

RESUMEN DEL PFC ‘Estudio y Diseño de Receptores para UMTS’

INDICE

1.- Introducción

2.- Detección Multiusuario

3.- Metodología y modelo de sistema

4.- Receptores propuestos para UMTS

4.1.- El Filtro Adaptado para UMTS

4.2.- El SIC (*Successive Interference Cancellor*) para UMTS

4.3.- El PIC (*Successive Interference Cancellor*) para UMTS

5.- Conclusiones

1.- INTRODUCCIÓN

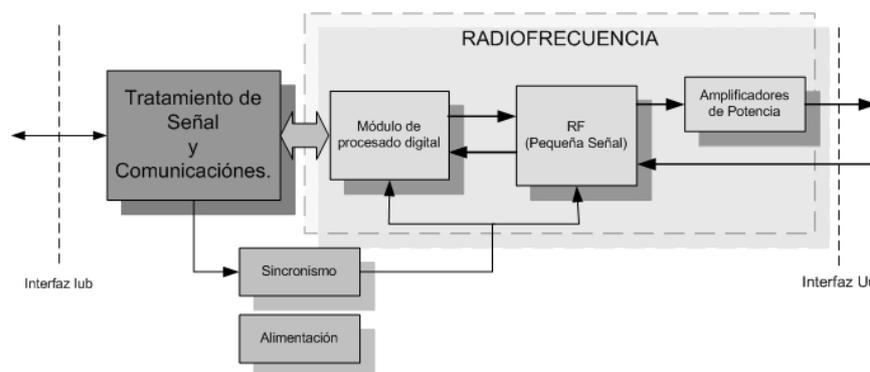
El proyecto titulado “Estudio y diseño de receptores para UMTS” está motivado por el intenso esfuerzo que la actualmente llamada ‘Sociedad de la Información’, está llevando a cabo para avanzar en la investigación y explotación de las ‘Tecnologías de la Información y las Comunicaciones’, puesto que son éstas el núcleo del cambio social que se viene experimentando a lo largo de la última década.

Es en esta nueva Economía ‘Informacional’, tal y como la define el sociólogo Manuel Castells donde surge la necesidad del desarrollo de redes de información cada vez más eficientes que permitan el incremento de la productividad, el beneficio y el retorno sobre la inversión.

Tal necesidad de eficiencia y capacidad ha motivado el desarrollo de nuevos sistemas en el campo de las comunicaciones móviles, como son los sistemas de Tercera Generación (3G). Es en este marco donde se justifica el presente proyecto, dado que con su desarrollo se pretende contribuir a aumentar la base de conocimiento sobre tecnologías de comunicaciones móviles de última generación.

El proyecto se centra en la primera variante de UTRA (UTRA, *UMTS Terrestrial Radio Access Network*), el modo FDD, para el caso del enlace ascendente (terminal móvil - estación base), ya que será esta variante la que primeramente se despliegue en las etapas iniciales de desarrollo de UMTS.

Debido a las necesidades de eficiencia espectral que UMTS requiere, resulta conveniente explorar y desarrollar los receptores basados en detección multiusuario. Por la propia naturaleza del proceso de detección, su aplicación es adecuada en las estaciones base de la red UTRAN (Nodos-B), que deben ser capaces de recibir al mayor número de usuarios posible dentro de su área de cobertura y donde las limitaciones en cuanto a complejidad no son tan grandes como en los terminales móviles. En la siguiente figura se muestra el ámbito de aplicación de las técnicas a desarrollar:



El proyecto se aborda desde una doble perspectiva, una académica, donde se analiza la base teórica y los fundamentos de la detección multiusuario, y otra empírica, donde haciendo uso de los conceptos adquiridos se proponen y desarrollan detectores para un sistema comercial como es UMTS.

Los dos primeros capítulos se pueden considerar correspondientes a la fase de estudio de receptores CDMA de carácter general, donde se revisan conceptos y modelos matemáticos relacionados con los sistemas de comunicaciones basados en CDMA y principales técnicas de detección multiusuario,

El proyecto presta una especial atención a la técnica que más interés ha despertado de cara a su utilización en sistemas comerciales, como es la Cancelación de Interferencias en Paralelo (PIC, *Parallel Interference Cancellation*) sobre la cual se ha realizado una interesante aportación teórica, corroborada por los resultados de simulación y que ha desembocado en la publicación de un artículo en la 'Vehicular Technology Conference (VTC'04)' celebrada en Septiembre de 2004 en Los Angeles, (USA).

El cuarto capítulo está dedicado al sistema UMTS; se realiza una breve descripción de su estructura, prestando una mayor atención a los aspectos de las especificaciones técnicas del 3GPP que más interesan de cara a la realización mediante software del transmisor para la simulación del enlace ascendente, tales como el esparcimiento espectral, la generación de códigos o la modulación.

En el quinto capítulo se determina el modelo de sistema a emplear para las simulaciones de los capítulos siguientes, así como las características con las que se va a dotar al primitivo simulador de capa física realizado en el presente proyecto.

Los siguientes tres capítulos del proyecto se corresponden con la fase de diseño, y en ellos se proponen tres estructuras distintas para realizar detección multiusuario en UMTS bajo canales con ruido aditivo AWGN (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*).

El análisis de rendimiento de las estructuras propuestas se lleva a cabo mediante simulaciones por ordenador del proceso de recepción en el enlace ascendente. Concretamente, se busca estudiar las características de detección multiusuario, aislando este problema de otros como el canal multitrayecto, la sincronización o la codificación, que se supondrán ideales en las simulaciones.

