



***DISEÑO COOPERATIVO DE UN SISTEMA DE
COMUNICACIONES POR SATÉLITE BASADO EN
DIVERSIDAD ESPACIAL***

**Memoria del Trabajo de Final de Carrera
de Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones,
especialidad en Sistemas Electrónicos**

Realizado por
Renat Martín Rius
y dirigido por
José López Vicario
Bellaterra, 16 de Junio de 2008

DISEÑO COOPERATIVO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES POR SATÉLITE BASADO EN DIVERSIDAD ESPACIAL	- 1 -
ÍNDICE DE FIGURAS	- 4 -
Capítulo 1.	- 7 -
INTRODUCCIÓN.....	- 7 -
1.1. MOTIVACIÓN	- 7 -
1.2. OBJETIVOS.....	- 8 -
1.3. ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO.....	- 9 -
Capítulo 2	- 11 -
TEORÍA DE LA TRANSMISIÓN	- 11 -
2.1 ELEMENTOS DE LA COMUNICACIÓN	- 11 -
2.2 MEDIOS DE TRANSMISIÓN	- 12 -
2.3 PREDICCIÓN Y MODELADO	- 13 -
2.4 MODELOS DE PROPAGACIÓN	- 14 -
2.4.1 MODELO DE PROPAGACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE.....	- 14 -
2.4.2 MODELO CON DISTRIBUCIÓN RAYLEIGH	- 15 -
2.4.3 MODELO CON DISTRIBUCIÓN RICE	- 17 -
2.4.4 MODELO CON DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL	- 18 -
2.4.5 MODELO CON DISTRIBUCIÓN SUZUKI	- 20 -
Capítulo 3.	- 21 -
SISTEMAS DE DIVERSIDAD TERRESTRES	- 21 -
3.1 SISTEMAS BASADOS EN DIVERSIDAD	- 21 -
3.2 COMUNICACIÓN VÍA SATÉLITE.....	- 23 -
Capítulo 4.	- 27 -
DISEÑO CON DIVERSIDAD DE SATÉLITES	- 27 -
4.1 DIVERSIDAD APLICADA A SATELITES.....	- 28 -
4.1.1 ESTUDIOS RELACIONADOS	- 28 -
4.2 MODELO DE TRANSMISIÓN CON SISTEMA ALAMOUTI	- 30 -
4.3 MODELO DE TRANSMISIÓN CON SELECCIÓN DE SATÉLITE	- 33 -
4.4 MODELO DE TRANSMISIÓN CON UN SOLO SATÉLITE	- 34 -
Capítulo 5.	- 37 -
SIMULADOR MATLAB.....	- 37 -
5.1 ESTRUCTURA DEL SIMULADOR	- 37 -
5.2 ESCENARIO ANALIZADO	- 39 -
5.3 DESPLAZAMIENTO A 10m/s	- 41 -
5.3.1 MODELADO CON CANAL RAYLEIGH A 10m/s.....	- 41 -
5.3.2 MODELADO CON CANAL RICE A 10m/s.....	- 45 -
5.3.3 MODELADO CON CANAL LOGNORMAL A 10m/s	- 49 -
5.3.4 MODELADO CON CANAL SUZUKI A 10m/s	- 53 -
5.4 DESPLAZAMIENTO A 100m/s	- 57 -
5.4.1 MODELADO CON CANAL RAYLEIGH A 100m/s.....	- 57 -
5.4.2 MODELADO CON CANAL RICE A 100m/s.....	- 63 -
5.4.3 MODELADO CON CANAL LOGNORMAL A 100m/s	- 68 -
5.4.4 MODELADO CON CANAL SUZUKI A 100m/s.	- 73 -
Capítulo 6	- 79 -
CONCLUSIONES Y PROYECTOS FUTUROS.....	- 79 -
RESUMEN.....	- 81 -
BIBLIOGRAFÍA	- 82 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Esquema básico de comunicaciones.....	- 12 -
Figura 2.- Modelos de canales confinados. Cable coaxial, cable eléctrico y guía onda ..	- 12 -
Figura 3.- Modelos de canales no confinados	- 13 -
Figura 4.- Modelo de propagación en espacio libre	- 15 -
Figura 5.- Esquema de distribución Rayleigh	- 15 -
Figura 6.- Representación PDF con 1.000 muestras	- 16 -
Figura 7.- Representación PDF con 100.000 muestras	- 16 -
Figura 8.- Esquema de distribución Rice	- 17 -
Figura 9.- Representación de la PDF Rice con 100.000 muestras	- 18 -
Figura 10.- Representación de la PDF Lognormal	- 19 -
Figura 11.- Esquema de distribución Lognormal	- 19 -
Figura 12.- Representación de la PDF Suzuki con 1.000 y con 100.000 muestras....	- 20 -
Figura 13.- Esquema de diversidad de señal (izquierda), y esquema de.....	- 22 -
Figura 14.- Ejemplos de transmisión de banda ancha. TV por satélite e Internet por satélite.....	- 23 -
Figura 15.- Constelación de satélites GPS	- 25 -
Figura 16.- Esquemas de un solo satélite (izquierda), método Alamouti (centro)	- 28 -
Figura 17.- Esquema de transmisión Alamouti.....	- 31 -
Figura 18.- Representación del código Alamouti	- 31 -
Figura 19.- Esquema de transmisión Alamouti	- 31 -
Figura 20.- Esquema de selección de satélite.....	- 33 -
Figura 21.- Satélite geoestacionario.....	- 35 -
Figura 22.- Esquema de un solo satélite.....	- 35 -
Figura 23.- Esquema de codificación QPSK	- 38 -
Figura 24.- Estructura del Simulador.....	- 38 -
Figura 25.- Modelos estudiados, vehículo urbano (izquierda).....	- 39 -
Figura 26.- Proceso de selección de satélite con errores en el mensaje de retorno ..	- 40 -
Figura 27.- Evolución de la probabilidad de error para incrementos	- 42 -
Figura 28.- Evolución para SNR de 5dB	- 43 -
Figura 29.- Evolución para SNR de 10dB	- 44 -
Figura 30.- Evolución para SNR de 20dB	- 44 -
Figura 31.- Evolución de la probabilidad de error para incrementos	- 46 -
Figura 32.- Evolución para SNR de 5dB	- 47 -
Figura 33.- Evolución para SNR de 10dB	- 48 -
Figura 34.- Evolución para SNR de 20dB	- 48 -
Figura 35.- Evolución de la probabilidad de error para incrementos	- 50 -
Figura 36.- Evolución para SNR de 5dB	- 51 -
Figura 37.- Evolución para SNR de 10dB	- 51 -
Figura 38.- Evolución para SNR de 20dB	- 52 -
Figura 39.- Probabilidad de error de símbolo de los casos Rayleigh, Lognormal y Suzuki.....	- 53 -
Figura 40.- Evolución de la probabilidad de error para incrementos	- 54 -
Figura 41.- Evolución para SNR de 5dB	- 55 -
Figura 42.- Evolución para SNR de 10dB	- 56 -
Figura 43.- Evolución para SNR de 20dB	- 56 -
Figura 44.- Evolución de la probabilidad de error para incrementos	- 58 -
Figura 45.- Evolución para SNR de 5dB	- 60 -
Figura 46.- Evolución para SNR de 10dB	- 60 -

