*fading*), causado por la propagación multi-trayecto que sufre la señal desde el transmisor al receptor, es uno de los principales. El hecho de que la señal llegue por múltiples caminos al receptor hace que éste reciba, en lugar de una señal limpia y sólo atenuada por efecto de la distancia (pérdidas en espacio libre), una señal compuesta por la energía repartida entre todos y cada uno de los caminos que ha seguido la señal hasta llegar al receptor, lo que puede llegar a ocasionar que ésta se pierda completamente (cuando las contribuciones debidas a los diferentes trayectos se sumen en oposición de fase) y desde luego, con un nivel alto de interferencia intersimbólica por causa de la dispersión de retardos entre los diferentes caminos.

Desde hace tiempo se viene aprovechando la diversidad que el multi-trayecto ofrece. Para hacer uso de esta diversidad existen dos estrategias bien diferenciadas: procesar la señal en frecuencia o hacerlo en el tiempo. Como exponente del primer grupo las técnicas OFDM [1] ofrecen, además, grandes ventajas como son, la flexibilidad, sencillez y robustez. Al segundo grupo pertenece CDMA (Acceso Múltiple por División en Código - *Code Division Multiple Access*), aprovechando la diversidad del multi-trayecto a través del uso de receptores RAKE. Ambas estrategias tienen sus ventajas y sus inconvenientes. En la presente Tesis se ha optado por analizar y mejorar algunas de las limitaciones que las técnicas OFDM presentan en entornos multi-usuario que son inherentemente mucho más complejos, aportando novedosas y valiosas contribuciones.

1.2. Objetivos

La presente Tesis se centrará por tanto, en solucionar y/o extender resultados ya conocidos para el escenario de un solo usuario, a sistemas multi-usuario. Desde este punto de vista, la Tesis se dividirá en dos partes: una primera, que versará sobre el análisis y la mejora de la Sincronización en OFDM

(tanto en tiempo como en frecuencia) en entornos multi-usuario, mientras que la segunda tratará temas relacionados con la Modulación Adaptativa [2] para mejorar las prestaciones e incrementar la capacidad de estos sistemas. Por lo tanto, los principales objetivos de esta Tesis son:

■ **Sincronización en OFDM:**

- *Estudio y análisis de los efectos de los problemas de sincronización así como su mejora:* para obtener mejores prestaciones globales.
- *Propuesta de algoritmo para la Sincronización multi-usuario.* Aunque algunas de las últimas referencias que proponen buenas soluciones son [3], [4] o [5], no obstante, prácticamente todo el trabajo se dirige a la sincronización de un sólo usuario, y de ahí la importancia de los resultados de esta Tesis, que pretende extender estos resultados al entorno multi-usuario.

■ **Modulación Adaptativa:**

- *Evaluación de la Modulación adaptativa:* en qué situaciones o entornos es ventajosa y en qué otras no merece la pena incrementar la complejidad del sistema introduciendo modulación adaptativa.
- *Evaluación de las prestaciones en situaciones reales:* de la modulación adaptativa así como sus límites.
- *Reducción de la información de realimentación:* dada la elevada carga de señalización que los sistemas adaptativos pueden requerir, estudiar y elaborar propuestas para reducir la información de realimentación.
- *Simplificación de los sistemas adaptativos:* para facilitar su implementación en sistemas reales.
- *Mejora de los algoritmos adaptativos:* para incrementar las prestaciones de este tipo de sistemas.

1.3. Desarrollo y contribuciones de la tesis

1.3.1. Metodología

Durante la realización de esta Tesis, se ha empleado una metodología empírica y pragmática para el diseño de las soluciones que se aportan en la Tesis, teniendo siempre presente las restricciones y limitaciones que los sistemas físicos presentan: consumo, complejidad... Asimismo, han estado siempre soportadas por un estudio teórico previo. Por otra parte, se han utilizado las simulaciones para verificar los estudios teóricos presentados, así como para la validación práctica de algunas de las soluciones. Cabe destacar que el algoritmo de seguimiento de la desviación de frecuencia ha sido implementado físicamente en un sistema real destinado a ser banco de pruebas de sistemas OFDM basados en la transmisión de paquetes [6]. Por lo tanto, también se ha tenido en cuenta el modelado e implementación de sistemas de comunicaciones.

1.3.2. Contribuciones

En primer lugar, en lo relativo a la sincronización, se aportan tres aspectos importantes:

- Extensión de la formulación de interferencia entre portadoras para el caso de un único usuario (*single-user*) [7] al caso multi-usuario.

- *Seguimiento del desplazamiento de frecuencia*: se aporta un algoritmo sencillo y eficiente, para realizar de un modo eficaz el seguimiento del desplazamiento de frecuencia utilizando las sub-portadoras piloto repartidas en los símbolos OFDM, incluso aunque el número de éstas sea muy reducido, y se comprueba que las prestaciones obtenidas cuando se utiliza este seguimiento son muy buenas [8]. Estas aportaciones fueron implementadas en un receptor inalámbrico para la empresa Telefónica I+D [9] y para la empresa VIMESA [10].
- *Reducción de los problemas de sincronización multi-usuario a mono-usuario*: por medio del “*Procedimiento del Líder*”: en este aspecto se evalúan las prestaciones del algoritmo propuesto para los diferentes entornos WPAN (Redes de Área Personal Inalámbricas - Wireless Personal Area Networks), evaluando la tasa de adquisición del líder, tiempos de retardo y eficiencia. También se aporta una solución distribuida que todavía reduce el consumo de potencia aún más [11]. La novedosa propuesta se basa en el diseño conjunto de la capa física y la capa MAC (Medium Access Control), lo que se conoce como *cross-layer design* [12]. En esta línea se han realizado aportaciones a la acción europea COST 289 [13].