En los capítulos seis y siete se desarrollan y analizan el Filtro Adaptado para UMTS y el Cancelador de Interferencias en Sucesivo (SIC, *Succesive Interference Cancellation*), para de esta forma obtener un marco referencial con el que evaluar el rendimiento de la solución principal de este proyecto, el PIC.

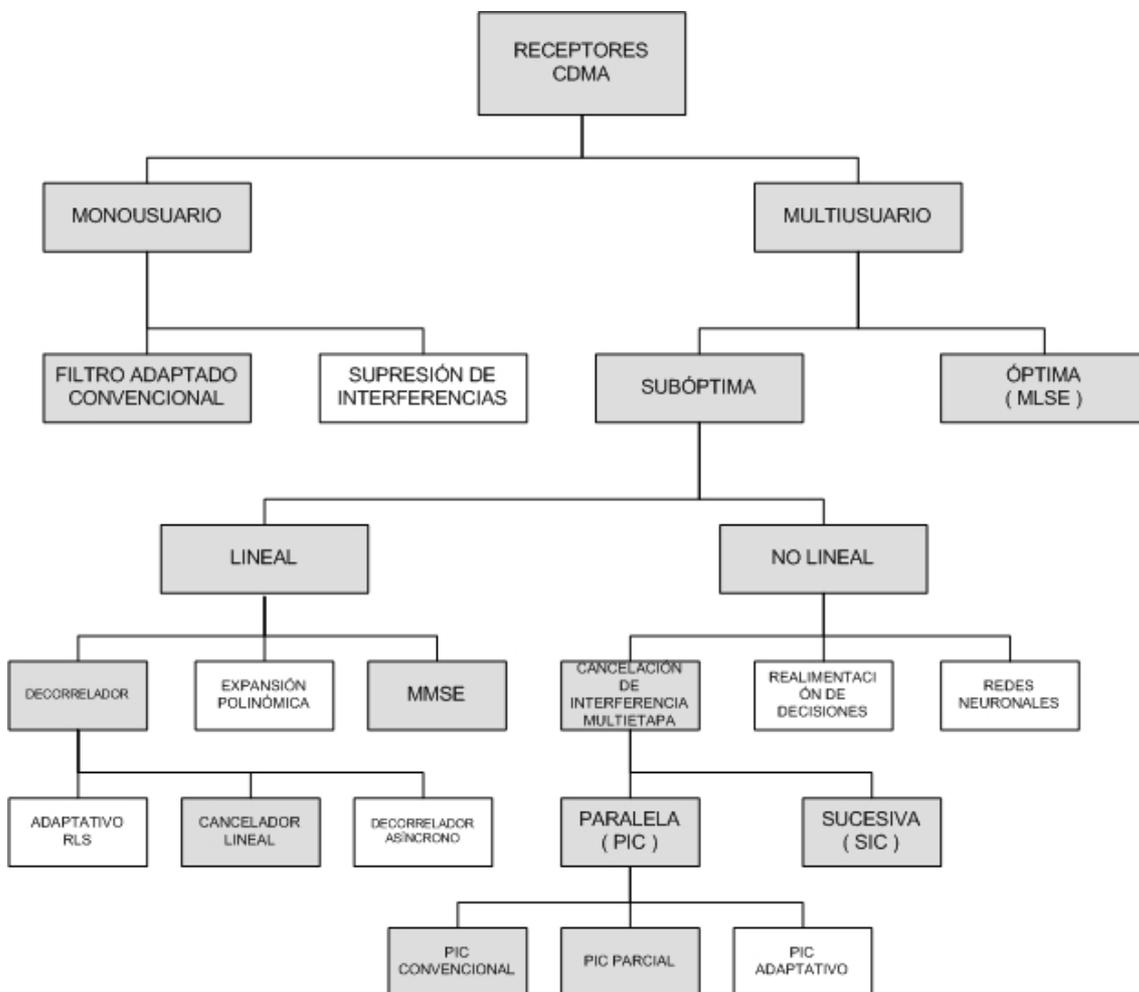
El capítulo ocho se dedica a la cancelación de interferencias paralela (PIC, *Parallel Interference Cancellation*) y es el capítulo principal del proyecto. En el se estudia la técnica de forma exhaustiva, analizando las distintas variantes y proponiendo dos estructuras diferentes para realizar la cancelación parcial. Se analizarán los distintos parámetros de diseño, prestando especial atención a los factores de cancelación parcial, empleando el límite teórico obtenido límite teórico como restricción a los valores de dichos factores. Se evalúan los resultados de simulación, comparándolos con los obtenidos por los detectores anteriores, Filtro Adaptado y SIC.

2.- DETECCIÓN MULTIUSUARIO

Las técnicas de detección multiusuario tienen como objetivo la demodulación conjunta de señales digitales de información mutuamente interferentes.

Las áreas de aplicación de dichas técnicas se extienden a múltiples ámbitos de las comunicaciones comerciales tales como la telefonía móvil celular, comunicaciones por satélite o televisión digital.

En la siguiente figura se muestra un esquema de las distintas técnicas de recepción multiusuario propuestas a lo largo de los últimos años. Debido a la excesiva complejidad de la solución óptima, diferentes soluciones de carácter 'subóptimo' se han desarrollado para sistemas CDMA de carácter general.



Los bloques sombreados representan los tipos de receptores que se han analizado con más detalle debido a su potencial interés comercial.