Figura 47.- <i>Evolución para SNR de 20dB</i>	- 61 -
Figura 48.- <i>Comparativa modelado Rayleigh a distintas velocidades</i>	- 62 -
Figura 49.- <i>Evolución de la probabilidad de error para incrementos</i>	- 64 -
Figura 50.- <i>Evolución para SNR de 5dB</i>	- 65 -
Figura 51.- <i>Evolución para SNR de 10dB</i>	- 66 -
Figura 52.- <i>Evolución para SNR de 20dB</i>	- 66 -
Figura 53.- <i>Comparativa modelado Rice a distintas velocidades</i>	- 67 -
Figura 54.- <i>Evolución de la probabilidad de error para incrementos</i>	- 69 -
Figura 55.- <i>Evolución para SNR de 5dB</i>	- 70 -
Figura 56.- <i>Evolución para SNR de 10dB</i>	- 70 -
Figura 57.- <i>Evolución para SNR de 20dB</i>	- 71 -
Figura 58.- <i>Comparativa modelado Lognormal a distintas velocidades</i>	- 72 -
Figura 59.- <i>Probabilidad de error de símbolo de los casos Rayleigh, Lognormal y Suzuki</i>	- 73 -
Figura 60.- <i>Evolución de la probabilidad de error para incrementos</i>	- 74 -
Figura 61.- <i>Evolución para SNR de 5dB</i>	- 75 -
Figura 62.- <i>Evolución para SNR de 10dB</i>	- 76 -
Figura 63.- <i>Evolución para SNR de 20dB</i>	- 76 -
Figura 64.- <i>Comparativa modelado Suzuki a distintas velocidades</i>	- 77 -

Capítulo 1.

INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

Desde el principio de los tiempos el hombre se ha comunicado con sus semejantes con el fin de transmitir información, con el paso del tiempo y las investigaciones tecnológicas se han conseguido formas de comunicación que apenas hace dos décadas parecían de ciencia ficción.

La constante evolución de las comunicaciones ha pasado en los últimos años por la aparición de la telefonía móvil, la televisión por satélite y la expansión de Internet a un ritmo que ni sus creadores podían imaginar. Pero todavía quedan muchos obstáculos a superar, ha llegado la hora de dar un paso más en ésta frenética carrera tecnológica.

Paralelamente, la carrera espacial ha permitido abrir un nuevo horizonte en comunicaciones aéreas a larga distancia. Hasta los años 60 solo se podían alcanzar distancias de unos 10000km mediante propagación ionosférica bajo estrictas condiciones meteorológicas.