En segundo lugar, relacionados con la Modulación Adaptativa, se aportan cuatro aspectos:

- *Conveniencia de la Modulación Adaptativa*: un análisis de cuándo es conveniente utilizar la modulación adaptativa y cuándo no compensa incrementar la complejidad del sistema por la ganancia obtenida. Esto se evalúa en diferentes escenarios [14]. Asimismo se propusieron mejoras sobre sistemas adaptativos [15]. Estas aportaciones se han visto enmarcadas dentro del proyecto europeo PACWOMAN [16] y en la acción COST 289 [13] así como el proyecto nacional ORISE [17].
- *Efecto de Errores en la Estimación de canal*: un análisis del impacto que, sobre la capacidad media, tienen los errores en la estimación de canal cuando se utiliza modulación adaptativa. Se aportan cotas numéricas que aproximan de forma muy precisa el comportamiento de la capacidad en presencia de errores de estimación de canal, verificándolas con los resultados en simulación [18]. Aportaciones utilizadas en proyectos del Plan Nacional de I+D+i como ORISE [17], MACAWI [19] y regionales como MAMBO [20].
- *Reducción de la Información de Realimentación*: se aportan esquemas para reducir y comprimir la información de realimentación en sistemas que utilicen modulación adaptativa. Se analizan y evalúan diferentes escenarios para comprobar las tasas de compresión alcanzables [21].
- Diseño de algoritmos para carga de bits (*bit-loading*)¹ en entornos multi-usuario [22, 23]. Estas aportaciones han sido utilizadas en proyectos oficiales como ORISE [17] y MAMBO [20].

1.4. Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones generales que se pueden extraer de los trabajos realizados en esta Tesis Doctoral.

En esta Tesis se aportan soluciones, haciendo énfasis en aspectos principalmente prácticos, para el diseño de las futuras redes inalámbricas de comunicaciones en las que se utilice la tecnología OFDMA.

Desde el punto de vista de la implementación, a la vista de los resultados y algoritmos presentados en esta Tesis, se puede concluir que, la utilización de técnicas avanzadas de comunicaciones en OFDM, como puede ser la modulación adaptativa fina (adaptación de sub-banda o sub-portadora), se aproximan a la fase de implementación para lograr los resultados predichos por la teoría, una vez se van resolviendo los problemas iniciales.

¹Se utilizan diferentes modulaciones en diferentes sub-portadoras.

Se ha estudiado la necesidad de realizar un seguimiento del desplazamiento de frecuencia, especialmente cuando la transmisión es de cierta duración, debido a la rotación que se produce en los datos por el desplazamiento de frecuencia residual que existe. Se ha propuesto un algoritmo para realizar este seguimiento de forma sencilla y eficiente, utilizando las sub-portadoras piloto, obteniéndose mejoras significativas, incluso aunque el número de éstas fuera reducido. Se ha comprobado cómo, más importante que la precisión con la que se realiza la estimación del desplazamiento residual, es la tasa de actualización de esta desviación residual. Esto ha motivado la modificación del algoritmo inicial para obtener una versión iterativa del mismo, que ofrece mejores prestaciones sin incrementar demasiado la complejidad del sistema.

Por otro lado, se ha **diseñado un procedimiento** por el cual se reduce el problema de la **sincronización multi-usuario en redes *ad-hoc* basadas en OFDMA**, a uno ampliamente estudiado como es el mono-usuario en OFDM. Esto permite la reutilización de muchas de las técnicas existentes en la literatura para resolver este problema. También se propone la utilización conjunta de dos de estas técnicas (con algunas modificaciones) para un sistema concreto.

Se ha demostrado que el procedimiento para la sincronización propuesto, no solamente es simple y eficiente, sino que además, no es necesario que el terminal que asuma el rol del líder tenga que utilizar mucha más energía para llevar a cabo la función de sincronización que la que utilizaría si no fuera el líder. No obstante, adicionalmente se propone una versión distribuida del líder para hacer que este gasto de potencia sea uniforme en todos los terminales de la red, es decir, se distribuya el consumo de energía debido a las tareas relativas a la sincronización entre todos. Ambos procedimientos ofrecen soluciones de fácil implementación en sistemas reales, y se presentan como una alternativa para la sincronización multi-usuario en entornos *ad-hoc*.

Siguiendo en la línea de la implementación de sistemas multi-usuario, se ha estudiado en qué ocasiones merece la pena la **utilización de técnicas avanzadas como la modulación adaptativa fina**, y en cuáles las mejoras obtenidas no justifican su uso, llegándose a la conclusión de que, para terminales de baja velocidad de transmisión, las mejoras introducidas por el uso de la adaptación de sub-portadora no son muy significativas, y por tanto, no merece la pena incrementar la complejidad del sistema, mientras que para terminales de alta tasa es más que recomendable su uso. Esto nos lleva a otra conclusión importante a la hora de diseñar las redes: la necesidad de la coexistencia en una misma red de terminales avanzados (entendiéndose por avanzados que utilizan técnicas como modulación adaptativa, MIMO ...), pero también terminales más simples. De esta forma, se optimizarán, no sólo los recursos radio, sino además, gracias a esta división de terminales avanzados y simples, el coste de la redes.

Por otro lado, uno de los problemas a la hora de decidirse a implementar la modulación adaptativa es el hecho de estimar y predecir el canal, para adecuar la modulación a éste de forma satisfactoria y obtener así las ventajas que la modulación adaptativa nos ofrece. En esta Tesis se ha **analizado teóricamente el efecto que, sobre la capacidad del sistema, tienen los errores en la estimación de canal**. Se han obtenido unas cotas superiores que aproximan de forma muy precisa este efecto. Gracias a estas cotas, se puede concluir que este efecto no es muy importante para el error que se alcanza con los actuales algoritmos de estimación de canal, y por tanto, desde el punto de vista de la implementación, se puede concluir que es viable la utilización de este tipo de técnicas para mejorar los sistemas. No obstante, también se ha visto cómo, para relaciones señal a ruido elevadas, el efecto de los errores de estimación es más acusado, y por tanto, es necesario seguir mejorando estos algoritmos de estimación de canal si se quiere obtener toda la capacidad del sistema para relaciones señal a ruido elevadas.

Adicionalmente, a la hora de la **implementación de la modulación adaptativa**, especialmente cuanto más fina sea ésta, se encuentra la necesidad de la **realimentación de la información**. Salvo en los sistemas TDD, en los sistemas FDD (la inmensa mayoría de los sistemas desplegados actualmente, así como en vías de estandarización), la información de la estimación de canal y de la

modulaci3n 3ptima para adaptarse a las condiciones de ese canal se encuentra disponible en el receptor, y 3sta ha de ser enviada al transmisor para que pueda utilizarla adecuadamente. En los sistemas OFDM y OFDMA, la granularidad con la que se puede realizar esta adaptaci3n es muy elevada, y por tanto pueden obtenerse adaptaciones extremadamente fieles. Sin embargo, a medida que se hace m3s fina la adaptaci3n, p.e. adaptaci3n de sub-portadora, la cantidad de informaci3n a realimentar va aumentando. Adem3s, esta informaci3n en canales m3viles varía r3pidamente en el tiempo. Esto hace que este tipo de sistemas sea complicado de implementar o poco eficiente por la p3rdida de ancho de banda necesario para la realimentaci3n. En esta Tesis se ha mostrado c3mo es posible reducir la cantidad de informaci3n necesaria para ser realimentada, as3 como formas para comprimirla, obteni3ndose reducciones en m3s de seis veces las tasas originales. Gracias a estos resultados, la implementaci3n f3sica de este tipo de sistemas se hace posible.

