

# Proyecto Final de Carrera

## HAPS – High Altitude Platform Stations

*Análisis y simulación de sistemas de comunicaciones mediante haps*

*Prof. José A. Delgado-Penín  
Colaborador José A. Ruiz Cuevas  
Autor Gerard Papaseit Bielsa*

*Barcelona, Julio 2010*

## Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 Introducción.....	6
2. EL Marco: Los HAPS .....	7
2.1 Introducción a las plataformas estratosféricas.....	7
2.1.1 Descripción de HAPS .....	7
2.1.2 Tipos de plataformas estratosféricas: HAPS, HALO, HALE, HAVE, Skystation, Helios... ..	7
2.2 Situación actual de las plataformas estratosféricas .....	8
2.2.1 Revisión histórica. Unión Europea: el programa Helinet. Estado actual de los proyectos sobre HAPS y evolución esperada. ....	8
2.3 Ventajas de HAPS y características .....	9
2.4 Comunicaciones de banda ancha con HAPS.....	12
2.4.1 Servicios de Banda Ancha. Aplicaciones y oportunidades. ....	12
2.5 Arquitectura de red con HAPS .....	16
2.5.1 Las técnicas de acceso y transmisión para la comunicación. ....	18
2.6 Puntos críticos. Desafíos e inconvenientes.....	19
2.7 Estudios y soluciones .....	22
2.7.1 Soluciones para las bandas 27,5-28,35 GHz y 31-31,3 GHz.....	22
2.7.2 Soluciones para las bandas 47,2-47,5 GHz y 47,9-48,2 GHz.....	27
3. Los modelos de canal utilizados: Gausiano, Rayleigh, Rice y Lognormal .....	33
3.1 Introducción.....	33
3.2 Modelos de canal HAPS.....	34
3.2.1 Modelo de propagación en el espacio libre .....	36

3.2.2 Variaciones rápidas: Modelo Rayleigh.....	36
3.2.3 Variaciones rápidas: Modelo Rice.....	38
3.2.4 Variaciones lentas: Modelo Lognormal.....	40
<b>4. La cadena adecuada: Códigos Reed-Solomon y el Efecto Doppler.....</b>	<b>43</b>
4.1 Introducción.....	43
4.2 Sistemas concatenados: Códigos Reed-Solomon.....	43
4.2.1 Propiedades de los códigos RS .....	45
4.2.2 Esquema global de transmisión y recepción.....	45
4.3 Efecto Doppler .....	46
<b>5. El simulador utilizado: TOPSIM.....</b>	<b>49</b>
5.1 Introducción.....	49
5.2 El lenguaje TOPSIM IV .....	50
5.3 Opciones de Simulación.....	52
5.3.1 La simulación en el dominio del tiempo.....	53
5.3.2 Elección del ancho de banda.....	53
5.3.2.1 <i>Simulación de señales analógicas</i> .....	54
5.3.2.2 <i>Simulación de señales discretas</i> .....	55
5.3.3 Descripción de la simulación.....	55
5.3.3.1 <i>Parámetros</i> .....	55
5.3.3.2 <i>Bloques utilizados</i> .....	57
5.3.3.3 <i>Ejecución</i> .....	59
5.3.4 Librerías de TOPSIM .....	59

6. LAS SIMULACIONES, SOLUCIONES Y PROPUESTAS: SISTEMAS ADAPTATIVOS .....	62
6.1 Introducción.....	62
6.2 Canal Gausiano.....	64
6.2.1 Simulaciones realizadas.....	64
6.2.2 Simulaciones con canal Gausiano: Resultados y conclusiones .....	68
6.3 Canal Rayleigh .....	69
6.3.1 Simulaciones realizadas.....	69
6.3.2 Resultados y conclusiones canal Rayleigh .....	75
6.4 Simulaciones con frecuencias doppler bajas (Canales Rayleigh y Rice).....	76
6.4.1 Simulaciones realizadas.....	76
6.4.2 Conclusiones: Técnica Multirate .....	77
6.4.3 Simulaciones con canal Rice .....	78
6.4.4 Comparativa canales Rayleigh y Rice .....	80
6.4.5 Resultados y Conclusiones .....	81
6.5 Simulaciones con frecuencias doppler más elevadas .....	82
6.5.1 Simulaciones realizadas.....	82
6.5.2 Canales Rayleigh .....	84
6.5.3 Canales Rice .....	88
6.5.4 Sigüientes pasos.....	91
6.6 Resumen de simulaciones y conclusiones.....	91
6.7 Canal Lognormal.....	92
6.7.1 Simulaciones realizadas.....	92
6.7.2 Resultados y conclusiones .....	93
6.8 Sistemas adaptativos.....	94

6.8.1 Adaptación según tasas de transmisión (según potencia recibida).....	94
6.8.1.1 <i>Simulaciones realizadas</i> .....	94
6.8.1.2 <i>Resultados y conclusiones: Adaptación entre tasas</i> .....	101
6.8.2 Adaptación según tipos de modulaciones (según potencia recibida) .....	102
6.8.2.1 <i>Simulaciones realizadas</i> .....	102
6.8.2.2 <i>Resultados y conclusiones: Adaptación entre modulaciones</i> .....	105
6.8.3 Adaptación según tipos de modulaciones y codificaciones (según potencia recibida). Cadena multi-adaptativa .....	106
6.8.3.1 <i>Simulaciones realizadas</i> .....	106
6.8.3.2 <i>Resultados y conclusiones: Adaptación entre modulaciones</i> .....	108
6.8.4 Ejemplo código TOPSIM con adaptación según tasa de transmisión .....	109
<b>7. Conclusiones</b> .....	<b>113</b>
7.1 Conclusiones y siguientes líneas de estudio.....	113
<b>8. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS</b> .....	<b>114</b>
8.1 Bibliografía.....	114
8.1.1 <i>Sobre canales de comunicaciones</i> .....	115
8.1.2 <i>Sobre codificación de canal</i> .....	117
8.1.3 <i>Sobre comunicaciones mediante HAPS</i> .....	114
8.2 <i>Referencias y Sitios web</i> .....	117

# Capítulo 1.

## 1. INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 Introducción

En el presente proyecto, centrado en las futuras comunicaciones a través de plataformas estratosféricas, se abordará inicialmente una introducción a las plataformas, situación actual y futura de las mismas y retos. Todo ello se podrá encontrar en el capítulo 2 del presente trabajo.

A continuación, y antes de proceder a simular comunicaciones a través de HAPS, se hará una explicación de todo aquello relacionado con la cadena de transmisión, recepción y con los distintos canales de comunicación que se utilizarán para simular una comunicación extremo a extremo a través de plataformas estratosféricas (HAPS). Aquello relacionado con el canal de comunicación se podrá encontrar en el capítulo 3 del presente trabajo, mientras que lo más importante relacionado con la cadena de transmisión se explicará en el capítulo 4.

Después, y para introducir los resultados de las simulaciones realizadas, se procederá a explicar la herramienta de simulación utilizada, TOPSIM IV, durante el capítulo 5.

Finalmente, y antes de exponer las conclusiones del capítulo final, se exponen todas las simulaciones realizadas y los resultados obtenidos, tanto de forma gráfica como numérica. Con ello finalizará el capítulo 6.

Durante los capítulos 7 y 8, se expondrán las conclusiones del trabajo, biografía utilizada y para concluir, en el anexo, se expone el código utilizado para las simulaciones más importantes así como una muestra de los resultados extraídos directamente por el programa de simulación.

# Capítulo 2.

## 2. EL Marco: Los HAPS

---

### 2.1 Introducción a las plataformas estratosféricas

#### 2.1.1 Descripción de HAPS

Unas nuevas alternativas tecnológicas para ayudar a resolver el problema de acceso que plantean las redes de banda ancha en este siglo son las redes/sistemas basadas en “HAPS” (High Altitude Platform Stations). Con el acrónimo HAPS, la UIT-R denomina a las estaciones radioeléctricas que pueden embarcarse en globos o aviones estratosféricos no tripulados o planeadores y, que pueden volar entre 20 y 50 Km. de altura sobre la superficie terrestre. Dichas estaciones cumplen funciones idénticas a las que hoy pueden realizar los equipamientos embarcados en satélites artificiales de la Tierra con lo que los sistemas basados en HAPS serán competidores directos de los sistemas satelitales de órbita baja (LEO).

#### 2.1.2 Tipos de plataformas estratosféricas: HAPS, HALO, HALE, HAVE, Skystation, Helios...

Se presentan dos alternativas de aeronaves HAP: las de uso puntual en el tiempo y las fijas. Las primeras pueden dar servicio por un período corto de tiempo, y están basadas en aeronaves convencionales (tripuladas) como el caso de la red/sistema americano Halo, explotado por la empresa Angel Technologies en 1999 y basada en unos antiguos aviones militares. En esta red cada aeronave podía dar servicio a un área de un diámetro de unos 120 Km y facilitar transmisiones de banda ancha. Esta experiencia se llevó a cabo en USA.



*Aeronave HALO*

Por el contrario, las plataformas fijas constituidas por planeadores son las que están conllevando mayor actividad de I+D .Su rentabilidad comercial pasa por disponer de aeronaves no tripuladas capaces de efectuar largas misiones sin necesidad de retorno a tierra y son de dos tipos: HALE (High Altitude Long Endurance) si el tiempo de misión es del orden de varios días o semanas y HAVE (High Altitude Very-long Endurance) si se llega a los meses en la duración de la misión. Si bien la idea de usar aeronaves para portar sencillos transceptores o radiodifusores de señales radio ya ha sido explotada en el pasado mediante globos atmosféricos, lo novedoso de los actuales proyectos se debe a tres razones: la necesidad de que estén fuera de las rutas aéreas comerciales; la de una mayor continuidad del servicio y precisión de la posición de las aeronaves y, la de proporcionar servicios de banda ancha y/o radiodifusión. Las primeras razones conllevan la necesidad de que las aeronaves no lleven tripulación, es decir, que sean controladas remotamente; la última al uso de bandas de frecuencia milimétricas con la consiguiente problemática planteada por la atmósfera (lluvias y gases atmosféricos) y la derivada de las variaciones del ángulo de elevación de las estaciones/terminales de tierra.

## **2.2 Situación actual de las plataformas estratosféricas**

2.2.1 Revisión histórica. Unión Europea: el programa Helinet. Estado actual de los proyectos sobre HAPS y evolución esperada.

Hasta hoy se han llevado a cabo experiencias de viabilidad tecnológica con una sola estación radioeléctrica embarcada, tanto en USA como en Japón y con diferentes complejidades técnicas. En los últimos años se han realizado vuelos estratosféricos en Japón (Sky Station) y en el 2001 voló el primer avión no tripulado o planeador alimentado con energía solar en USA (Helios). Durante el año 2002 se hicieron experiencias en USA con equipamientos japoneses sobre el Helios. A la vista de esta situación, la UE y la ESA han iniciado proyectos relacionados con HAPS. En el caso de la UE se subvencionó el primer proyecto europeo (Helinet) sobre HAPS y la ESA está subvencionando un estudio de viabilidad para plataformas estratosféricas que pueden servir como estaciones base para comunicaciones de banda ancha.



Planeador Helios.

## 2.3 Ventajas de HAPS y características

Las principales ventajas que nos conceden los HAPS son las siguientes:

**Despliegue rápido:** es decir, un HAP puede ser desplegado para su funcionamiento en cuestión de horas. Esto tiene grandes ventajas para los proveedores de servicios de

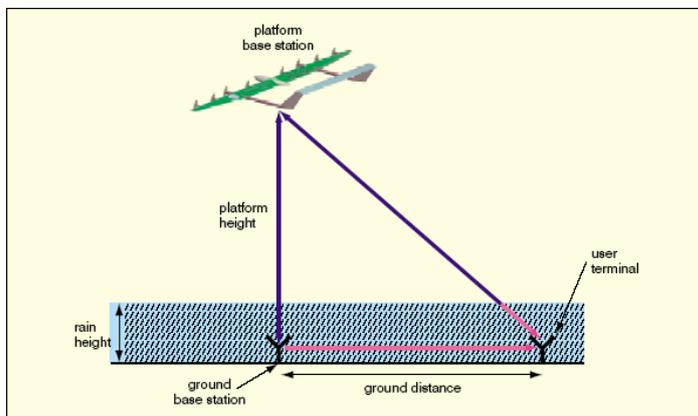
comunicaciones, donde los HAPS pueden ser un suplemento o complemento para la red terrestre existente, cuando ésta este sobrecargada o no funcione.

Dicho despliegue rápido permite también el posible uso de HAPS en un entorno de emergencia, gran desastre natural, misiones militares....

**Bajo coste de reconfiguración o mantenimiento:** Los HAPS pueden estar en funcionamiento durante periodos de hasta un año a más, aunque también pueden ser vueltos a tierra para su actualización o reconfiguración a un relativo bajo coste.

**Capacidad para comunicaciones de banda ancha:** Los HAPS están pensados, sobre todo para comunicaciones de banda ancha.

**Gran área de cobertura y pocos problemas de obstrucciones (comparado con redes**



**terrestres):** La geometría del despliegue de HAPS implica que las comunicaciones con HAPS experimentaran menor atenuación debida a lluvia que las comunicaciones terrestres.

**Gran capacidad del sistema:**

Usando un esquema celular de rehuso de frecuencias, gran capacidad puede ser provista a un gran número de pequeñas células.

**Flexibilidad para responder a las distintas demandas de trafico:** Los HAPS han sido idealmente concebidos para la provisión de recursos de una manera totalmente adaptable, es decir de manera muy flexible.

**Bajo retardo de propagación:** El retardo de propagación de un HAP es despreciable comparado con los retardos de satélites, ofreciendo así ventajas para tráfico de datos o de internet, aplicaciones interactivas...

**Menos infraestructura en tierra:** Un simple HAP puede dar servicio a un gran número de celdas, limitado por la tecnología de su antena. En contraposición, el reemplazo de un gran número de estaciones en tierra tendría una notable implicación económica.

**Bajo coste:** Un HAPS es considerablemente más barato que un satélite (LEO o GEO) en términos de costes de manejo, mantenimiento gestión y lanzamiento. Una red HAP debe ser también más barata que una red terrestre con un gran número de estaciones base.

**Despliegue incremental:** A diferencia de una red de satélites LEO, el servicio puede ser dado inicialmente con un único HAP, y la red se puede expandir gradualmente cuando una mayor cobertura y/o capacidad sea requerida.

**Respeto medioambiental:** Los HAPS se alimentan de luz solar, evitando así cualquier tipo de combustible contaminante. Además, dichas plataformas permitirían la eliminación de un gran número de mástiles terrestres actuales y su infraestructura asociada

*Tabla comparativa entre sistemas HAP- terrestres- satelitales*

	Terrestrial	HAP	LEO satellite	GEO satellite
<b>Station coverage (typical diameter)</b>	<1 km	up to 200km	>500km	up to global
<b>Cell size (diameter)</b>	0.1–1km	1–10 km	c. 50km	400 km minimum
<b>Total service área</b>	spot service	national/regional	global	quasi-global
<b>Maximum transmisión rate per user</b>	155 Mbit/s	25–155 Mbit/s	<2 Mbit/s up 64Mbit/s down	155 Mbit/s
<b>System deployment</b>	several base stations before use	flexible	many satellites before use	flexible, but long lead time
<b>Estimated cost of infrastructure</b>	varies	\$50million upwards?	c. \$9billion	>\$200million



esto, reconfigurada y adaptada a los requerimientos de tráfico. De hecho, la arquitectura del HAP permite el uso de técnicas adaptativas de gestión de recursos, lo que supone un uso eficiente del ancho de banda y una maximización de la capacidad.

Comparado con los servicios de satélites geoestacionarios, las células pueden ser considerablemente más pequeñas, ya que la dimensión de estas células provistas de una satélite depende de la dimensión antena del satélite.

La mayor capacidad que pueden ofrecer los HAPS esta facilitada, en gran medida, por unas condiciones de enlace más favorables en comparación con los satélites, debido esencialmente a la menor distancia, (34 dB respecto a los satélites LEO y 66dB respecto a los geoestacionarios). Asimismo, en comparación con redes terrestres, un solo HAP puede ofrecer una capacidad equivalente a un gran número de estaciones base separadas destacando de la misma manera que la geometría del enlace implicara que la mayoría de los obstáculos terrestres serán evitados.

### **Aplicaciones BWA**

Como ya se ha comentado, la principal aplicación para HAPS es BWA (broadband wireless access), es decir servicios de banda ancha, tales como LMDS (local multipoint distribution services), MVDS (multipoint video distribution services)...Así, la banda de uso de frecuencias 47/48 Ghz. Ofrece 2x300Mhz. de ancho de banda.

Los estudios europeos basados en el entorno HELINET proponen un esquema con una región de cobertura de 60 Km. Por HAP, teniendo 121 células de diámetro 5Km cada una. La potencia en el enlace de bajada es 1W por célula y esto puede soportar tasas de datos de hasta 60 Mb/s, lo que concuerda con el ancho de banda requerido por célula de 25 Mhz usando esquemas de modulación tales como 16-QAM o más elevados. La carga total en este ejemplo más bien conservador puede llegar a 7 Gbits/s, aunque esto se resumirá con más detalle en apartados sucesivos.

Respecto a la plataforma HAP, y continuando con el proyecto Helinet, se espera que la plataforma se mantenga estacionaria dentro de un cilindro de posición imaginario cuyo tamaño dependerá de la disponibilidad de servicio que se desee. Las medidas de este cilindro son para Helinet de  $\pm 4$  Km lateralmente y altitud de  $\pm 1500$  m para el 99'9% del

tiempo. Para las velocidades de transmisión de datos más altas, se usaran en tierra las antenas de alta ganancia, las cuales necesitaran seguir de cerca la localización de la plataforma para reducir las pérdidas al mínimo. El coste añadido a este mecanismo no será demasiado grande, puesto que las antenas pueden ser de un tamaño y peso modesto y el algoritmo de seguimiento usará una señal de control emitida durante el movimiento del HAP. Una solución que no siguiera el movimiento del HAP requeriría una apertura de antena más ancha, como se muestra en la siguiente tabla.

Ground terminal type	Data rate, Mbit/s	Availability, %
Highly portable (100° antenna)	2	99
Fixed (28° antenna)	4	99.9
	12	99
Steered (2° antenna)	10	99.9
	40	99

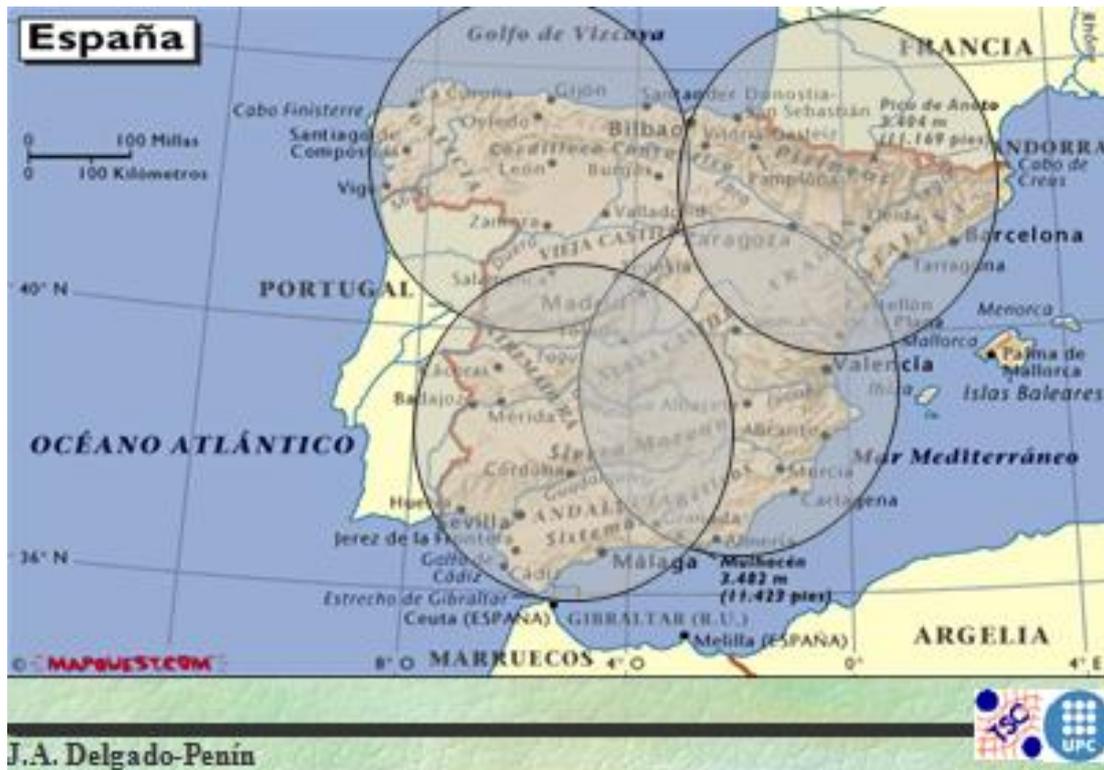
### Aplicaciones de 3ª generación

Los HAPS pueden ofrecer la oportunidad de desarrollar la 3ª generación de servicios móviles celulares o, de forma clara, los servicios de la generación actual. Además el uso de las bandas IMT-2000 ha sido autorizado por la ITU.

Una sola estación HAP con una antena de gran ancho de haz podrá dar servicio a una gran área, lo que es una gran ventaja para cubrir regiones con población muy esparcida. Alternativamente, un determinado número de pequeñas células se podrán desarrollar con sus respectivas antenas directivas. Los beneficios incluirán mayores áreas de cobertura y eliminación de muchas estaciones terrestres, entre otros.

## Redes HAPS

Unos cuantos HAPS podrán ser desplegados en una red para cubrir una región en su totalidad. Por ejemplo, la figura nos muestra varios HAPS cubriendo España. Los enlaces entre HAPS pueden ser implementados en altas frecuencias EHF (47/48 Ghz) o usando enlaces ópticos, dicha tecnología esta implementada para satélites y no debe presentar mayores preocupaciones.



Posible Red HAPS cubriendo España

## Aplicaciones para el desarrollo

Los HAPS ofrecen innumerables oportunidades para el desarrollo de nuevos servicios, Esto incluye telefonía para áreas rurales, broadcasting y servicios de datos. Estos servicios son especialmente valiosos para aquellas zonas en que las infraestructuras terrestres no permiten su despliegue.

## Aplicaciones para desastres y emergencias

Las plataformas estratosféricas pueden ser rápidamente puestas en marcha para suplir los servicios existentes en el caso de algún desastre natural (terremotos o inundaciones) o también para restablecer el servicio en caso de fallo en red existente importante.

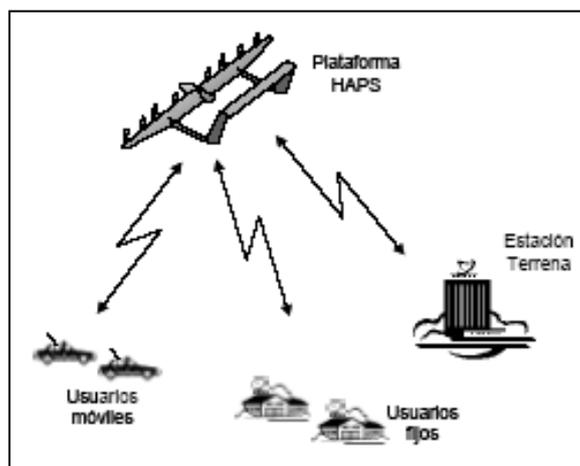
### Aplicaciones militares

Debido a las características implícitas de HAPS hacen que su uso para aplicaciones militares sea evidente. Además, aunque podría pensarse que son vulnerables frente al enemigo, presentan la ventaja de que su recubrimiento es invisible a microondas, presentando también una baja visibilidad para los radares.

## 2.5 Arquitectura de red con HAPS

Una red HAPS está compuesta por los siguientes subsistemas:

- 1) Plataformas Estratosféricas HAPS (Aeróstatos o planeadores o aviones no tripulados)
- 2) Estaciones terminales de usuarios;
- 3) Estaciones de cabecera y
- 4) Centros de control (de recursos, de configuración, comercial regional).

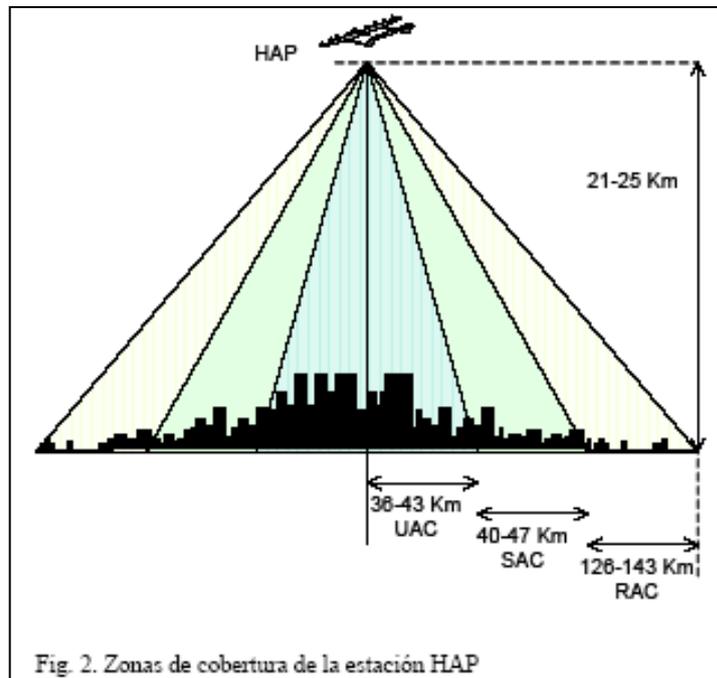


Esta clasificación implica la posibilidad de numerosas estaciones de abonado móviles y fijas. Estas estaciones asociadas a la red HAPS son idénticas a las utilizadas con los sistemas terrenales de antenas con torre, tradicionales por ejemplo en el IMT-2000. Las

redes de HAPS poseen una configuración en estrella, dando servicio a la plataforma HAPS en el nodo principal.

La estación de abordaje proyecta múltiples haces puntuales en el suelo y da una cobertura circular radioeléctrica que puede subdividirse en tres zonas para garantizar un servicio de banda ancha a los usuarios a lo largo de toda la huella en el suelo procedente de la HAPS. Dichas zonas son:

- a) Zona de cobertura urbana. Esta zona se puede extender entre 36 y 43 Km. desde un punto situado directamente bajo la plataforma (alturas comprendidas entre 21 y 25 Km).
- b) Zona de cobertura suburbana .Esta área va desde la zona de cobertura urbana hasta 76/91 Km, dependiendo de la altura. En este caso los ángulos de elevación oscilan entre 15 y 30 grados
- c) Zona de cobertura rural. La superficie es exterior a la de la zona b) y se considera para ángulos de elevación que oscilan entre 15 y 5 grados.



Los enlaces entre dos HAPS y los enlaces entre una HAPS y las estaciones terrestres del sistema HAPS no se establecerán en bandas designadas para las comunicaciones a los usuarios. La búsqueda de ofrecer un nuevo medio con una mínima estructura terrestre es el objetivo deseado de esta tecnología. Los terminales de usuario suelen ser

transceptores portátiles que enlazan directamente con la estación embarcada. La conmutación de las comunicaciones entre usuarios se realiza directamente en la estación embarcada que contiene un conmutador del tipo ATM. Las estaciones de cabecera establecen la interfaz con las redes públicas y pueden estar situadas en cualquier punto de la zona de cobertura, a fin de minimizar los requisitos de infraestructura en el suelo. Normalmente estarán situadas en una instalación central de operador o en un punto de presencia de proveedor de servicio. Cada estación de cabecera utilizará antenas orientables de alta ganancia con haces estrechos. La mayoría de estas estaciones se diseñan como unidades no atendidas y autónomas que funcionan por control a distancia desde el centro de control de las HAPS y que se parece mucho a un centro de operaciones de satélite con un funcionamiento de 24 h.

Un aspecto importante en toda red radioeléctrica es el de la banda de frecuencias que puede utilizar. Existen propuestas para el uso de las bandas: del IMT-2000, 28/31 Ghz y 47/48 Ghz. En las dos últimas bandas es donde se están llevando a cabo estudios interesantes. La UIT-R tiene en la actualidad Recomendaciones (para dichas bandas) sobre características de sistema tales como: altura aconsejada de la nave HAPS (25 Km. como máximo), plan de alimentación energético basado en baterías solares y de regeneración de combustible, unidad de comunicaciones embarcada con conmutación de paquetes a bordo, antena multihaz para facilitar cobertura celular en tierra, etc.

### 2.5.1 Las técnicas de acceso y transmisión para la comunicación.

Para hacer máxima la eficiencia espectral en las zonas de cobertura se utiliza un esquema de Acceso Múltiple por asignación dinámica que permite a los usuarios compartir eficazmente el ancho de banda. En los análisis de viabilidad realizados (y actuales) se están tomando como bandas de funcionamiento de la red aquellas reconocidas por UIT-R como bandas asignadas al acceso de banda ancha : IMT-2000 , 28/31 Ghz y 47/48 Ghz. Las bandas inferiores para el enlace de bajada (plataforma tierra) y las más altas para el enlace de subida. En las dos últimas bandas los fenómenos perturbadores de las señales transmitidas son principalmente los hidrometeoros. Las coberturas por áreas se podrán garantizar mediante sistemas de antenas multihaz

(phased arrays) en función del ángulo de elevación y de la ganancia de cresta de cada haz en particular.

El sistema HAPS se diseñará para dar canales digitales dúplex de velocidad variable. Por lo que se refiere a las técnicas de acceso y transmisión se ha optado para la primera banda por la técnica CDMA y para la segunda y tercera por TDMA en función de la conmutación ATM que debe realizarse en la estación embarcada. En el enlace descendente, cada terminal de usuario recibirá constantemente; pero sólo mantendrá las células a las que tiene derecho. De esta forma se puede aprovechar al máximo la ventaja de la multiplexación estadística propia de la conmutación ATM. En el caso del enlace ascendente la transmisión para el caso AMDT lleva una célula ATM en cada intervalo AMDT.

La transmisión desde la estación situada en la plataforma se realiza mediante QPSK dentro de un esquema MDT y hacia los terminales de usuario. Para comunicaciones con las estaciones de cabecera se utilizan modulaciones QAM-64 en ambos sentidos de transmisión. En estas circunstancias se estima que se pueden llegar a tener unas velocidades de transmisión de carga y descarga de 2Mb/s y 11 Mb/s aproximadamente (por usuario) para un total de 110000 usuarios posibles.