En la actualidad disponemos de sistemas de telefonía móvil que ofrecen una cobertura del 95% del territorio español. Se puede mantener un enlace saltando de celda en celda sin perder calidad de transmisión gracias a la diversidad de antenas transmisoras.

La posibilidad de establecer enlaces a larga distancia mediante el uso de satélites ha ampliado los conceptos de comunicaciones de entornos reducidos hasta llegar a maximizarlos a escala mundial. Iridium, Globalstar o el sistema GPS son algunos de los más conocidos.

Numerosos estudios se están llevando a cabo con la finalidad de eliminar las fronteras de la comunicación. A grandes términos, la llamada globalización permite que una misma compañía de servicios pueda operar en diferentes países pudiendo ofrecer ofertas por comunicaciones a través de ésta misma compañía. Como por ejemplo es el caso de Telefónica en España y en Latinoamérica, ofrece servicios más económicos en llamadas dentro de la misma compañía.

El siguiente paso se centra en ampliar las redes de comunicación a todo el mundo mediante redes satelitales y a su vez aportar la libertad de movimiento que ofrece la telefonía móvil celular. Garantizar cobertura alrededor del mundo forma parte de la nueva generación de comunicaciones de alta velocidad.

1.2. OBJETIVOS

La importancia de ofrecer alta calidad en los enlaces de comunicaciones, así como la expansión de Internet, ha hecho combinar los conceptos para visualizar una nueva forma de comunicación. Las conexiones existentes de Internet con telefonía móvil están muy lejos de parecerse a las líneas de alta velocidad ADSL.

El objetivo de este proyecto es realizar el diseño de un sistema de comunicaciones de banda ancha por satélite. Este sistema deberá ser capaz de aprovechar el hecho de disponer de más de un satélite transmisor, técnica conocida como diversidad. Además se tendrá en cuenta que el escenario a analizar no se trata de un receptor estático como una antena parabólica, sino que se trata de un receptor en movimiento.

Se debe añadir que el móvil viaja a diferentes velocidades, en un caso irá a 10 m/s (36km/h), como si se tratara de una persona en bicicleta o un corredor haciendo footing. Y en el otro caso la velocidad aumentará hasta los 100m/s (360km/h), el móvil estaría dentro de un tren de alta velocidad.

Para realizar este diseño se deben conocer conceptos teóricos como los modelos de diversidad existentes, los tipos de canal que se puede encontrar un transmisor en un entorno móvil, los métodos de transmisión por satélite o los problemas que puede ocasionar la comunicación vía satélite.

La finalidad es poder comparar la calidad en tres tipos de enlaces sujetos a las características de cada tipo de canal, bajo un modelo de detección. En cada caso se simulará, mediante Matlab, la estructura de comunicación y los resultados se verán reflejados en la probabilidad de error de símbolo en función de la SNR del sistema.

1.3. ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

Con el fin de ofrecer una introducción a las comunicaciones y su posterior análisis este proyecto se ha estructurado en dos grandes bloques, los apartados teóricos y los apartados prácticos.

La organización se ha distribuido de la siguiente forma:

En el capítulo 2 se explica la teoría de la transmisión, ésta incluye los elementos que forman parte en las comunicaciones, los diferentes medios de transmisión disponibles, cual es la finalidad de la predicción de canal y su posterior modelado, y concluye explicando bajo que modelos de distribución se trabajará.

En el capítulo 3 se describen los distintos modelos de diversidad terrestres, que son las comunicaciones basadas en diversidad, así como los elementos de las comunicaciones por satélite.

En el capítulo 4 se analiza el modelo propuesto, como aplicar diversidad sobre redes de satélites, se hace una breve descripción sobre los estudios relacionados. Y se explica como funcionan los tres modelos de transmisión para comunicación con diversidad.

El capítulo 5 alberga el apartado práctico del proyecto, en este capítulo se explica como está formada la estructura del simulador en Matlab. Se muestran los resultados de los escenarios a distintas velocidades de movimiento sujetos al comportamiento de cada canal.

Capítulo 2

TEORÍA DE LA TRANSMISIÓN

Para entender todos los conceptos relacionados con las comunicaciones y más en concreto con un enlace de comunicaciones son necesarias una serie de definiciones previas a la explicación en detalle. A lo largo de este capítulo encontraremos los elementos de la comunicación básica, los medios de transmisión por los que puede viajar una onda electromagnética. La utilidad de la predicción y el modelado de canal, y para terminar se explicarán los diferentes modelos de distribución de canal que nos encontraremos en las comunicaciones.

2.1 ELEMENTOS DE LA COMUNICACIÓN

Todo sistema de comunicación tiene como finalidad transmitir un mensaje con información a través de un canal, desde un punto inicial (emisor) a otro final (receptor). Para establecer comunicación es imprescindible que el mensaje sea recibido por el receptor con suficiente calidad como para que pueda entenderlo.