Las principales conclusiones que se han derivado de la fase de análisis son las siguientes:

- 1.- La solución óptima al problema de la detección multiusuario presenta un grado de complejidad exponencial por lo que resulta inviable para su realización en sistemas prácticos de alta capacidad, como son los orientados al ámbito comercial.
- 2.- El filtro adaptado convencional es la solución de menor complejidad, aunque también resulta inadecuada cuando se pretende conseguir una alta capacidad en el sistema, debido a las pobres características de recepción que presenta.
- 3.- Los sistemas basados en cancelación de interferencias son los que han despertado un mayor interés de cara a su aplicación en sistemas comerciales de tercera generación, por ello, en el presente proyecto se ha decidido ir más allá de las características generales que estos esquemas poseen y se ha profundizado en su comportamiento, proponiendo esquemas adaptados para UMTS.
- 4.- La versión simple del PIC se puede modelar como una transformación no lineal que no cumple las condiciones suficientes de los teoremas clásicos de convergencia a un punto fijo de funciones, y es por tanto intrínsecamente inestable.
- 5.- Versiones avanzadas del PIC, como es la Cancelación Parcial de Interferencias Multietapa pueden solucionar el problema de la inestabilidad, y para ello se propone un nuevo algoritmo para la elección de los factores de cancelación en cada etapa.

3.- METODOLOGÍA Y MODELO DE SISTEMA

Para la evaluación de los receptores propuestos en los siguientes capítulos del proyecto se ha realizado un primitivo simulador de capa física para el 'uplink' en el modo FDD de UMTS, realizado en Matlab.

Se ha intentado dotar al simulador de las características adecuadas para la correcta evaluación de los algoritmos de recepción deseados, soslayando los efectos menos influyentes en el tema que se trata, para obtener una solución de compromiso entre realismo de las simulaciones y simplicidad y tiempo de desarrollo.

Las principales características del simulador desarrollado son las siguientes:

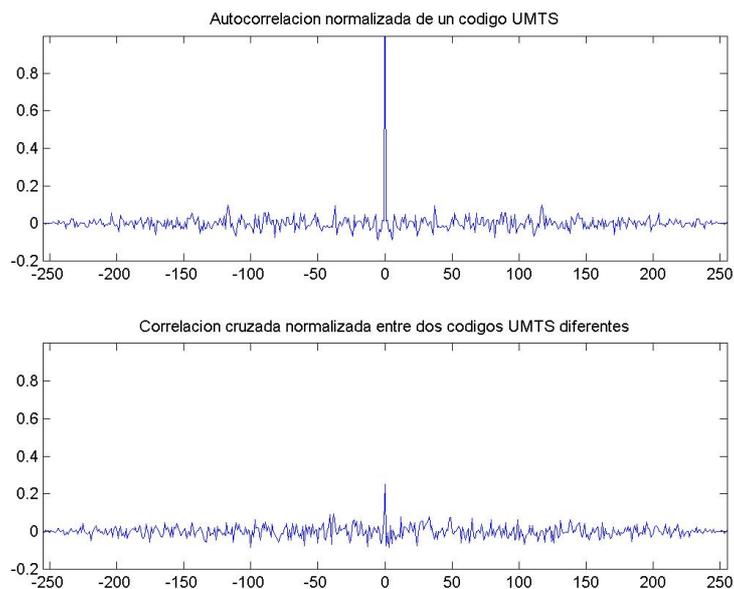
- 1.- Los amplificadores y filtros de la parte de RF de los equipos de usuario y nodo-B se han considerado ideales, el espectro de señal no se distorsiona por efecto de estos en el transmisor ni en el receptor.
- 2.- El canal empleado es AWGN con potencia de ruido variable, que equivale a considerar un canal multitrayecto junto con un receptor RAKE ideal con tantas ramas como sea necesario para recuperar la totalidad de la energía de señal y estimación de canal perfecta.

3.- La interferencia de otros usuarios se simula generando las señales de estos mediante los mismos procedimientos que los empleados para generar la señal del usuario de interés, dado que al contrario de lo utilizado en otros sistemas, no se supone que la interferencia multiacceso pueda ser modelada mediante procesos de tipo gaussiano, para de esta forma poder explotar la característica de interferencia en la detección multiusuario que se estudia.

Desde un punto de vista de señales aleatorias, la suposición que se hace en el último punto resulta interesante dado que en los sistemas en los que las secuencias de código no son ortogonales, las señales de los distintos usuarios dejan de ser estadísticamente independientes, invalidándose así la hipótesis del teorema del límite central, con lo cual, en general, la suma de estas señales no sería modelable mediante una variable aleatoria de tipo gaussiano. Es por ello que la interferencia multiacceso es considerada mediante un modelo más preciso.

El estudio de rendimiento se aborda desde un escenario de usuarios 'síncronos', es decir, que comienzan sus transmisiones en el mismo instante de tiempo. Aunque esta es una situación poco realista para el caso del enlace ascendente, tiene dos importantes ventajas:

- 1.- La realización software de la herramienta de simulación resulta menos compleja, resultando en un desarrollo rápido y eficiente.
- 2.- Representa el caso peor en lo que a interferencia multiusuario se refiere, dado que para usuarios que se reciban con la misma potencia, la mayor cantidad de interferencia se produce cuando estos lo hacen de forma síncrona, como se deduce de la observación de las funciones de correlación entre códigos que se representan en la siguiente figura :



Dado que los resultados que se persiguen en el proyecto son de tipo cualitativo, este escenario de caso peor proporciona un excelente banco de pruebas para los receptores que se estudian.

Asumiendo que todos los usuarios transmiten flujos de datos y de control de forma síncrona, la señal recibida se puede expresar como la suma de M señales complejas, cada una de ellas con un código de ‘scrambling’ complejo, $s_u(t)$, de longitud 256 chips.