Es importante destacar que estos resultados no s3lo posibilitan la implementaci3n de sistemas en los que se utilice la modulaci3n adaptativa, sino que adem3s tienen aplicaci3n en otro tipo de t3cnicas avanzadas como son las t3cnicas MIMO o de conformado de haz, en los que tambi3n es preciso realimentar informaci3n hacia el transmisor. A modo de resumen, se pueden extraer como principales conclusiones las siguientes:

- Se ha puesto de manifiesto la posibilidad de extender de forma sencilla y eficiente (tanto a nivel de tasa de informaci3n, como de gasto en potencia), los algoritmos de sincronizaci3n mono-usuario al caso multi-usuario, por medio del procedimiento del l3der, lo que facilita la implementaci3n de sistemas OFDMA de redes futuras.
- El uso de t3cnicas avanzadas, como es la modulaci3n adaptativa, es una alternativa recomendable y adem3s viable desde el punto de vista t3cnico, lo que contribuye a la mejora en capacidad de los sistemas futuros inal3mbricos.

1.5. Otros m3ritos de la Tesis

- La Tesis obtuvo la **menci3n de calidad** de *Doctor Europeus*.
- Se realizaron 2 **estancias de investigaci3n en centros extranjeros de prestigio** como son la Universidad de Leeds (Reino Unido) bajo la supervisi3n del Dr. Mounir Ghogho (Senior IEEE y Fellow de la Real Academia de Ingenier3a Inglesa) en 2003 y la Universidad de Chalmers (Suecia) bajo la supervisi3n del Dr. Arne Svensson (Fellow IEEE) en 2004.
- Actualmente esta Tesis ha generado 5 **art3culos en revistas internacionales de prestigio**: [12, 8, 15, 22, 23].
- 2 art3culos en proceso de revisi3n [18, 24] y otro en fase final de preparaci3n [21].
- Las aportaciones de la Tesis se han publicado en **numerosos congresos** tanto nacionales [25, 26, 6, 27, 28, 29, 30] como internacionales [31, 32, 33, 34, 35, 36, 14, 37, 38, 39].
- Tiene 2 art3culos con dos citas cada uno [8, 26]. Adem3s [26] fue finalista en el IEEE R8 *Student Paper Contest 2002*.
- Tambi3n ha generado un **cap3tulo de libro** [40] de reciente publicaci3n.
- La Tesis ha generado **abundante transferencia de tecnolog3a**, tanto en proyectos europeos [16, 41, 42] como nacionales [17, 19, 43, 20], adem3s de en contratos con empresas [9, 10]. Adem3s ha sido un **miembro activo de la acci3n COST 289** [13, 44, 45, 46], y, dada la novedad en los trabajos, se han realizado cursos de formaci3n sobre algunos aspectos de la Tesis.
- La Tesis se ha realizado tanto en castellano como en ingl3s.

Capítulo 2

Originalidad del tema

El tema sobre el que versa esta Tesis son los sistemas multi-portadora OFDM, en concreto para entornos multi-usuario. Dentro de la amplitud de este tema, la Tesis se centra en dos grandes líneas de investigación, por una parte la **sincronización** de este tipo de sistemas y por otra la **modulación adaptativa**. Ambas líneas están ya maduras en entornos mono-usuario, sin embargo, no están apenas investigadas en entornos multi-usuario. Además, como ya se comentó, cada vez más se trata de aprovechar la diversidad multiusuario en sistemas de comunicaciones, y por tanto, estos sistemas están teniendo cada vez más relevancia. Desde este punto de vista, esta Tesis es novedosa y original en ambas líneas de investigación, en donde se proponen novedosos algoritmos y estudios, siendo de los primeros trabajos de investigación en abordar alguno de los temas multi-usuario.

2.1. Sincronización

Comenzando por la **Sincronización**, en esta Tesis se propone resolver el problema de la sincronización multi-usuario de forma sencilla y eficiente, por lo que implica tanto al nivel físico como al nivel de enlace o MAC (Medium Access Control), desarrollando lo que se denomina *cross-layer design*. De esta forma, simplifica muy ostensiblemente el procesado en el nivel físico y dota a la sincronización de mayor robustez. En este sentido, el **procedimiento del líder** permite reducir el problema de la sincronización multi-usuario a un problema mono-usuario, ampliamente estudiado en la literatura. De esta forma es posible reutilizar algoritmos para sistemas mono-usuario, lo que se traduce en la posibilidad de diseñar sistemas complejos multi-usuario aprovechando algoritmos mono-usuario. Además, en este sentido, se utiliza uno de los algoritmos mono-usuario para el *procedimiento del líder*, al que se le introduce una mejora que obtiene unas prestaciones mucho mayores en cuanto a precisión en la sincronización.

También en la línea de la sincronización, en esta Tesis se propone un **algoritmo para el seguimiento de la desviación de frecuencia**. Este algoritmo realiza el seguimiento en el dominio de la frecuencia, dado que ofrece mejores prestaciones y mayor sencillez. El principal problema de realizar la estimación de la desviación de frecuencia en el dominio de la frecuencia es el coste computacional elevado que supone dado que, hasta que se obtiene una estimación razonable de la desviación de frecuencia es necesario realizar múltiples operaciones de FFT (Fast Fourier Transform), pues se desconoce la muestra exacta a partir de la cuál hay que realizar la FFT. Este problema ya no existe (o existe en mucha menor medida) cuando el sistema se encuentra transmitiendo y sólo es necesario realizar el seguimiento. Por esta razón se aprovechó la potencia de las operaciones en el dominio de la frecuencia para estimar la desviación de frecuencia. Además, dado que el sistema ya se encuentra transmitiendo, es necesario realizar una FFT para la demodulación. Nuestro algoritmo aprovecha la

salida de esta demodulaci3n para realizar la estimaci3n, y llevar a cabo la correcci3n para el siguiente s'mbolo. Esta correcci3n se realiza en el dominio del tiempo de forma eficiente, y se aprovecha el bloque de correcci3n inicial para introducir las posibles variaciones. De esta forma, la complejidad del algoritmo en conjunto es pr'cticamente despreciable. Por 'ltimo, para incrementar la precisi3n y resoluci3n, se introduce dentro del bloque de correcci3n la estimaci3n acumulada, obteniéndose as' resoluciones mayores con el mismo coste de *hardware*. Desde estos puntos de vista, la Tesis tambi3n es novedosa, porque no s3lo diseña un algoritmo, sino que adem's lo optimiza desde la 3ptica de la implementaci3n f'isica. El resultado es un algoritmo robusto, sencillo, eficiente y preciso de estimaci3n de la desviaci3n de frecuencia en sistemas OFDM, que ha sido implementado en una plataforma real de evaluaci3n de prestaciones para sistemas inal'mbricos.