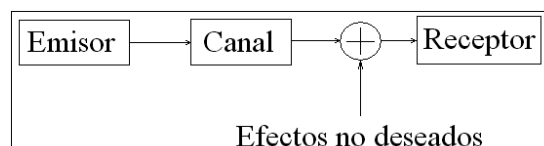


Figura 1.- Esquema básico de comunicaciones

En la Figura 1 podemos ver los elementos básicos de un sistema de comunicación, emisor, canal, receptor y efectos no deseados. Se explican en detalle a continuación.

El emisor es el encargado de elegir y seleccionar los signos adecuados para transmitir su mensaje. Se ocupa de codificar, modular y amplificar el mensaje para poder llevarlo de manera entendible al receptor.

El receptor es a quien se destina el mensaje. Realiza un proceso inverso al del emisor, se encarga de demodular y decodificar el mensaje que el emisor quiere dar a conocer.

Es imprescindible que, para que emisor y receptor se entiendan, tengan un código en común. El código es el conjunto de reglas propias de cada sistema de signos y símbolos que el emisor utilizará para transmitir su mensaje, se deben combinar de manera ordenada porque tiene que estar adecuado para que el receptor pueda captarlo.

El canal constituye el soporte físico por el cual viaja el mensaje, establece una conexión entre el emisor y el receptor. Además, el canal puede introducir efectos no deseados en nuestra comunicación, como atenuaciones, ecos, efecto Doppler, ruido. En el siguiente apartado veremos diferentes medios por donde se puede transmitir una onda.

2.2 MEDIOS DE TRANSMISIÓN

Tal como hemos visto en el apartado anterior, existen numerosos efectos no deseados en un sistema de comunicación, aun así no tienen porque darse todos a la vez. Dependiendo del medio por el cual se transmita la información tendremos unos efectos u otros. Podemos clasificar los distintos canales de comunicación y sus características en:

- Canales confinados: son aquellos cuya transmisión se realiza por el interior de un conducto, como los de la Figura 2, cable eléctrico, cable coaxial, fibra óptica o guías de onda. Al ser medios cerrados se puede proteger mucho la señal, lo que implica mayor resistencia a interferencias, condiciones climáticas, etc. Dependen de una instalación previa a su uso lo que supone un elevado coste, no es útil para terminales móviles y ofrece poca flexibilidad una vez instalado.

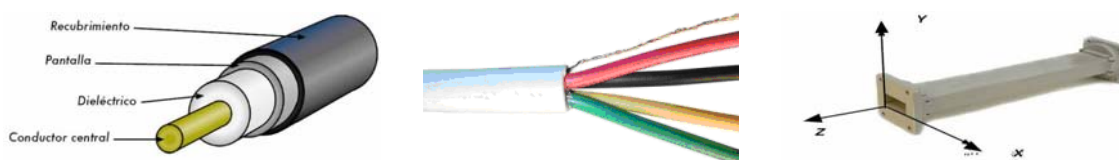


Figura 2.- Modelos de canales confinados. Cable coaxial, cable eléctrico y guía de onda

- Canales no confinados: son, básicamente, aquellos cuya transmisión se realiza por el aire o, en casos de comunicaciones submarinas, por el agua. No requieren de instalación, ni mantenimiento del medio físico. Ofrecen libertad de movimiento y es posible realizar enlaces a largas distancias sin demasiada complejidad. En la Figura 3 tenemos algunos ejemplos de modelos no confinados. Por contrapartida las señales son muy susceptibles a interferencias externas, estado climático. Además de ser un sistema

con poca confidencialidad ya que un receptor involuntario podría recibir el mensaje enviado.



Figura 3.- Modelos de canales no confinados

Aunque los medio confinados ofrecen ventajas a nivel de fiabilidad, la libertad de movimiento de los medios no confinados y su bajo coste han impulsado las comunicaciones sin cables hasta el punto de instalarse de forma permanente en nuestro día a día. Claros ejemplos son los teléfonos móviles o las redes WirelessLAN.

El estudio de este proyecto solo es viable con comunicaciones no confinadas, dado que estamos tratando con sistemas de satélites.

2.3 PREDICCIÓN Y MODELADO

La predicción y el modelado de los canales de radiocomunicación son una de las partes mas complicadas que interviene en el diseño de sistemas de comunicación, por lo general esta parte se hace de manera estadística, tomando como base mediciones realizadas en una zona específica y para un determinado sistema o parte del espectro [3].

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, tendremos que un canal satélite móvil es el camino que recorre una señal desde uno o varios emisores vía satélite hasta un receptor móvil.

A diferencia otros receptores, en esta ocasión, al estar el receptor en movimiento, las condiciones que hasta ahora han 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 [1]:

- **Reflexión:** las ondas electromagnéticas inciden en obstáculos de dimensiones mayores que λ , 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 λ , como hojas, árboles, señales de tráfico, postes de luz, etc.

En el sistema propuesto de comunicaciones por satélite, 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 los efectos de la troposfera. Alterándose con ruido, dispersión, atenuación, reflexiones multitrayecto, efecto Doppler...