La señal compleja en banda base se puede entonces expresar como:

$$r(t) = \sum_{u=1}^M \sum_{i=-\infty}^{\infty} \left(A_{d,u}(i) \sum_{j_u=0}^{M_u-1} (b_{d,u}(i, j_u) c_{d,u}(t - j_u T_u - iT)) + j \cdot A_{c,u}(i) b_{c,u}(i) c_{c,u}(t - iT) \right) s_u(t - iT) + n(t)$$

Donde para el usuario u , $c_{d,u}(t)$ y $c_{c,u}(t)$ son los códigos de ‘spread’ de los canales de datos y control, de longitudes SF_u y 256 chips, respectivamente, $M_u = \frac{256}{SF_u}$, T representa la duración de un periodo de código de scrambling, y $T_u = \frac{T}{M_u}$, $b_{d,u}(i, j_u)$ representan los j_u bits transmitidos durante el periodo de código de ‘scrambling’ i , $b_{c,u}(i)$ son los bits de control, $A_{d,u}(i)$, $A_{c,u}(i)$ representan las amplitudes de las señales recibidas en fase y cuadratura y por último, $n(t)$ representa ruido aditivo blanco gaussiano.

4.- RECEPTORES PROPUESTOS PARA UMTS

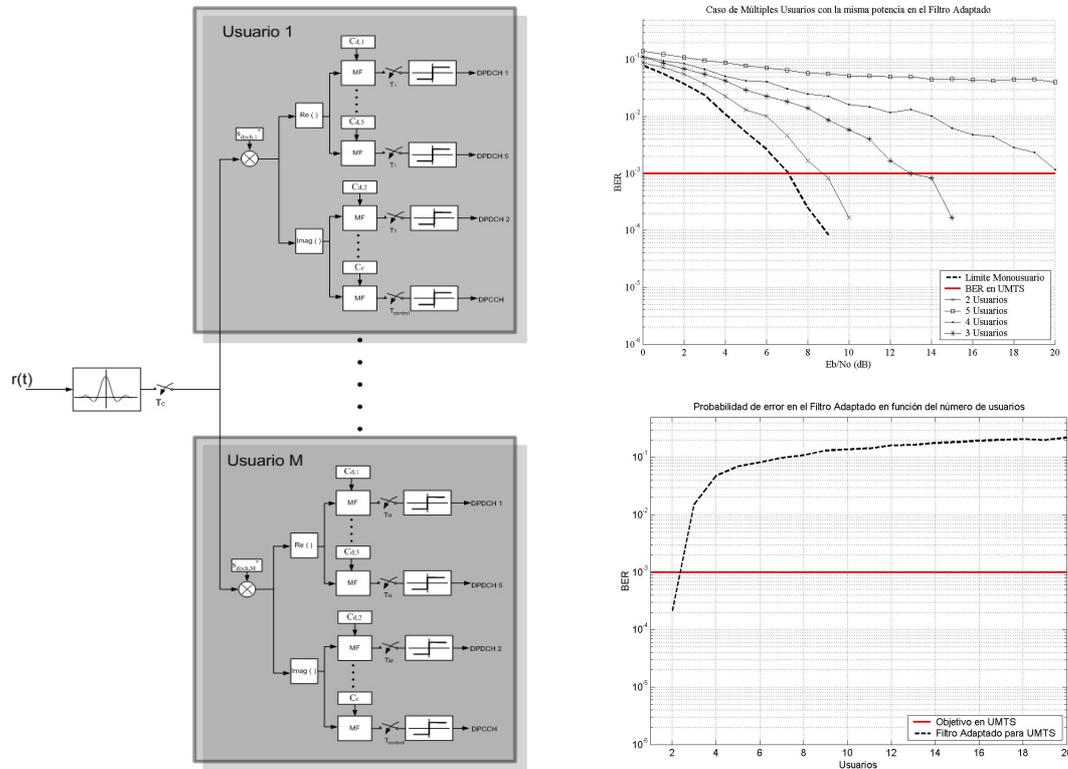
Para la fase de diseño se ha tomado como base el análisis de las distintas estrategias de recepción multiusuario previamente realizado, y en ella se desarrollan en los siguientes receptores, siguiendo las características de la especificación técnica para UMTS del 3GPP:

1. El Filtro Adaptado para UMTS.
2. El SIC (*Successive Interference Cancellor*) para UMTS
3. Distintas versiones del PIC (*Parallel Interference Cancellor*) para UMTS.

4.1.- El Filtro Adaptado para UMTS

Mediante la primera de las anteriores estructuras, el Filtro Adaptado se establece mediante simulación el denominado límite monousuario, dado que para el caso particular de un solo usuario en el sistema, el Filtro Adaptado resulta equivalente al receptor óptimo. Será este límite el que determinará la mínima probabilidad de error de bit (BER) con la que un usuario se podrá detectar.

En la siguiente figura se representa un esquema de la estructura propuesta, el límite monousuario obtenido, así como una muestra de la sensibilidad del receptor frente al aumento de carga en la celda y de la evolución de la BER en función del número de usuarios activos.



Además se obtienen distintas evoluciones de la probabilidad de error en función de la relación de energía por bit a densidad espectral de ruido E_b/N_0 o del número de usuarios activos para distintas condiciones de control de potencia.

La principal conclusión que se extrae de los resultados de simulación es que el Filtro Adaptado, por sí solo, representa una opción poco potente en lo que a detección multiusuario se refiere, aunque debido a su extremada sencillez, no deja de ser una opción viable de cara a su utilización en un sistema comercial.