2.2. Modulaci3n Adaptativa

En esta l'nea, la Tesis tambi3n es original desde varios puntos de vista. En primer lugar, plantea una ***novedosa forma de calcular la capacidad en un sistema OFDM cuando existen errores***, o bien en la estimaci3n de canal, o bien en la retransmisi3n del canal hacia el transmisor. Lo original en el planteamiento es el hecho de tomar el error de estimaci3n, de predicci3n o de *feedback* del canal como una nueva fuente de ruido, haciendo por tanto, que la relaci3n seña a ruido disminuya. De esta forma, el comportamiento de las cotas anal'ticas obtenidas refleja el verdadero comportamiento de los errores en el c'culo de la capacidad. Hasta ahora no se hab'ia tenido esto en cuenta, y las cotas obtenidas ofrec'ian peores prestaciones. Utilizando nuestra aproximaci3n, se obtienen unas cotas superiores que se reflejan de forma extremadamente fiel el comportamiento real de la capacidad erg3dica en presencia de errores en la estimaci3n de canal. Utilizando estas cotas anal'ticas, es posible diseñar los umbrales de operaci3n para los sistemas adaptativos para conocer cu'ndo es viable/adecuado el empleo de modulaci3n adaptativa y cu'ndo no. Adem's, gracias al estudio anal'tico, se llega a una mejor comprensi3n del efecto de los errores en la estimaci3n de canal sobre la capacidad.

Tambi3n se aborda la importancia de ***reducir*** de alguna forma la ***informaci3n de realimentaci3n***, que hasta la fecha no era un tema que hubiera atra'ido demasiado inter's. No obstante, cada vez m's son los autores que realizan propuestas en este sentido debido principalmente a la relevancia que los sistemas adaptativos est'n experimentando actualmente. Adicionalmente, este problema se ve agravado en los entornos multi-usuario. En esta Tesis se proponen diversas t'cnicas para la reducci3n y la compresi3n de la informaci3n de realimentaci3n, bas'ndose principalmente en la ***correlaci3n*** existente tanto *en tiempo* como *en frecuencia* en sistemas OFDM(A). La Tesis ha sido pionera en la propuesta de alternativas para la reducci3n y compresi3n de la informaci3n de realimentaci3n en sistemas OFDMA adaptativos. Las propuestas aportadas en la Tesis exploran la correlaci3n tiempo-frecuencia al mismo tiempo para obtener reducciones mayores, lo que no se hab'ia hecho hasta ahora, y adem's propone la compresi3n de esta informaci3n por medio de ***c3digos Huffman***, lo que tambi3n es original e innovador. Como se mostrar' en el apartado dedicado a resultados, este uso conjunto de exploraci3n de la correlaci3n tiempo-frecuencia unidos a la potencia de la codificaci3n Huffman, obtiene unos resultados verdaderamente buenos.

Por 'ltimo, tambi3n se eval'ian ***las prestaciones de un sistema OFDMA adaptativo*** en el que la ***granularidad*** se realiza a nivel de sub-portadora, obteniéndose unos resultados que dan lugar a un novedoso punto de vista en el diseño de los sistemas adaptativos: dependiendo de la velocidad de transmisi3n deseada, resultar' interesante o no la utilizaci3n de sofisticados sistemas adaptativos para obtener las mejores prestaciones. Desde este punto de vista, esta Tesis tambi3n aporta aspectos novedosos, en tanto en cuanto no descuida los aspectos de implementaci3n de las propuestas aportadas en *sistemas reales*.

Capítulo 3

Resultados obtenidos

En este apartado se van a mostrar los resultados más significativos de esta Tesis. Como en los casos anteriores, se dividirán los resultados en las dos líneas de investigación abordadas en este Tesis: *la sincronización y la modulación adaptativa*.

3.1. Sincronización

Una de las propuestas de esta Tesis ha sido un *algoritmo de seguimiento de la desviación de frecuencia* en sistemas OFDM que requiere el uso de muy pocas sub-portadoras piloto. En la figura 3.1a se muestra lo que ocurre cuando se realiza una transmisión en la que sólo se estima la desviación de frecuencia al comienzo (y existe un error residual inferior a 10^{-4}) y no se realiza seguimiento de ésta durante la transmisión de ese paquete. Se puede observar que, aunque el error de estimación de la desviación de frecuencia es pequeño, éste va rotando poco a poco la constelación (QPSK) y llega un momento en el que los datos se desplazan a una región de decisión incorrecta, lo que ocasiona una degradación muy significativa de las prestaciones, como se puede observar en la figura 3.2. Sin embargo, si se utiliza el algoritmo propuesto en esta Tesis, se consigue evitar esa rotación indeseada (figura 3.1b), además de una mejor estimación de la desviación de frecuencia. En la figura 3.2 se observa cómo, utilizando el algoritmo de seguimiento, la degradación por el hecho de que el paquete sea más o menos largo, o haya existido un pequeño error de estimación de la desviación de frecuencia son prácticamente despreciables, ya que se van auto-corrigiendo a medida que se transmite.