Existen numerosos modelos de propagación de la señal. En el apartado siguiente se analizarán los modelos más comunes de distribución multitrayecto que tienen los canales en comunicaciones móviles: Rayleigh, Rice, Lognormal y Suzuki. Cada una de estas distribuciones se produce en distintos entornos que se explicarán a continuación.

2.4 MODELOS DE PROPAGACIÓN

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.

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” [2].

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 de que no haya obstáculos, ruido o reflexiones en el camino, y posteriormente encontraremos los modelos con efectos no deseados sobre la señal, son los modelos Rayleigh, Rice, Lognormal y Suzuki.

2.4.1 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**. Los sistemas de comunicación satelital estáticos y los enlaces con microondas se pueden modelar como propagación en el espacio libre. El modelo de espacio libre predice que la potencia recibida decae en función de la separación entre transmisor y receptor [3].

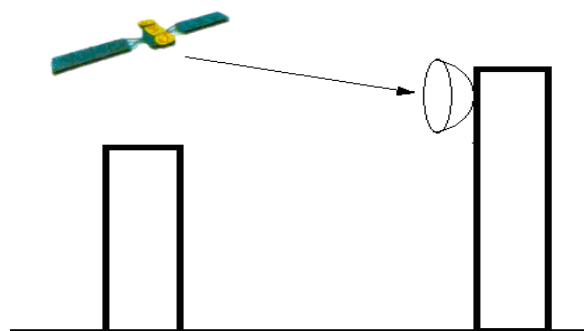


Figura 4.- Modelo de propagación en espacio libre

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.

2.4.2 MODELO CON DISTRIBUCIÓN RAYLEIGH

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** (LOS¹) 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 directa con la antena.

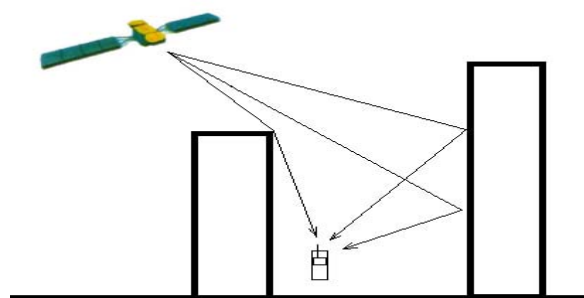


Figura 5.- Esquema de distribución Rayleigh

En un canal Rayleigh aparecen las denominadas “variaciones de señal a corto plazo²”, 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,

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

² Variaciones adicionales debido a las componentes multitrayecto generadas en el entorno cercano al móvil (alrededor de 150λ).[1]

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:

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

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 [3]:

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

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.

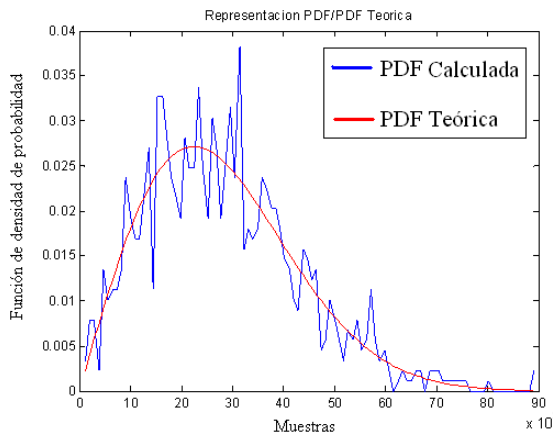


Figura 6.- Representación PDF con 1.000 muestras

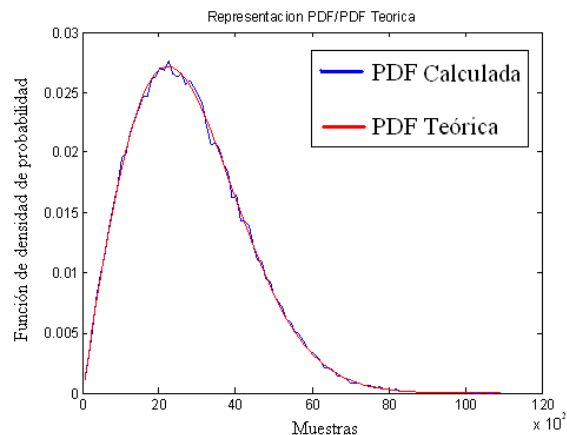


Figura 7.- Representación PDF con 100.000 muestras

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 dispone de línea de visión directa, la señal recibida llega del multitrayecto de las diferentes reflexiones.

2.4.3 MODELO CON DISTRIBUCIÓN 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** (LOS³) 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:

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

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

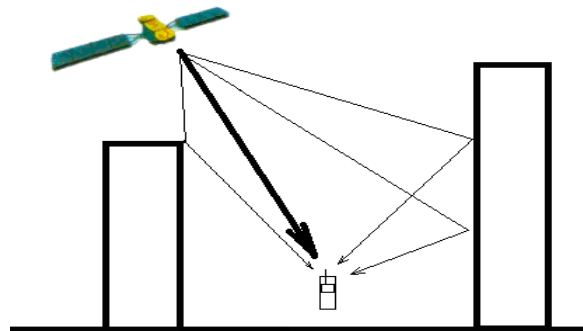


Figura 8.- Esquema de distribución Rice

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.