## **2.6 Puntos críticos. Desafíos e inconvenientes**

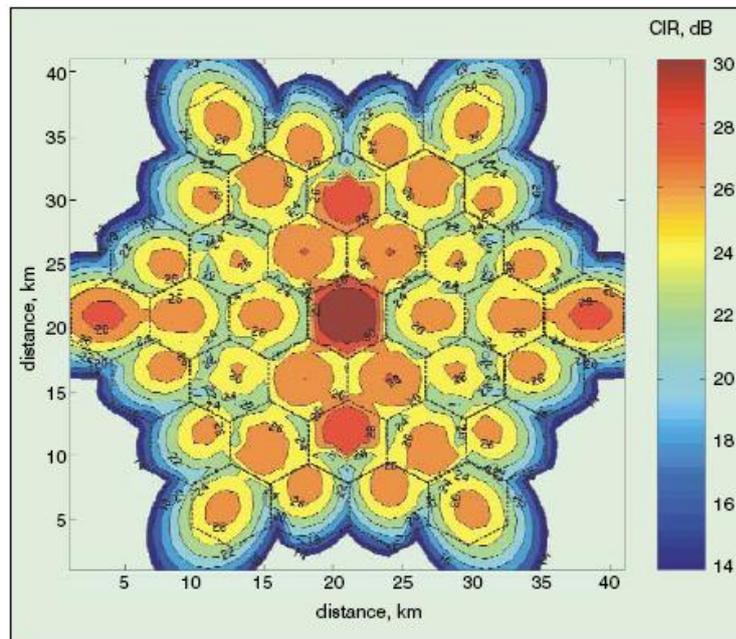
La novedad de las comunicaciones vía HAPS es que presentan conceptos e ideas nuevas algunas de las cuales pueden presentar algún tipo de problema o complicación para llevarse a cabo.

### **Requerimientos del sistema**

Las redes HAP para servicios de comunicación de banda ancha requieren una modificación del diseño básico existente para servicios de tipo celular, con un desarrollo centrado en el plan de frecuencias y el patrón de rehuso de las mismas

## Propagación y diversidad

Los servicios de este tipo de plataformas se han localizado por la ITU principalmente en las bandas 47-48 Ghz. En estas bandas, la atenuación de vida a la lluvia, por ejemplo, es significativa por lo que uno de los principales requerimientos es desarrollar técnicas de



scattering. Otro objetivo importante es de terminar la técnica de diversidad más apropiada para cada tipo de tráfico. La figura nos muestra la relación señal interferente debido únicamente a la lluvia, sobre una área de cobertura de 20 Km de radio

## Modulación y codificación

Para optimizar la capacidad de la red se deben escoger tanto una modulación como una codificación apropiadas para poder ofrecer servicios de telecomunicaciones de banda ancha cumpliendo ciertas especificaciones en términos de QoS y BER que son consideradas como óptimas según las condiciones del enlace. Para ello, el uso de técnicas adaptativas proporcionará soluciones óptimas.

## Localización de recursos y protocolos de red

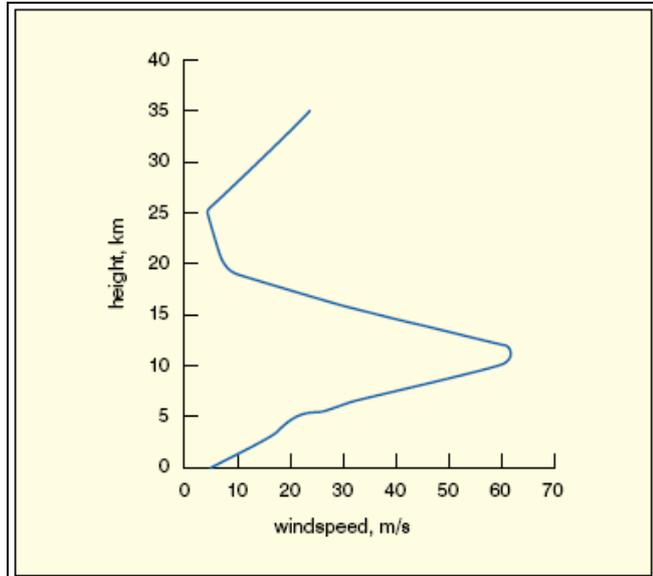
Las asignaciones de canales y la localización de los recursos tienen que ser desarrolladas de nuevo debido a que es distinta a cualquier escenario terrestre o satélite ya existente. Los esquemas ya existentes deberán ser rediseñados para poder soportar tráfico multimedia.

## Antenas

Para servicios inalámbricos de banda ancha ofrecidos por HAPS toda la tecnología referente a antenas tendrá un papel clave y por tanto será un punto crítico del diseño. Son requeridos un gran número de transmisores que emiten señal y por esto se debe pensar en algún tipo de array de antenas o similar (multihaz). Otro aspecto importante a tener en cuenta será la interferencia intercelular

## Estabilidad y estacionariedad de la plataforma

La habilidad de un HAP para mantener su posición a pesar de los vientos variables es una de las mayores preocupaciones y quizás el punto más crítico para la viabilidad. Es probable que se deba pensar en técnicas de diversidad y uso de múltiples HAPS.



Inevitablemente los HAPS tienen inclinaciones o sacudidas debido a las turbulencias estratosféricas, en este sentido plataformas mayores presentaran una estabilidad mayor. En la grafica se muestra la velocidad aproximada del viento en función de la altura.

## Handoff

Muchos esquemas de HAPs han propuesto el uso de múltiples emisores sobre el área de cobertura. Aunque la arquitectura de una red de banda ancha es probablemente para tener principalmente un número fijo de usuarios, los handoffs pueden ocurrir cuando las antenas emisoras se muevan debido a los cambios de posición de las plataformas, dependiendo de las técnicas de estabilidad del HAP. El tamaño de las células en tierra y la estabilidad física de la antena del HAP gobernarán la frecuencia con que esto ocurrirá. De todas formas limitaciones de retardo y jitter para servicios multimedia (como video) impondrán restricciones más severas en procesos de handoff.

## TV digital con HAPS

Otra faceta del uso de HAPS como soporte de Telecomunicación es el que se propone para TV digital. Las experiencias hasta ahora realizadas han confirmado que es posible transmitir HDTV desde una altura de 20 Km. y en las bandas de UHF y L, respectivamente. El problema es, que la transmisión de TV solo sería previsible para la zona llamada urbana en el contexto de la cobertura HAPS.

## 2.7 Estudios y soluciones

### 2.7.1 Soluciones para las bandas 27,5-28,35 GHz y 31-31,3 GHz.

#### Recomendación ITU-R F.1569

Esta recomendación, partiendo de que los receptores de los sistemas basados en las HAPS en las bandas 27,5-28,35 GHz y 31-31,3 GHz están diseñados para funcionar sometidos a la interferencia máxima combinada del 10% del ruido térmico del sistema receptor en las plataformas HAPS y en las estaciones del sistema HAPS situadas en el suelo, recomienda

- 1 que las HAPS funcionen a una altitud comprendida entre 20 y 25 km;
- 2 que el factor de reutilización de frecuencias de la célula iluminada por los haces puntuales de las antenas HAPS sea igual o superior a cuatro
- 3 que la atenuación de la potencia de la señal debida al efecto de apantallamiento del cuerpo de la nave aérea con recubrimiento metálico se calcule mediante las ecuaciones siguientes:

0	dB	para $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$
$0,5(\theta - 90)$	dB	para $90^\circ \leq \theta < 120^\circ$
15	dB	para $120^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$

donde  $\theta$  es el ángulo de separación entre la dirección de interés y la del nadir de la HAPS;

- 4 que se utilice la técnica de control automático de la potencia de transmisión (ATPC) para reducir la probabilidad de causar interferencia inaceptable a otros

servicios y para aumentar la disponibilidad del enlace en el sistema basado en la HAPS;

5 que para el estudio de compartición se tenga en cuenta el límite superior del número de portadoras que transmiten simultáneamente a la estación HAPS situada en el suelo, y que viene determinado por la anchura de banda disponible en el enlace ascendente y la anchura de banda de cada señal de transmisión;

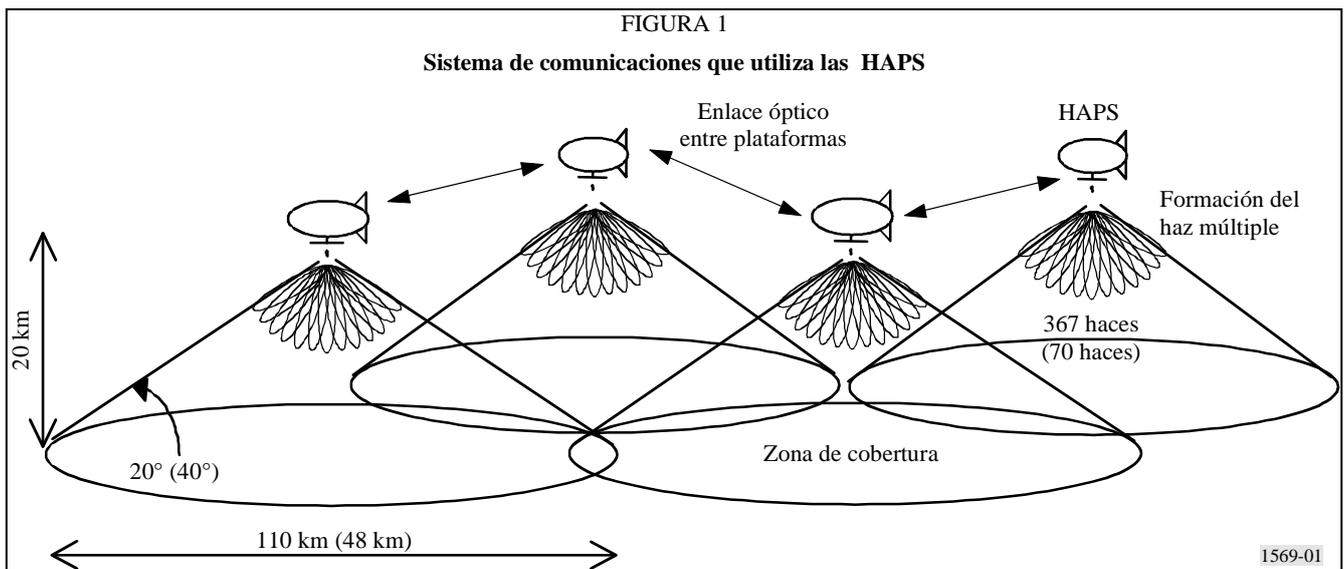
6 que para los estudios pertinentes se utilice el sistema basado en las HAPS descrito a continuación:

### **Descripción del sistema típico basado en las HAPS**

Un sistema HAPS típico puede presentar los aspectos siguientes:

- la nave aérea se alimenta con la energía eléctrica necesaria para el mantenimiento del sistema y el funcionamiento de la misión de comunicaciones, a partir de baterías solares que van en la superficie superior de la nave aérea y con baterías secundarias que se cargan para la utilización nocturna;
- la nave aérea va equipada con una antena de haz multi-puntual en su parte inferior que establece los enlaces de acceso a las estaciones situadas en el suelo con un cierto ángulo de elevación mínimo;
- cada haz formado por la antena de haz multi-puntual corresponde a una célula en el suelo, con una reutilización de frecuencias de al menos cuatro veces;
- el recinto para el gas de la nave aérea es una película de un metal, tal como el aluminio con el que se pretende bloquear las ondas electromagnéticas en la gama de frecuencias de 18-32 GHz o superior;
- se despliegan múltiples naves aéreas para abarcar una amplia zona en el suelo y las estaciones en ella se conectan mediante enlaces inalámbricos, tales como los enlaces ópticos, constituyendo una red inalámbrica en malla.

La figura ilustra un sistema de comunicaciones que utiliza las HAPS. Se muestran dos ejemplos de ángulo de elevación mínimo de 20° y de 40°.



### Altitud de la HAPS

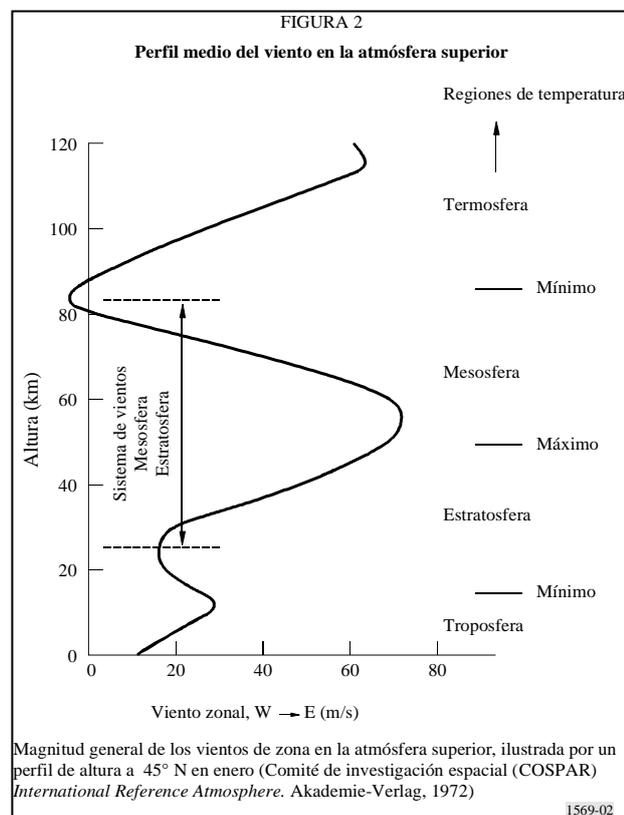
La altitud de la HAPS debe estar comprendida entre 20 y 50 km. La cobertura con visibilidad directa desde una HAPS es mayor desde altitudes superiores. No obstante, la densidad atmosférica disminuye significativamente al aumentar la altitud. El Cuadro 1 muestra la densidad y la presión atmosféricas en diversas altitudes. La densidad atmosférica a una altitud de 50 km es muy inferior a la de la altitud de 20 km, en una relación aproximada de 1/90. Esto significa que la nave aérea situada a 50 km de altitud necesita 90 veces más de gas helio que la situada a 20 km y requiere una longitud de la estructura 4,5 veces mayor. Suponiendo que a una altitud de 20 km se necesita una nave de 200 m de longitud para aguantar un cierto peso, a una altitud de 50 km se requiere una nave de 900 m de longitud para el mismo peso. Es absolutamente imposible construir una nave aérea tan enorme con la tecnología actual y la de un futuro próximo.

Cuadro1 Densidad y presión atmosférica en la estratosfera

Altitud (km)	Densidad atmosférica (kg/m <sup>3</sup> )	Presión (hpa)
0	1,22	1 013

15	0,195	121
20	0,0889	55,3
25	0,0401	25,5
30	0,0184	12
50	0,00103	0,798

La figura siguiente muestra un perfil medio del viento en la atmósfera superior. La velocidad del viento presenta un mínimo local alrededor de la altitud de 20-25 km. Se hace mayor a altitudes superiores a 25 km y es cuatro veces mayor en la altitud de 50 km respecto a la de 20 km. Para mantener la posición de la nave aérea en un punto nominal fijo en condiciones de viento, se necesita una potencia de propulsión muy superior, lo que a su vez exige materias más pesadas para el funcionamiento nocturno. Desde este punto de vista, el funcionamiento de una nave aérea a una altitud inferior a 25 km es razonable, aplicando la tecnología actual.



Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, puede determinarse que, desde un punto de vista técnico, la altitud de una HAPS será inferior a unos 25 km.

Ángulo de elevación mínimo operacional

El ángulo de elevación mínimo operacional determina la cobertura de la zona de servicio de una HAPS. Cuanto menor sea el ángulo de elevación mínimo, mayor será la cobertura de servicio obtenida. No obstante, el trayecto a través de la lluvia es mayor y la p.i.r.e. requerida aumenta, pues se requiere un margen respecto a la lluvia superior.

El valor típico del ángulo de elevación mínimo operacional para el sistema HAPS en la banda 28/31 GHz puede ser mayor de 20°. El funcionamiento con ángulos de elevación menores exige valores superiores de la p.i.r.e. en los enlaces ascendente y descendente al aumentar el trayecto de propagación y la atenuación debida a la lluvia y puede dar lugar a dificultades en la situación de compartición entre el sistema HAPS y otros sistemas tales como los sistemas de satélite, los del servicio fijo, los de los servicios científicos espaciales, etc. Además, el efecto de ensombrecimiento creado por los edificios o montañas degradará la disponibilidad del emplazamiento para ángulos de elevación inferiores en las zonas urbanas o montañosas.

También es posible adoptar un ángulo mínimo de elevación mayor, por ejemplo de 40°, a fin de reducir la interferencia causada a otros servicios y la procedente de éstos y de aumentar la disponibilidad del emplazamiento que impide el ensombrecimiento causado por los edificios o montañas. Cuando mayor sea el ángulo mínimo de elevación, mayor será el número de HAPS necesarias para abarcar una cierta zona en el suelo, sin que cambie el número total de haces puntuales para todas las HAPS.

## 2.7.2 Soluciones para las bandas 47,2-47,5 GHz y 47,9-48,2 GHz

### **Recomendación ITU-R F.1500**

#### **Recomendación para sistemas del servicio fijo que utilizan HAPS en las bandas 47,2-47,5 GHz y 47,9-48,2 GHz.**

Sistema situado en plataforma de gran altitud

El sistema comprende una plataforma de gran altitud situada en un emplazamiento nominalmente fijo en la estratosfera, a una altura comprendida entre 21 y 25 km. La comunicación se establece entre la plataforma y los terminales de usuario en el suelo, en una disposición celular que permite una reutilización de frecuencias considerable. Los terminales de usuario se clasifican según su situación en una de las tres zonas siguientes: zona de cobertura urbana, zona de cobertura suburbana y zona de cobertura rural, respectivamente).

Además, las comunicaciones se establecen en las mismas bandas de frecuencia entre la plataforma y una serie de estaciones de cabecera situadas en el suelo, en las zonas de cobertura urbana o suburbana, que establecen la interconexión con la red fija de telecomunicación.

La plataforma estratosférica

La plataforma de gran altitud se alimenta con células solares eficaces y células de regeneración de combustible hidrógeno-oxígeno. Los componentes de la célula de combustible de regeneración y del subsistema electrolítico convierten el agua en combustible durante el día y dicho combustible se utiliza para generar la energía eléctrica que requiere el funcionamiento nocturno. El electrolito convierte el agua en gases hidrógeno y oxígeno para el funcionamiento nocturno de la célula de combustible. El sistema de propulsión consta de unas hélices de velocidad variable activadas por un motor eléctrico, aunque también pueden emplearse otros tipos de propulsión con características de funcionamiento similares. Las HAPS utilizan un sensor GPS diferencial para el mantenimiento mediante control en bucle cerrado de su emplazamiento espacial en un círculo de 400 m de radio y una variación vertical de  $\pm 700$  m de altitud.

## **La cobertura proporcionada**

La zona de cobertura total de la HAPS se divide en tres zonas que son las necesarias para garantizar un servicio de banda ancha coherente a los usuarios a lo largo de toda la huella en el suelo de la HAPS que tiene un diámetro de unos 1 000 km.

Las zonas son:

- Zona de cobertura urbana: La zona de cobertura urbana se extiende entre 36 y 43 km desde un punto situado directamente bajo la plataforma. Los usuarios de estas zonas pueden utilizar módems de terminal de usuario portátil con una abertura de haz de unos 11°, o una ganancia de antena de 26 dBi y antenas de 10 cm x 10 cm. Las antenas de la plataforma deben tener una ganancia de 30 dBi (1W o potencia de RF por canal). Todos los usuarios de estas zonas tendrán un ángulo de elevación comprendido entre 30° y 90° desde el suelo hacia la plataforma HAPS. Los terminales de usuario requieren aproximadamente una potencia de RF de transmisión de 0,15W.
- Zona de cobertura suburbana: La zona de cobertura suburbana va desde la zona de cobertura urbana hasta 76,5/90,5 km, dependiendo de la altitud de funcionamiento. Los usuarios de la zona de cobertura suburbana utilizarán antenas direccionales de ganancia superior (41 dBi) con una potencia de transmisión de 0,2 W. Pueden también utilizarse las mismas antenas en las zonas de cobertura urbana para instalaciones fijas en azoteas. Las antenas de transmisión de la plataforma son las mismas que para las zonas de cobertura urbana. Los ángulos de elevación oscilan entre 15° y 30°
- Zona de cobertura rural: Los ángulos de elevación van de 15° a 5°. Esta zona se reserva para el acceso especializado de gran velocidad punto a punto y para coberturas de zona amplia en bandas de frecuencia inferiores, tales como las de 800 MHz a 5 GHz. Hay demasiada atenuación atmosférica y debida a la lluvia en 47/48 GHz.

## Zonas de cobertura

Zona de cobertura	Ángulos de elevación (grados)	Alcance del suelo (km)	
		Plataforma a 21	Plataforma a 25
Urbana	90-30	0-36	0-43
Suburbana	30-15	36-76,5	43-90,5
Rural	15-5	76,5-203	90,5-234

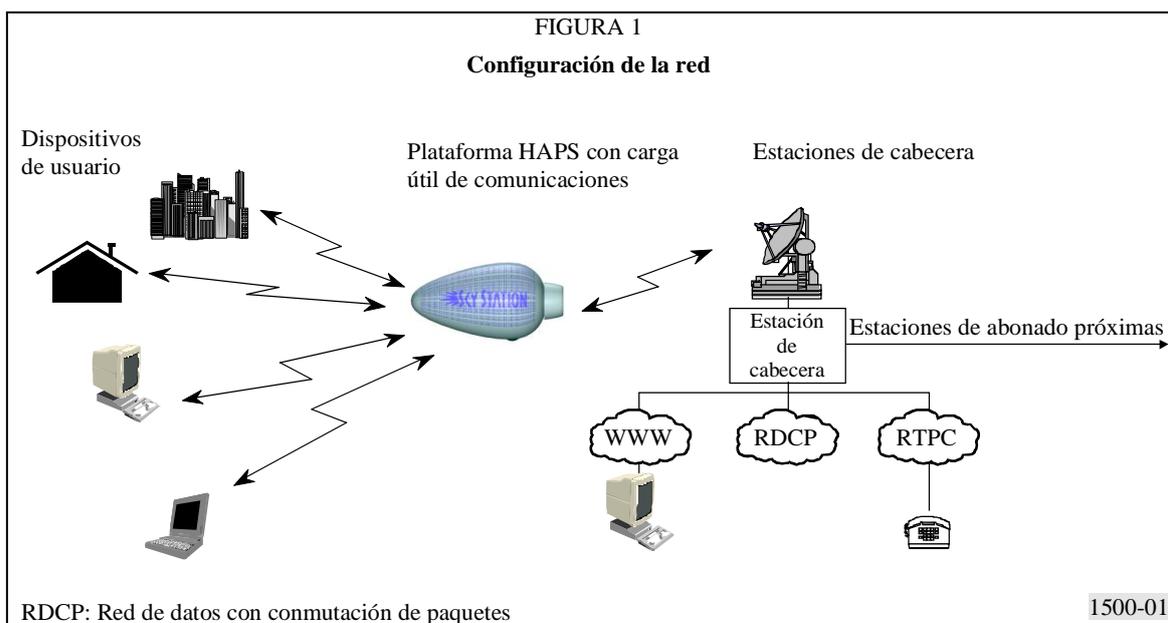
## El uso del espectro disponible

Para hacer máxima la eficacia espectral se utiliza un esquema de acceso múltiple por asignación dinámica que permite a los usuarios compartir eficazmente la anchura de banda, y a bordo hay una unidad de conmutación y multiplexadores de modo de transferencia asíncrono (ATM) para multiplexar estadísticamente el tráfico de usuario. En el enlace ascendente y en el descendente se utiliza la modulación MDP-4 y una codificación FEC concatenada de índice 0,6 (Reed-Solomon + codificación convolucional de índice 2/3 con limitación de longitud 9). Se utiliza también la codificación de entrelazado para reducir los errores de ráfaga. Dada la eficaz compartición de la anchura de banda y el reducido ciclo de trabajo en la mayoría de los tipos del tráfico de banda ancha, cabe esperar que la totalidad de los 110 560 usuarios logren una velocidad máxima de carga de 2048 Mbit/s y una velocidad de descarga de 11,24 Mbit/s con una atribución de frecuencia de sólo  $2 \times 100$  MHz. Suponiendo que en todo momento esté activa una media del 10% de la población total de abonados, una sola red HAPS (red de plataforma de gran altitud (HAPN)) puede servir para una población de abonados de cerca de un millón de usuarios con la atribución de  $2 \times 100$  MHz. Si la atribución de frecuencia se aumenta a  $2 \times 300$  MHz, cabe esperar que una sola HAPN sirva para más de cinco millones de abonados.

El sistema de base incluye también estaciones múltiples de cabecera en el suelo que utilizan el múltiplex por división en el tiempo (MDT) síncrono de gran velocidad por enlace para el tráfico que da la HAPN a la RTPC y a Internet. La velocidad de este enlace de conexión es de hasta 0,72 Gbit/s para una atribución de frecuencia de 300/300 MHz. Se utiliza la modulación MAQ-64 y una codificación FEC de índice 0,71 para optimizar la anchura de banda disponible. También pueden establecerse enlaces adicionales punto a punto de gran velocidad para clientes empresariales y suministradores de servicio.

#### Características del sistema de comunicaciones

Las HAPN tienen una configuración en estrella, dando servicio a la plataforma HAPS en el nodo principal. La carga útil proyecta múltiples haces puntuales en el suelo y da una cobertura en un círculo de unos 150 km de diámetro.



#### Características de transmisión de la estación situada en la plataforma

El Cuadro siguiente da las características típicas del transmisor y la antena de una estación de plataforma.

Las comunicaciones con los terminales de usuario utilizarán la modulación MDP-4 con MDT en una anchura de banda de 11 MHz para el enlace descendente y de 2,2 MHz para el enlace ascendente. Las comunicaciones con las estaciones de cabecera utilizarán

la modulación de alto nivel, MAQ-64, en una anchura de banda de 88 MHz (11 MHz por portadora). En ambas se supone una utilización de frecuencias de  $2 \times 100$  MHz. Si se emplease un espectro de frecuencia de  $2 \times 300$  MHz, sería posible que los terminales de usuario comunicasen con las HAPS en una anchura de banda de 33 MHz para el enlace descendente.

## CUADRO 2

Parámetros del transmisor de la estación situada en la plataforma

Comunicación con	Potencia del transmisor (dBW)	Ganancia de antena (dBi) <sup>(1)</sup>
Zona de cobertura urbana	1,3	30
Zona de cobertura suburbana	1,3	30
Zona de cobertura rural	3,5	41
Cabecera (zona de cobertura urbana)	0	35
Cabecera (zona de cobertura suburbana)	9,7	38

<sup>(1)</sup> Ganancias máximas de antena.

Características de los terminales de usuario y estaciones de cabecera

El Cuadro 3 da los parámetros correspondientes para las estaciones en tierra. En la dirección ascendente, los terminales de usuario utilizarán una multiportadora AMDT

con asignación por demanda y modulación MDP-4, mientras que las estaciones de cabecera utilizarán técnicas similares a las de la plataforma.

### CUADRO 3

Características del transmisor de la estación en tierra

Comunicación con	Potencia del transmisor (dBW)	Ganancia de antena (dBi)
Zona de cobertura urbana	-8,2	23
Zona de cobertura suburbana	-7	38
Zona de cobertura rural	-1,5	38
Cabecera (zona de cobertura urbana)	1,7	46
Cabecera (zona de cobertura suburbana)	13,4	46

# Capítulo 3.

## 3. Los modelos de canal utilizados: Gausiano, Rayleigh, Rice y Lognormal

---

### 3.1 Introducción

La predicción y el modelado de los canales de radiocomunicación son una de las partes clave que interviene en el diseño de sistemas de comunicación.

Por definición un canal es el soporte físico por el cual viajan las señales portadoras de información (o mensaje) que pretenden intercambiar emisor y receptor. En el caso de comunicaciones por satélite o haps, tendremos que un canal móvil es el camino que recorre una señal desde uno o varios emisores hasta un receptor móvil.

En esta ocasión, considerando el receptor en movimiento, las condiciones que hubieran funcionado sobre receptores estáticos se verán afectadas por nuevas variables dadas las características de una transmisión multitrayecto como el efecto Doppler (el movimiento se traducirá en desplazamiento de la frecuencia), o los desvanecimientos de señal debidos a la dispersión entre ecos.

A los fenómenos que intervienen en la propagación de la señal se les deberán añadir, debido a que nos encontramos en un caso en movimiento, variabilidad y dispersión temporal y desplazamiento en frecuencia. En un entorno de propagación por espacio libre y con pérdidas debidas a los obstáculos encontramos:

- **Reflexión:** las ondas electromagnéticas inciden en obstáculos de dimensiones mayores que  $\lambda$ , como edificios.

- **Difracción:** el trayecto entre el emisor y el receptor se encuentra obstruido y las ondas rodean el obstáculo.
- **Dispersión:** las ondas electromagnéticas inciden en obstáculos de dimensiones menores que  $\lambda$ , como hojas, árboles, señales de tráfico, postes de luz, etc.

En el sistema de comunicaciones propuesto, si analizamos el trayecto que recorre la señal en el camino de “bajada” (emisor-receptor) podremos observar que viaja a través de dos tipos de medios. Gran parte del camino atraviesa el espacio exterior sin sufrir alteraciones relevantes, pero una vez entra en la atmósfera se ve afectada por efectos como los de la troposfera, alterándose con ruido, dispersión, atenuación, reflexiones multitrayecto, efecto Doppler...

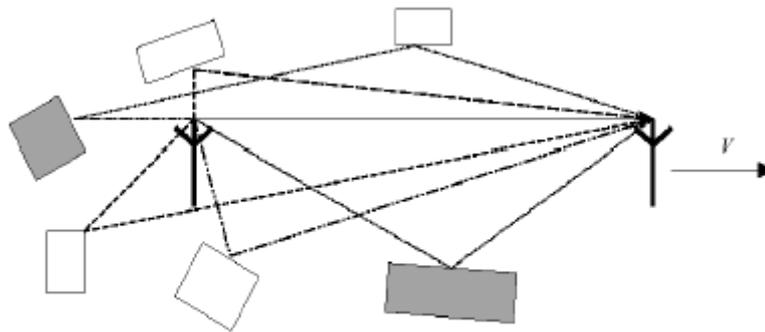


Figura 3.2: Ejemplo del multicanal como respuesta del canal móvil.

Existen numerosos modelos de propagación de la señal. A continuación se analizarán los modelos más comunes de distribución multitrayecto que tienen los canales en comunicaciones móviles: Rayleigh, Rice y Lognormal. Cada una de estas distribuciones se produce en las distintas situaciones, explicadas a continuación.

### 3.2 Modelos de canal HAPS

Los modelos de propagación han puesto su mayor interés en predecir la potencia por medio de una señal recibida a una distancia determinada del transmisor, así como también las variaciones de la potencia de la señal en la cercanía de un punto de interés.