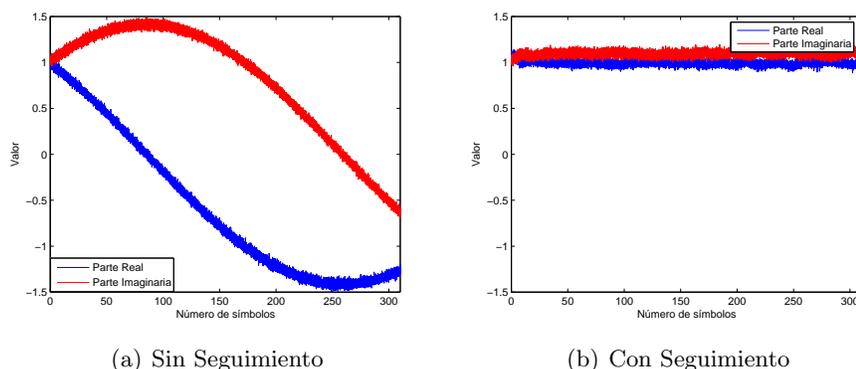


Figura 3.1: Parte Real y Parte Imaginaria de una señal QPSK cuyos datos son todo “1”s

También en esta Tesis se propone el *procedimiento del líder*. Los principales resultados se resumen en la figura 3.3 en la que muestra, por una parte, el histograma de la precisión en la sincronización temporal cuando sólo se ha aplicado la parte de sincronización gruesa (figura 3.3a), mientras que una

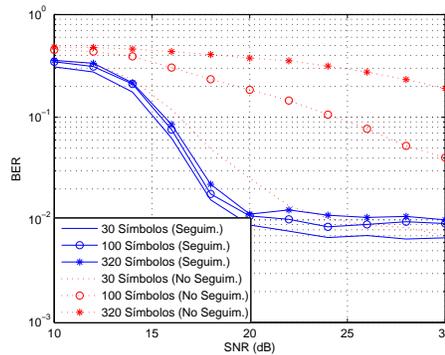


Figura 3.2: Comparativa de prestaciones con y sin seguimiento

vez aplicado la sincronización fina (figura 3.3b) se observa una disminución considerable de la varianza en la sincronización temporal, así como un altísima probabilidad de sincronización perfecta. Estos resultados en concreto, han sido promediados en 10,000 realizaciones de un canal HiperLAN 2 A [47]. Por otra parte, en la figura 3.3c se presenta el tiempo medio que requiere el proceso de sincronización en función de las peticiones de sincronización por segundo (recuérdese que este procedimiento del líder requiere iteración con la capa MAC), y la ocupación del sistema (P_o). Se puede apreciar cómo, a medida que aumenta el número de peticiones de sincronización por segundo, el tiempo aumenta, pero lo hace de forma lineal y no exponencial como se obtuvo en el análisis teórico. Esto es debido a que en ese análisis no se introdujo la posibilidad de las sincronizaciones simultáneas, lo que ocurre con gran frecuencia en la práctica, especialmente cuando el número de peticiones por segundo aumenta. Este comportamiento lineal y no exponencial es mucho más beneficioso, ya que permite que la escalabilidad sea lineal y no exponencial.

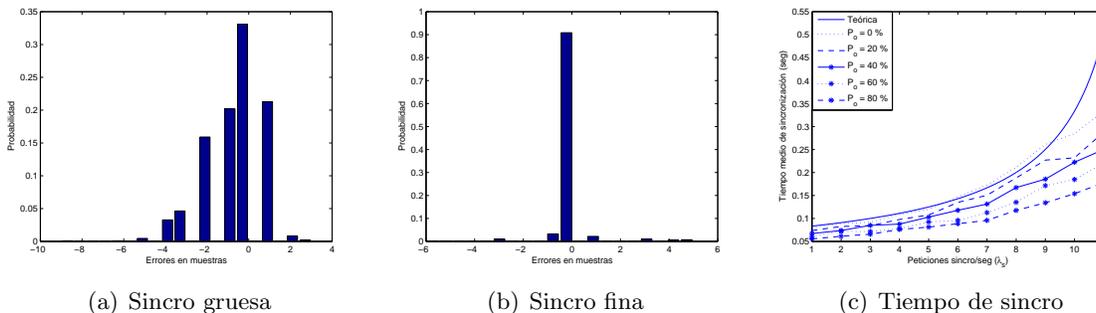


Figura 3.3: Principales resultados del Procedimiento del líder

3.2. Modulación Adaptativa

En esta línea, los resultados más relevantes se van a resumir en dos. En primer lugar, la *cota superior para la capacidad en presencia de errores en la estimación de canal*.

En la figura 3.4 se muestran los resultados para las simulaciones de la capacidad ergódica en presencia de errores en función de la relación media SNR para diferentes varianzas de error en la estimación de canal (σ_η^2). Además, se ha representado la cota analítica obtenida. Lo primero que se puede observar en la figura 3.4 es que la cota obtenida se ajusta prácticamente a la perfección con los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas y por lo tanto puede ser utilizada como la capacidad ergódica en canales Rayleigh cuando existen errores en la estimación de canal. También se

observa que la cota se ajusta mejor cuanto menor es el error en la estimación de canal. De hecho, para $\sigma_\eta^2 \leq 10^{-2}$ las diferencias pueden ser despreciadas. También en la figura 3.4 se observa que a medida que la relación señal a ruido se incrementa, la capacidad se incrementa también hasta un límite de saturación que depende del error de estimación de canal.

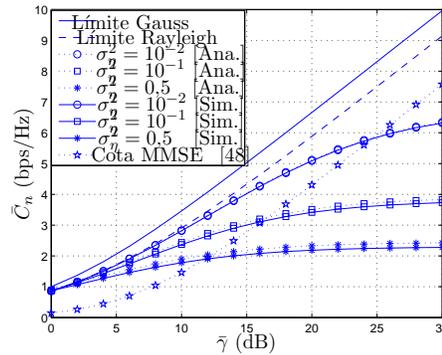


Figura 3.4: Cotas capacidad ergódica en presencia de errores en la estimación de canal

En segundo lugar, en lo referente a los resultados sobre *algoritmos para la compresión de la información de realimentación*, en la figura 3.5 se muestra una comparativa de los diferentes algoritmos propuestos en esta Tesis en un canal UMTS Vehicular tipo A [49], donde 30 terminales viajan a una velocidad de 50 km/h. En la figura 3.5a se muestran los resultados cuando el proceso de diseño de los códigos se ha hecho de forma promediada, es decir, se diseña el mejor código para todos los escenarios (velocidades, canales, SNR), mientras que en la figura 3.5b se muestran los resultados cuando se diseñan los códigos para cada escenario concreto. Como se puede observar, la reducción es significativa, y el diseño no ha de ser demasiado preciso, es decir, con unas estimaciones de SNR y de la velocidad del terminal razonables, se obtienen resultados similares.