4.2.- El SIC (*Successive Interference Canceller*) para UMTS

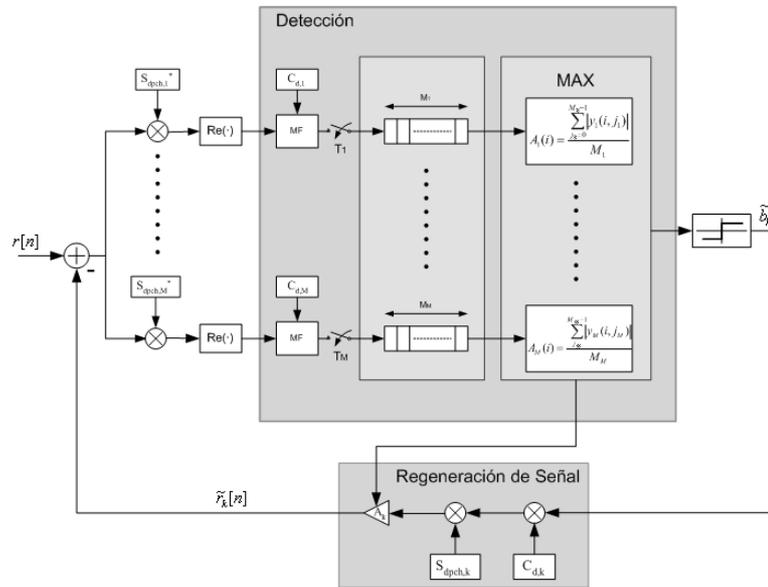
En el capítulo siete se realizará un estudio de las principales características de un receptor multiusuario basado en la técnica de cancelación de interferencias sucesiva (SIC, *Successive Interference Cancellation*), Concretamente, los receptores que se desarrollarán serán los llamados ‘de banda ancha’, ya que la cancelación se realizará sobre la señal esparcida espectralmente.

Como su propio nombre indica, en recepción SIC, el proceso de detección – cancelación ocurre de forma sucesiva.

Así, en cada iteración los usuarios se ordenan en orden creciente de potencia, y se recibe al primer usuario (el de mayor potencia), ya que será el que presente una mayor relación señal a interferencia, se reproduce la interferencia generada por ese usuario y se resta a la señal recibida.

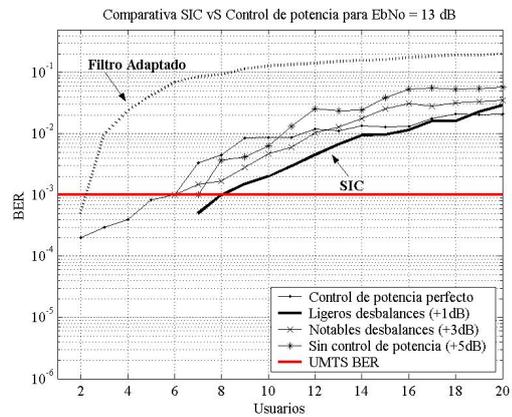
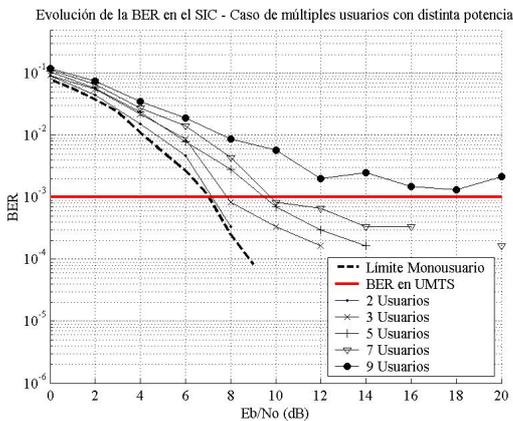
Así, se puede considerar, si las decisiones han sido correctas, que la señal recibida contiene un usuario menos, por lo que el proceso se puede repetir hasta que quede un solo usuario, reordenando a los usuarios no cancelados en orden creciente de energía al principio de cada iteración.

En la siguiente figura se muestra un esquema simplificado de la estructura propuesta para UMTS:



La solución adoptada para la estimación de amplitud de usuarios con diferentes velocidades de transmisión es la siguiente: Dado que el periodo del código de 'scrambling' es fijo y de longitud 256 chips, se toma como estimación de amplitud una media del valor absoluto de los estadísticos de decisión obtenidos en un periodo de código de 'scrambling' para cada usuario.

A continuación se muestran algunos de los resultados de simulación obtenidos:



La principal conclusión que de este capítulo se extrae es la notable mejora en prestaciones respecto al filtro adaptado, subrayando especialmente la extraordinaria capacidad de rechazo al efecto ‘cerca – lejos’ que el SIC posee.

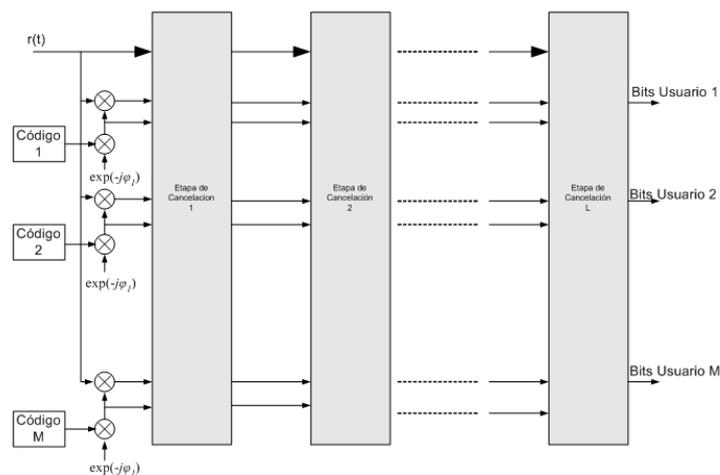
4.3.- El PIC (*Successive Interference Canceller*) para UMTS

A lo largo del capítulo octavo se proponen, desarrollan y analizan diferentes variantes de la técnica que más interés ha despertado de cara a su aplicación comercial, como es la PIC (*Parallel Interference Cancellation*).