Los modelos de propagación que predicen la potencia de la señal para cualquier distancia de separación entre el transmisor y el receptor, son conocidos como modelos de propagación “Large-Scale” y son de gran utilidad para el cálculo de áreas de cobertura para sistemas de radio.

$$d_{LOS} = h / \sin(\alpha) \quad (4.1)$$

$$d_{eco} = \sqrt{(\Delta r + r)^2 + h^2} + |\Delta r| \quad (4.2)$$

$$r = h / \tan(\alpha) \quad (4.3)$$

$r$  = distancia horizontal del receptor

$\Delta r$  = distancia horizontal de un reflector

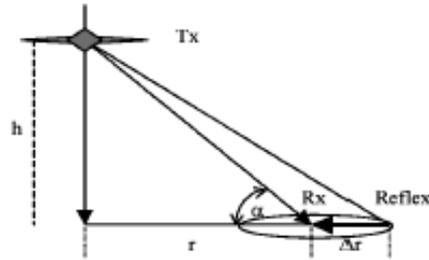
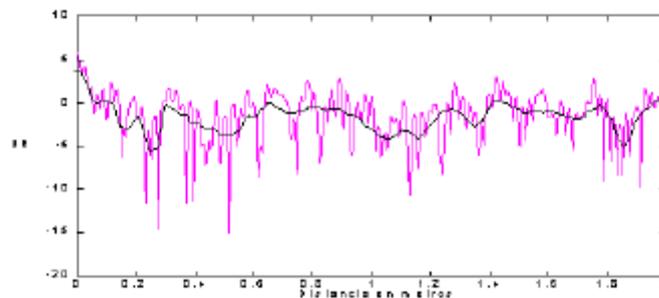


Figura 4.1: Plataforma terminal aérea (rayo directo + rayo reflejado o eco)

Los modelos que predicen los cambios rápidos en la intensidad de la señal recibida en distancias pequeñas de unas cuantas longitudes de onda, se les conocen como modelos “Small-Scale”.

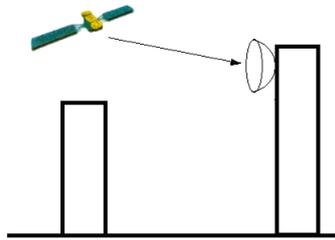


En este proyecto se han analizado varios modelos de propagación en función de las condiciones que se encuentre el receptor.

A continuación encontraremos el modelo de propagación en el espacio libre, que permitirá comprender los efectos considerando que no hay obstáculos, ruido o reflexiones en el camino, y posteriormente encontraremos los modelos con efectos no deseados sobre la señal; los modelos Rayleigh, Rice y Lognormal.

### 3.2.1 Modelo de propagación en el espacio libre

Este modelo es utilizado para predecir la potencia de la señal cuando entre el transmisor y el receptor existe una **clara línea de visión**. El modelo de espacio libre predice que la potencia recibida decae en función de la separación entre transmisor y receptor.



En una transmisión a través del espacio libre no encontramos efectos de atenuación, dispersión o ruido. Sería el caso ideal de comunicaciones, claro que solo existe como modelo teórico.

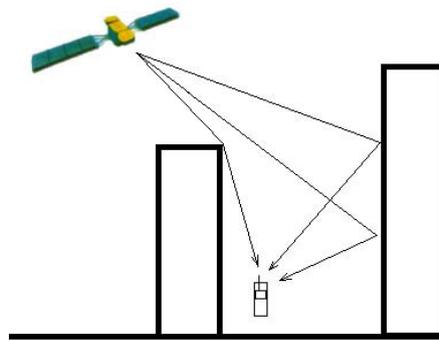
### 3.2.2 Variaciones rápidas: Modelo Rayleigh

En un entorno de comunicaciones móviles, la señal recibida en un determinado instante y lugar es la resultante de la suma de todas las trayectorias provocadas por las reflexiones del frente de onda en los objetos cercanos en dirección a la antena receptora.

Cada uno de los rebotes incide con una amplitud y fase distintas, que depende del coeficiente de reflectividad, y con un retardo distinto. Sin embargo, si los objetos están muy próximos a la antena receptora la diferencia entre los distintos retardos es prácticamente despreciable comparada con la duración del símbolo de la señal digital. No obstante, al transmitir la señal modulada, es decir multiplicada por una portadora, el efecto de retardos distintos implica que la señal incide en la antena con fases totalmente distintas.

El primero de los modelos analizados es el modelo de distribución Rayleigh. Este es el modelo más común en comunicaciones con teléfonos móviles dado que en la mayoría de transmisiones no disponemos de visión directa con la antena de telefonía.

Una distribución Rayleigh se produce cuando la **línea de visión directa** (LOS<sup>1</sup>) entre emisor y receptor se ve **interrumpida** por obstáculos o su nivel es inferior al nivel del ruido. En estas circunstancias la suma de las contribuciones multitrayecto permite la existencia del enlace. La mayoría de conexiones con telefonía móvil se realizan mediante enlaces con distribución Rayleigh, lo que permite tener cobertura en el interior de los edificios sin línea de visión directa con la antena.



En un canal Rayleigh aparecen las denominadas “variaciones de señal a *corto plazo*”<sup>2</sup>, éstas se deben a dos factores, la propagación multitrayecto y el efecto Doppler. Para modelar este tipo de canal se tiene que describir como la “*variación estadística de la envolvente compleja de dos señales gaussianas*”, una en fase y otra en cuadratura, resultante de la propagación multitrayecto. Esta distribución no tiene un rayo directo, por este motivo las dos gaussianas son de media cero.

La señal recibida es de la forma:

$$c(t) = c_r(t) + jc_i(t)$$

Donde  $c_r(t)$  y  $c_i(t)$  son procesos gaussianos independientes.

La función de densidad de probabilidad (PDF) de la envolvente de una gaussiana compleja se define con la siguiente expresión:

$$f_\theta(\theta) = \frac{1}{2\pi} \theta \in [0, 2\pi]$$

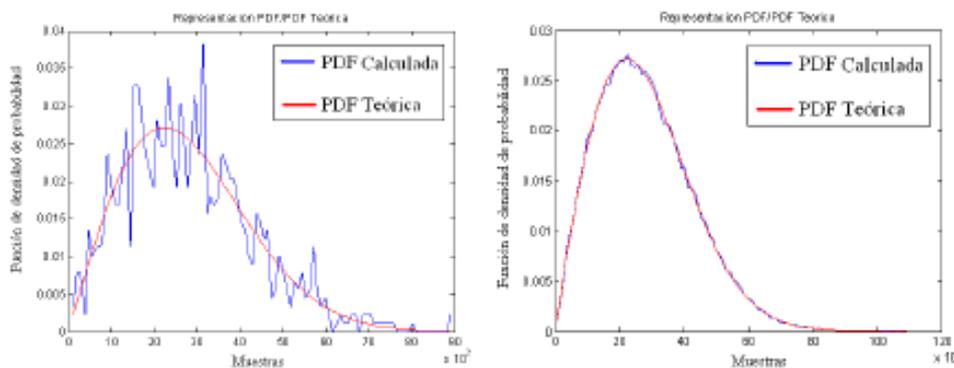
<sup>1</sup> LOS, siglas de Line Of Sight, o línea de visión directa, en un enlace de comunicaciones.

<sup>2</sup> Variaciones adicionales debido a las componentes multitrayecto generadas en el entorno cercano al móvil (alrededor de  $150\lambda$ ).

En los canales de radio móvil la distribución de Rayleigh es ampliamente utilizada para describir la naturaleza de las variaciones estáticas de la señal recibida o de los componentes individuales multitrayecto. Esta distribución tiene una función de densidad de probabilidad que está dada por:

$$P(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left[\frac{-r^2}{2\sigma^2}\right] \quad \begin{array}{l} P(r) = 0 \\ r < 0 \end{array}$$

Esta expresión permite modelar matemáticamente una distribución Rayleigh mediante el desarrollo de las funciones gaussianas en fase y cuadratura. Si desarrollamos la expresión anterior en función del número de muestras de transmisión, veremos que la PDF calculada se aproxima a la PDF teórica a medida que aumenta el número de muestras transmitidas por el canal. En la Figura 6 y la Figura 7 se pueden ver como, en el caso de tener solo 1000 muestras, apenas se distingue la evolución de la PDF calculada. Mientras que en el caso de 100.000 muestras son prácticamente idénticas.



Estas gráficas hacen relevante la importancia de disponer de un número elevado de muestras para tener una señal clara y minimizar el número de errores en la transmisión.

En un enlace bajo el modelo de transmisión Rayleigh hay mayor diversidad espacial ya que no se dispone de línea de visión directa, la señal recibida llega del multitrayecto de las diferentes reflexiones.

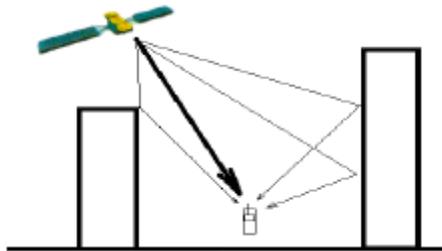
### 3.2.3 Variaciones rápidas: Modelo Rice

El segundo de los modelos analizados es el modelo con distribución Rice. En telefonía móvil es propio de comunicaciones al aire libre y en espacios abiertos donde la antena emisora tiene línea de rayo directo con el receptor. Una distribución Rice viene caracterizada por la **existencia de visión directa** (LOS) entre emisor y transmisor y su

nivel de potencia está por encima del nivel de las señales multitrayecto recibidas. La distribución Rice viene dada por la siguiente expresión:

$$p(r) = 2kr e^{-k(r^2+1)} I_0(2kr)$$

Donde  $k$  es el factor Rice e  $I_0$  representa la función de Bessel modificada de orden 0 de primera clase.



La distribución Rice es similar a la distribución Rayleigh, (que es la distribución que generalmente se usa en sistemas en UHF para caracterizar el multitrayecto) excepto que una componente de señal directa, *LOS*, se incluye en el modelo Rice.

La diferencia entre una distribución Rice y una Rayleigh viene dada por el factor de desvanecimiento 'k'. Se define como la razón de potencias de la componente directa de la señal y los componentes del multitrayecto y se expresa como:

$$k = \frac{s^2}{2\sigma^2}$$

Cuando  $k=0$  el canal exhibe un comportamiento del tipo Rayleigh, mientras que cuando el valor de  $k$  es muy grande ( $k \rightarrow \infty$ ) se tiene un canal gaussiano Rice.

La expresión de la PDF de un modelo Rice viene dada por:

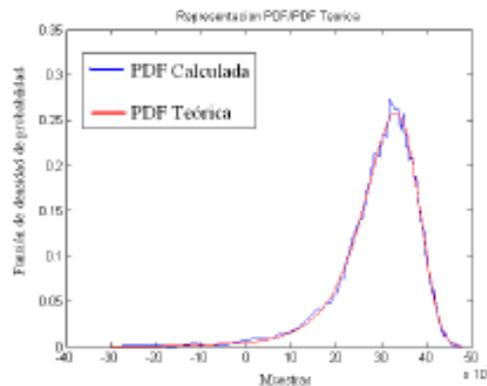
$$P(r) = \frac{r}{\sigma} \exp\left[-\frac{(r^2 + A^2)}{2\sigma^2}\right] I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) \quad A \geq 0, r \geq 0$$

Donde  $r$  es la amplitud de la señal recibida,  $2\sigma^2$  es la predicción de la potencia media de la señal multitrayecto,  $A$  es la amplitud pico de la señal dominante,  $I_0$  es la función de Bessel modificada en orden cero.

Del mismo modo que se ha visto en el canal Rayleigh, la distribución Rice también

requiere de un número elevado de muestras para aproximar el nivel de PDF al teórico.

Calculando para 100.000 muestras vemos la aproximación realizada en la Figura siguiente:



### 3.2.4 Variaciones lentas: Modelo Lognormal

A partir de los modelos de pérdidas por propagación es posible determinar cuál es el valor esperado de la potencia en función de la distancia, frecuencia, tipo de terreno, etc. Sin embargo, si un terminal móvil describe una circunferencia alrededor de una antena omnidireccional, el valor medio de la potencia varía en función de los distintos perfiles a medida que cambia su posición. Esta variación se denomina *desvanecimiento lento* y se produce por la ondulación del terreno y la interposición de objetos entre las antenas. Si representamos el nivel medio de potencia recibido,  $P_r$ , en el móvil de la figura 2.4 girando alrededor de la antena, se puede observar que la señal sufre una variación en su nivel de potencia en función del perfil del terreno que existe para cada posición, tal y como se muestra en la figura 2.5. Esta variación se produce alrededor del nivel medio de potencia,  $P$  que nos proporcionan los modelos de propagación. Cuando en su movimiento el terminal móvil se oculta detrás de una montaña o entra en un valle las condiciones de propagación son adversas y el nivel de potencia sufre una atenuación adicional. Por el contrario, pueden darse condiciones de visibilidad entre antenas especialmente favorables que redunden en un mayor nivel de señal recibido.

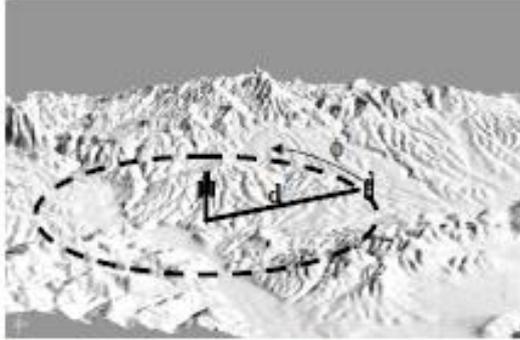


Fig. 2.4 Terminal móvil girando alrededor de una antena omnidireccional

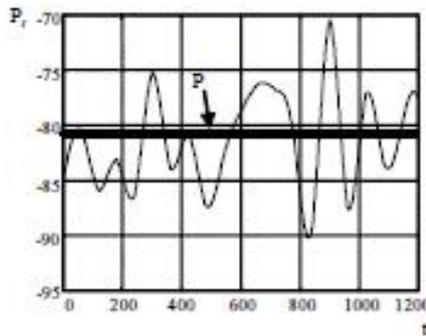


Fig. 2.5 Nivel de potencia recibido y nivel de potencia predicho

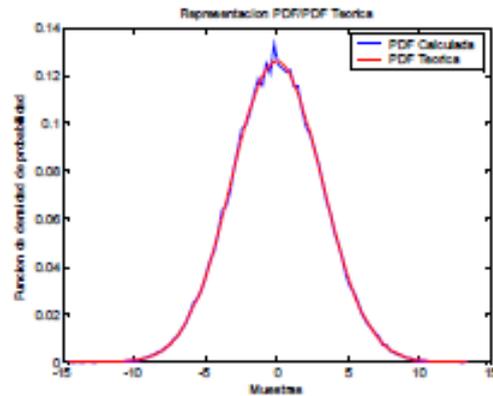
El tercer modelo de distribución es el modelo Lognormal, este tipo de modelos se dan en espacios cerrados sin línea de visión directa, obstáculos en los rayos multitrayecto y con variaciones rápidas de movimiento. Un ejemplo sería cuando se habla por teléfono dentro de un vehículo y se atraviesa un túnel rodeado de otros vehículos.

La distribución Lognormal representa la evolución de la probabilidad que un símbolo enviado sin errores en un instante 't' falle en ' t + dt '. Este tipo de distribuciones se utilizan para cuantificar la distribución de rayos que son objeto de múltiples reflexiones y difracciones entre el transmisor y el receptor. La función PDF-Lognormal se expresa de la siguiente forma [3]:

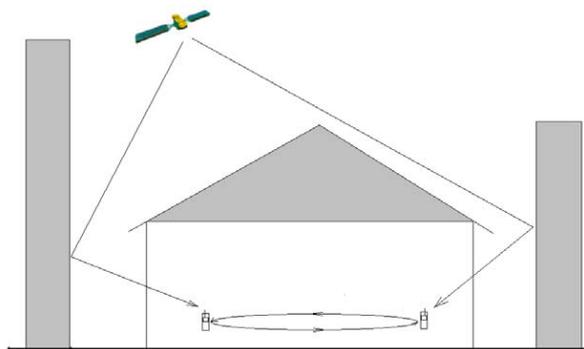
$$P(r) = \frac{r}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(\ln(r) - m)^2}{2\sigma^2}\right]$$

Donde m es la media del valor, y  $\sigma$  es la desviación estándar de la distribución normal correspondiente, obtenida usando la transformación  $y = \ln(r)$ .

La potencia recibida se caracteriza como una variable aleatoria con PDF-Lognormal. En la Figura 10 podemos comparar el comportamiento de la función  $P(r)$  y el cálculo para una transmisión de 1000, y otra de 100.000 muestras.



La transmisión sufre variaciones de señal a *medio plazo* producidas por efectos de sombras radioeléctricas. Se modela este tipo de señal en relación a la variación lenta de la potencia recibida en un terminal que da vueltas alrededor de una antena a una distancia  $d$  a causa de las variaciones del terreno y de la interposición de obstáculos entre las antenas. La variación depende de la velocidad del terminal, aunque los obstáculos serán relativamente grandes. En la Figura siguiente podemos ver un ejemplo de modelo para variaciones a medio plazo:



En el presente proyecto, el modelo Lognormal se ha usado para la simulación de efectos meteorológicos adversos, tales como lluvia, con sus distintos grados de intensidad.

# Capítulo 4.

## 4. La cadena adecuada: Códigos Reed-Solomon y el Efecto Doppler

---

### 4.1 Introducción

Según los distintos modelos de canal utilizados en la simulación de comunicaciones con HAPS, también se han empleado sistemas de control de errores, con el fin de mejorar las probabilidades de error obtenidas en cada caso.

El sistema más utilizado en las simulaciones ha sido la codificación Reed-Solomon, que se introduce en el presente apartado.

Finalmente, se profundiza algo más en las consecuencias derivadas del efecto Doppler, que tal como se ha indicado en el apartado anterior, se deben tener en cuenta si se usan canales Rayleigh o Rice.

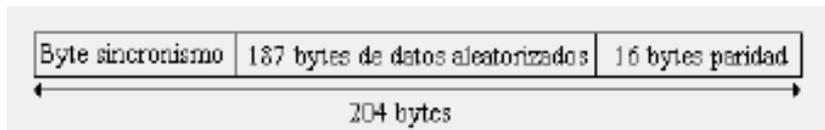
### 4.2 Sistemas concatenados: Códigos Reed-Solomon

Los códigos Reed-Solomon, se abrevian algunas veces como códigos RS. Es un código de bloques de corrección de errores que es utilizado en un amplio rango de aplicaciones en comunicaciones digitales así como también en almacenamiento de información. El codificador para un código RS difiere opera sobre bits múltiples y no sobre bits individuales.

Un código RS  $(n, k)$  se utiliza para codificar símbolos de  $m$  bits en bloques consistentes de  $n = 2^{(m-1)}$  símbolos. Por tanto, el algoritmo de codificación expande un bloque de  $k$  símbolos a  $n$  símbolos agregando  $n-k$  símbolos redundantes.

Cuando  $m$  es una potencia entera de dos, los símbolos de  $m$  bits reciben el nombre de bytes. Un valor popular de  $m$  es 8; en realidad los códigos RS de 8 bits son extremadamente poderosos.

En el estándar, el código Reed-Solomon definido es el sistemático RS (204, 188, 8) lo que quiere decir que ante una entrada de 188 bytes añade 16 bytes de paridad lo que da un total de 204 bytes, poseyendo la capacidad de corregir hasta 8 bytes erróneos arbitrarios.



En la figura se puede observar cómo queda la salida de este bloque ante una entrada, donde se ve que los 16 bytes de paridad aparecen al final de la trama de entrada.

Un código RS de corrección de errores tiene los siguientes parámetros.

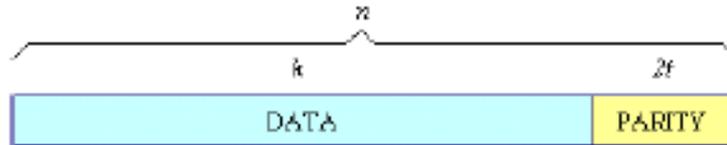
Longitud de bloque	$n = 2^{(m-1)}$ símbolos
Tamaño del mensaje	$k$ símbolos
Tamaño de verificación de paridad	$n - k = 2t$ símbolos
Distancia mínima	$d_{\min} = 2t + 1$ símbolos

Los códigos Reed-Solomon particularmente poseen buenas propiedades de distancia y son útiles en situaciones donde los errores tienden a presentarse en “ráfagas” en lugar de aleatoriamente. Además, ofrecen un extenso intervalo de tasa de código que es posible elegir para optimizar el desempeño.

Por último, están disponibles técnicas de descodificación eficiente que se emplean con códigos RS, lo cual es una razón más para su amplia aplicación (ej. sistema de audio digital de disco compacto)

### 4.2.1 Propiedades de los códigos RS

El siguiente diagrama muestra una palabra codificada por medio de RS (es conocido como código sistemático porque el mensaje se deja sin modificar y los símbolos de paridad son añadidos)



El código Reed -Solomon o RS (255, 223) funciona con símbolos de 8 bits. Cada palabra de código contiene 255 bytes de código, de los cuales 223 bytes son datos y 32 bytes son de paridad. Para este código:

$$n= 255, k=223, s=8, 2t= 32, t=16$$

El decodificador puede corregir 16 símbolos incorrectos en la palabra de código producidos en cualquier parte de dicha palabra, en el peor de los casos, pueden ocurrir 16 errores, cada uno en símbolos distintos, así el código corregirá 16 errores. En el mejor de los casos, ocurren errores en 16 símbolos completos y así el decodificador corrige errores de 16 x 8 bits. Esto hace a los códigos Reed-Solomon muy eficientes en la corrección de racimos largos de errores.

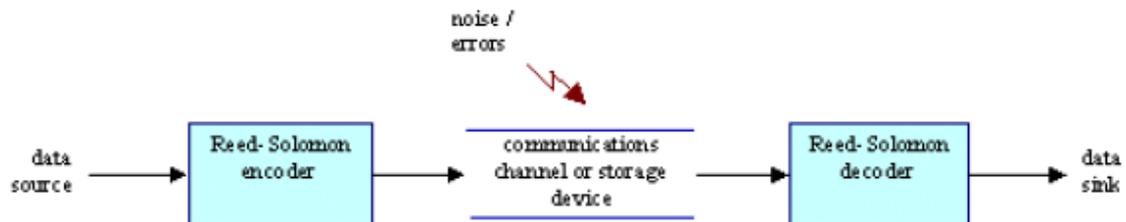
Cada palabra del código es creada utilizando un polinomio generador. Todas las palabras de código validas dan un resultado exacto al ser divididas entre el polinomio generador. La forma general del polinomio generador es.

$$g(x) =(x- i) (x- i+1) (x- i+2t).$$

La palabra de código es generada de tal manera que  $c(x)=g(x) i(x)$  donde  $g(x)$  es el polinomio generador,  $i(x)$  es el bloque de información y  $c(x)$  es una palabra de código válida.

### 4.2.2 Esquema global de transmisión y recepción

El codificador Reed Solomon toma un bloque de datos en forma digital y agrega los bits “redundantes” extras mencionados anteriormente. Generalmente los errores ocurren durante la transmisión o el almacenamiento de información por numerosas razones (por ejemplo: ruido o interferencia, ralladuras en un CD, etc.). Luego el decodificador procesa cada bloque e intenta corregir los errores y recuperar el mensaje original. El número y tipo de errores pueden ser corregidos dependiendo de las características del código RS.



Los procedimientos de descodificación algebraica Reed Solomon pueden corregir errores. Un decodificador puede corregir hasta un número  $2t$  de errores. La probabilidad de que se corrijan los posibles errores, depende en particular del código RS y del número y la distribución de los errores.

### 4.3 Efecto Doppler

Tal como se ha explicado en el apartado anterior, es necesario considerar el efecto Doppler en caso de realizar simulaciones con los canales Rayleigh y Rice. A continuación se explica llanamente cuál es el motivo del efecto doppler y por qué hay que considerarlo.

Cuando una fuente generadora de ondas se mueve relativamente a un observador, o cuando un observador se mueve relativamente a la fuente, existe entonces un apreciable desplazamiento en la frecuencia de las ondas. Si la distancia entre el observador y la fuente aumenta, el desplazamiento en la frecuencia disminuye, y viceversa.

La relación del efecto Doppler para una fuente en movimiento es dada por:

$$f_2 = f_1 \frac{v}{v \pm v_s}$$

Donde  $f_2$  es la frecuencia apreciada, y  $f_1$  es la frecuencia emitida por la fuente,  $v$  es la velocidad del sonido en el medio,  $v_s$  es la velocidad de la fuente (el signo negativo es usado si la fuente se está moviendo hacia el observador).

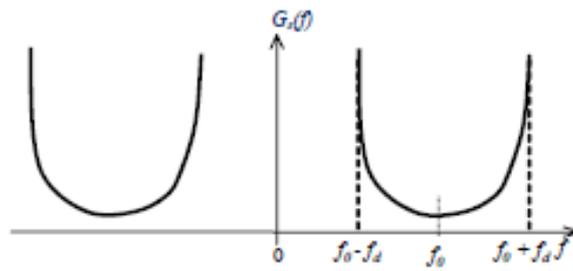
Un dispositivo de Radar de rango corto usa el principio de desplazamiento Doppler. Un cambio en la frecuencia entre los pulsos emitidos y los de retorno puede ser usado para encontrar la velocidad relativa.

Así pues, la movilidad del terminal, además de provocar variaciones en el nivel de señal recibido, provoca que la frecuencia portadora se vea desplazada en mayor o menor medida en función de la velocidad del terminal. Este efecto es conocido como efecto Doppler. Si suponemos que estamos transmitiendo una portadora sin modular de frecuencia  $f_0$ , la señal recibida por un terminal que se aleja de la antena transmisora a una velocidad  $v$  es:

$$r(t) = A \cos\left(2\pi f_0 t - 2\pi \frac{v}{\lambda} t\right)$$

Es decir, la frecuencia portadora sufre un desplazamiento igual a  $f_d = v/\lambda$ , donde  $f_d$  se denomina frecuencia Doppler y  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal recibida.

Si tenemos un terminal que se mueve en un entorno con múltiples trayectorias de propagación, cada una de las trayectorias incide en el terminal con un ángulo distinto. De este modo, la señal que incide con un ángulo  $\phi$  presenta un desplazamiento Doppler igual a  $\cos(\phi)v/\lambda$ . Por tanto, el espectro de potencia de la señal recibida queda dispersado según una función que depende del entorno. Por ejemplo, si transmitimos un tono de frecuencia  $f_0$ , el espectro de potencia recibido puede tener la forma de la siguiente figura, para un número de rayos tendente a infinito y un ángulo  $\phi$  con distribución aleatoria uniforme.



*Fig.2.11 Densidad espectral de potencia recibida en un entorno móvil al transmitir un tono*

En conclusión, la potencia de la señal queda dispersada frecuencialmente, con una dispersión máxima igual a  $fd$ . La forma de la función en que queda dispersado el tono depende del escenario de propagación.

# Capítulo 5.

## 5. El simulador utilizado: TOPSIM

---

### 5.1 Introducción

Para analizar sistemas de comunicaciones es de fundamental importancia la simulación digital con ordenador. Esta sirve para clarificar las ideas y desarrollar la experiencia sin necesidad de construir el sistema. Por lo tanto significa un fuerte ahorro en los gastos y una disminución del riesgo de construir un prototipo que no funcione como se espera.

La simulación con ordenador se utiliza también para proyectar sistemas de comunicaciones. Para aprovechar al máximo este método, la simulación digital se utiliza junto al análisis teórico y a pruebas sobre sistemas reales construidos en laboratorio.

La característica fundamental de un paquete de simulación para sistemas de comunicaciones es la versatilidad, es decir, la posibilidad de permitir la simulación de sistemas diferentes y de facilitar modificaciones de los parámetros del sistema y de su propia estructura. Para la simulación se ha utilizado el paquete de software Topsis IV, además de las herramientas office de Microsoft.

En la actualidad existen diferentes paquetes de simulación, el que se pasa a describir a continuación, TOPSIM-IV, es el utilizado en el presente proyecto.

TOPSIM (TORino Politecnico SIMulator) es un paquete de software orientado a la simulación de sistemas de comunicación en el dominio del tiempo, desarrollado en el marco de una estrecha colaboración en programas de investigación entre la Agencia Espacial Europea (ESA) y el Politécnico de Torino.

La primera versión del simulador, TOPSIM-I, salió a la luz a finales de la década de los 70. Esta versión era más un estudio de viabilidad que un software orientado a aplicaciones prácticas de ingeniería, teniendo en cuenta los ordenadores que había en dicha época y el restringido acceso que se podía tener a ellos. La siguiente versión se aprovisionó de una amplia librería de modelos y fue reconocida como una herramienta útil y práctica en el análisis y diseño de sistemas de comunicación.

TOPSIM-III marcó un punto de inflexión en el desarrollo de la herramienta. Esta versión se rediseñó completamente para ser una plataforma apoyada exclusivamente en el lenguaje FORTRAN (FORmula TRANSlation), de forma que se eliminaba la dependencia de la aplicación respecto al sistema operativo y a la máquina en que se fuera a ejecutar, asegurando de este modo su portabilidad. Gracias a este hecho, el software se diseminó ampliamente en entornos de investigación e industriales, llevando la herramienta a una constante prueba y puesta a punto. Las librerías de bloques se enriquecieron en gran medida y se mejoraron las facilidades de salida del simulador.

En la versión más reciente, TOPSIM-IV, se han desarrollado notablemente las capacidades gráficas del simulador. El paquete dispone de una interfaz gráfica de entrada con utilidades visuales para introducir los diagramas de bloques. Del mismo modo, se tiene una interfaz gráfica de salida, que mejora la presentación y el proceso final de los resultados obtenidos. La versión TOPSIM-IV disponible en el laboratorio corresponde a la 1.80.

## **5.2 El lenguaje TOPSIM IV**

El simulador TOPSIM es un paquete software que sirve para la simulación de sistemas de comunicaciones en el dominio del tiempo. Proporciona un lenguaje simple de alto nivel, para la descripción del sistema. Los programas se pueden escribir siguiendo la estructura empleada en el dibujo del diagrama de bloques del sistema. La descripción completa del sistema es la parte central de un programa TOPSIM. Está formada por llamadas a las subrutinas de los bloques que, si se conectan de manera oportuna, realizan el modelo a simular. El usuario ha de proporcionar a cada bloque unos parámetros que especifican el comportamiento del bloque mismo. Los bloques

disponibles forman la TOPSIM block library. Existe además otra librería que contiene las subrutinas de evaluación de las presentaciones. Sirve para el procesado de las muestras durante la simulación y la obtención de unos resultados

El entorno de simulación TOPSIM-IV se compone de varios elementos, tal y como se observa en la figura. El denominado kernel (núcleo del simulador) incluye:

- El procesador, que traduce el fichero fuente generado mediante TOPSIM-IV al correspondiente módulo FORTRAN-77.
- El simulador, que construye el programa ejecutable en base al fichero FORTRAN-77, incluyendo todos los módulos de las librerías, y que realiza la ejecución de la simulación. Los resultados se muestran en la consola de terminal UNIX o se guardan en ficheros creados durante el proceso.