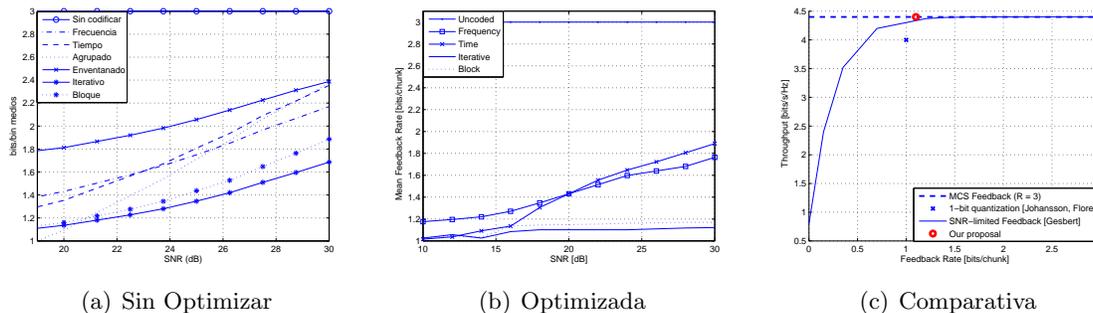


Figura 3.5: Comparativa para canal Vehicular A. 50 km/h

En la figura 3.5c se muestra una comparativa de los dos mejores algoritmos propuestos, el ITF (Iterative Time Frequency) y el BTF (Block Time Frequency) con otros algoritmos propuestos en la literatura. Se puede observar cómo nuestras propuestas ofrecen un compromiso entre reducción de la cantidad de la información y el rendimiento del sistema.

Como se ha mencionado, los resultados de esta Tesis han sido publicados en 5 **revistas internacionales de prestigio** y hay 2 **artículos más en proceso de revisión**. Además, ha generado amplia **transferencia de tecnología** (varias de las aportaciones han sido implementadas en sistemas reales) así como transferencia de conocimiento en forma de cursos de formación impartidos sobre temas relacionados con esta Tesis.

Capítulo 4

Aplicabilidad práctica al área específica

En primer lugar es necesario indicar que actualmente la tendencia en los sistemas de comunicaciones es a la utilización de tecnologías OFDM(A) y combinaciones de OFDM. Y son precisamente estos sistemas los que transportan las señales multimedia como el vídeo, la música o las fotos. Por este motivo, cualquier aporte que se proporcione a la mejora, a la simplificación o al incremento de ancho de banda de este tipo de sistemas tiene aplicación directa en los sistemas de nuevas generaciones o en los ya existentes, y por tanto en las aplicaciones de banda ancha que se transporten sobre ellos. Esta Tesis realiza aportaciones importantes a los sistemas OFDM(A) que obtienen mejoras sobre las prestaciones actuales de los sistemas OFDM y OFDMA, y más concretamente en entornos multi-usuario.

4.1. Sincronización

Centrándose en la aplicabilidad de las aportaciones de esta Tesis en la línea de la *sincronización*, es preciso decir que el ***Algoritmo de seguimiento de la desviación de frecuencia*** para sistemas OFDM propuesto [8] ha sido implementado con éxito en una plataforma de evaluación de sistemas OFDM para redes inalámbricas de la empresa Telefónica I+D [6]. Esta plataforma se ha utilizado para la evaluación de sistemas de video conferencia móvil. Gracias a este algoritmo han conseguido mejorar las prestaciones de este tipo de sistemas así como ampliar la cobertura. Las ventajas que ofrece el algoritmo son, además de la posibilidad de realizar el seguimiento de la desviación de frecuencia de forma precisa utilizando un número muy reducido de sub-portadoras piloto (lo cual hace el sistema más eficiente), también el incremento de la resolución en la estimación y la reducción de la complejidad y el espacio de integración en FPGA (*Field Programmable Gate Array*) al reutilizar el módulo CORDIC [50] para la estimación y corrección de la desviación de frecuencia.

Además, y dado que este algoritmo no requiere más que un número reducido de sub-portadoras piloto, puede ser implementado en la mayoría de los sistemas y estándares actuales que utilizan OFDM y disponen de sub-portadoras piloto para diversos fines.

Continuando con las aportaciones a la sincronización, ***el Procedimiento del Líder*** puede ser aplicable a cualquier sistema de comunicaciones *ad-hoc* que disponga de un canal que sea escuchado por todos los dispositivos que formen parte de la red. Originalmente está planteado para sistemas OFDMA pero es fácilmente extrapolable a otro tipo de sistemas. Gracias a la utilización del *procedimiento del líder*, se pueden simplificar muchos de los desarrollos de productos, pues reduce la sincronización multi-usuario en redes *ad-hoc* a un problema de sincronización mono-usuario en redes punto a punto, ampliamente estudiado y analizado. Cada vez son más los dispositivos multimedia que disponen de

capacidades de comunicación, y estos dispositivos suelen formar redes *ad-hoc*.

4.2. Modulación Adaptativa

En relación a la línea de *Modulación Adaptativa*, las aportaciones de esta Tesis también tienen una gran aplicabilidad.

En primer lugar, los algoritmos propuestos para la reducción y compresión de la información de realimentación en sistemas OFDMA incurren en una complejidad muy reducida y por tanto se pueden implementar fácilmente. Además, gracias a estos algoritmos se obtienen reducciones de hasta 6 veces la tasa original. Esto, teóricamente, permitiría el incremento del número de usuarios en hasta 6 veces, con las consiguientes ventajas para el operador o proveedor de servicios, que ve incrementado significativamente el número de usuarios o de servicios a los que es posible dar cobertura. Además, dado que se utiliza modulación adaptativa, se reduce significativamente la interferencia a otros sistemas así como la radiación electromagnética emitida, lo que redundaría en un incremento de las prestaciones globales y una reducción del impacto de estas tecnologías en la salud, respectivamente.

En segundo lugar, el estudio teórico sobre el *efecto de los errores en la estimación, predicción o realimentación de canal sobre la capacidad de sistemas OFDM* ofrece unos resultados que permiten el diseño de nuevos sistemas de comunicaciones basados en OFDM adaptativo porque se ha demostrado que los algoritmos de estimación de canal actuales son suficientemente precisos para que las pérdidas de capacidad debidas a los errores en la estimación sean relativamente pequeñas. No obstante, también de este estudio se desprende que si se quiere sistemas que trabajen a altas relaciones señal a ruido (por encima de 25 ó 30 dB), es muy recomendable la mejora de estos algoritmos de estimación, ya que en estos casos la degradación debida a los errores en la estimación de canal es más significativa.