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.

³ LOS, siglas de Line Of Sight, o línea de visión directa, en un enlace de comunicaciones.

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 9.

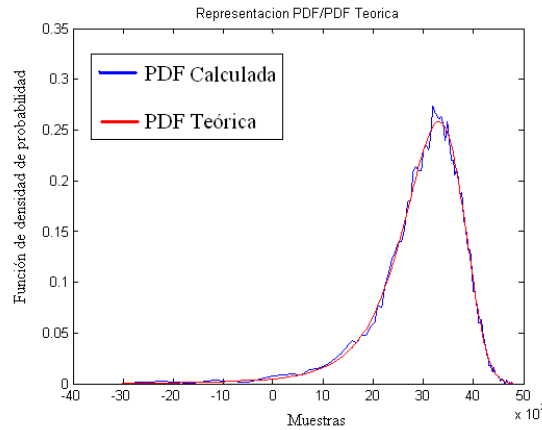


Figura 9.- Representación de la PDF Rice con 100.000 muestras

2.4.4 MODELO CON DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL

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 σ 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 (gaussiana pero todos los valores en dB's) [1]. 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.

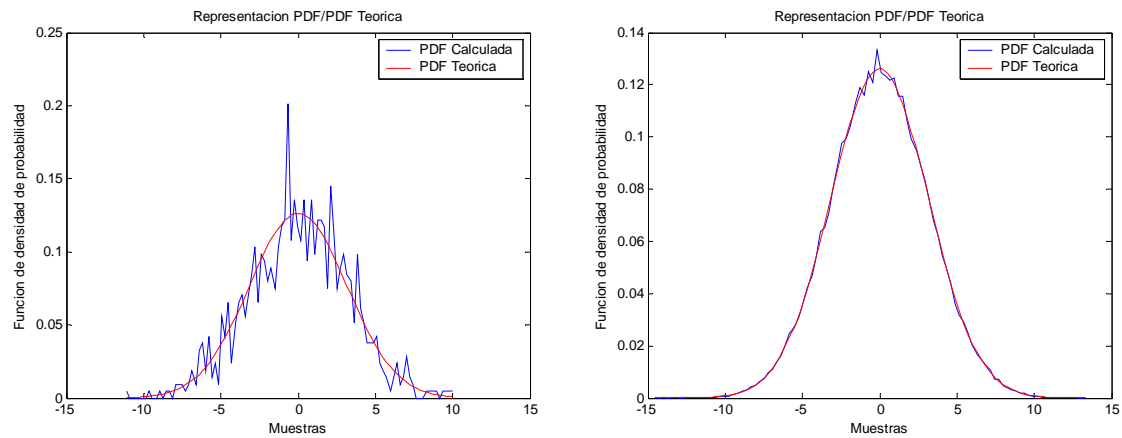


Figura 10.- Representación de la PDF Lognormal con 1000 y con 100.000 muestras respectivamente

La transmisión sufre variaciones de señal a *medio plazo*⁴ producidas por efectos de sombras radioeléctricas [1]. 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 11 podemos ver un ejemplo de modelo para variaciones a medio plazo:

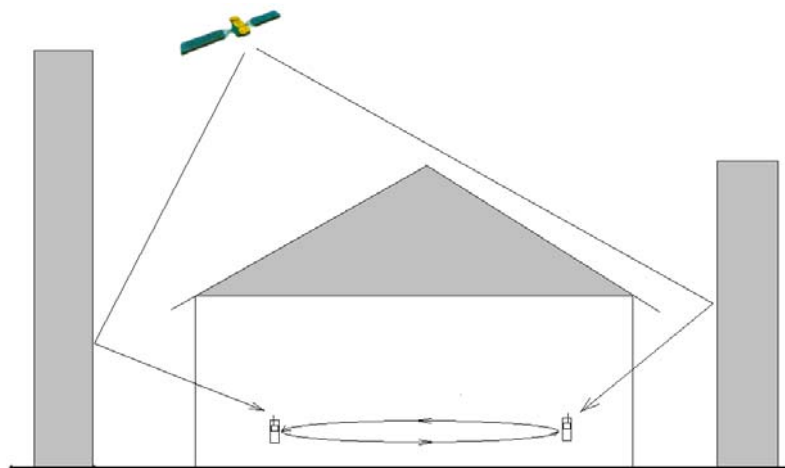


Figura 11.- Esquema de distribución Lognormal

⁴ Variaciones en torno al valor inmediatamente anterior, se deben a grandes obstáculos y reflectores lejanos al móvil [1].