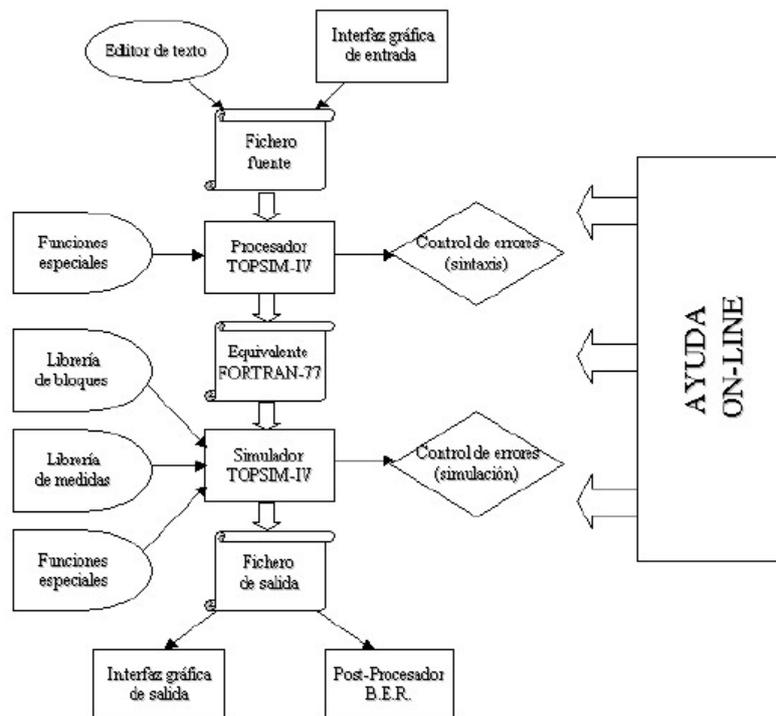


Figura 2.1: Entorno de simulación de TOPSIM-IV.

Las librerías, que incluyen como módulos compilados todos los subprogramas necesarios para simular los diferentes bloques prediseñados. Las siguientes librerías se encuentran disponibles en TOPSIM-IV (se detallan más adelante):

- librería de bloques, contiene gran variedad de bloques de subsistemas.
- librería de medidas, incluye módulos de evaluación del comportamiento.

- librería de funciones especiales, incluye módulos para pre-computación y procesado de bloques.
- El kernel controla los errores que se producen debido a la sintaxis del lenguaje de programación y a la propia ejecución de la simulación. Además, también comprende:
- La ayuda on-line, que contiene información relativa al lenguaje, las librerías y los procesos. Se encuentra disponible en el propio entorno TOPSIM-IV y en la web [www.tlc.polito.it/topsim\\_en.html](http://www.tlc.polito.it/topsim_en.html).
- La interfaz gráfica de entrada, que permite construir el sistema a simular mediante un entorno de ventanas.
- La interfaz gráfica de salida, que presenta los resultados obtenidos.
- Otras unidades de post-procesado.

### 5.3 Opciones de Simulación

Las opciones más interesantes para facilitar la realización de las simulaciones en TOPSIM-IV, de entre los nuevos servicios ofrecidos, son las siguientes:

- **Pre-ejecución:** esta opción permite realizar simulaciones preliminares sobre una parte reducida de la simulación completa para obtener parámetros a utilizar en la ejecución global, o bien, para representar características de algunos elementos a estudiar. De esta manera, se consigue eliminar simulaciones tediosas previas a la simulación principal.
- **Multi-Rate:** la simulación en el dominio del tiempo con muestreo uniforme obliga a satisfacer el teorema de muestreo para el elemento del sistema con mayor ancho de banda. En muchos casos, el sistema contiene elementos con diferentes anchos de banda, por lo que mantener el mismo muestreo implica incrementar el tiempo de CPU en las secciones donde la frecuencia es más baja. TOPSIM-IV ofrece la posibilidad de partir el sistema en secciones y emplear en cada una el muestreo apropiado mediante la utilización del comando `TIMESCALE`.

- **Segmentación:** el diseño de sistemas de transmisión suele requerir la comparación del mismo con diferentes configuraciones. Esto implica manejar diferentes programas que tienen partes en común, ralentizando así el proceso de desarrollo del sistema. TOPSIM-IV permite activar diferentes segmentos del programa a partir de variables lógicas.
- **Post-procesado de la BER:** esta opción evalúa la función de distribución de la longitud del gap, siendo este la secuencia de bits correctos entre dos símbolos afectados de error. Así, esta opción facilita la información sobre ráfagas de error y sus características.

### 5.3.1 La simulación en el dominio del tiempo

La principal limitación de todas las técnicas digitales para la simulación del tiempo continuo es la representación de señales y de sistemas estrictamente limitadas en banda, porque se muestrean las señales y los sistemas en unos instantes de tiempo que están determinados por cierta frecuencia denominada frecuencia de muestreo. Existen dos técnicas para simular el tiempo continuo en un programa, porque las señales analógicas se pueden representar en el dominio del tiempo o en el dominio de las frecuencias. El dominio de la frecuencia se utiliza para la simulación de traslaciones espectrales y filtrajes lineales, mientras que tiene desventajas significativas cuando se ha de simular un modelo que contiene dispositivos no lineales o bucles realimentados. Por estos motivos se elige un simulado que utilice la técnica temporal como puede ser el TOPSIM IV.

### 5.3.2 Elección del ancho de banda

Las señales se pueden clasificar, desde el punto de vista de la variable tiempo, en analógicas y en discretas, siendo su procesado muy distinto en función de pertenecer a una clase o a otra. En cualquier caso, el almacenamiento en memoria de una señal queda representado por una secuencia de valores. Para una señal analógica dicha secuencia estará formada por los valores obtenidos al muestrear la señal. Para una señal discreta la secuencia de valores será directamente la propia señal.

En TOPSIM-IV se define como parámetro de simulación el período de muestreo. Este valor se almacena en la variable DELT y corresponde al intervalo de tiempo existente entre una muestra y la siguiente. La variable DELT determina, de algún modo, el ancho de banda de trabajo y es fundamental asignarle un valor correcto. Dado que la simulación tiene lugar hasta un instante de tiempo fijado, este se almacena en la variable FINTIM.

Un valor bajo de la variable DELT lleva a un elevado número de pasos de simulación, y por tanto a un tiempo invertido en la simulación demasiado largo, además, este número está limitado a  $10^9$ . Por otro lado, un valor demasiado alto de DELT lleva a un ancho de banda de trabajo inferior al ancho de banda de las señales de nuestro sistema, presentándose entonces el efecto denominado aliasing y obteniendo unos resultados no válidos.

#### *5.3.2.1 Simulación de señales analógicas*

Las señales y los sistemas de comunicación suelen ser, desde el punto de vista espectral, de tipo banda-base o paso-banda, siendo frecuente tratar en ambos casos con señales y sistemas banda-estrecha. Gracias a esta característica, las señales y los sistemas paso-banda pueden expresarse por su señal analítica, aunque presenten una frecuencia central elevada.

El teorema de muestreo establece como frecuencia mínima de muestreo, en el caso de una señal de banda limitada, el doble de la frecuencia máxima de dicha señal. Para poder disponer de mayor precisión, y con la intención de minimizar los efectos debidos al aliasing, TOPSIM-IV recomienda escoger un ancho de banda de simulación igual a cinco veces la frecuencia máxima de las señales que se van a simular.

### 5.3.2.2 Simulación de señales discretas

La simulación de señales discretas no requiere ningún cálculo especial de ancho de banda. Si se conoce la frecuencia de muestreo ( $f_s$ ), el valor de la variable DELT es directamente ese, ajustándose entonces la finalización de la simulación mediante FINTIM.

La simulación en sistemas digitales suele hacerse con el objetivo de obtener una probabilidad de error determinada, contabilizando los errores de una señal digital respecto a una referencia. Para tener un margen de confianza razonable, se recomienda contar más de 100 errores. Así, la longitud de la simulación viene determinada por el número de símbolos a simular, los suficientes para conseguir la probabilidad de error prevista para el sistema.

### 5.3.3 Descripción de la simulación.

#### 5.3.3.1 Parámetros

Para la realización de la simulación en un programa TOPSIM se han de definir dos parámetros fundamentales:

- DELT: Representa el intervalo de tiempo entre dos muestras consecutivas, o sea, el período de muestreo.
- FINTIM: Duración de la simulación. Muchas veces se la puede definir como múltiplo del período de muestreo DELT.

La variable independiente del programa de simulación es TIME, que representa el tiempo que ha transcurrido. Esta debe incrementarse en pasos de longitud DELT, desde cero hasta FINTIM.

El teorema de Nyquist ya mencionado requiere una frecuencia de muestreo  $f_m$  que sea por lo menos igual al doble de la frecuencia máxima de las señales simuladas. TOPSIM fija una condición más restrictiva para que se consiga mayor precisión y se evite una superposición de espectros (aliasing). Exige que la frecuencia de muestreo sea, por lo menos, cinco veces más grande que la frecuencia máxima  $f_B$  de las señales y de los sistemas que han de simular:

$$f_m = 1/\text{DELT} * 5f_B$$

Por consiguiente, cualquier señal o subsistema debe cumplir con:

$$TB = 1 / 5 * DELT$$

TB se llama banda Topsisim y se determina fijando el período de muestreo DELT. Es necesario un examen cuidadoso del sistema a simular para escoger el oportuno valor de DELT. Un DELT bajo permite mayor precisión; pero requiere un tiempo de simulación más largo en el caso de que FINTIM no varíe. En los sistemas de comunicación digitales DELT normalmente se calcula como relación entre el tiempo de símbolo y el número de muestras por símbolo.

El programa de simulación contiene la descripción completa del sistema a estudiar, las medidas y las especificaciones referentes a la simulación.

El programa principal se puede crear mediante un editor de texto, introduciendo cada una de las sentencias que equivalen a los bloques que conforman el sistema, o bien, mediante la interface gráfica, insertando los diferentes bloques, conectándolos y dándole valor a los parámetros, para generar finalmente el fichero fuente en cualquiera de los dos casos.

Cada programa TOPSIM está formado por tres secciones:

1. **INITIAL** está puesta al comienzo del programa. Aquí, se definen los parámetros temporales de la simulación DELT y FINTIM y también los parámetros de los bloques a través de asignaciones iguales a las que se utilizan en el lenguaje FORTRAN. Contiene la información necesaria para la inicialización de todas las entidades involucradas en la simulación. Se establecen los valores de DELT y FINTIM indispensables en cualquier simulación.
2. **DYNAMIC** es la parte más importante de un programa TOPSIM. Contiene la descripción del modelo que se quiere simular del sistema dado con la lista ordenada de sentencias.
3. **TERMINAL** es opcional. Contiene los cálculos a realizar al final de la simulación. El procesador TOPSIM traduce el programa fuente escrito en el lenguaje TOPSIM a un programa fuente en FORTRAN, que, compilado,

produce unos módulos que se juntarán a un programa main estándar con las subrutinas de librería utilizadas y las creadas por el usuario. Se subraya la posibilidad de que el usuario diseñe sus propios bloques en FORTRAN definiendo de este modo los subsistemas como los necesite y ampliando así la librería de los bloques según las necesidades. Después, se realiza una fase de pre-run para evaluar la memoria que el modelo necesita para simular. Esta fase llevará a la creación del programa main de simulación que se compilará y se juntará con los módulos necesarios y se ejecutará. TOPSIM permite la simulación digital de sistemas digitales y analógicos y el análisis de las interacciones entre señales y sistemas de ambos tipos. Se encuentran las sentencias para controlar el valor de determinados parámetros y obtener valores de salida de la simulación.

#### 5.3.3.2 *Bloques utilizados*

- NBWN Genera un ruido Gaussiano blanco de banda estrecha con densidad espectral preasignada. El ruido viene dado como señal analítica con frecuencia central definida por el usuario. Dos procesos Gaussianos blancos independientes son usados para construir las partes real e imaginaria de la señal generada. Este modulo tiene un valor de default para la aleatorizacion de los parámetros.
- CLOCK Generador de clock ideal. Suministra un impulso de clock cada NS muestras.
- CONV Convertidor de frecuencia. La envolvente compleja de la señal analítica de ingreso se transfiere alrededor de la frecuencia central deseada.
- DPSDEM Demodulador de señal DPSK empleando un detector de fase diferencial.
- DPSMOD Genera una señal analítica con amplitud y frecuencia central fijadas y con fase modulada digitalmente en el formato diferencial PSK (DPSK).
- FILBRC Filtro paso banda con función de transferencia en banda base de tipo coseno alzado elevado a un exponente real. Este bloque puede emplearse para simular los filtros típicos de transmisión y recepción en los sistemas de transmisión de datos.

- FILBUT Bloque TOPSIM para la simulación de un filtro de Butterworth. Los parámetros que se tienen que definir son el tipo de filtro, (pasobajo, paso banda o pasoalto) el numero de polos, a frecuencia central, la banda a -3 dB y la ganancia en amplitud.
- GAIN Amplificador.
- HIMULT Multiplica dos señales analíticas. La frecuencia central de salida es la suma de las frecuencias centrales de las señales de ingreso.
- MPX Conmutador guiado por una señal binaria.
- PHADET Mide la diferencia de fase entre dos señales analíticas.
- PHASHF Desplazador de fase.
- PNSEQ Genera una secuencia pseudoaleatoria de bits.
- PSKDEM Demodulador PSK.
- PSKMOD Genera una señal analítica modulada PSK.
- SIGGEN Genera una señal analítica en el formato estándar de la frecuencia central, amplitud y fase deseadas.
- SUM Bloque que realiza la suma de dos señales con la misma frecuencia central.
- SCEBI Generador de una secuencia de bits codificados sistemáticamente para un código Reed-Solomon de longitud de bloque N variable entre 7 y 255, con distancia mínima entre 3 y N-2.
- RSCDBI Decodificador de Reed-Solomon por bit.
- BYADD Sumador de dos secuencias de entrada en un instante dado.
- NCONV Contador del numero de unos de la secuencia de entrada. Contador de errores.
- DELAY Bloque de Retardo.
- POWMET Bloque de medida de potencia.
- INTL Matriz de entrelazador del tipo bloques del numero de filas y numero de columnas dados; la dimension de cada elemento de la matriz corresponde a la dimension del registro de entrada.
- DNTL Matriz de desentrelazado para INTL.
- CNV12E Codificador convolucional de tasa 12, se puede elegir un “constraint-length” de 3 hasta 9.

- CNV12D Decodificador de Viterbi para decisión hard y soft según el trace-back, para esto necesita una tabla de métricas DMETR en caso de una decisión soft, proporcionada directamente o calculable mediante una subrutina METCOM, es posible elegir el estado óptimo en el cálculo de las métricas acumuladas y la profundidad de decodificación.

### 5.3.3.3 Ejecución

El simulador TOPSIM-IV no es más que un bucle que se ejecuta tantas veces como pasos de simulación deben realizarse. En la ejecución de un paso de simulación, se van llamando sucesivamente todas las subrutinas asociadas a los bloques del sistema en el orden necesario para calcular los valores de las muestras de todas las señales del sistema. Esto implica que cada bloque deba tener asociada su propia área de memoria.

TOPSIM-IV define unos arrays de memoria, para cada tipo de señal del simulador, de carácter general, y dispone de unas subrutinas de gestión de memoria. Dichas subrutinas devuelven un valor referente al índice del array que le corresponde a cada bloque, para así trabajar estos con la zona de memoria asociada a su llamada.

### 5.3.4 Librerías de TOPSIM

La librería de TOPSIM-IV contiene aproximadamente 400 bloques que modelan diversos subsistemas de comunicación, y unos 30 bloques que implementan varias funciones de medida. Los primeros están clasificados según se sigue:

- Generadores de señal, contiene bloques generadores de pulsos con paso por cero, relojes, señales chirp y procesos con distribución laplaciana.
- Generadores aleatorios analógicos, se encuentran generadores de secuencias binarias PN y de señales de distribución gaussiana, rayleigh y uniformes.
- Módems analógicos, incluye moduladores y demoduladores de amplitud coherentes, de frecuencia, de fase, etc.
- Módems digitales, incluye moduladores y demoduladores de amplitud, binarios, MPSK, MQAM, FSK, GMSK, etc.

- Canales analógicos, destacan los bloques de canal con fading lognormal y con multicamino difundido, además de contener los típicos gaussianos.
- Dispositivos no lineales, contiene limitadores de señal y dispositivos de características AM/AM o AM/PM.
- Filtros analógicos, se encuentran filtros paso-banda y paso-bajos de Bessel, Butterworth, Chebyshev, además incluye la posibilidad de definir filtros por puntos o por su respuesta impulsional.
- Filtros digitales, se encuentran filtros FIR (Finite Impulse Response) y filtros IIR (Infinite Impulse Response).
- Ecuadores.
- Circuitos de recuperación de portadora y sincronismo de reloj, contiene PLLs de primer y segundo orden, recuperadores de reloj y rectificadores, entre otros.
- Módulos DSP, incluye bloques de alineación de registros, conversión de registros a enteros, operaciones binarias, etc.
- Convertidores analógico/digital y digital/analógico.
- Codificadores y decodificadores, destacan los de tipo binario BCH, los convolucionales, los de Golay, Reed-Solomon y Hamming, entre otros.
- Moduladores y demoduladores TCM, contiene los bloques correspondientes a estas estructuras.
- Módulos de multiplexado por división en el tiempo, incluye generadores de ráfagas TDMA para modulación QPSK.
- Componentes de espectro ensanchado.
- Miscelánea, destacan los generadores de señal analítica, los bloques sumadores, retardadores, amplificadores y atenuadores, multiplexadores, etc.

Los bloques correspondientes a la librería de medidas se dividen de la siguiente manera:

- Medidas cualitativas, contiene bloques de medida de diagramas de ojo y de scattering (dispersión).
- Estimaciones estadísticas, incluye histogramas y medida de parpadeo de fase.
- Medidas de tasa de error mediante técnicas de conteo (método de Monte-Carlo) o, cuando es posible, mediante aproximaciones semianalíticas.
- Evaluaciones de espectro de potencia.

- Medidas de potencia.

Se exponen a continuación varios ejemplos gráficos de simulaciones de acuerdo con los módulos TOPSIM:

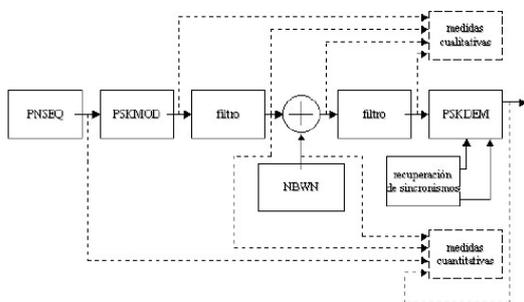


Figura 3.1: Diagrama de bloques genérico de las simulaciones propuestas.

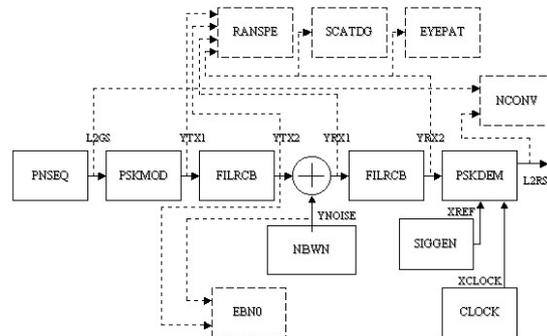


Figura 3.2: Diagrama de bloques esquema QPSK1.top.

# Capítulo 6.

## 6. LAS SIMULACIONES, SOLUCIONES Y PROPUESTAS: SISTEMAS ADAPTATIVOS

---

### 6.1 Introducción

Se exponen en este apartado todas las simulaciones realizadas referentes a las comunicaciones HAPS, utilizando los distintos modelos de canal, modulaciones y codificaciones, y problemáticas explicadas en los anteriores capítulos.

Los canales simulados se indican a continuación:

- Canal Gaussiano: Que permite simular condiciones ideales de transmisión
- Canal Rayleigh: Que permite simular condiciones de transmisión sin visibilidad directa
- Canal Rice: Que permite simular las condiciones de Canal Rayleigh, teniendo en cuenta una posible visión directa
- Canal Lognormal: Permite simular los efectos de los hidrometeoros, tales como tormenta o lluvia intensa.

Las modulaciones empleadas son QPSK y 8PSK.

Ocasionalmente, se han usado los siguientes tipos de codificación:

- Codificación convolucional, de tasa de codificación 1/2
- Codificación Reed Salomon, (255, 223, 8)

Antes de mostrar los resultados de todas las simulaciones, se explica en que formato se muestran. Los apartados que se muestran a continuación, están separados por canales; gaussiano, Raleigh, rice, lognormal y finalmente se explica la cadena adaptativa.

Esta cadena denominada adaptativa pretende adaptarse a la complejidad del canal en cada caso. Así, en función de la potencia recibida en cada momento, el sistema conmutará la tasa de transmisión, la codificación y/o la modulación utilizada en cada caso.

Las simulaciones realizadas demostrarán que la probabilidad de error obtenida por las canales adaptativos estará, en cada caso, entre las probabilidades de error de las cadenas de transmisión entre las que se realiza la adaptación.

En consecuencia, inicialmente se muestran distintas simulaciones para diversos canales, utilizando diferentes cadenas de transmisión, variando modulación, codificación, tasas de transmisión y teniendo en cuenta, si es necesario el efecto doppler.

Para todo ello se muestra, en cada simulación:

- Una breve introducción de la simulación
- Una tabla resumida con las principales características de la simulación realizada
- Un grafico con la probabilidad de error (BER) en función de la  $E_b/N_0$  recibida. La probabilidad de error estimada es el número de errores / nº de bits transmitidos y la  $E_b/N_0$  es la relación Señal a Ruido que se dispone en recepción.
- Finalmente, una tabla con los valores numéricos de cada simulación que dan lugar al gráfico mostrado anteriormente.

Al finalizar cada grupo de simulaciones, se exponen las principales conclusiones derivadas de las mismas.

## 6.2 Canal Gaussiano

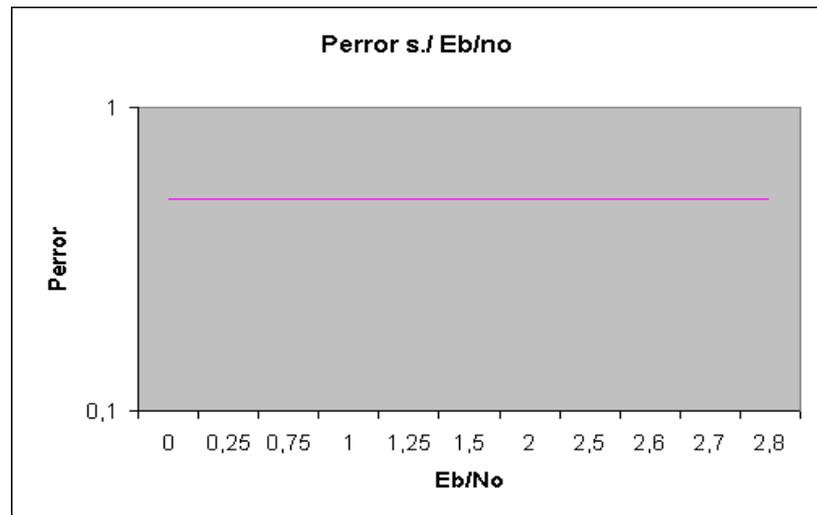
### 6.2.1 Simulaciones realizadas

Inicialmente, se han realizado las simulaciones de una cadena de transmisión con canal gaussiano con distintas frecuencias portadoras: 1 Mhz, 1Ghz., y 10 Ghz. En el mejor caso, dicha cadena de transmisión contiene un modulador QPSK más codificación Reed-Salomon (255, 223, 8) más código convolucional con tasa de codificación 1/2.

Las simulaciones se han realizado, a su vez, para distintas tasas de transmisión; de 1200 símbolos por segundo hasta 145600 símbolos por segundo (2 bits por símbolo).

- Simulación QPSK, Sin Codificación, con frecuencia portadora de 1 Mhz, para diferentes tasas de transmisión

<b>Codificación</b>	N/A
<b>Frecuencia</b>	1Mhz
<b>Bits</b>	150001
<b>Tiempo de simulación</b>	38Horas

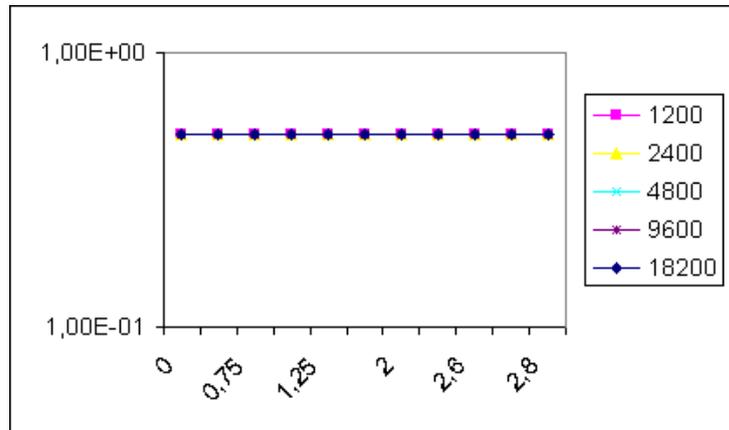


### Resultados numéricos de la simulación:

<i>Eb/No</i>	<i>Rs</i>	1200	2400	4800	9600	18200	36400	72800	145600
0		5,01E-01							
0,25		5,01E-01							
0,75		5,01E-01							
1		5,01E-01							
1,25		5,01E-01							
1,5		5,01E-01							
2		5,01E-01							
2,5		5,01E-01							
2,6		5,01E-01							
2,7		5,01E-01							
2,8		5,01E-01							

- Simulación QPSK con codificación Reed-Salomon, portadora 1 Mhz, para diferentes tasas de transmisión:

<b>Codificación</b>	Reed-solomon
<b>Frecuencia</b>	1Mhz
<b>Bits</b>	178400
<b>Tiempo de simulación</b>	78 horas

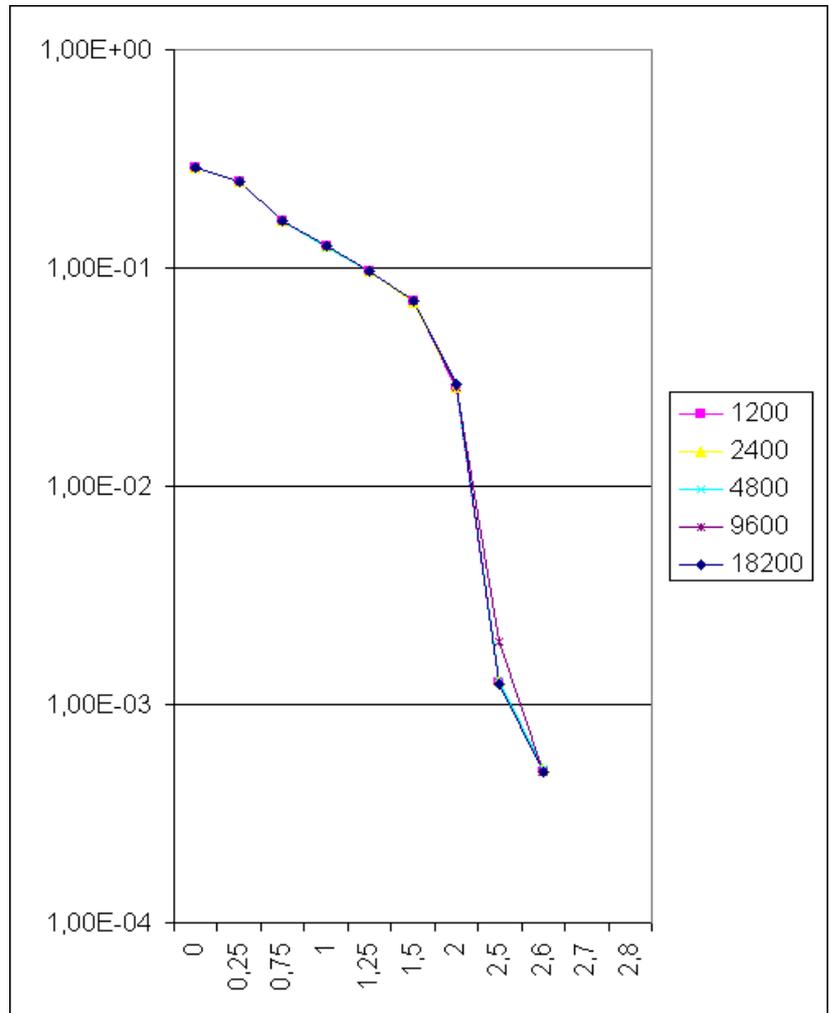


**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$	$R_s$	1200	2400	4800	9600	18200	36400	72800	145600
0		5,02E-01	2,89E-01						
0,25		5,01E-01	2,49E-01						
0,75		5,02E-01	1,66E-01						
1		5,01E-01	1,25E-01						
1,25		5,01E-01	9,68E-02						
1,5		5,02E-01	7,05E-02						
2		5,02E-01	2,82E-02						
2,5		5,02E-01	1,23E-03						
2,6		5,02E-01	5,04E-04						
2,7		5,02E-01							
2,8		5,02E-01							

- Simulación QPSK con codificación Reed-Salomon más convolucional, portadora de 1 Mhz, para diferentes tasas de transmisión:

<b>Codificación</b>	Reed- Sal. + Conv
<b>Frecuencia</b>	1Mhz
<b>Bits</b>	178400
<b>Tiempo de simulación</b>	85 horas

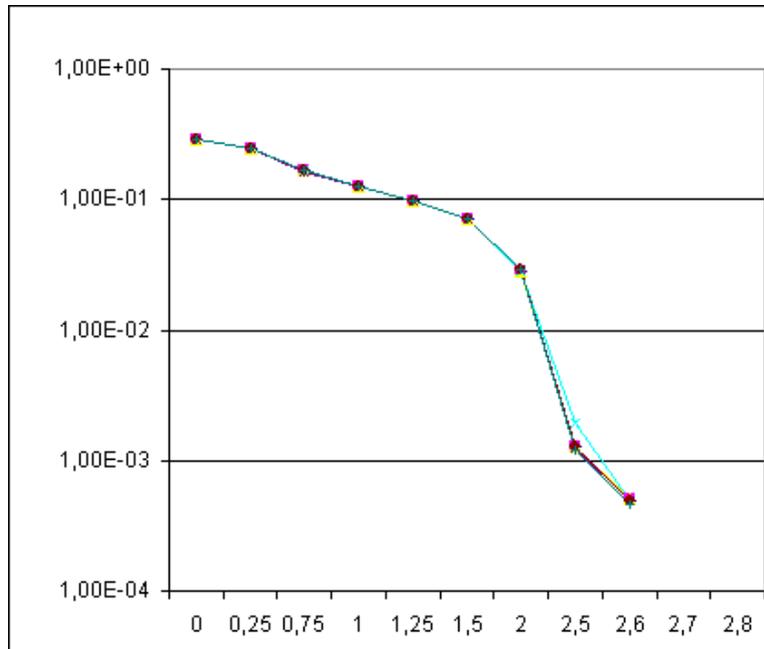


**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ $R_s$	1200	2400	4800	9600	18200	36400	72800	145600
0	2,89E-01							
0,25	2,49E-01							
0,75	1,66E-01	1,66E-01	1,66E-01	1,66E-01	1,64E-01	1,66E-01	1,66E-01	1,66E-01
1	1,26E-01	1,26E-01	1,25E-01	1,26E-01	1,26E-01	1,25E-01	1,25E-01	1,25E-01
1,25	9,69E-02	9,69E-02	9,69E-02	9,70E-02	9,70E-02	9,69E-02	9,69E-02	9,68E-02
1,5	7,04E-02	7,00E-02	7,01E-02	7,03E-02	7,04E-02	7,01E-02	7,01E-02	7,05E-02
2	2,79E-02	2,84E-02	2,85E-02	2,85E-02	2,93E-02	2,90E-02	2,95E-02	2,82E-02
2,5	1,26E-03	1,28E-03	1,27E-03	1,93E-03	1,25E-03	1,27E-03	1,22E-03	1,23E-03
2,6	4,88E-04	5,04E-04	5,04E-04	4,88E-04	4,88E-04	4,88E-04	4,60E-04	5,04E-04