En cuanto al estudio sobre un sistema OFDMA adaptativo realizado, permite la toma de decisiones de diseño que mejoren las prestaciones de los futuros sistemas de comunicaciones móviles 4G, pensados principalmente para la transmisión de contenidos multimedia móvil.

Por lo tanto, los resultados de esta Tesis tienen aplicación directa en la mayoría de los sistemas actuales de comunicaciones, además de servir para el diseño y la optimización de los sistemas futuros. Todo esto redundaría en la simplificación de la implementación de estos sistemas y el aumento de la eficiencia de los mismos.

Bibliografía

- [1] J. A. C. Bingham. Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come. *IEEE Communications Magazine*, 28(5):5–14, Mayo 1990.
- [2] David Gesbert and Robert W. Heart Jr. Adaptive modulation and mimo coding for broadband wireless data networks. *IEEE Communications Magazine*, pages 108–115, Junio 2002.
- [3] Hlaing Minn, V.K. Bhargava, and K.B. Letaief. A robust timing and frequency synchronization for OFDM systems. *IEEE trans. on Wireless Communications*, 2(4):822–839, Julio 2003.
- [4] Kai Shi and Erchin Serpedin. Coarse frame and carrier synchronization of OFDM systems: a new metric and comparison. *IEEE trans. on Wireless Communications*, 3(4):1271–1284, Julio 2004.
- [5] Zi-Wei Zheng, Zhi-Xing Yang, Chang-Yong Pan, and Yi-Sheng Zhu. Robust synchronization and channel estimation for the OFDM-based wlan systems. *IEEE trans. on Consumer Electronic*, 50(3):807–812, Agosto 2004.
- [6] Juan Manuel Vázquez Burgos, Belén Castán, Luis Miguel Campoy Cervera, Jaime Lluich, Ana García Armada, María Julia Fernández-Getino García, Francisco González Serrano, and Victor P. Gil Jiménez. Desarrollo de una interfaz OFDM configurable sobre una plataforma radio genérica. *Actas Telecom I+D*, Diciembre 2003.
- [7] Thomas Keller and Lajos Hanzo. Adaptive multicarrier modulation: a convenient framework for time-frequency processing in wireless communications. *Proc. of the IEEE*, 88(5):611–640, Mayo 2000.
- [8] Víctor P. Gil Jiménez, M. Julia Fernández-Getino García, Francisco J. González Serrano, and Ana García Armada. Design and implementation of synchronization and agc for OFDM-based wlan receivers. *IEEE trans. on Consumer Electronics*, 50(4):1016–1025, Noviembre 2004.
- [9] IP: Ana García Armada. Desarrollo de Algoritmos de Estimación de Canal, Sincronismo y Control Automático de Ganancia para WLAN basadas en OFDM. Contrato de I + D con Telefónica I + D, 2002 - 2003.
- [10] IP: Ana García Armada. Análisis de sistema de codificación de voz y modulación digital. Contrato de I + D con VIMESA, 2003 - 2004.
- [11] Víctor P. Gil Jiménez and Ana García Armada. Multi-user synchronization in ad-hoc OFDM-based wireless personal area networks. In *Proc. Wireless Personal Multimedia Communications. WPMC*, Septiembre 2005.
- [12] Víctor P. Gil Jiménez and Ana García Armada. Multi-user synchronization in ad-hoc OFDM-based wireless personal area networks. *Wireless Personal Communications Journal*, 40(3):387 – 399, Febrero 2007.
- [13] IP: Ana García Armada. COST 289: Spectrum and Power Efficient Broadband Communications. Acción Europea, 2003 - 2007.
- [14] Víctor P. Gil Jiménez and Ana García Armada. Bit-loaded H-OFDM to increase capacity in WLAN/WPAN. *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference VTC Fall 04. Los Angeles.*, 1(1), Septiembre 2004.
- [15] Ana García Armada, Beatriz Bardón Rodríguez, Víctor P. Gil Jiménez, and Matilde Pilar Sánchez Fernández. Modelling, performance analysis and design of WPAN systems. *Wireless Personal Communications Journal*, On Line. Publicación en Enero 2007. DOI:10-1007/s11277-006-9183-x.
- [16] IP: Ana García Armada. Power aware communications for wireless optimised personal area networks (PACWOMAN). Unión Europea. IST-2001-34157, 2002 - 2005.
- [17] IP: Ana García Armada. Optimización de Redes Inalámbricas de área personal para SERVICIOS flexibles (ORISE). Programa Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2000 - 2003, Ministerio de Ciencia y Tecnología, TIC2002-03498, 2002 - 2005.
- [18] Víctor P. Gil Jiménez, Ana García Armada, and Mounir Ghogho. Theoretical analysis of the effect of channel estimation errors on the capacity of OFDM systems. *IEEE trans. on Wireless Communications*, 2007. En proceso de revisión.
- [19] IP: M. Julia Fernández-Getino García. Modelado de Canal, Algoritmos y Capacidad para comunicaciones WiMaX (MACAWI). Programa Nacional de I + D. TEC-2005-07477-c02-02, 2005 - 2007.