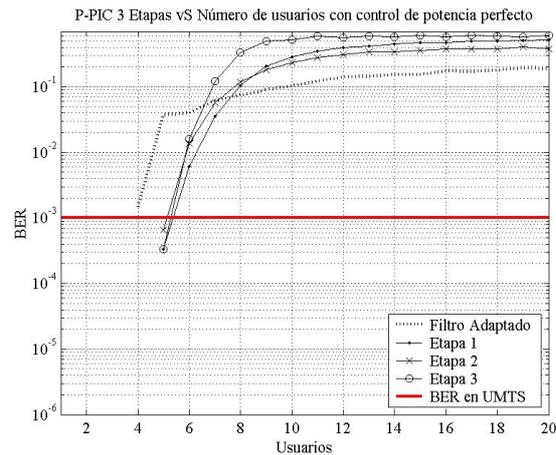
Las distintas alternativas consideradas son las siguientes:

1. Cancelación total en una sola etapa.
2. Cancelación total multietapa.
3. Cancelación parcial mediante una estructura simplificada.
4. Cancelación parcial mediante una estructura sofisticada.

Las estructuras multietapa propuestas se pueden representar mediante la siguiente figura conceptual, donde tras una etapa de entrada basada en Filtros Adaptados, los estadísticos de decisión sucesivamente se refinan para eliminar la interferencia multiacceso que unos producen sobre otros:

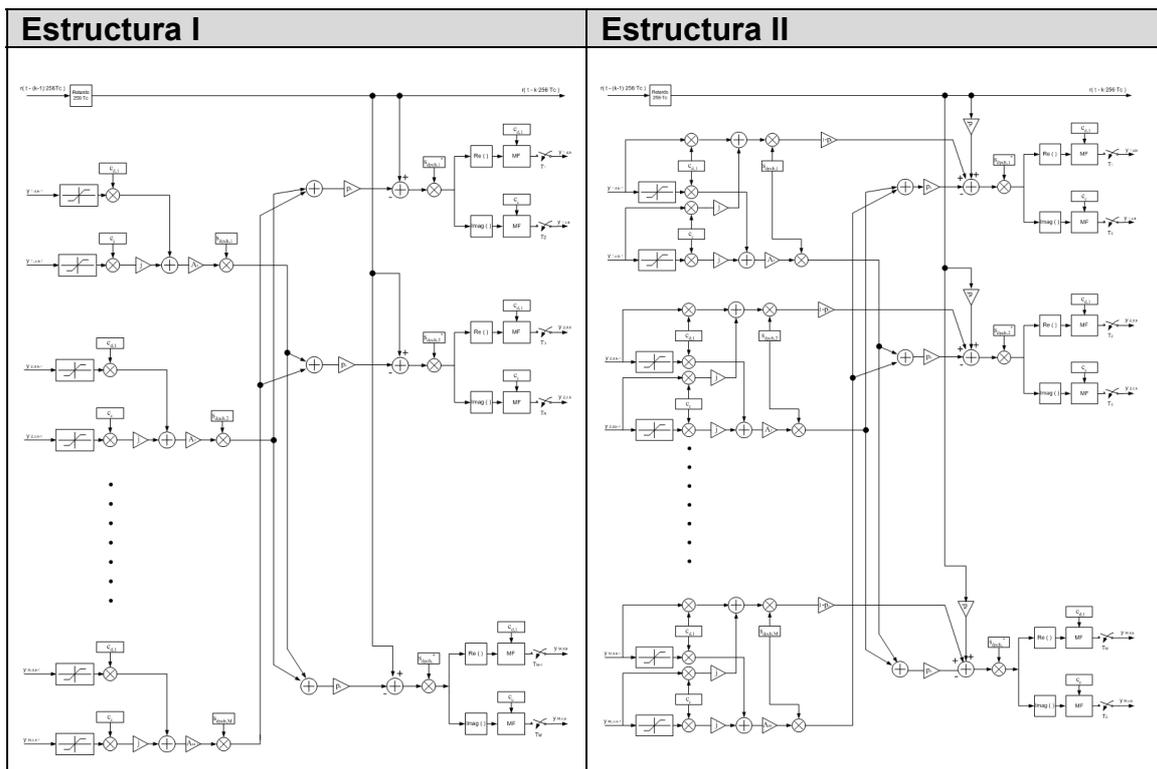


A través de los resultados de simulación se demuestra la inestabilidad de la solución basada en cancelación total, tanto de una etapa como multietapa, debido a la falta de fiabilidad de los estadísticos obtenidos en la etapa inicial, donde las sucesivas etapas no solo no mejoran, sino que empeoran la probabilidad de error de bit (BER) para un determinado usuario:



Para solucionar el problema de la inestabilidad se recurre a soluciones más sutiles, como son las que se basan en cancelación parcial multietapa. En este tipo de estructuras, tan solo una porción de la interferencia se elimina en cada etapa. A medida que la cancelación progresa, las estimaciones son más precisas, y se puede aumentar la cantidad de interferencia que se elimina. La cantidad de interferencia a eliminar (factor de cancelación) es un parámetro de diseño crítico que se estudia en profundidad.