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon más convolucional, portadora de 1 Ghz, , para diferentes tasas de transmisión:

<b>Cadena</b>	RS+Conv
<b>Frecuencia</b>	1Ghz
<b>Bits</b>	178400

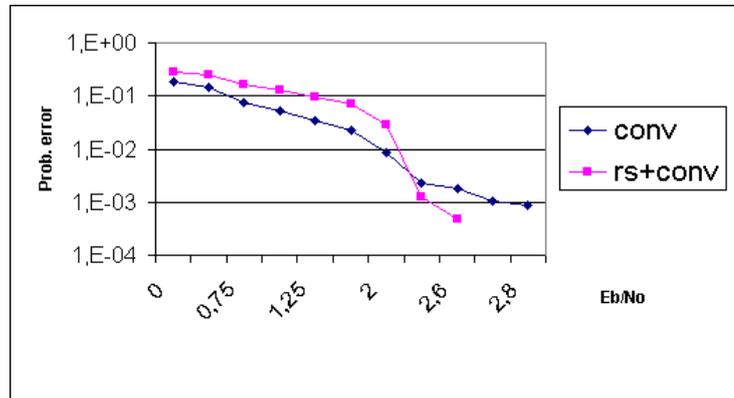


**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$	$R_s$	1200	2400	4800	9600	18200	36400	72800
0		2,89E-01	2,89E-01	2,89E-01	2,89E-01	2,88E-01	2,89E-01	2,89E-01
0,25		2,49E-01						
0,75		1,66E-01	1,66E-01	1,66E-01	1,66E-01	1,64E-01	1,66E-01	1,66E-01
1		1,26E-01	1,26E-01	1,25E-01	1,26E-01	1,26E-01	1,25E-01	1,25E-01
1,25		9,69E-02	9,69E-02	9,69E-02	9,70E-02	9,70E-02	9,69E-02	9,69E-02
1,5		7,04E-02	7,00E-02	7,01E-02	7,03E-02	7,04E-02	7,01E-02	7,01E-02
2		2,79E-02	2,84E-02	2,86E-02	2,85E-02	2,93E-02	2,90E-02	2,95E-02
2,5		1,26E-03	1,28E-03	1,27E-03	1,93E-03	1,25E-03	1,27E-03	1,22E-03
2,6		4,88E-04	5,04E-04	5,04E-04	4,88E-04	4,88E-04	4,88E-04	4,60E-04

- Comparativa de simulaciones QPSK con codificaciones Reed-Salomon más convolucional o únicamente con codificación convolucional , portadora de 10 Ghz y Tasa de transmisión 1200 símbolos por segundo:

<b>Cadena</b>	RS+Conv
<b>Frecuencia</b>	10 Ghz



**Resultados numéricos de la simulación:**

Eb/No	Rs	Tasa 1200 y código convolucional	Tasa 1200 y códigos RS+Conv.
0		1,81E-01	2,89E-01
0,25		1,45E-01	2,49E-01
0,75		7,61E-02	1,66E-01
1		5,21E-02	1,26E-01
1,25		3,43E-02	9,69E-02
1,5		2,28E-02	7,04E-02
2		8,60E-03	2,79E-02
2,5		2,28E-03	1,26E-03
2,6		1,85E-03	4,88E-04
2,7		1,05E-03	N/A
2,8		8,87E-04	N/A

**6.2.2 Simulaciones con canal Gaussiano: Resultados y conclusiones**

Los resultados no son aceptables (P. Error = 0.5) si no existe algún tipo de codificación (convolucional o Reed Solomon). Por tanto, a partir de ahora siempre se usará codificación convolucional y si es necesario código Reed-Salomon,

La tasa de transmisión, comprendida entre 1200 y 145600 (símbolos por segundo), no ha afectado en los resultados. Lo mismo sucede con la frecuencia portadora, dado que el canal es gaussiano. Eso sí, se comprueba que los resultados con codificaciones Reed

Solomon y convolucional son mejores que si solo se considera codificación convolucional. (considerando una Relación Señal a Ruido mayor o igual a 2 dB).

## 6.3 Canal Rayleigh

### 6.3.1 Simulaciones realizadas

Se ha simulado la misma cadena con codificación convolucional y código Reed-Salomon substituyendo ahora el canal gaussiano por el canal Rayleigh.

La simulación se ha realizado a frecuencias 1Mhz. y 1Ghz., simulando hasta tasas de 291200 símbolos por segundo.

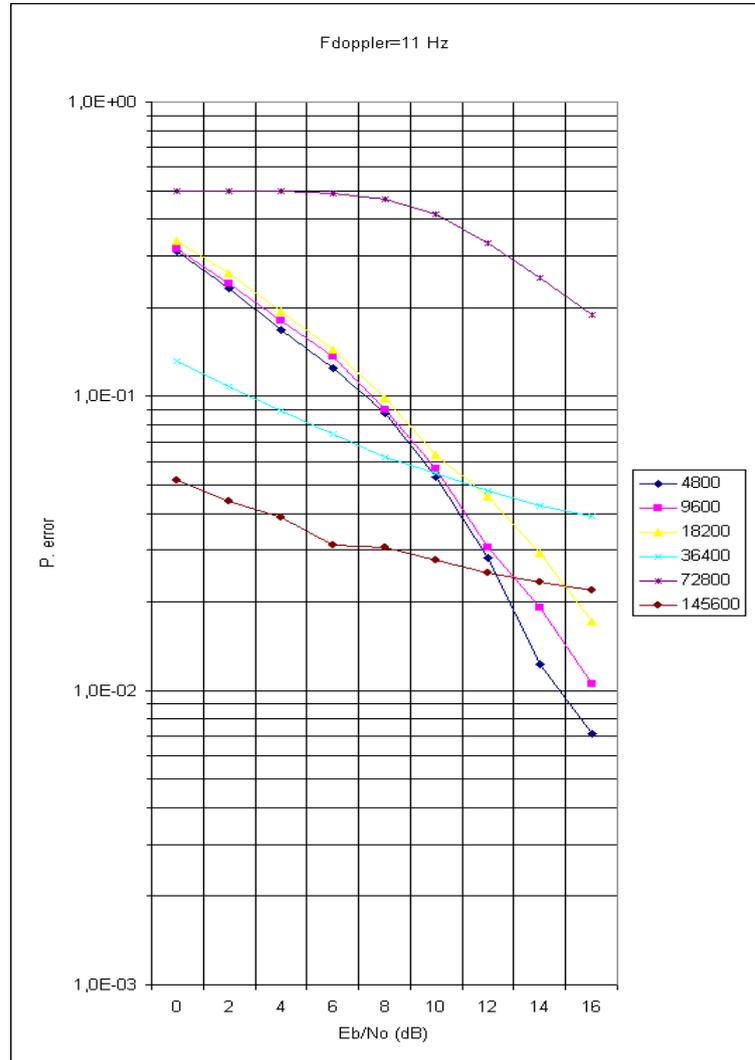
Las frecuencias doppler, necesarias en canal Rayleigh, que han sido simuladas inicialmente no corresponden, de momento, a velocidades relativas entre emisor y receptor coherentes. Por ello, se observa que la probabilidad de error no aumenta al incrementar la frecuencia doppler, hecho no coherente y que se estudia posteriormente (técnica multirate)

Finalmente, una vez entendido el concepto de la simulación, se dejará de simular a frecuencias 1 Ghz. y 1Mhz, para pasar a simular únicamente a frecuencias lo suficiente mente alejadas de banda base, decrementando así el tiempo de simulación. Aunque considerando que las simulaciones que se llevarán a cabo serán validas hasta 10 Ghz., a partir de esta frecuencia deberemos tener en cuenta el fenómeno de los hidrometeoros, entre otros. Estos efectos son considerados posteriormente en las simulaciones con canal lognormal.

Se observa, en general, que la probabilidad de error aumenta al considerar tasas de transferencia más elevadas.

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon más convolucional, portadora de 1 Mhz, y doppler,  $f_D=11$  Hz., para diferentes tasas de transmisión:

<b>Canal</b>	rayleigh
<b>Frecuencia</b>	1Mhz
<b>Bits</b>	178400
<b>F. Doppler</b>	11

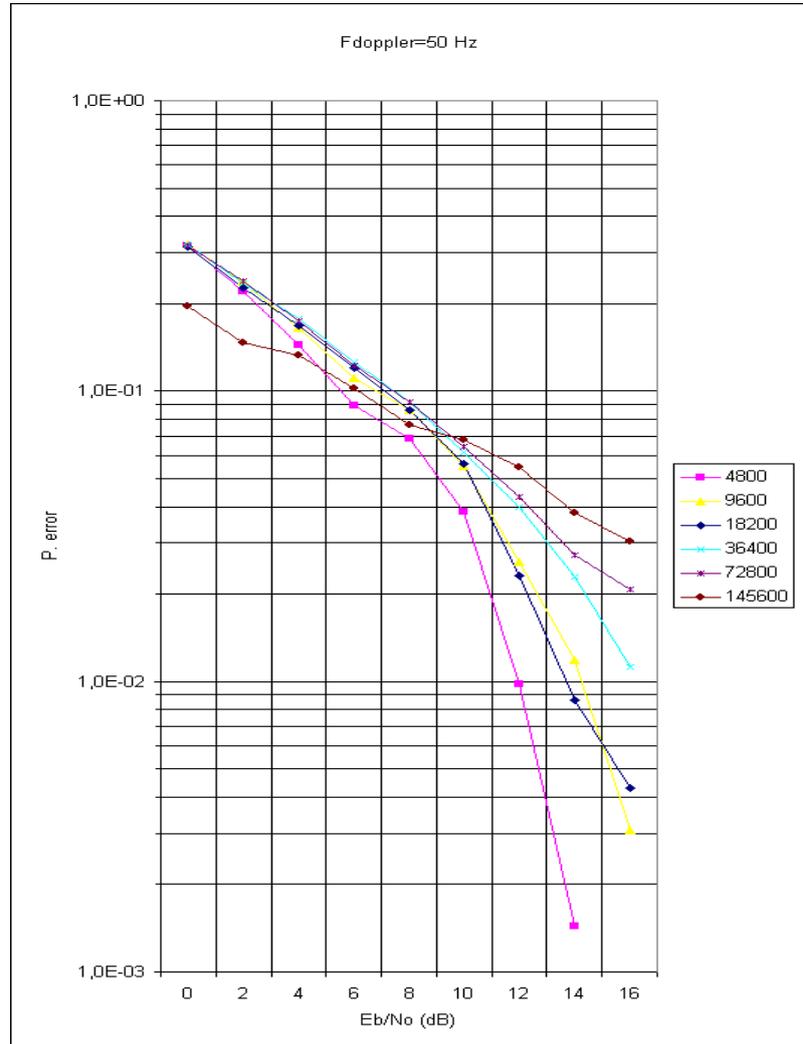


**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ -Rs	4800	18200	36400	72800	145600
0	3,12E-01	3,38E-01	1,31E-01	5,00E-01	5,16E-02
2	2,34E-01	2,62E-01	1,08E-01	4,99E-01	4,42E-02
4	1,69E-01	1,94E-01	8,92E-02	4,97E-01	3,87E-02
6	1,25E-01	1,44E-01	7,42E-02	4,88E-01	3,11E-02
8	8,73E-02	9,84E-02	6,21E-02	4,67E-01	3,07E-02
10	5,34E-02	6,32E-02	5,47E-02	4,15E-01	2,77E-02
12	2,81E-02	4,58E-02	4,78E-02	3,32E-01	2,50E-02
14	1,22E-02	2,93E-02	4,26E-02	2,53E-01	2,34E-02
16	7,13E-03	1,72E-02	3,92E-02	1,89E-01	2,19E-02

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon más convolucional, portadora de 1 Mhz, y doppler,  $f_D=50$  Hz. para diferentes tasas de transmisión:

<b>Canal</b>	rayleigh
<b>Frecuencia</b>	1Mhz
<b>Bits</b>	178400
<b>F. Doppler</b>	50

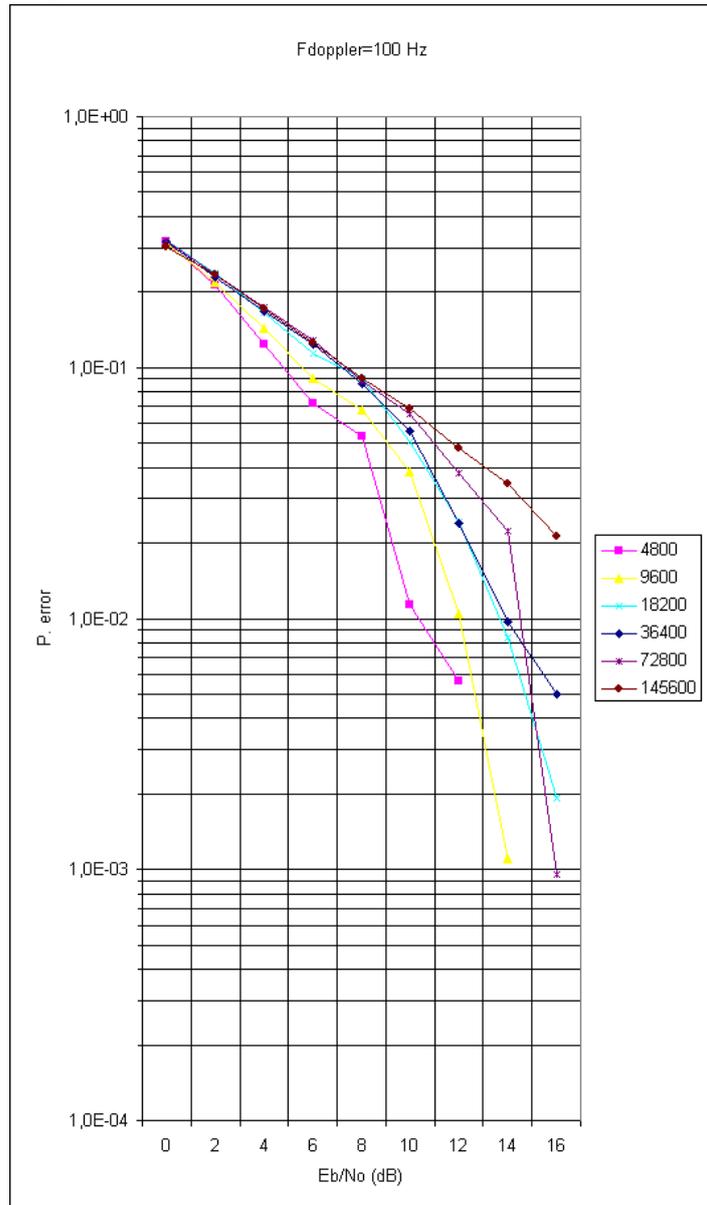


**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ --Rs	4800	9600	18200	36400	72800	145600
0	3,16E-01	3,20E-01	3,14E-01	3,19E-01	3,18E-01	1,97E-01
2	2,21E-01	2,37E-01	2,28E-01	2,36E-01	2,38E-01	1,46E-01
4	1,44E-01	1,65E-01	1,68E-01	1,77E-01	1,74E-01	1,32E-01
6	8,89E-02	1,11E-01	1,20E-01	1,26E-01	1,22E-01	1,02E-01
8	6,87E-02	8,57E-02	8,59E-02	9,19E-02	9,20E-02	7,68E-02
10	3,83E-02	5,51E-02	5,64E-02	6,13E-02	6,42E-02	6,82E-02
12	9,75E-03	2,58E-02	2,31E-02	3,98E-02	4,32E-02	5,49E-02
14	1,44E-03	1,18E-02	8,64E-03	2,29E-02	2,73E-02	3,79E-02
16		3,08E-03	4,29E-03	1,12E-02	2,08E-02	3,03E-02

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon más convolucional, portadora de 1 Mhz, y doppler,  $f_D=100$  Hz. para diferentes tasas de transmisión:

<b>Canal</b>	rayleigh
<b>Frecuencia</b>	1Mhz
<b>Bits</b>	178400
<b>F. Doppler</b>	100

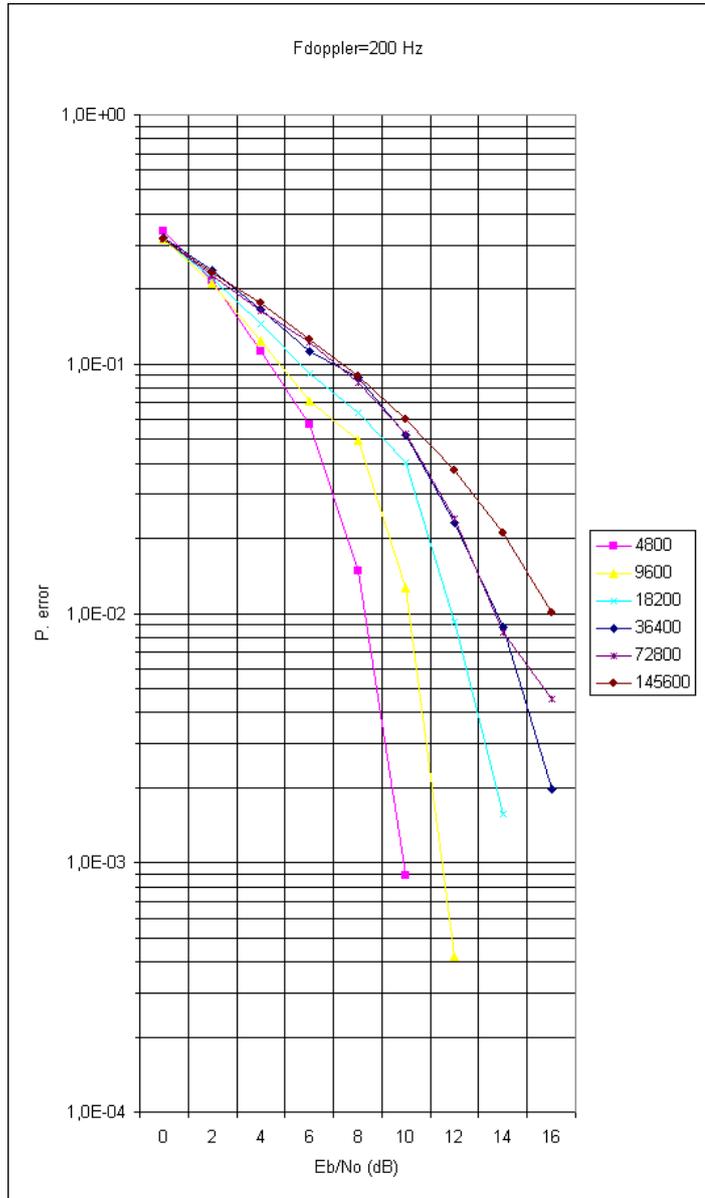


**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ --Rs	4800	9600	18200	36400	72800	145600
0	3,18E-01	3,14E-01	3,22E-01	3,16E-01	3,20E-01	3,04E-01
2	2,12E-01	2,20E-01	2,37E-01	2,28E-01	2,36E-01	2,35E-01
4	1,24E-01	1,43E-01	1,66E-01	1,67E-01	1,75E-01	1,73E-01
6	7,19E-02	9,01E-02	1,14E-01	1,24E-01	1,28E-01	1,25E-01
8	5,35E-02	6,78E-02	9,02E-02	8,63E-02	8,86E-02	9,07E-02
10	1,14E-02	3,85E-02	5,08E-02	5,60E-02	6,50E-02	6,88E-02
12	5,66E-03	1,05E-02	2,44E-02	2,40E-02	3,80E-02	4,77E-02
14		1,11E-03	8,41E-03	9,72E-03	2,24E-02	3,45E-02
16			1,92E-03	4,98E-03	9,60E-04	2,12E-02

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon y convolucional, portadora de 1 Mhz, y doppler,  $f_D=200$  Hz. para diferentes tasas de transmisión:

<b>Canal</b>	rayleigh
<b>Frecuencia</b>	1Mhz
<b>Bits</b>	178400
<b>F. Doppler</b>	200

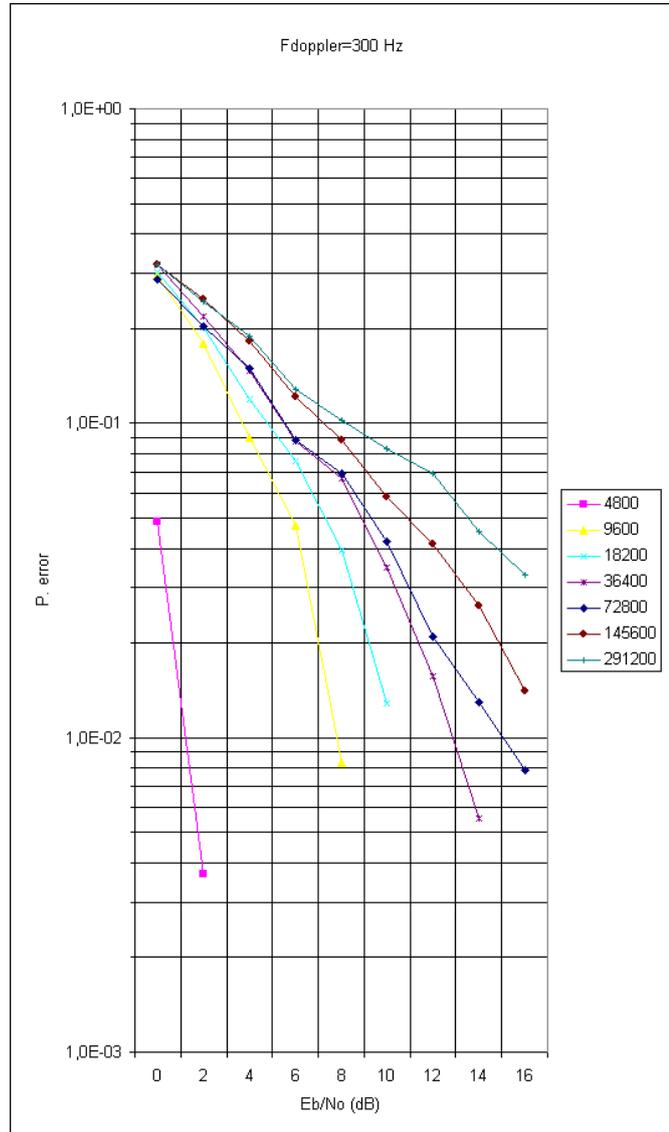


**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ --Rs	4800	9600	18200	36400	72800	145600
0	3,43E-01	3,19E-01	3,16E-01	3,22E-01	3,16E-01	3,17E-01
2	2,15E-01	2,11E-01	2,21E-01	2,39E-01	2,26E-01	2,33E-01
4	1,12E-01	1,24E-01	1,45E-01	1,66E-01	1,63E-01	1,75E-01
6	5,72E-02	7,11E-02	9,12E-02	1,12E-01	1,23E-01	1,25E-01
8	1,47E-02	4,94E-02	6,37E-02	8,85E-02	8,39E-02	8,95E-02
10	8,91E-04	1,26E-02	4,01E-02	5,22E-02	5,26E-02	5,98E-02
12		4,20E-04	9,26E-03	2,32E-02	2,40E-02	3,73E-02
14			1,58E-03	8,86E-03	8,39E-03	2,09E-02
16				1,97E-03	4,51E-03	1,00E-02

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon y convolucional, portadora de 1 Ghz, y doppler,  $f_D=300$  Hz. para diferentes tasas de transmisión:

<b>Canal</b>	rayleigh
<b>Frecuencia</b>	1Ghz
<b>Bits</b>	178400
<b>F. Doppler</b>	300



**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ --Rs	4800	9600	18200	36400	72800	145600	291200
0	4,88E-02	2,94E-01	3,01E-01	3,20E-01	2,87E-01	3,19E-01	3,19E-01
2	3,70E-03	1,79E-01	2,02E-01	2,18E-01	2,03E-01	2,48E-01	2,43E-01
4		8,96E-02	1,19E-01	1,47E-01	1,50E-01	1,83E-01	1,88E-01
6		4,73E-02	7,57E-02	8,75E-02	8,85E-02	1,21E-01	1,28E-01
8		8,30E-03	3,95E-02	6,69E-02	6,91E-02	8,82E-02	1,02E-01
10			1,29E-02	3,49E-02	4,19E-02	5,85E-02	8,29E-02
12				1,56E-02	2,10E-02	4,13E-02	6,90E-02
14				5,55E-03	1,29E-02	2,62E-02	4,54E-02
16					7,85E-03	1,41E-02	3,28E-02

### 6.3.2 Resultados y conclusiones canal Rayleigh

Las simulaciones de la cadena de transmisión considerada (código Reed – Salomon y codificación convolucional) con canal Rayleigh son las siguientes:

Se han llevado a cabo dos simulaciones, con 2 frecuencias centrales de simulación distintas, 1 Mhz. y 1 Ghz.

La diferencia observada es que para 1 Ghz, las tasas (rate o símbolos/segundo) para las cuales el programa es capaz de obtener las probabilidades de error son mayores que si simulamos a frecuencia central 1Mhz. Así, para simulaciones con 17840 bits de información, obtenemos resultados hasta 18200 símbolos por segundo si la frecuencia es 1Mhz., mientras que si la frecuencia es 1 Ghz, los resultados obtenidos son hasta 291200 símbolos por segundo.

Se observa también, como al aumentar los bits de información, la resolución de los resultados aumenta así como la tasa para la cual obtenemos resultados.

Por otra parte, y ya considerando el efecto del canal Rayleigh, se observa que para simulaciones con 1Mhz. de frecuencia central de simulación, los resultados obtenidos no son coherentes para frecuencias doppler menores que 100 Hz., mientras que para 1Ghz de frecuencia central de simulación, los resultados no son coherentes para frecuencias doppler menores que 300Hz.

Esto es debido, a que el ancho de banda del filtro que define la frecuencia doppler es muy pequeño respecto de la frecuencia central de la simulación. Así pues, en adelante, se mantendrá el compromiso necesario entre doppler y frecuencia de la portadora.

Resultados de las simulaciones para canal Rayleigh, frecuencia portadora 1 Mhz. (y resolución de 178400 bits de información):

Frecuencia doppler	Canal Rayleigh
11 Hz	Resultados NO válidos
50 Hz.	
100 Hz.	Resultados coherentes
200 Hz.	

## 6.4 Simulaciones con frecuencias doppler bajas (Canales Rayleigh y Rice)

### 6.4.1 Simulaciones realizadas

Se simulará, ya con la frecuencia portadora óptima para cada tasa de transmisión, la misma cadena (QPSK, con codificaciones convolucional de tasa  $\frac{1}{2}$  y codificación Reed Salomon) considerando ahora canales Rayleigh y Rice.

Las simulaciones se han realizado para los siguientes valores:

- **Eb/No**: de 0 dB a 16 dB en pasos de 2 dB
- **Tasas de transmisión**: de 4800 a 1164800 símbolos por segundo. (en progresión geométrica de razón 2).
- **Frecuencias doppler**: 3, 10, 17, 50, 120, 250, 583 Hz.

Se han escogido estos valores de doppler en base a los cálculos con el fin de obtener velocidades coherentes, teniendo en cuenta que la frecuencia de la portadora es menor que 10 Ghz.

Los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas son los siguientes:

Frecuencia doppler	Canal Rayleigh	Canal Rice
3 Hz.	Simulación no coherente, puesto que las probabilidades de error para tasas 18200, 145600, 291200 y 582400 son menores que para la tasa de 4800 símbolos por segundo. Este hecho puede ser debido a que el ancho de banda del filtro que define el doppler sea muy pequeño.	N/A
10 Hz.	Datos correctos hasta 18200 simb/seg. A partir de esa tasa la simulación no es coherente.	N/A
17 Hz	Datos correctos hasta 18200 simb/seg. A partir de esa tasa la simulación no es coherente.	Datos correctos hasta 72800 simb/seg. A partir de esa tasa la simulación no es coherente.

Frecuencia doppler	Canal Rayleigh	Canal Rice
50 Hz.	Datos correctos hasta 72800 simb/seg. A partir de esa tasa la simulación no es coherente.	N/A
120 Hz.	Datos correctos hasta 582400 simb/seg. A partir de esa tasa la simulación no es coherente.	Datos correctos hasta 145600 simb/seg. A partir de esa tasa la simulación no es coherente.
250 Hz.	Datos correctos hasta 291200 simb/seg. A partir de esa tasa la simulación no es coherente.	Datos correctos hasta 145600 simb/seg. A partir de esa tasa la simulación no es coherente.
583 Hz.	Datos correctos hasta 582400 simb./seg. A partir de esa tasa la simulación no es coherente.	Simulación correcta. Se observa como al aumentar la tasa, también aumenta la probabilidad de error.

#### 6.4.2 Conclusiones: Técnica Multirate

Se observa un compromiso entre el ancho de banda del filtro que define la frecuencia doppler y la tasa de transmisión hasta la que se puede simular para obtener resultados coherentes.

Para solucionar este problema, con frecuencias doppler bajas se ha utilizado la técnica multirate. Esta técnica consiste en aumentar el número de muestras simuladas en determinados momentos de la simulación, consiguiendo así un aumento de la resolución en los resultados si es necesario. Por ello, en las partes de la simulación donde la señal no es analítica, basta con una muestra por bit mientras que en partes donde se trata con señales analíticas se aumentan el número de muestras a simular en un mismo intervalo de tiempo, aumentando así la resolución del resultado.

Todo ello supone el aumento o decremento del retraso de señal al final de la cadena de transmisión, debiendo ajustar los parámetros de los decodificadores adecuadamente para la correcta medida de la probabilidad de error en recepción.

Se ha comprobado que escogiendo los valores para TIMESCALE adecuados, los resultados obtenidos son exactamente iguales a los obtenidos hasta ahora, sin usar la técnica multirate. En consecuencia en adelante, se aumentará el valor de TIMESCALE para aumentar también la resolución de los resultados.