- [20] IP: Ana García Armada. Mimo-ofdm: comunicaciones móviles de banda ancha optimizadas (MAMBO). Universidad Carlos III de Madrid, 2005 - 2006.
- [21] Víctor P. Gil Jiménez, Ana García Armada, Thomas Eriksson, and Arne Svensson. Reducing feedback information for adaptive modulation in wireless environments. *IEEE trans. on Wireless Communications*, 2007. En preparación.
- [22] Khalid el Baamrani, A. A. Ouahman, Víctor P. Gil Jiménez, Ana García Armada, and Said el Allaki. Subcarrier and power allocation for the downlink of multiuser ofdm transmission. *Wireless Personal Communications Journal*, 39(4):457 – 465, Diciembre 2006.
- [23] Khalid El Baamrani, Víctor P. Gil Jiménez, Ait Ouahman, Ana García Armada, and Said Allaki. Low-complexity multiuser bit-loading algorithm for the downlink of wireless local area networks. *Advances in Modelling and Simulations Enterprise (AMSE) Journal*, 48(6):15 – 24, Diciembre 2005.
- [24] Víctor P. Gil Jiménez, M. Julia Fernández-Getino García, Matilde P. Sánchez Fernández, and Ana García Armada. Efficient Implementation of Complementary Golay Sequences for PAR Reduction and Forward Error Correction in OFDM-based WLAN systems. *Wireless Communications and Mobile Computing de la Editorial Wiley*, 2007, en proceso de revisión.
- [25] Víctor P. Gil Jiménez and Ana García Armada. Mejora de la capacidad en redes wlan y wpan mediante bit-loading. *Actas del Telecom I + D*, 2002.
- [26] Víctor P. Gil Jiménez, Matilde Sánchez Fernández, and Ana García Armada. Study and Implementation of Complementary Golay Codes for PAR reduction in OFDM Signals. *Proc. IEEE Mediterranean Electronical Conference. MELECOM'02*, pages 198 – 203, Mayo 2002.
- [27] Víctor P. Gil Jiménez, M. Julia Fernández-Getino García, and Ana García Armada. Diseño y análisis de parámetros de la capa física del sistema H-OFDM para redes flexibles. *Actas del Simposium URSI*, Septiembre 2003.
- [28] Jesus García-Arroba, M. Julia Fernández-Getino García, Ana García Armada, and Víctor P. Gil Jiménez. Evaluación del método ops para la reducción de los picos de potencia en señales OFDM. *Actas del Simposium URSI*, Septiembre 2003.
- [29] Isaac Seoane Pujol, Víctor P. Gil Jiménez, Francisco J. González Serrano, M. Julia Fernández-Getino García, and Ana García Armada. Descripción Hardware en Verilog de un receptor OFDM para WLAN. In *Actas URSI*, Septiembre 2004.
- [30] Víctor P. Gil Jiménez and Ana García Armada. Reduccion de la información de realimentación en sistemas OFDMA adaptativos para 4G. In *Actas del URSI*, Septiembre 2006.
- [31] Víctor P. Gil Jiménez, M. Julia Fernández-Getino García, and Ana García Armada. Channel estimation for bitloading in OFDM-based wlan. *IEEE Interantional Symposium on Signal Process and Information Technologies ISSPIT*, pages 581–585, Diciembre 2002.
- [32] Ana García Armada, Víctor P. Gil Jiménez, M. Julia Fernández-Getino, and J. Luis García. H-ofdm design for wireless personal area communications. *Proc. IST Mobile Summit 2003.*, Julio 2003.
- [33] Ana García-Armada, Juan R. Torre, Víctor P. Gil Jiménez, and M. Julia Fernández-Getino García. Evaluation of different spreading sequences for mc-cdma in wlan environments. *Proc. IEEE 4th Workshop in Multi-Carrier Spread Spectrum*, Octubre 2003.
- [34] Beatriz Bardón, Víctor P. Gil Jiménez, M.Mar Olmedilla, Matilde P. Sánchez, and Ana García-Armada. Discrete channel simulation of general packet radio service. *Proc. of First International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HETNET)*, Julio 2003.
- [35] Víctor P. Gil Jiménez, M. Julia Fernández-Getino García, Ana García Armada, and J. Luis García. Ofdm channel estimation, synchronization and performance evaluation for wireless personal communications. *Proc. IST Mobile Summit*, Junio 2004.
- [36] Ana García Armada, Víctor P. Gil Jiménez, and Jacinto Darriba. Analysis of phase noise effects in multi-user OFDM. *Proc. IEEE First Internatinal Symposium on Control Communications, and Signal Processing (ISCCSP)*, Marzo 2004.
- [37] Khalid El Baamrani, Víctor P. Gil Jiménez, Ait Ouahman, Ana García Armada, and Said Allaki. Low-complexity multiuser bit-loading algorithm for the downlink of wireless local area networks. *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference Spring VTS*, 30 May - 1 June 2005.
- [38] Beatriz Bardón Rodríguez, Isaac Seoane Pujol, Víctor P. Gil Jiménez, Matilde P. Sánchez Fernández, and Ana García Armada. Multi-user synchronization in ad-hoc OFDM-based wireless personal area networks. In *Proc. Wireless Personal Multimedia Communications. WPMC*, Septiembre 2005.
- [39] Víctor P. Gil Jiménez and Ana García Armada. An Adaptive MIMO OFDM system: Design and Performance evaluation. In *Proc. IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems*, Septiembre 2006.

-
- [40] M. Julia Fernández-Getino García, Jose Luis Rojo Álvarez, Víctor P. Gil Jiménez, Felipe Alonso Atienza, and Ana García Armada. *Kernel Methods in Bioengineering, Signal and Image Processing*, chapter A complex Support Vector Machine Approach to OFDM Coherent demodulation. Idea Group Inc., 2007.
- [41] IP: Ana García Armada. Analysis of new multipath mitigation techniques for navigation receivers. Contrato de I + D con la European Space Agency (ESA), 2001 - 2002.
- [42] IP: Fernando Díaz de María. Desarrollo de WLAN basada en técnicas de espectro ensanchado y multiportadora. CICYT y fondos FEDER (2FD97-1066-C02-02), 1999 - 2001.
- [43] IP: Ana García Armada. Desarrollo y validación de modelos de markov para la interfaz radio de bluetooth en presencia de sistemas interferentes. Comunidad de Madrid. 07T-0025-2003-1, 2003 - 2004.
- [44] Víctor P. Gil Jiménez and Ana García Armada. Bit-loading in hybrid OFDM (h-ofdm). *Contribution to COST 289*, <http://www.ee.hacettepe.edu.tr/cost289/index.php> 2004.
- [45] Víctor P. Gil Jiménez and Ana García Armada. Bit-Loaded H-OFDM Performance in WPAN environments. In *Proc. of 1st Workshop in COST 289*, Julio 2004.
- [46] Víctor P. Gil Jiménez and Ana García Armada. Reducing the feedback information in OFDM-based Adaptive Modulation Systems for 4G. In *Proc. of 2nd Workshop in COST 289*, Julio 2005.
- [47] ETSI-BRAN. Channel Models for HiperLAN 2 in Different Indoor scenarios. Technical report, ETSI - BRAN, Marzo 1998.
- [48] Shuichi Ohno and Georgios B. Giannakis. Capacity maximizing MMSE-optimal Pilots for Wireless OFDM over Frequency-selective Block Rayleigh-Fading channels. *IEEE trans. on Information Theory*, 50(9):2138 – 2145, Septiembre 2004.
- [49] Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000. Technical report, Recommendation ITU-R M.1225, 2000.
- [50] Ray Andraka. A survey of CORDIC algorithms for FPGAs. *Proc. of the 1998 ACM/SIGDA 6th International Symposium on Field Programmable Gate Arrays*, pages 191–200, Febrero 1998.