2.4.5 MODELO CON DISTRIBUCIÓN SUZUKI

El último modelo analizado es la distribución Suzuki, este modelo combina la distribución Lognormal y la Rayleigh. El modelo Suzuki proporciona una aproximación mejor de la suma del complejo Lognormal correlacionado para una variedad más amplia de comportamientos del canal. En esta distribución se considera que la media de la variable aleatoria Rayleigh es una variable lognormal (en la teoría de Rayleigh hemos tratado con variables gaussianas) [3].

$$f_{SUZUKI}(r) = \int_0^{\infty} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \frac{\log \ell}{\sigma \alpha \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\log\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) / 2\alpha^2\right) d\sigma$$

Donde σ es la desviación estándar y x la amplitud.

La PDF de una distribución Suzuki tiene como finalidad describir el comportamiento a pequeña y gran escala de los desvanecimientos. Fue una de las primeras distribuciones en utilizar una “mezcla” de estadísticas para describir zonas urbanas con canales móviles de satélite [4].

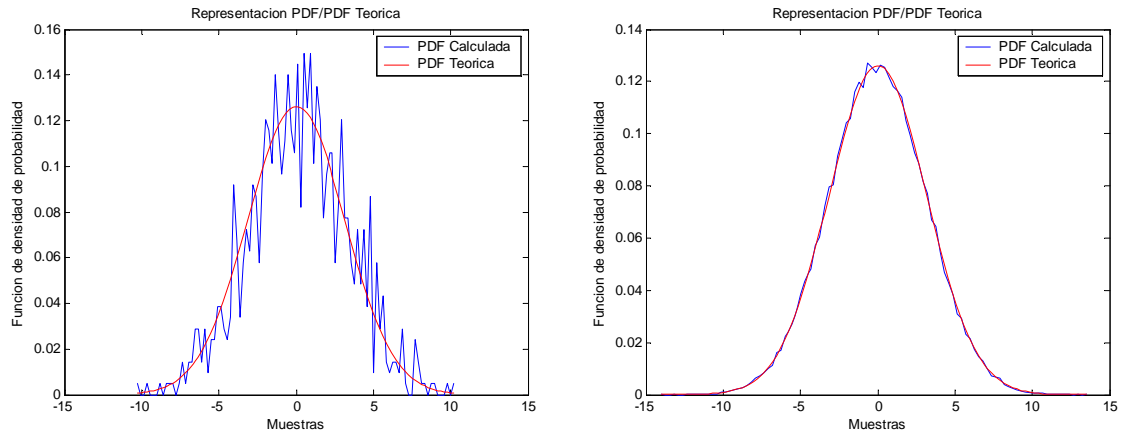


Figura 12.- Representación de la PDF Suzuki con 1.000 y con 100.000 muestras

El modelo de transmisión Suzuki también está sujeto al número de muestras. Será más preciso cuantas más muestras disponga.

Capítulo 3.

SISTEMAS DE DIVERSIDAD TERRESTRES

3.1 SISTEMAS BASADOS EN DIVERSIDAD

Como hemos visto en el capítulo anterior, el camino que recorre una señal desde el transmisor hasta el receptor puede ser desde una simple y sencilla línea de vista directa hasta un ambiente en el cual tengamos gran cantidad de obstáculos, como edificios, montañas o árboles que lo interfieran.

La técnica de la diversidad se basa en **utilizar varios emisores** con fuentes de señal independientes y aprovechar la baja probabilidad de que en un instante se produzca el mismo error en dos canales distintos. De este modo aunque uno de los canales sufra un error el otro trabajará con la señal correcta, para distinguir uno y otro deberemos seguir una serie de pasos que se explicaran mas adelante [5].

Podemos distinguir los sistemas de diversidad en dos grandes bloques (Figura 13), los sistemas de diversidad de señal y los sistemas de diversidad de transmisor.

- En un sistema basado en diversidad de señal, la principal ventaja es que la potencia de transmisión queda repartida entre las diferentes antenas que participan en el enlace. En comunicaciones vía satélite el consumo de energía es primordial.
- En un sistema basado en diversidad de transmisor, la potencia de este modelo recae en una amplia gamma de transmisores a elegir el que ofrezca la mejor calidad de enlace.

Los enlaces que utilizan esquemas de diversidad son muy eficaces en sistemas celulares donde el espacio, la potencia y la capacidad de procesamiento no suponen una limitación para la transmisión pero en cambio tienen una gran diferencia con las posibilidades del aparato receptor.

En las comunicaciones inalámbricas terrestres se han aplicado varios modelos de estructuras de transmisión por diversidad con la ventaja que los emisores se encuentran en tierra y se les puede suministrar la energía que necesiten. Trabajar con una red de satélites amplía las regiones de cobertura hasta donde aun no han llegado las antenas terrestres, en cambio se ven limitados en potencia.

En transmisiones por diversidad de señal se debe tener en cuenta que cada emisor transmitirá con una potencia ' P ' dividida por el número de antenas que transmitan a la vez, lo cual supondrá ahorro energético para cada una.