Como se ha comentado, es importante destacar que al introducir la técnica multirate hay que tener en cuenta dos factores básicos además de las modificaciones implícitas por el hecho de usar la técnica multirate. Estos dos factores son el número de muestras que descarta el decodificador convolucional antes de empezar a decodificar y también la fase del reloj en recepción. Estos dos parámetros se deben adaptar siempre al valor de TIMESCALE elegido.

### 6.4.3 Simulaciones con canal Rice

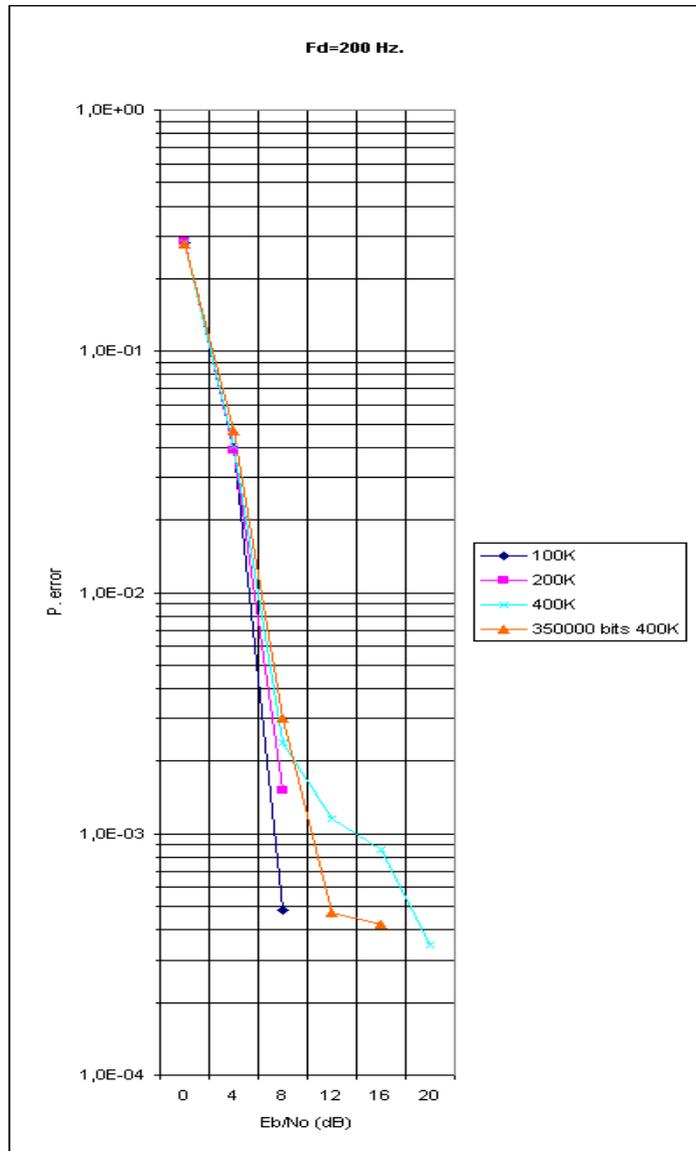
Una vez realizadas las simulaciones con canales Gausiano y Rayleigh, se obtienen ahora los resultados de la BER en función de la  $E_b/N_0$  para las cadenas de transmisión con codificación RS y sin codificación RS, con canal Rice, que considera la posible visión directa, para distintas tasas de transmisión.

Para ello, se escoge una frecuencia doppler de 200 Hz. (que corresponde a una velocidad de 108 Km./h asumiendo que la portadora es de 2 Ghz. ) . Las modulaciones empleadas son 8PSK y QPSK.

Además, se usa la misma fuente en todas las cadenas, con el fin de poder adaptar más adelante entre un esquema y otro.

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon y convolucional, *Canal Rice* y  $f_d = 200$ , para diferentes tasas de transmisión:

<b>Canal</b>	rice
<b>doppler</b>	200
<b>Bits</b>	178400



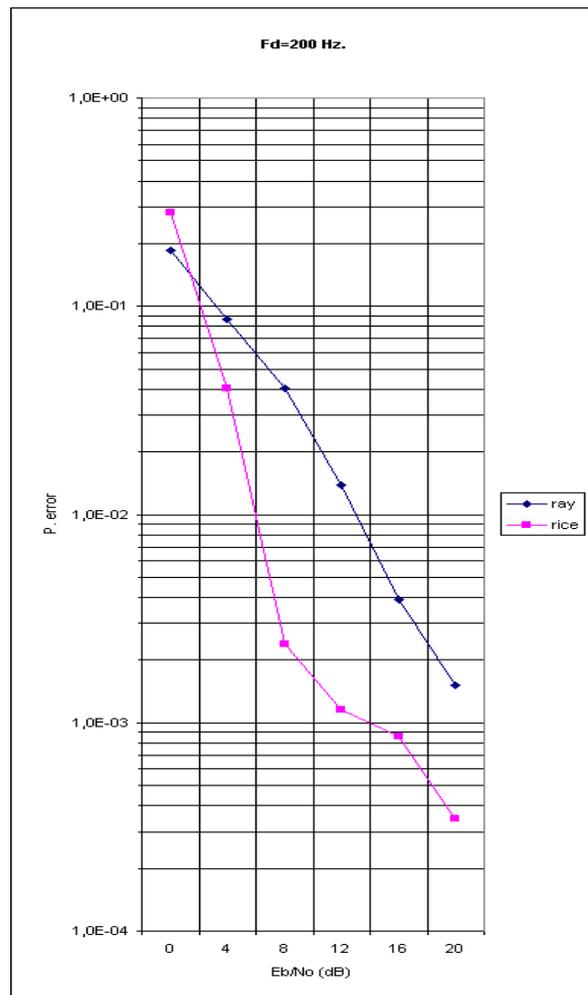
**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0 - R_s$	100K	200K	400K	400K	600K	700K	800K	
0	2,82E-01	2,85E-01	2,82E-01	2,78E-01	1,50E-01	3,36E-01	3,36E-01	
4	3,99E-02	3,90E-02	4,02E-02	4,66E-02	0	0	0	
8	4,82E-04	1,52E-03	2,39E-03	3,01E-03	0	0	0	
12	0	0	1,15E-03	4,73E-04	0	0	0	
16	0	0	8,57E-04	4,20E-04	0	0	0	
20	0	0	3,48E-04	0	0	0	0	

#### 6.4.4 Comparativa canales Rayleigh y Rice

Con la misma cadena, se obtienen resultados para comparar los canales Rayleigh y Rice, y comprobando que el canal Rice proporciona mejor rendimiento, puesto que incluye la componente directa.

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon y convolucional, *Canales Rayleigh y Rice* y  $f_d = 200$ , tasas de transmisión de 400.000 símbolos por segundo:



#### Resultados numéricos de la simulación:

$E_b/N_0$ -Rs	400K, Canal Rayleigh	400K canal Rice
0	1,85E-01	2,82E-01
4	8,69E-02	4,02E-02
8	4,02E-02	2,39E-03
12	1,39E-02	1,15E-03
16	3,89E-03	8,57E-04
20	1,52E-03	3,48E-04

#### 6.4.5 Resultados y Conclusiones

Los resultados obtenidos, tanto para canales Rayleigh como Rice, son coherentes.

Se ha comprobado que el canal Rice provoca una probabilidad de error menor al Rayleigh, debido a la componente directa que el canal Rice considera.

Para simular frecuencias doppler menores se usará la técnica de TOPSIM denominada multirate, que permitirá aumentar la resolución de la simulación cuando así se requiera.

## 6.5 Simulaciones con frecuencias doppler más elevadas

### 6.5.1 Simulaciones realizadas

La misma cadena de transmisión, considerando canales Rayleigh y Rice, debe contemplar frecuencias doppler más elevadas que en casos anteriores, para simular fielmente un caso HAPS lo más real posible, con los datos que se mostraran al final de este apartado.

Las simulaciones se han realizado para los siguientes valores:

**Eb/No**: de 0 dB a 16 dB en pasos de 2 dB

**Tasas de transmisión**: de 4800 a 1164800 símbolos por segundo. (en progresión geométrica de razón 2).

**Frecuencias doppler**: 800, 1000, 1500, 2000 Hz.

Se han escogido estos valores de doppler en base a cálculos con el fin de obtener velocidades coherentes, teniendo en cuenta que la frecuencia de la portadora es menor que 10 Ghz.

Tabla de frecuencias doppler para distintas portadoras entre 1 y 10 Ghz. y para diferentes velocidades

Frecuencia portadora (Hz.)	Velocidad rel. (Km/hora)	Velocidad rel. (m/seg)	Frecuencia doppler (Hz.)
1,00E+09	3,2	0,9	3
1,00E+09	10,8	3	10
1,00E+09	18,4	5,1	17
1,00E+09	54	15	50
1,00E+09	129,6	36	120
2,00E+09	3	0,8	5
2,00E+09	50	13,9	93
2,00E+09	100	27,8	185
2,00E+09	150	41,7	278
2,00E+09	200	55,6	370
5,00E+09	2,2	0,6	10
5,00E+09	3,7	1	17
5,00E+09	10,8	3	50
5,00E+09	54	15	250

<b>Frecuencia portadora (Hz.)</b>	<b>Velocidad rel. (Km/hora)</b>	<b>Velocidad rel. (m/seg)</b>	<b>Frecuencia doppler (Hz.)</b>
5,00E+09	125,9	35	583
<b>9,00E+09</b>	<b>96</b>	<b>26,7</b>	<b>800</b>
<b>9,00E+09</b>	<b>120</b>	<b>33,3</b>	<b>1000</b>
<b>9,00E+09</b>	<b>180</b>	<b>50</b>	<b>1500</b>
<b>9,00E+09</b>	<b>240</b>	<b>66,7</b>	<b>2000</b>

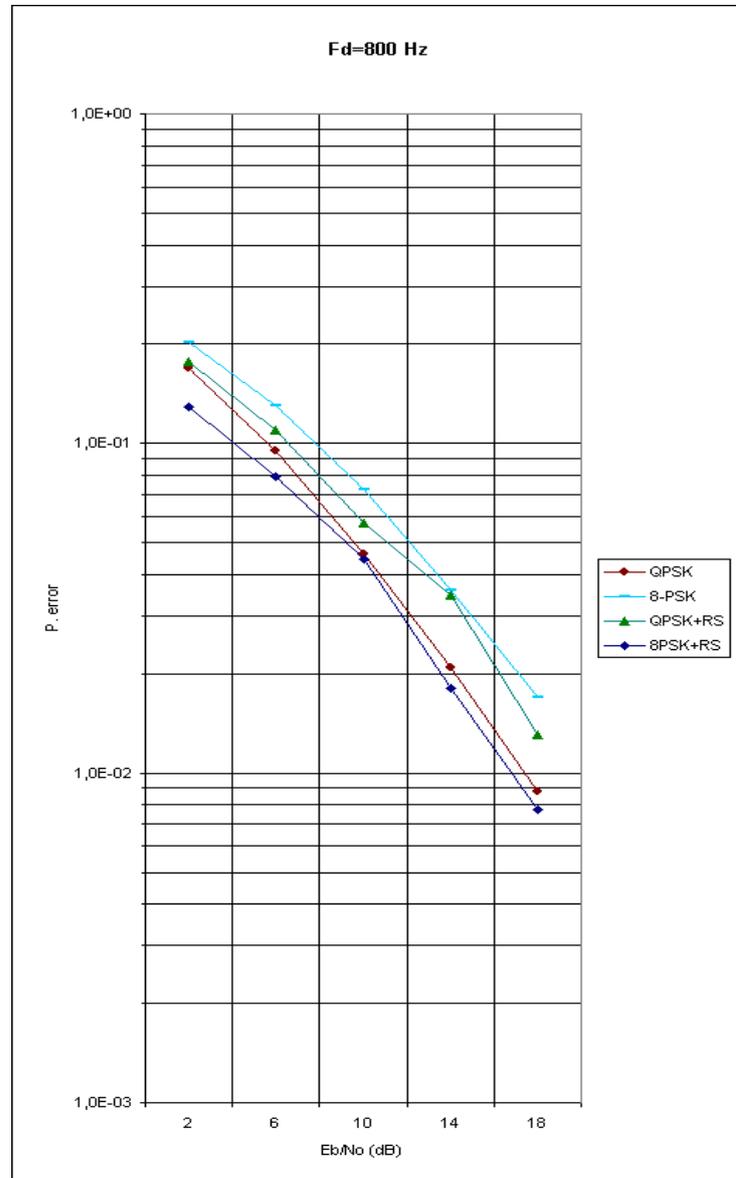
En resumen,

<b>Frecuencia portadora (GHz.)</b>	<b>Velocidad rel. (Km/hora)</b>	<b>Frecuencia doppler (Hz.)</b>
<b>9</b>	<b>96</b>	<b>800</b>
<b>9</b>	<b>120</b>	<b>1000</b>
<b>9</b>	<b>180</b>	<b>1500</b>
<b>9</b>	<b>240</b>	<b>2000</b>

## 6.5.2 Canales Rayleigh

- Simulación con varias modulaciones, con codificación convolucional, Canal Rayleigh,  $f_d = 800$ , y solo si así se indica, codificación Reed-Solomon:

<b>Canal</b>	rayleigh
<b>doppler</b>	800
<b>tasa</b>	200 Ksimb/s.

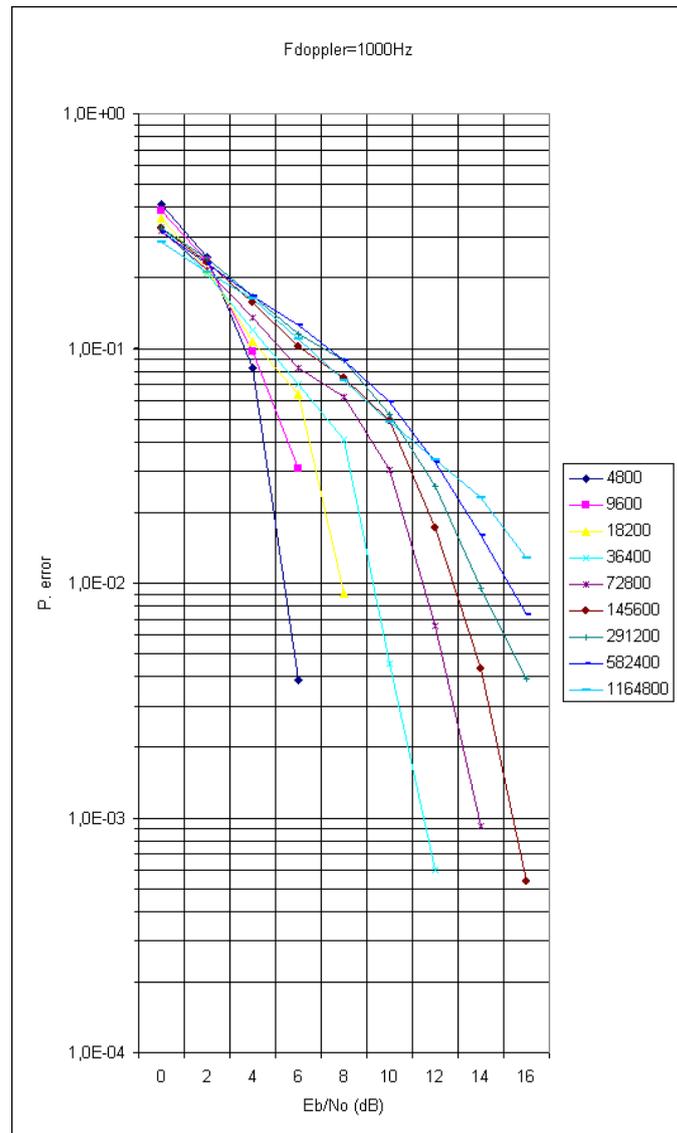


### *Resultados numéricos de la simulación:*

$E_b/N_0$ -Rs	QPSK	8-PSK	QPSK+RS	8QPSK+RS
2	1,70E-01	2,03E-01	1,77E-01	1,29E-01
6	9,51E-02	1,30E-01	1,10E-01	7,93E-02
10	4,63E-02	7,28E-02	5,76E-02	4,44E-02
14	2,08E-02	3,60E-02	3,45E-02	1,81E-02
18	8,82E-03	1,69E-02	1,31E-02	7,72E-03

- Simulación QPSK, con codificaciones Reed-Salomon y convolucional, canal Rayleigh,  $f_D=1000$  Hz. para varias tasas de transmisión:

<b>Canal</b>	rayleigh
<b>NPRDS</b>	100
<b>Bits</b>	178400
<b>Frecuencia</b>	1000
<b>Tiempo sim.</b>	21 horas

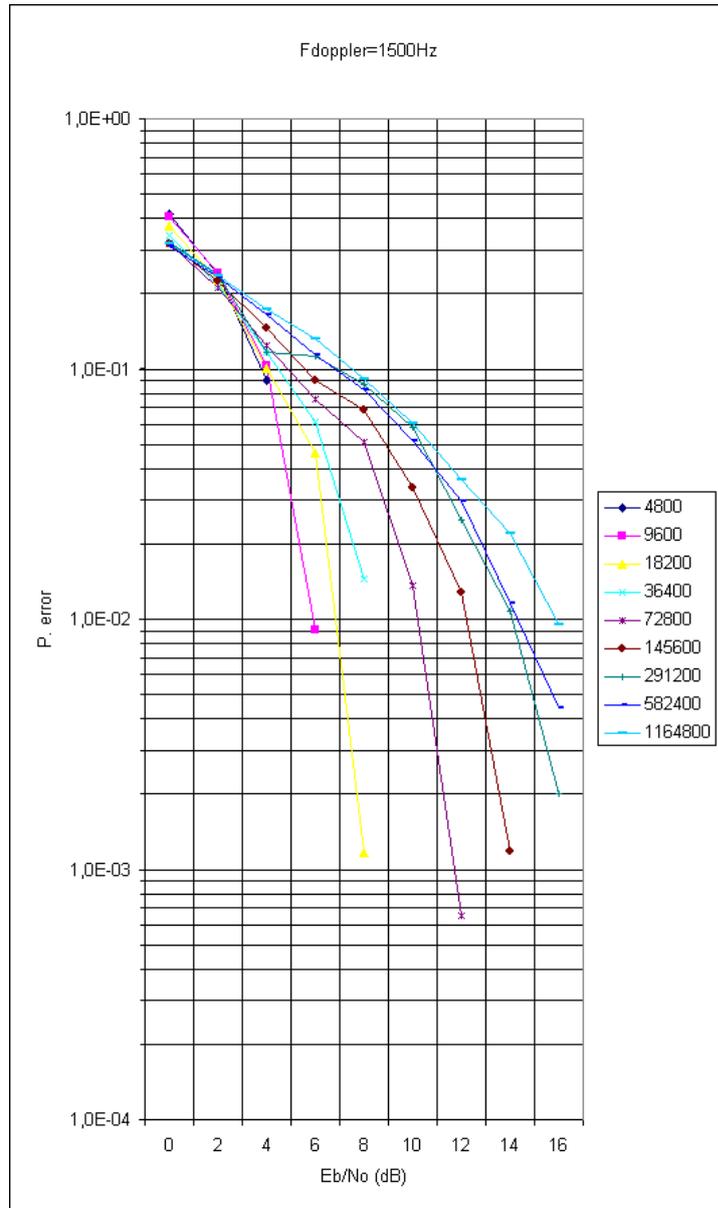


**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ -Rs	4800	9600	18200	36400	72800	145600	291200	582400	1164800
0	4,11E-01	3,86E-01	3,57E-01	3,28E-01	3,17E-01	3,23E-01	3,23E-01	3,12E-01	2,84E-01
2	2,46E-01	2,37E-01	2,17E-01	2,08E-01	2,15E-01	2,32E-01	2,41E-01	2,31E-01	2,11E-01
4	8,25E-02	9,70E-02	1,07E-01	1,20E-01	1,36E-01	1,58E-01	1,67E-01	1,68E-01	1,62E-01
6	3,87E-03	3,08E-02	6,34E-02	7,04E-02	8,23E-02	1,02E-01	1,16E-01	1,25E-01	1,09E-01
8			9,11E-03	4,08E-02	6,19E-02	7,45E-02	8,84E-02	8,92E-02	7,33E-02
10				4,52E-03	3,03E-02	4,91E-02	5,20E-02	5,94E-02	4,84E-02
12				6,00E-04	6,55E-03	1,72E-02	2,58E-02	3,29E-02	3,35E-02
14					9,25E-04	4,33E-03	9,49E-03	1,61E-02	2,32E-02
16						5,38E-04	3,91E-03	7,33E-03	1,28E-02

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon y convolucional, canal Rayleigh,  $f_D=1500$  Hz. para varias tasas de transmisión:

<b>Canal</b>	rayleigh
<b>Bits</b>	178400
<b>Frecuencia</b>	1500
<b>Tiempo sim.</b>	21 horas

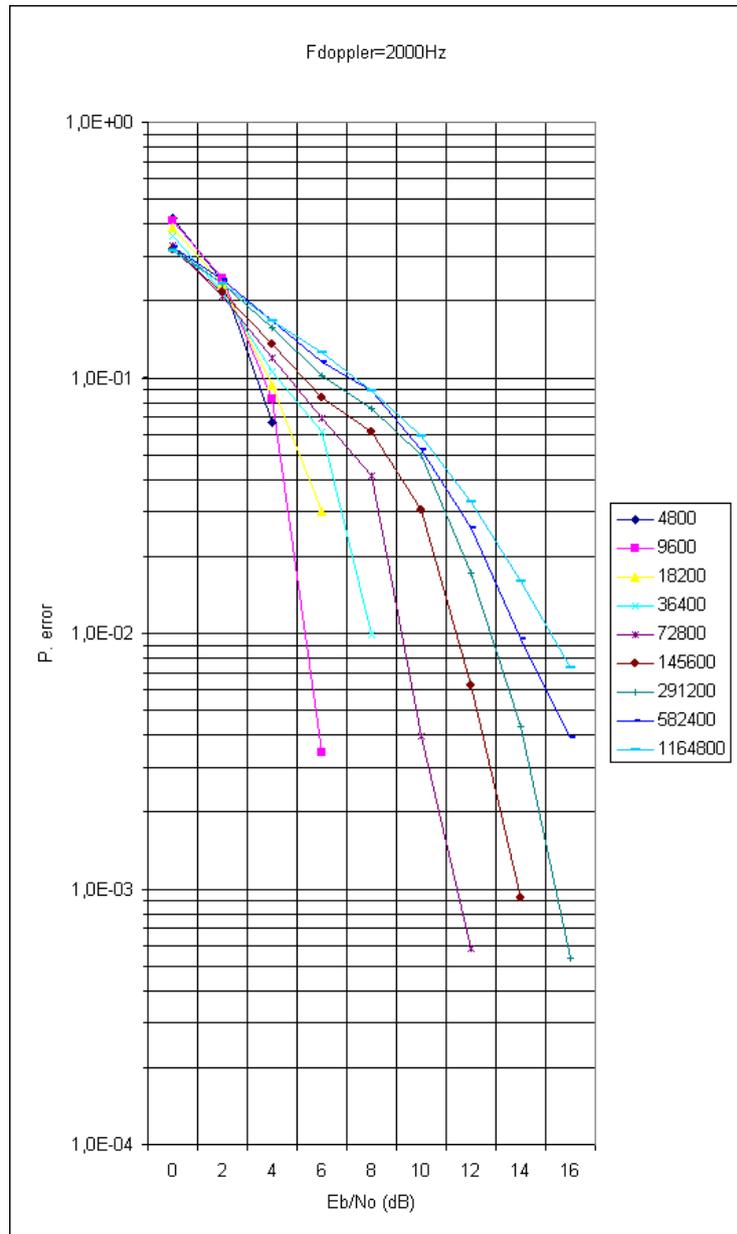


**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ -Rs	4800	9600	18200	36400	72800	145600	291200	582400	1164800
0	4,18E-01	4,05E-01	3,71E-01	3,42E-01	3,19E-01	3,16E-01	3,20E-01	3,11E-01	3,17E-01
2	2,39E-01	2,42E-01	2,29E-01	2,16E-01	2,11E-01	2,25E-01	2,39E-01	2,33E-01	2,35E-01
4	8,96E-02	1,03E-01	1,01E-01	1,17E-01	1,25E-01	1,46E-01	1,17E-01	1,65E-01	1,74E-01
6		9,11E-03	4,65E-02	6,14E-02	7,60E-02	9,04E-02	1,12E-01	1,14E-01	1,32E-01
8			1,16E-03	1,44E-02	5,07E-02	6,83E-02	8,69E-02	8,21E-02	9,07E-02
10					1,36E-02	3,34E-02	5,83E-02	5,14E-02	6,08E-02
12					6,50E-04	1,27E-02	2,48E-02	2,98E-02	3,62E-02
14						1,18E-03	1,07E-02	1,16E-02	2,21E-02
16							2,00E-03	4,41E-03	9,55E-03

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon y convolucional, canal Rayleigh,  $f_D=2000$  Hz. para varias tasas de transmisión.:

<b>Canal</b>	rayleigh
<b>Bits</b>	178400
<b>Frecuencia</b>	2000
<b>Tiempo sim.</b>	21 horas



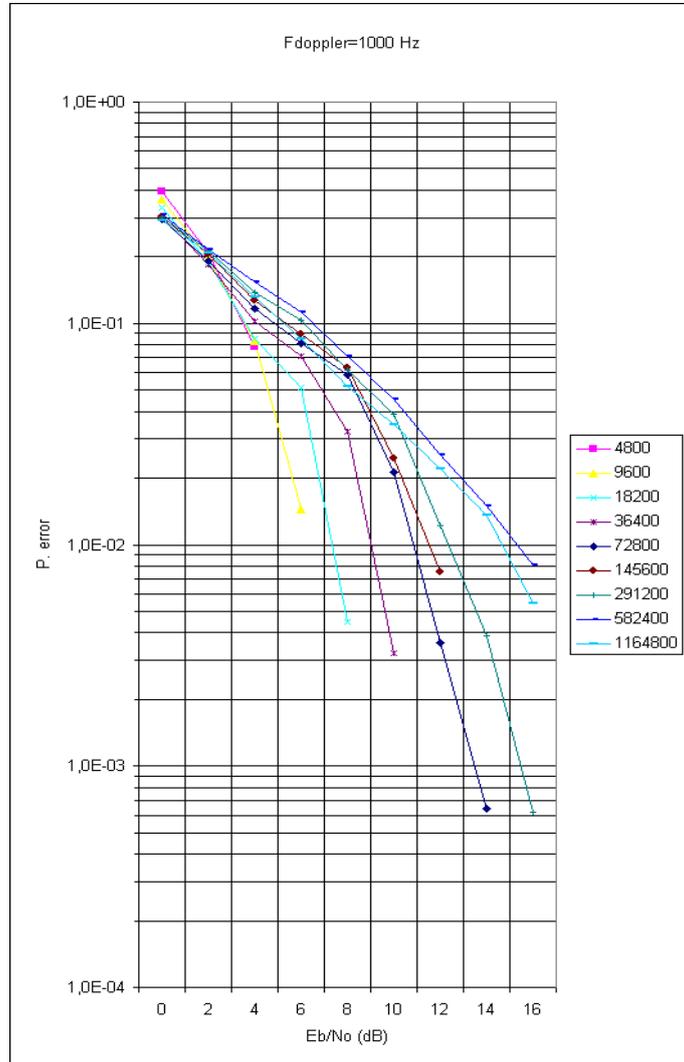
**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ --Rs	4800	9600	18200	36400	72800	145600	291200	582400	1164800
0	4,22E-01	4,12E-01	3,89E-01	3,57E-01	3,28E-01	3,16E-01	3,23E-01	3,23E-01	3,12E-01
2	2,39E-01	2,46E-01	2,32E-01	2,18E-01	2,08E-01	2,16E-01	2,32E-01	2,41E-01	2,32E-01
4	6,68E-02	8,28E-02	9,33E-02	1,06E-01	1,20E-01	1,35E-01	1,57E-01	1,67E-01	1,68E-01
6		3,40E-03	3,02E-02	6,15E-02	6,98E-02	8,37E-02	1,02E-01	1,16E-01	1,25E-01
8				9,87E-03	4,11E-02	6,14E-02	7,53E-02	8,84E-02	8,92E-02
10					3,94E-03	3,03E-02	4,96E-02	5,20E-02	5,94E-02
12					5,83E-04	6,23E-03	1,72E-02	2,58E-02	3,29E-02
14						9,25E-04	4,33E-03	9,49E-03	1,61E-02
16							5,38E-04	3,91E-03	7,33E-03

### 6.5.3 Canales Rice

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon y convolucional,,  $f_D=1000$  Hz, para varias tasas de transmisión:

<b>Canal</b>	Rice
<b>Bits</b>	178400
<b>Frecuencia</b>	1000
<b>Tiempo simulación</b>	21 horas

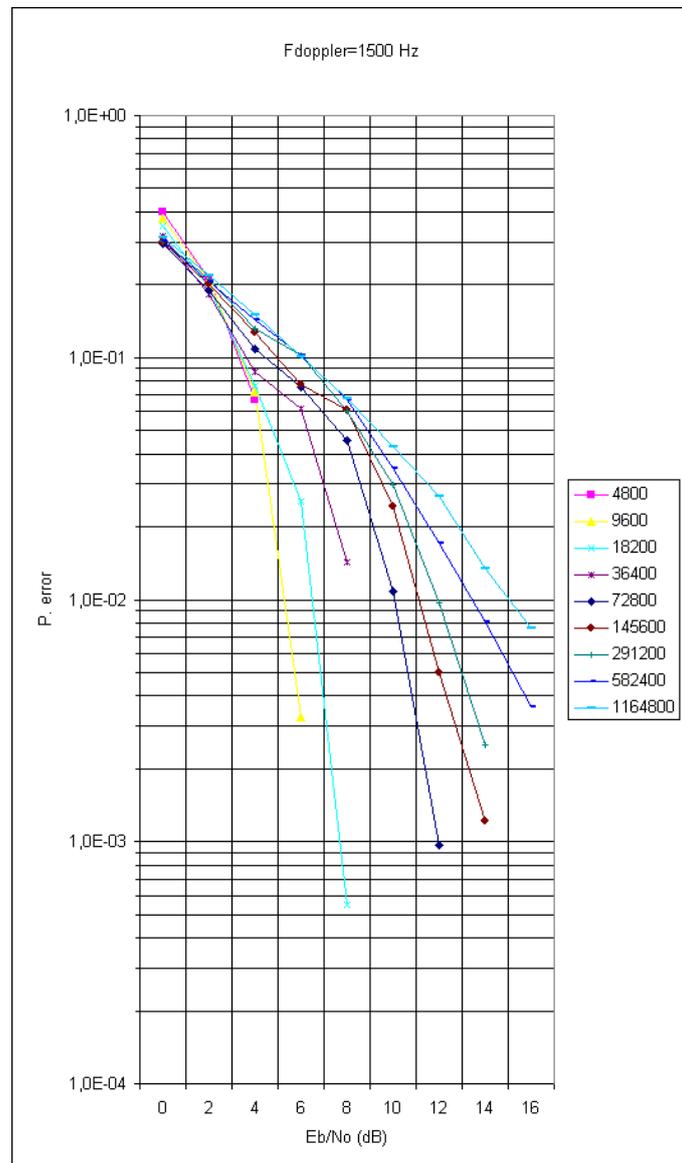


#### Resultados numéricos de la simulación:

$E_b/N_0 - R_s$	4800	9600	18200	36400	72800	145600	291200	582400	1164800
0	3,94E-01	3,65E-01	3,31E-01	3,03E-01	2,97E-01	3,03E-01	3,03E-01	3,10E-01	2,93E-01
2	2,09E-01	1,98E-01	1,89E-01	1,84E-01	1,90E-01	2,06E-01	2,13E-01	2,17E-01	2,08E-01
4	7,80E-02	8,34E-02	8,48E-02	1,02E-01	1,17E-01	1,27E-01	1,38E-01	1,53E-01	1,31E-01
6		1,45E-02	5,14E-02	7,09E-02	8,13E-02	8,96E-02	1,03E-01	1,12E-01	8,57E-02
8			4,50E-03	3,24E-02	5,88E-02	6,27E-02	6,18E-02	7,09E-02	5,17E-02
10				3,23E-03	2,13E-02	2,46E-02	3,90E-02	4,54E-02	3,50E-02
12					3,59E-03	7,57E-03	1,22E-02	2,54E-02	2,22E-02
14					6,45E-04		3,87E-03	1,51E-02	1,36E-02
16							6,22E-04	8,10E-03	5,43E-03