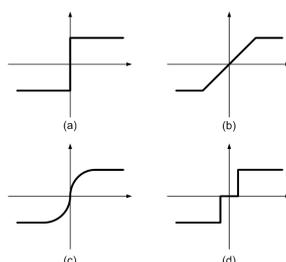
Se proponen dos estructuras para realizar la cancelación de interferencias en cada etapa particularizadas para el caso de UMTS, y que se muestran a continuación:



Los principales parámetros de diseño que se han considerado para la realización de las estructuras propuestas han sido los siguientes:

1. Dispositivos de decisión: Determinan la transformación que se aplica a un estadístico de decisión en una etapa de cancelación.

Pueden ser basados en ‘Soft Decisions’ o ‘Hard Decision’. Por ejemplo:



2. Factores de Cancelación: Hasta la fecha, se habían considerado como parámetros indicativos de la probabilidad de que un determinado estadístico fuese correcto, y por tanto se les asignaban valores entre [0,1]. Se proponen dos algoritmos para su evaluación:

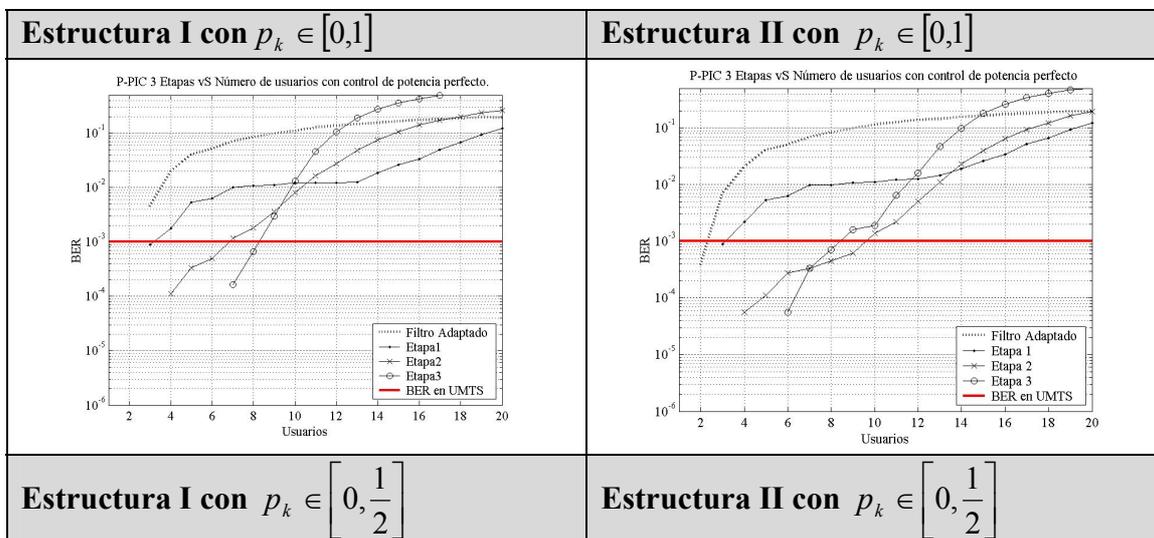
- $p_k = 1$, donde k es el número de etapa concreto
- $p_k = \frac{k}{K_{max}}$ donde K_{max} el número de etapas total.

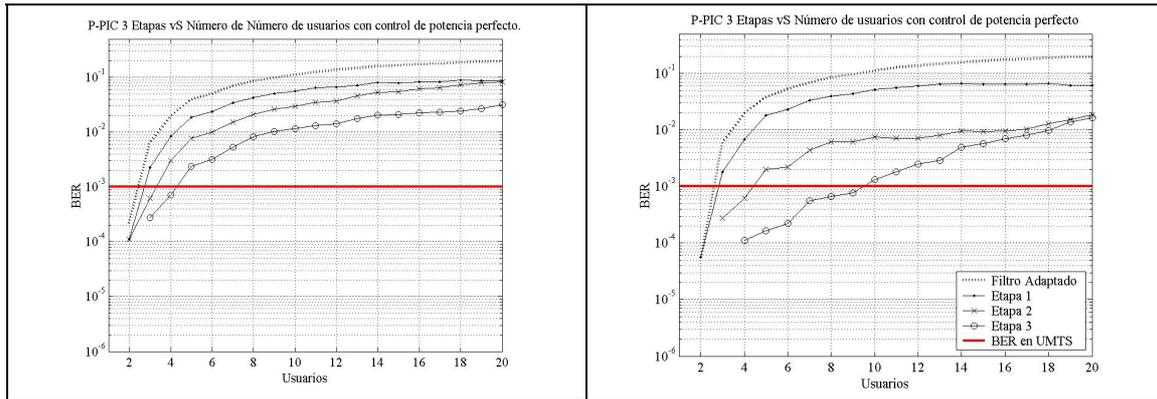
Sin embargo, el análisis del PIC realizado en el Anexo A del proyecto, para el marco de sistema CDMA generales arroja un límite teórico de 0.5, por lo que se propone como para la elección de los factores de cancelación el siguiente algoritmo:

- $p_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{k}{K_{max}}$ de forma que $p_k \in \left[0, \frac{1}{2}\right]$

3. Estimación de Amplitud: Basada en promediado sobre los estadísticos en periodos anteriores, frente a la utilización de la amplitud del estadístico de decisión actual.