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon y convolucional,,  $f_D=1500$  Hz, para varias tasas de transmisión:

<b>Canal</b>	Rice
<b>Bits</b>	178400
<b>Frecuencia</b>	1500
<b>Tiempo simulación</b>	21 horas

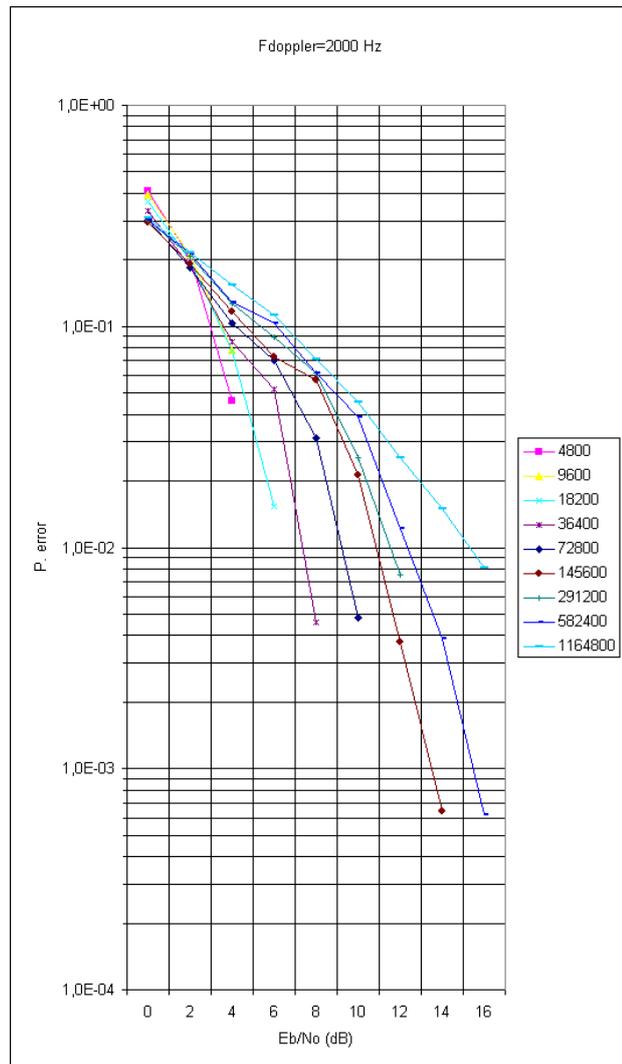


**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ --Rs	4800	9600	18200	36400	72800	145600	291200	582400	1164800
0	3,98E-01	3,78E-01	3,49E-01	3,16E-01	2,96E-01	2,99E-01	3,04E-01	3,02E-01	3,12E-01
2	2,10E-01	2,07E-01	1,96E-01	1,83E-01	1,88E-01	2,00E-01	2,11E-01	2,07E-01	2,19E-01
4	6,71E-02	7,18E-02	7,69E-02	8,76E-02	1,09E-01	1,27E-01	1,32E-01	1,43E-01	1,51E-01
6		3,27E-03	2,55E-02	6,15E-02	7,54E-02	7,73E-02	1,02E-01	1,02E-01	1,01E-01
8			5,49E-04	1,42E-02	4,57E-02	6,10E-02	6,04E-02	6,71E-02	6,79E-02
10					1,08E-02	2,42E-02	2,99E-02	3,51E-02	4,28E-02
12					9,70E-04	4,97E-03	9,71E-03	1,71E-02	2,66E-02
14						1,22E-03	2,51E-03	8,05E-03	1,34E-02
16								3,60E-03	7,58E-03

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon y convolucional,  $f_D=2000$  Hz, para varias tasas de transmisión

<b>Canal</b>	Rice
<b>Bits</b>	178400
<b>Frecuencia</b>	2000
<b>tiempo sim</b>	21 horas



**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ -- $R_s$	4800	9600	18200	36400	72800	145600	291200	582400	1164800
0	4,08E-01	3,95E-01	3,65E-01	3,31E-01	3,03E-01	2,97E-01	3,03E-01	3,04E-01	3,10E-01
2	2,05E-01	2,10E-01	1,98E-01	1,88E-01	1,84E-01	1,92E-01	2,08E-01	2,13E-01	2,16E-01
4	4,60E-02	7,85E-02	7,71E-02	8,48E-02	1,03E-01	1,17E-01	1,27E-01	1,28E-01	1,54E-01
6			1,53E-02	5,19E-02	7,05E-02	7,26E-02	8,95E-02	1,03E-01	1,12E-01
8				4,57E-03	3,14E-02	5,75E-02	6,11E-02	6,18E-02	7,09E-02
10					4,82E-03	2,13E-02	2,56E-02	3,90E-02	4,54E-02
12						3,75E-03	7,57E-03	1,22E-02	2,54E-02
14						6,45E-04		3,87E-03	1,51E-02
16								6,22E-04	8,10E-03

#### 6.5.4 Sigüientes pasos

Después de simular con la técnica multirate y observar que al aumentar el valor de TIMESCALE también aumenta la resolución, se han diseñado sistemas adaptativos. Estos sistemas adaptativos consisten en evaluar la potencia recibida y a continuación imponer una tasa de transmisión adecuada a la potencia recibida; así, si la potencia recibida es muy baja transmitiremos con tasas menores y viceversa.

Como cabía esperar, las curvas de probabilidad de error obtenidas con los sistemas adaptativos están comprendidas entre las curvas anteriormente obtenidas para tasas de transmisión alta y baja respectivamente. Los resultados han sido obtenidos usando la técnica multirate con valores de TIMESCALE iguales a 8 y 16, aunque los más satisfactorios se han obtenido para frecuencia doppler relativamente altas, 800 y 1200 Hz. y sin necesidad de multirate.

### **6.6 Resumen de simulaciones y conclusiones**

Se ha simulado mediante TOPSIM una cadena de transmisión compuesta por un modulador QPSK y codificación convolucional, así como codificación Reed-Salomon.

El canal que se ha considerado para esta cadena de transmisión ha sido de tres tipos distintos; se empezó con canal Gausiano y se continuó con canales Rayleigh y Rice. El hecho de considerar estos canales Rayleigh y Rice provocó tener que considerar frecuencias doppler.

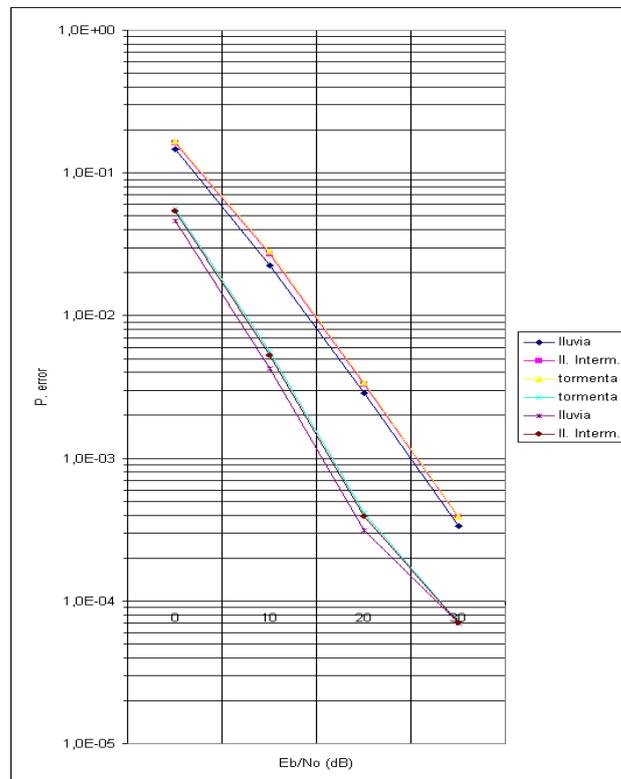
Los resultados se han obtenido en términos de probabilidad de error en recepción y siempre en función de la  $E_b/N_0$ , de la tasa de transmisión y de la frecuencia doppler considerada.

Estos resultados son coherentes, aunque se ha observado el compromiso ya comentado entre la tasa de transmisión simulada y la frecuencia doppler considerada. Por esta razón se está considerando ahora la técnica de simulación con TOPSIM denominada multirate, para poder así aumentar la resolución de la simulación cuando se considere oportuno y evitar el problema derivado del compromiso entre tasa de transferencia y frecuencia doppler.

## 6.7 Canal Lognormal

### 6.7.1 Simulaciones realizadas

Se obtienen ahora los resultados de la BER en función de la  $E_b/N_0$  para la misma cadena de transmisión. La diferencia está en el canal. Se evalúa esta cadena para canales lognormal, lognormal-rice y lognormal –rayleigh. La modulación empleada es QPSK. Estos canales permiten tener en cuenta los efectos meteorológicos, así como también permiten simular efectos de sombra. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:



#### Resultados numéricos de la simulación:

$E_b/N_0 - R_s$	LOG-RAYLEIGH			LOG-RICE		
	tormenta	lluvia	II. Interm.	tormenta	lluvia	II. Interm.
0	1,67E-01	1,46E-01	1,63E-01	5,63E-02	4,61E-02	5,39E-02
10	2,81E-02	2,25E-02	2,70E-02	5,54E-03	4,24E-03	5,27E-03
20	3,40E-03	2,87E-03	3,29E-03	4,13E-04	3,11E-04	3,94E-04
30	3,94E-04	3,37E-04	3,88E-04	6,99E-05	6,99E-05	6,99E-05

### 6.7.2 Resultados y conclusiones

Se obtienen resultados coherentes en todos los casos. Los valores empleados para simular distintos efectos meteorológicos son los extraídos de la literatura (consultar referencias), aunque los resultados obtenidos no son tan buenos como los esperados. Cabe destacar que los casos de tormenta son los más desfavorables respecto a la BER y le siguen la lluvia y la lluvia intermitente.

Además se confirma que la probabilidad de error en un canal Rice-lognormal es mejor que cuando el canal es Rayleigh –lognormal, debido, lógicamente a la componente directa que contempla el canal Rice

## 6.8 Sistemas adaptativos

### 6.8.1 Adaptación según tasas de transmisión (según potencia recibida)

#### 6.8.1.1 Simulaciones realizadas

Resultados de la probabilidad de error del sistema en función de la  $E_b/N_0$  para tasas de transmisión de 145600, 582400, y 1164800 símbolos / seg.

Cadena con codificaciones Reed – Salomon y convolucional, además de canal Rayleigh.

Se ha empleado la técnica multirate para simular, con el valor de TIMESCALE =8.

Los resultados sólo son coherentes para frecuencia doppler = 583 Hz.

Resultados de la probabilidad de error del sistema en función de la  $E_b/N_0$  para tasas de transmisión de 145600 y 1164800 símbolos / seg.

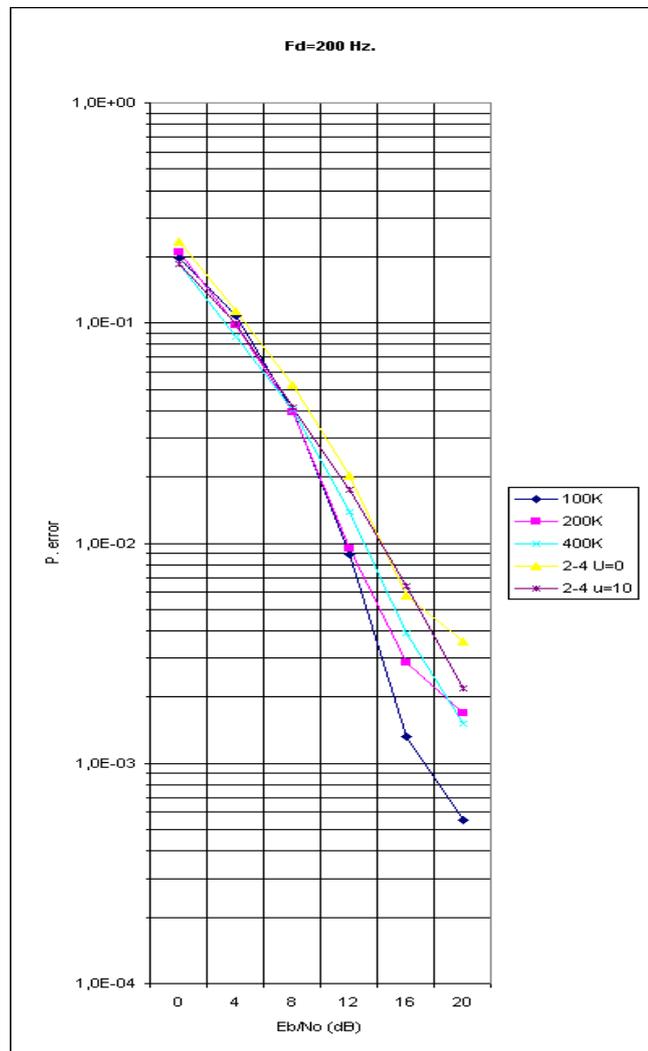
Resultados además, de la probabilidad de error del sistema adaptativo, que selecciona una de las dos tasas anteriores según el nivel de potencia de señal recibida; si la potencia recibida es mayor que el nivel de potencia umbral, se transmite la siguiente muestra a velocidad alta, y si es menor, se transmite a velocidad baja.

Cadena con codificaciones Reed – Salomon y convolucional, además de canal Rayleigh.

Se obtienen resultados de esquemas adaptativos según la potencia recibida entre distintas tasas de transmisión.

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon y convolucional, Canal Rayleigh y  $f_d = 200$ , adaptativa entre tasas de transmisión según SNR en recepción:

canal	rayleigh
doppler	200



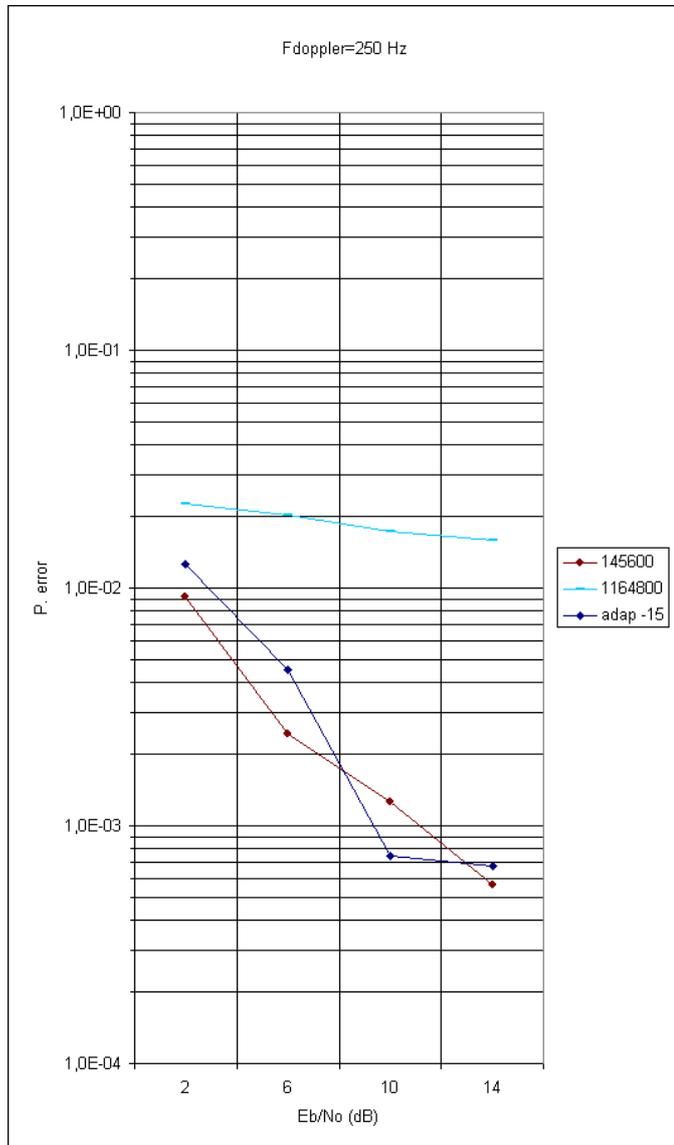
**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ (dB)	100K	200K	400K	adap 2-4(TS)		adap 2-4(TS2)	
				U=0	U=10	U=0	U=10
0	1,97E-01	2,11E-01	1,85E-01		1,85E-01	2,35E-01	2,79E-01
4	1,08E-01	9,76E-02	8,69E-02		9,91E-02	1,14E-01	1,44E-01
8	3,99E-02	3,92E-02	4,02E-02		4,14E-02	5,24E-02	7,01E-02
12	8,86E-03	9,52E-03	1,39E-02		1,76E-02	2,04E-02	2,83E-02
16	1,33E-03	2,86E-03	3,89E-03		6,40E-03	5,78E-03	7,86E-03
20	5,55E-04	1,70E-03	1,52E-03		2,19E-03	3,56E-03	4,99E-03

En todos los casos se puede observar que al disminuir el umbral de adaptación, la BER disminuye.

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon y convolucional, Canal Rayleigh y  $f_d = 250$ , adaptativa entre tasas de transmisión según SNR en recepción:

<b>Cadena</b>	rayleigh
<b>Bits</b>	165000
<b>F. Doppler</b>	250
2 horas de simulación	

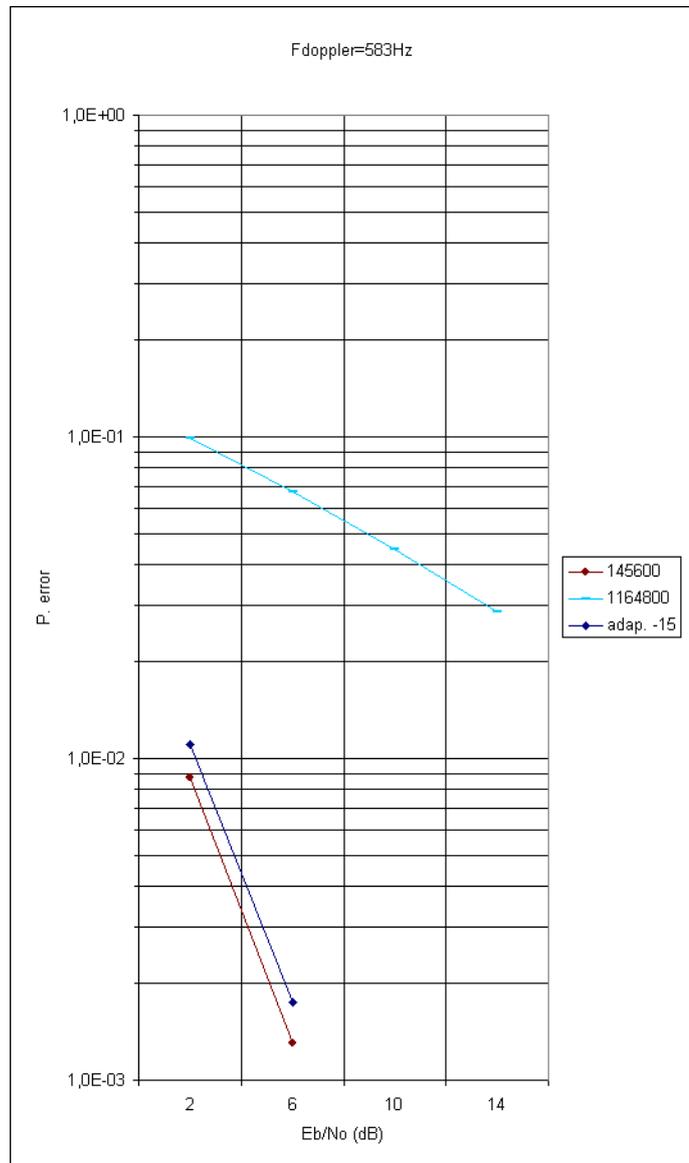


**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ --Rs	145600	1164800	adap(-15)
2	9,13E-03	2,26E-02	1,27E-02
6	2,44E-03	2,04E-02	4,50E-03
10	1,26E-03	1,73E-02	7,42E-04
14	5,61E-04	1,59E-02	6,76E-04

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon y convolucional, Canal Rayleigh y  $f_d = 583$ , adaptativa entre tasas de transmisión según SNR en recepción:

<b>cadena</b>	rayleigh
<b>Bits</b>	165000
<b>F. Doppler</b>	583
2 horas de simulación	

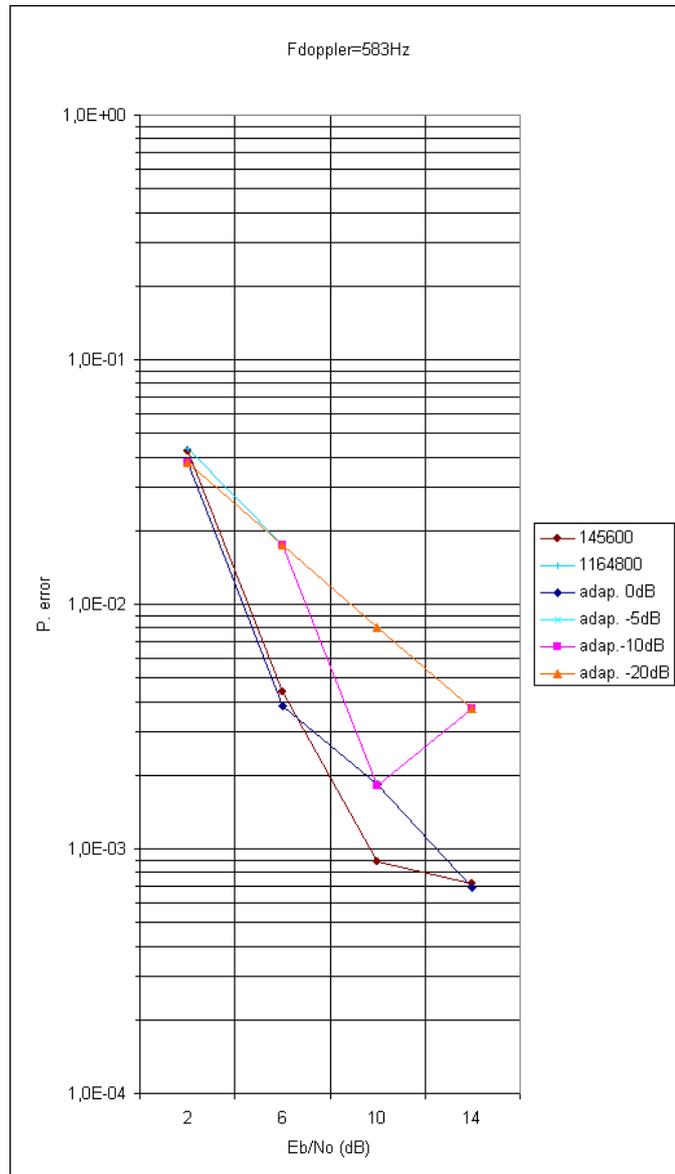


**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ -Rs	145600	1164800	adap(-15)
2	8,73E-03	9,91E-02	1,11E-02
6	1,30E-03	6,72E-02	1,74E-03
10		4,49E-02	
14		2,87E-02	

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon y convolucional, Canal Rayleigh y  $f_d = 583$ , adaptativa entre tasas de transmisión según SNR en recepción:

canal=	rayleigh
Bits=	110000
F. Doppler=	583
2 horas de simulación (con Timescale 8)	

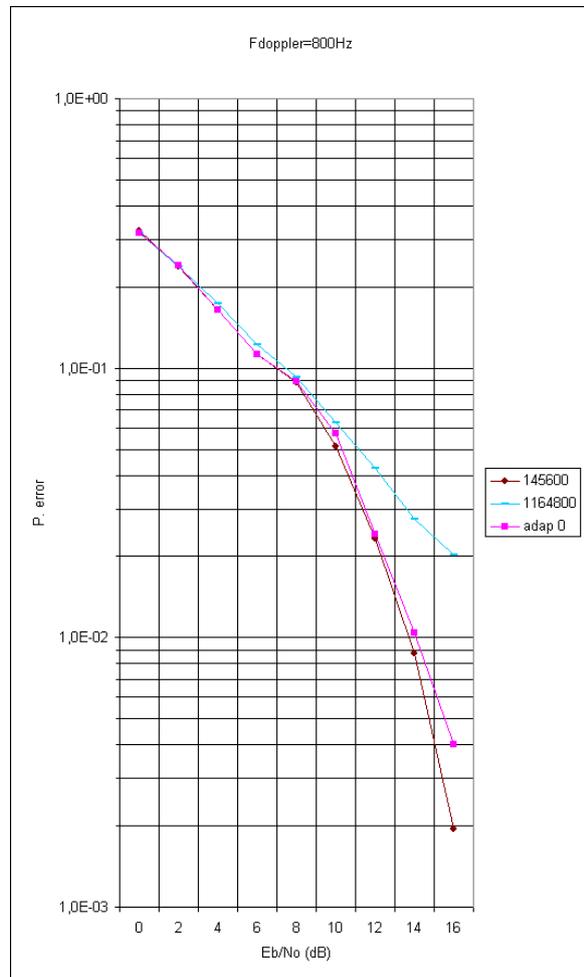


**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ --Rs	145600	1164800	adap(0)	adap(-5)	adap(-10)	adap(-20)
2	4,21E-02	4,32E-02	3,77E-02	3,77E-02	3,77E-02	3,77E-02
6	4,40E-03	1,75E-02	3,85E-03	1,74E-02	1,74E-02	1,75E-02
10	8,91E-04	8,01E-03	1,83E-03	1,82E-03	1,82E-03	8,01E-03
14	7,18E-04	3,74E-03	6,91E-04	3,73E-03	3,73E-03	3,74E-03

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon y convolucional, Canal Rayleigh y  $f_d = 800$ , adaptativa entre tasas de transmisión según SNR en recepción:

canal=	rayleigh
Bits=	178400
F. Doppler=	800
Tiempo sim.	21 horas

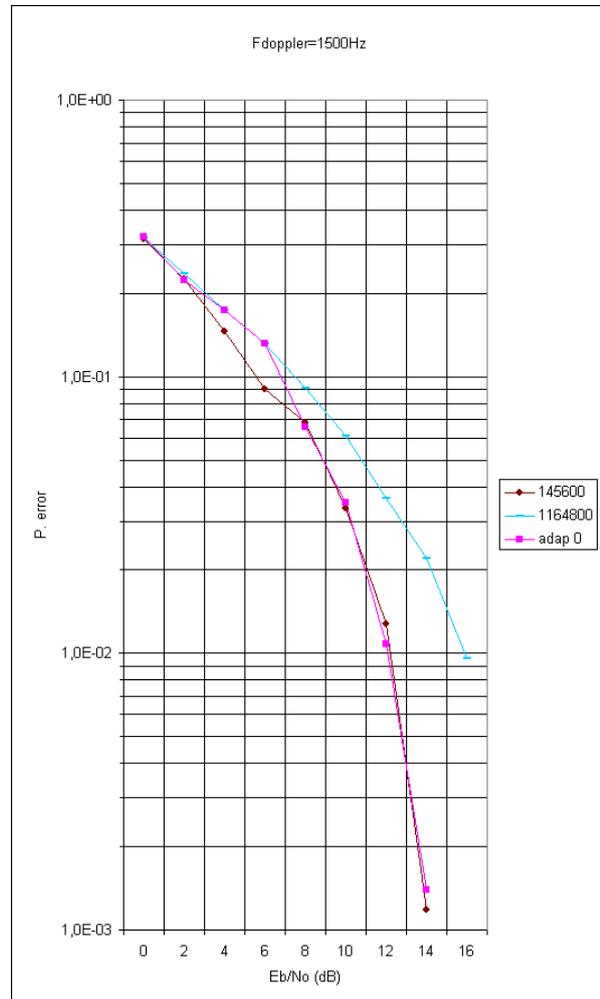


**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ -Rs	145600	1164800	adap (0)
0	3,22E-01	3,17E-01	3,17E-01
2	2,38E-01	2,38E-01	2,40E-01
4	1,65E-01	1,73E-01	1,65E-01
6	1,13E-01	1,22E-01	1,12E-01
8	8,83E-02	9,28E-02	8,92E-02
10	5,12E-02	6,29E-02	5,70E-02
12	2,32E-02	4,24E-02	2,42E-02
14	8,73E-03	2,76E-02	1,04E-02
16	1,95E-03	2,03E-02	4,02E-03

- Simulación QPSK con codificaciones Reed-Salomon y convolucional, Canal Rayleigh y  $f_d = 1500$ , adaptativa entre tasas de transmisión según SNR en recepción:

canal=	rayleigh
Bits=	178400
F. Doppler=	1500
Tiempo sim.	21 horas



**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0 - R_s$	145600	1164800	adap (0)
0	3,16E-01	3,17E-01	3,19E-01
2	2,25E-01	2,35E-01	2,24E-01
4	1,46E-01	1,74E-01	1,74E-01
6	9,04E-02	1,32E-01	1,32E-01
8	6,83E-02	9,07E-02	6,55E-02
10	3,34E-02	6,08E-02	3,50E-02
12	1,27E-02	3,62E-02	1,08E-02
14	1,18E-03	2,21E-02	1,40E-03
16		9,55E-03	

### *6.8.1.2 Resultados y conclusiones: Adaptación entre tasas*

Se observa como la curva de probabilidad de error del sistema adaptativo se encuentra entre las curvas de tasas alta y baja respectivamente.

## 6.8.2 Adaptación según tipos de modulaciones (según potencia recibida)

### 6.8.2.1 Simulaciones realizadas

A continuación, se ha simulado un sistema adaptativo según la potencia recibida como el que ya se había diseñado, aunque ahora no se varían las tasas de transmisión, sino que se varían las modulaciones utilizadas.

Así, si la potencia recibida es alta, la transmisión se efectuará con modulación 8-PSK, mientras que cuando la potencia recibida sea baja, conmutaremos a la transmisión con modulación QPSK.

Para simplificar, se ha realizado el sistema sin codificaciones y con canal Gausiano, aunque a continuación, se ha vuelto a suponer el sistema con canal Rayleigh.

Se ha comprobado que para canal Rayleigh la probabilidad de error es mayor, como cabía esperar, y a continuación se procederá a introducir la codificación Reed – Salomon.

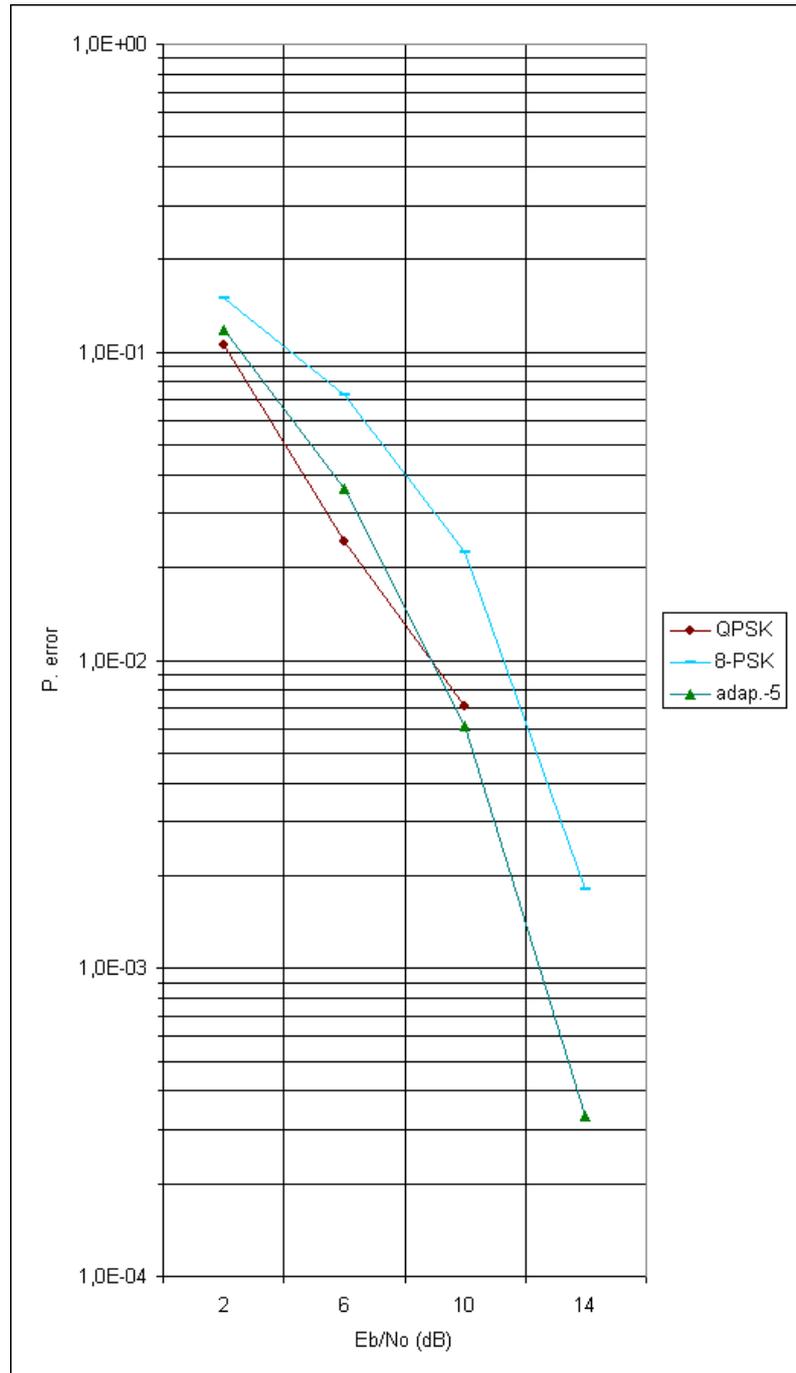
Se ha empleado TIMESCALE=16 para frecuencias doppler hasta 583 Hz y no se ha usado la técnica multirate para doppler 800 y 1500 Hz.

Los resultados de la probabilidad de error del sistema en función de la  $E_b/N_0$  para tasas de transmisión de 1164800 símbolos / seg. con modulaciones QPSK y 8- PSK se muestran a continuación, junto con los resultados además, de la probabilidad de error del sistema adaptativo, que selecciona una de las dos modulaciones anteriores según el nivel de potencia recibida; si la potencia recibida es mayor que el nivel de potencia umbral, se transmite la siguiente muestra en 8-PSK, y si es menor, se transmite en QPSK.

Cadena sin codificaciones, con simulación para canales Gausiano y Rayleigh.

- Cadena adaptativa entre modulaciones, sin codificaciones, Canal Gausiano.:

canal=	gausiano
NPRDS=	150000
Bits=	150000

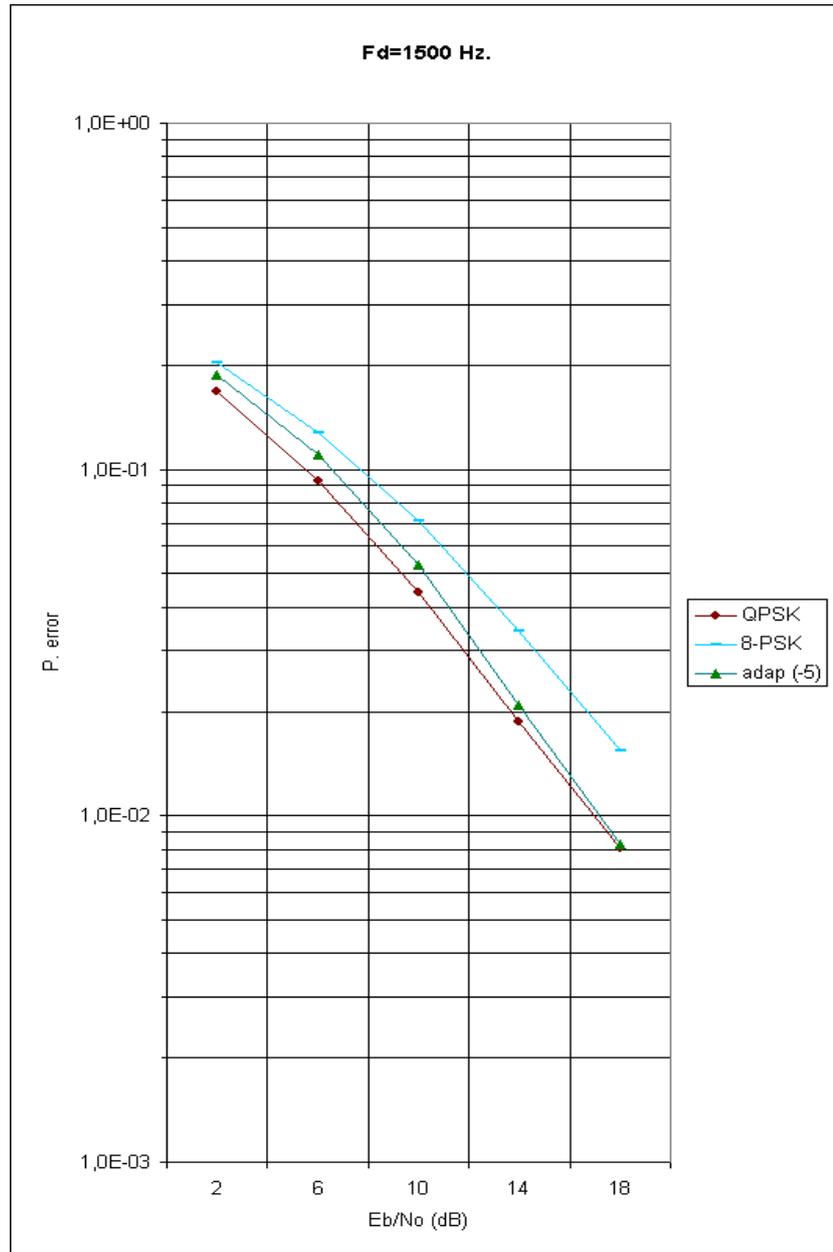


**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0 - R_s$	QPSK	8-PSK	adap(-5)
2	1,06E-01	1,49E-01	1,18E-01
6	2,42E-02	7,26E-02	3,62E-02
10	7,07E-03	2,24E-02	6,09E-03
14		1,81E-03	3,33E-04

- Cadena adaptativa entre modulaciones, Canal Rayleigh:

canal=	rayleigh
doppler=	1500
NPRDS=	150000
Bits=	150000



**Resultados numéricos de la simulación:**

$E_b/N_0$ --Rs	QPSK	8-PSK	adap(-5)
2	1,67E-01	2,03E-01	1,87E-01
6	9,25E-02	1,28E-01	1,10E-01
10	4,40E-02	7,09E-02	5,32E-02
14	1,88E-02	3,41E-02	2,08E-02
18	8,03E-03	1,54E-02	8,26E-03

### 6.8.2.2 *Resultados y conclusiones: Adaptación entre modulaciones*

Se adjuntan los resultados para canal Gaussiano y para canal Rayleigh con frecuencias doppler 800 y 1500 Hz.

Los resultados obtenidos son coherentes

#### **Conclusión y siguientes pasos:**

Se pretende hacer un sistema adaptativo que conmute no solo entre dos tipos de modulaciones o dos tasas, sino entre varios tipos de sistemas distintos según la potencia recibida.

### 6.8.3 Adaptación según tipos de modulaciones y codificaciones (según potencia recibida). Cadena multi-adaptativa

#### 6.8.3.1 Simulaciones realizadas

Como última simulación, se obtienen ahora los resultados de la BER en función de la  $E_b/N_0$  para las cadenas de transmisión con codificación RS y sin codificación RS, con canal Rayleigh y para una tasa de transmisión de 200 Kbits. También se escoge para el canal una frecuencia doppler de 200 Hz. ( que corresponde a una velocidad de 108 Km/h asumiendo una portadora de frecuencia 2 Ghz. ) . Las modulaciones empleadas son 8PSK y QPSK.

Además, se usa la misma fuente en todas las cadenas, con el fin de poder adaptar más adelante entre un esquema y otro.

Modulaciones 8PSK y QPSK sin codificación RS y Modulaciones 8PSK y QPSK con codificación RS. Esquema multi-adaptativo entre los cuatro casos mencionados a continuación:

Canal “muy bueno”: modulación 8PSK

Canal “bueno”: modulación QPSK

Canal “malo”: modulación 8PSK y codificación Reed-Salomon

Canal “muy malo”: modulación QPSK y codificación Reed-Salomon

Los umbrales utilizados para las transiciones entre esquemas son:

Umbral 1: 10, 20 y 30 dB

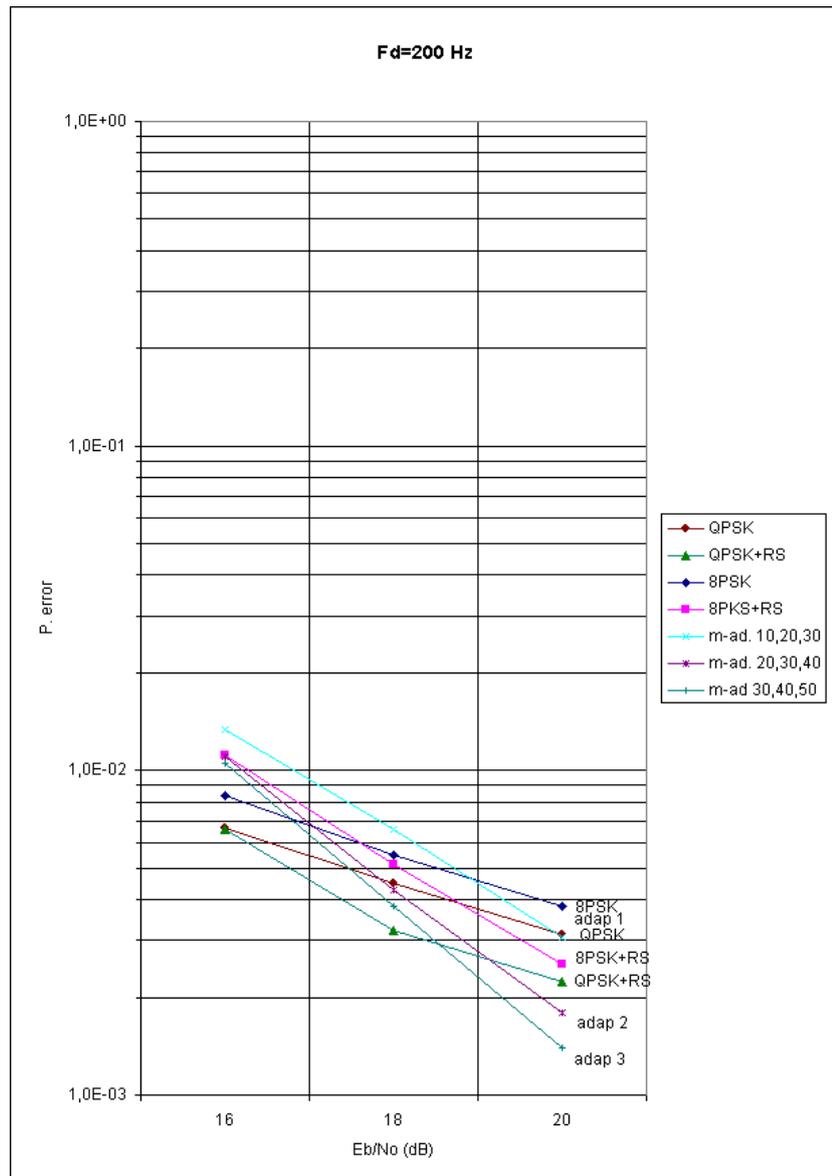
Umbral 2: 20, 30 y 40 dB

Umbral 3: 30, 40 y 50 dB

Con ello, se han obtenido resultados para tres sistemas adaptativos iguales, pero con umbrales de transición distintos

- Cadena adaptativa, Canal Rayleigh y codificación Reed - Salomon:

canal=	rayleigh
doppler=	200
NPRDS=	150000
Bits=	150000



**Resultados numéricos de la simulación:**

MULTIADAPTACION							
<i>E<sub>b</sub>/N<sub>0</sub></i>	QPSK	QPSK+RS	8PSK	8PSK+RS	10,20,30	20,30,40	30,40,50
16	6,64E-03	6,58E-03	8,36E-03	1,11E-02	1,34E-02	1,10E-02	1,05E-02
18	4,50E-03	3,22E-03	5,51E-03	5,15E-03	6,56E-03	4,30E-03	3,81E-03
20	3,11E-03	2,23E-03	3,80E-03	2,54E-03	3,05E-03	1,79E-03	1,40E-03

### *6.8.3.2 Resultados y conclusiones: Adaptación entre modulaciones*

Se obtienen resultados coherentes en todos los casos.

Se obtienen resultados de esquemas adaptativos según la potencia recibida entre:

Modulaciones 8PSK y QPSK sin codificación y Modulaciones 8PSK y QPSK con codificación RS.

Así pues, de las simulaciones realizadas, se puede considerar una solución adecuada utilizar esquemas adaptativos para eficientar el sistema de comunicación utilizado en cada momento, adaptándose así a las condiciones del canal.

#### 6.8.4 Ejemplo código TOPSIM con adaptación según tasa de transmisión

Se incluye a continuación, *a modo de ejemplo*, el código empleado para simular el escenario ADAPTATIVO SEGÚN VELOCIDAD, considerando un canal RAILEIGH, modulación QPSK, y codificaciones convolucional (de tasa 1/2) y Reed-Solomon.

El resto de códigos de las simulaciones realizadas se pueden encontrar en el anexo adjunto a este documento.

INITIAL

\*\*\*PARAMETROS DE TASA DE TRANSMISION\*\*\*

RS=1164800\*8.

TS=1./RS

NS=1

DELT=TS/NS

\*\*\*PARAMETROS DE CODIFICADOR R.S. Y CONV.\*\*\*

NDEG=0

NGEN=1

NSYNC=0

N=255\*8

K=223\*8

M=8

N1=255

K1=223

NCL=7

NTRFLG=0

NCDEL=0

\*\*\*PARAMETROS DE FRECUENCIA DE SIMULACION Y MODULACION\*\*\*

TB=1/(5\*DELT)

F0=10\*TB

AMPM=1.

\*\*\*PARAMETROS DE FILTROS\*\*\*

ROL=0.5

GAM=0.5

GGAM=1.-GAM

NST=8

```

***PARAMETROS DE DEMODULACION Y DECISION***

NSICL=3

AMPS=2*sqrt(2.)

PHA=0.

***PARAMETROS DE CANAL RAILEIGH***

GRFR=0.

IF (BEQRFR.GT.0) GRFR=1./BEQRFR

***PARAMETROS DE DOPPLER***

FD=583.

BWRFR=2*FD

***PARAMETROS DE EB/N0***

NB=1

PARAMETER EBNODB=2.,6.,10.,14.

EBN=10.**(EBNODB/10.)

POW=(AMPM*AMPM)/2.

EB=(POW*TS)/(223./255.)

PN0=2.*EB/EBN

***PARAMETROS DE DECISION***

OPT=0.

NSOFT=3

TABLE TH(1-7)=-1.0,-0.666,-0.333,0.0,0.333,0.666,1.0

DIMENSION DMETR(16)

DIMENSION TM(16)

***PARAMETROS DE DECODIFICACION CONV.***

NDVIT=33

NDEC=100

NDS=1

NFLA=0

CALL METCOM(NFLA,NSOFT,TM,TH,PN0,DMETR)

***PARAMETROS DE DURACION DE LA SIMULACION***

NDELRS=NDVIT+(NDEC-1)*NS

NDD=NDELRS/NS+N

NSICL1=MOD(NDELRS,NS)

NPRSD=500

```

```

FINTIM=(NDELS+(NPRSD+1)*N*NS)*DELT
T0=33.*DELT
DYNAMIC
***DECISION DE VELOCIDAD SEGUN EL ESTADO DEL CANAL***
! IF (P.GE.0) THEN
!   SP=1164800.*8.
!   PN0=(255./(223.*SP))/EBN
!   DELT=1./(SP*NS)
! ELSE
!   SP=145600.*8.
!   PN0=(255./(223.*SP))/EBN
!   DELT=1./(SP*NS)
! ENDIF
***GENERACION***
TIMESCALE=8
L1F<PNSEQV(NDEG,NGEN,NSYNC,NS,N,K)
***CODIFICACION***
L1R<RSCEBI(NS,NSYNC,N1,K1,M)<L1F
L2C<CNV12E(NS,NCL,NTRFLG,NCDEL)<L1R
L2N<RNOT<L2C
TIMESCALE=1
***MODULACION***
XMOD<PSKMOD(F0,AMPM)<L2N
XF<FILRCB(0,F0,GAM,1.,ROL,1.,NST)<XMOD
***CANAL RAILEIGH***
XGNRA<NBWN(GRFR,F0)
XGNRA<TESTSIGNAL /1/IMPULS(F0)
XRAY<FILBUT(2,12,F0,BWRFR,1.)<XGNRA
COMPUTEDBY /1/BEQNOI(BEQRFR)<XRAY
*
XM<HIMULT<XRAY,XF
XM1<CONV(F0)<XM
XNOI<NBWN(PN0,F0)
Y1<SUM<XM1,XNOI

```

```

***RECUPERADOR DE PORTADORA***
XRE<SIGGEN(F0,AMPS,PHA)
XPHA<PHADET<XRAY,XRE
Y<PHASHF(XPHA(1))<Y1
XCLK1<CLOCK(NST,NSICL)
***DEMODULACION***
YF<FILRCB(1,F0,GGAM,1.,ROL,1.,NST)<Y
YP,YQ,L2D<PSKDEM<XCLK1,XRE,YF
***DECISION***
L3P<SHQUAN(OPT,TH)<XCLK1,YP
L3Q<SHQUAN(OPT,TH)<XCLK1,YQ
***EVALUACION DE LA POTENCIA RECIBIDA***
! P=10*(LOG10(YF(1)**2))
*! PRINT*,P
*! PRINT*,PNO
***DECODIFICACION***
TIMESCALE=8
L1D<CNV12D(NS,NDVIT,NCL,NTRFLG,DMETR,NDEC,NDS)<L3P,L3Q
L1RDS<RSCDBI(NS,NDELRS,N1,K1,M)<L1D
***MEDIDA DE LA BER***
L1DF<DDELAY(NS,NSICL1,NDD)<L1F
L1E<BYADD(NS,0)<L1DF,L1RDS
MEASURE NCONV(NS,0,1,1,1,1,NDD)<L1E
***GRAFICA DE SEÑAL ANTES Y DESPUES DEL CANAL***
*
OUTPUT YF(1)
OUTPUT XF
END

```

# Capítulo 7.

## 7. Conclusiones

---

### 7.1 Conclusiones y siguientes líneas de estudio

Una vez realizadas todas las simulaciones explicadas, se deducen las siguientes conclusiones:

- El comportamiento de la cadena de transmisión es aceptable si se usan codificaciones, en este proyecto se han utilizado codificaciones de tipo convolucional y Reed-Solomon.
- Las codificaciones Reed-Solomon mejoran significativamente las probabilidades de error de la transmisión
- En condiciones de cielo claro (canal gaussiano) o con visibilidad directa (simulada mediante canales Rice) las probabilidades de error mejoran notablemente.
- Los hidrometeoros, a tener en cuenta siempre con portadoras mayores a 10 Ghz., han sido simulados mediante canales lognormal-Rice y Lognormal-Rayleigh, y las probabilidades de error obtenidas obligan al uso de codificaciones Reed-Solomon.
- Los resultados obtenidos para cadenas de transmisión adaptativas suponen una buena alternativa, dado que evitan las modulaciones, tasas de transmisión y codificaciones más complejas únicamente en aquellos casos que el canal de transmisión lo permita, mientras que usan la “cadena” compleja cuando es necesario. Se ha demostrado mediante las simulaciones que los resultados obtenidos para estos sistemas adaptativos son coherentes.
- Como siguientes pasos, se recomendaría el uso de otros turbo-códigos distintos al Reed-Solomon así como profundizar en las simulaciones adaptativas con canales que consideren los efectos meteorológicos.

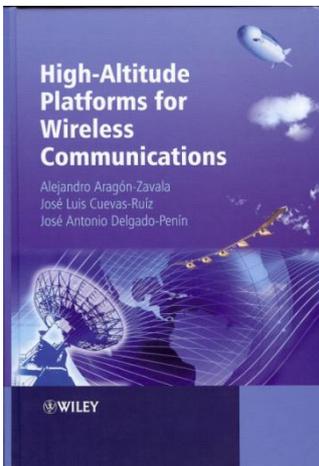
# Capítulo 8.

## 8. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

---

### 8.1 Bibliografía

#### 8.1.1 Sobre comunicaciones mediante HAPS



—High-Altitude Platforms for Wireless Communications. Alejandro Aragón-Zavala, José Luis Cuevas-Ruiz, José A. Delgado Penín, Wiley.

— F. Perez-Fontan, J. A. Delgado-Penin, and I. R. Palma-Lazgare, "A case study: WiMAX HAPS system at S-Band," COST 297 - HAPCOS, Action Document for WG1 Meeting, Document No: COST297-0088-WG10-PUB-P01, Oberpfaffenhofen, Germany, April 2006.

— I.R. Palma-Lázgare, J.A. Delgado-Penín, F. Pérez-Fontán, "HAP-based broadband communications under WiMAX standards – A first approach to physical layer performance assessment," First COST 297-HAPCOS Workshop, Document No: COST297-0141-WG10-PRI-P02, York, United Kingdom, 26-27 October 2006.

— I.R. Palma-Lázgare, J.A. Delgado-Penín, "High Altitude Platform Stations in Design Solutions for Emergency Services," Revista IEEE Burán –Branca d'Estudiants de l'IEEE de Barcelona, Revista No. 24, Octubre 2006.

— I. R. Palma-Lazgare, J. A. Delgado-Penin, and F. Perez-Fontan, "An Advance in Wireless Broadband Communications based on a WiMAX-HAPS Architecture," 26th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), AIAA-2008-5502, Sand Diego, CA, USA, 10-12 June 2008.

— I. R. Palma-Lazgare, J. A. Delgado-Penin, "Efectos de Distorsión Presentes en el

Canal de Propagación en un Sistema de Comunicaciones de Banda-Ancha

WiMAX basado en HAPS,” Actas del XXIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2008). Madrid, , España, 22-24 Septiembre 2008, ISBN: 978-84-612-6291-5.

— I. R. Palma-Lazgare, and J. A. Delgado-Penin, “Fixed Broadband Wireless Access based on HAPS using COFDM Schemes: Channel Modelling and Performance Evaluation,” Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC’08), 978-1-4244-2603-4/08/\$25.00 © 2008 IEEE, Adelaide, SA, Australia, 7-10 Dec. 2008.

— Int. Telecom. Ginebra, ITU-R, M.1456 Minimum performance characteristics and operational conditions for HAPS stations providing IMT-2000 in the bands 1885-1980 MHz, 2010-2025 MHz and 2110-2170 MHz in region 1 and 3, 1885-1980 MHz and 2110-2160MHz in region 2, 2000.

### *8.1.2 Sobre canales de comunicaciones*

—Lee W.C.Y, Mobile Cellular Telecommunication System, McGraw-Hill, New York,1995.

— Proakis J.G., Digital Communications, McGraw-Hill, New York, third edition, 1995.

— Jakes W.C., Microwave Communication Systems, Ed. Wiley-Intercience Publications,Bell Telephone Labs., 1974.

— Patzold M., Mobile Fading Channels, Ed. Wiley-Intercience Publications, 2002.

— Valdovinos A., “Comunicaciones móviles personales: Caracterización del canal y estudio de técnicas de transmisión,” Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 1998.

— Benedeto S., Biglieri E., and Castellani V., Digital Transmission Theory, Prentice-Hall, 1987.

— Sklar B., “Rayleigh channels in mobile digital communication systems,” IEEE, Communication Magazine, September 1997.

- Marvin S. and Alouini M., *Digital Communication over Fading Channels*, Ed. Wiley-Interscience Publications, 2000.
- Hernando-Rabanos J.M., *Transmision por Radio*, Colección E.T.S.I. de Telecomunicación Universidad Politécnica de Madrid, Ed. Centro de Estudios Ramón Areces S.A., 1998.
- Vázquez M., “Modelado de canal LMS mediante técnicas estadísticas y deterministas en entornos no urbanos,” Tesis Doctoral, Universidad de Vigo, España, 1999.
- Rice M., “K/Ka-band channel characterization for mobile satellite systems,” *IEEE 45th Vehicular Technology Conference*, vol. 2, pp. 981–985, 1995.
- Wenzhen L. and Choi L., “Ka-band land mobile satellite channel model incorporating weather effects,” *IEEE Communications Letters*, vol. 5 No5, May 2001.
- Jahn A. and Lutz E., “EHF-band land mobile satellite channel characterization,” *Proc. IEEE 47th Vehicular Technology Conference*, vol. 1, pp. 56–60, 1997.
- Kubista E., Perez-Fontan F., Vázquez-Castro M., Buonomo S., Bertram R., and Arbesser-Rastburg, “Ka - Band propagation measurements and statistics for land mobile satellite applications,” *IEEE Trans. On Vehic. Tech.*, vol. 49 No3, pp. 973–983, May 2000.
- Frasco L.A., “Signal design for aeronautical channels,” *IEEE Trans. on Comm.*, vol. COM-21 No5, May 1973. May 1991.
- Matricciani E., “Transformation of rain attenuations statistics from fixed to mobile satellite communication system,” *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 38, pp. 1359–1366, September 1995.
- Loo C., “A statistical model for land mobile satellite link,” *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. VT-34 No3, pp. 122–127, August 1985.
- Loo C., “Digital transmission through a land mobile satellite channel,” *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 38 No5, May 1990.

— Loo C. and Secord N., “Computer models for fading channels with applications to digital transmission,” IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 40 No4, pp. 700–707, November 1991.

### *8.1.3 Sobre codificación de canal*

- Forney G.D., “Concatenated codes,” MIT Press, Cambridge, May 1996.
- Vucetic B., “An adaptive coding scheme for time-varying channels,” IEEE Trans. on Comm., vol. 39 No5, May 1991.
- Vucetic B., “Bandwidth efficient concatenated coding schemes for fading channels,” IEEE Trans. on Comm., vol. 41, January 1993.

## *8.2 Referencias y Sitios web*

- J.A. Delgado-Penín; “Simulación de Sistemas de Radiocomunicación. Apuntes de la Asignatura”; ETSETB (UPC); curso 2002-03.
- [www.tlc.polito.it/topsim\\_en.html](http://www.tlc.polito.it/topsim_en.html)
- Comunicaciones de banda ancha y TV digital basada en HAPS. José A. Delgado-Penín. Departamento de Teoría de la señal y comunicaciones. UPC. 2003
- Broadband communications from a high altitude platform: the european helinet programme. T.C.Tozer, D. Grace y otros. June 2001
- Web de la ITU-R servicio fijo: <http://www.itu.int/ITU-R/publications/rec/index-es.asp> (Recomendaciones F.1569 y F.1500)
- High-altitude platforms for wireless communications. T.C.Tozer and D. Grace. June 2001
- Broadband Service Delivery from High altitude platforms, T.C.Tozer and D. Grace. Communicate 2000. University of York.. <http://www.amp.york.ac.uk/external/comms>
- Communications from high altitude platforms. T.C.Tozer and D. Grace. University of York.
- <http://www.amp.york.ac.uk/external/comms>

- Sitio de la ITU: [www.itu.int](http://www.itu.int)
- Sitio de Helinet: [www.helinet.polito.int](http://www.helinet.polito.int)
- University of york, [www.elec.york.ac.uk/comms](http://www.elec.york.ac.uk/comms)
- University of surrey, <http://www.ee.surrey.ac.uk/CCSR/>
- skylarc technologies, <http://www.skylarc.com/>
- ESA, <http://www.esa.int>,
- University of bath, [http://www.bath.ac.uk/electeng/pages/research/tsar/high\\_altitude\\_platforms.htm](http://www.bath.ac.uk/electeng/pages/research/tsar/high_altitude_platforms.htm)
- Angel technologies corporation, <http://www.angeltechnologies.com/>
- Gielow, <http://www.gielow.org/>
- Centre for telecommunications research, <http://www.ctr.kcl.ac.uk>
- ESA telecommunications, <http://telecom.esa.int>
- skytower telecommunications, <http://www.skytowerglobal.com>