Un resumen de los resultados de simulación obtenidos para las dos estructuras estudiadas con los dos algoritmos para la elección de los factores de cancelación se presenta a continuación:

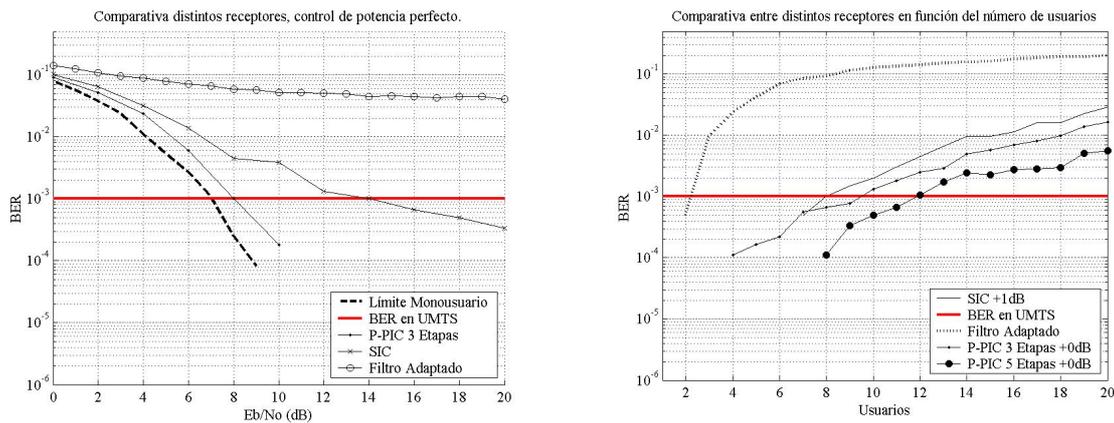




Se demuestra por tanto como el problema de la inestabilidad se resuelve mediante la limitación del valor máximo de la interferencia cancelada en cada etapa.

Por otro lado, se observa como la estructura más sofisticada posee una capacidad de detección multiusuario mayor.

El capítulo se complementa con un estudio comparativo entre los tres detectores propuestos para UMTS. Un extracto de dicho estudio se representa a través de las siguientes figuras:



Se puede observar como mejor solución propuesta es la desarrollada para el caso de Cancelación Parcial de Interferencias en Paralelo con el algoritmo y la estructura propuestas en el ámbito del proyecto.

Por último, y como resumen del estudio comparativo se adjunta la siguiente tabla, donde se resumen las características cualitativas de los receptores estudiados:

	FA	SIC	PIC
SENSIBILIDAD Eb/No	Muy baja	Media	Alta
RESISTENCIA ‘CERCA-LEJOS’	Muy baja	Muy Alta	Alta

RESISTENCIA 'MAI'	Muy baja	Media	Alta
RETARDO	Bajo	Alto	Medio
VERSATILIDAD EN EL DISEÑO	Baja	Media	Alta
COMPLEJIDAD Y COSTE	Baja	Media	Alta

5.- CONCLUSIONES

La solución óptima al problema de la detección multiusuario presenta un grado de complejidad tal que resulta inviable para su realización en sistemas prácticos orientados al ámbito comercial.

El filtro adaptado posee características de escasa resistencia frente a la interferencia multiusuario y al efecto ‘cerca – lejos’. Pese a ser la solución de menor complejidad, resulta inadecuada cuando se pretenden conseguir buenas características de recepción y una alta capacidad en el sistema.

Las opciones de detección conjunta, tales como el Decorrelador y el Filtro MMSE solventan las características negativas del filtro adaptado, a costa de introducir una complejidad adicional, debido a la necesidad de invertir la matriz de correlación de códigos.

Una de las principales ventajas que presentan las alternativas de cancelación de interferencias es que no necesitan conocer la matriz de correlación de códigos, ni por tanto llevar a cabo la inversión de ésta. Esto los hace más adecuados como primera opción a la hora de realizar detección multiusuario en un sistema comercial.

El principal resultado obtenido es que el SIC mejora notablemente el rendimiento ofrecido por el banco de filtros adaptados en lo que a resistencia frente al efecto ‘cerca – lejos’ se refiere, haciéndolo aconsejable en entornos donde sea difícil realizar un control de potencia preciso. Sin embargo, el retardo que se introduce en la recepción aumenta con el número de usuarios en el sistema, lo cual es una característica bastante negativa en sistemas de alta capacidad.

Ello hace que la variante de cancelación en paralelo, con un retardo mucho más limitado, se torne interesante para su empleo en la recepción en celdas con alta carga, como pretende ser UMTS.

De especial importancia ha resultado la elección de los factores de cancelación en el caso de cancelación parcial de interferencias paralela. El análisis propuesto arroja un límite en el valor que estos factores pueden tomar para garantizar un funcionamiento estable a medida que aumenta la carga en el sistema.

Las mejoras en cuanto a sensibilidad en recepción que el PIC introduce implican una reducción de la potencia transmisión por parte de los equipos de usuario, con lo que

los Nodos-B que empleen este tipo de detectores exigirán un menor consumo a los terminales móviles, permitiendo reducir el tamaño de la batería o incrementar el tiempo de servicio.

Por último, cabe señalar que numerosos autores coinciden en que la técnica de cancelación de interferencias paralela es una de las técnicas más prometedoras en lo que a detección multiusuario se refiere por lo que los esfuerzos en la comprensión de los procesos que se llevan a cabo en este tipo de receptores pueden arrojar resultados interesantes para que la red UTRAN alcance la madurez necesaria y los servicios de tercera generación que pretende prestar UMTS se puedan llevar a cabo de una forma eficiente y robusta.