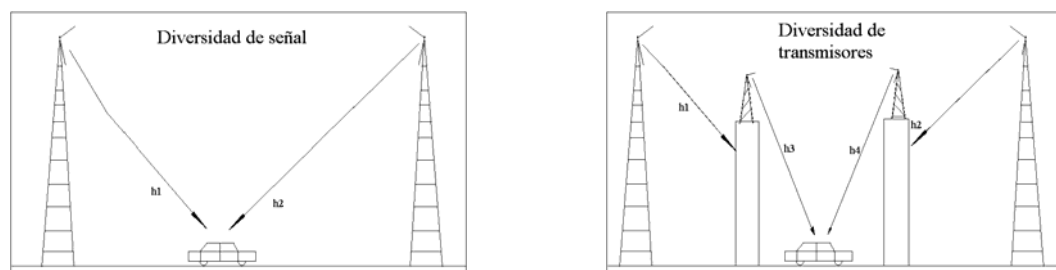


Figura 13.- Esquema de diversidad de señal (izquierda), y esquema de diversidad de transmisores (derecha)

En el diseño de transmisiones con sistemas de diversidad, una de las variables más importantes es el hecho de conocer las características del canal complejo. Si conocemos las características del canal podemos hacer uso de esta información y utilizar la estructura de esquema óptimo u *optimal beamforming* (transmitir en función del canal que haya).

Sin embargo, en la mayoría de ocasiones, al trabajar en un entorno de transmisiones urbano con terminales móviles, no nos será posible conocer el tipo de canal al que será sometida la señal.

Con el fin de aprovechar los beneficios de la diversidad deberemos recurrir a otros modelos de transmisión como utilizar la estructura Alamouti o la estructura de seleccionar el mejor transmisor.

En este proyecto veremos la particularización de los sistemas de un solo satélite, Alamouti y selección de satélite. De este modo se podrá analizar la diferencia entre disponer de un único transmisor o de aprovechar las cualidades de la diversidad espacial.

3.2 COMUNICACIÓN VÍA SATÉLITE

En la actualidad podemos hablar por teléfono, mandar un SMS o conectarnos a Internet desde cualquier lugar a través de dispositivos móviles ya sea con una PDA, un teléfono móvil o un ordenador portátil, pero el elevado precio de la conexión y la baja tasa de transmisión ofrecidas están muy lejos de parecerse a las conexiones de banda ancha disponibles mediante conexiones por cable.

Las conexiones vía satélite comerciales tienen dos tipos de aplicaciones, por una banda encontramos el sistema GPS de la Figura 15, dedicado al posicionamiento global en aparatos móviles. Y por otra, tenemos enlaces destinados a receptores estáticos con una antena parabólica y una instalación rígida. Como vemos en la Figura 14, un ejemplo de estas conexiones son la televisión por satélite o las conexiones de semi-banda ancha, que solo utilizan el satélite en la bajada de datos. El receptor tiene que utilizar la línea telefónica como canal de subida.

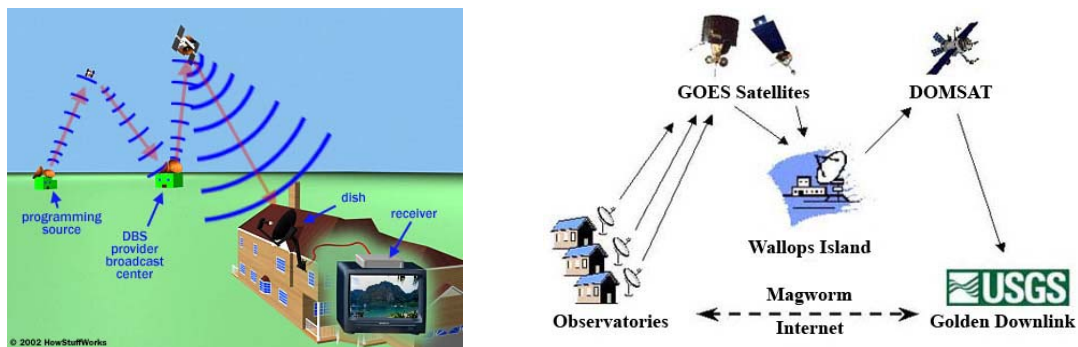


Figura 14.- Ejemplos de transmisión de banda ancha. TV por satélite e Internet por satélite

Una de las principales características en la transmisión por satélite es la órbita a la que están situados y su período de revolución a la tierra, se diferencian en tres grupos:

- Satélites Geoestacionarios (GEO)

Situados sobre una órbita circular ecuatorial de altitud 35.786Km. Actualmente hay centenares de satélites de comunicaciones situados a esta altura y describen órbitas circulares sobre la línea ecuatorial. A esta distancia el satélite da una vuelta a la Tierra cada 24 horas permaneciendo estático para un observador situado sobre la superficie terrestre. Por tal razón son llamados geoestacionarios. Con tres satélites se puede ofrecer cobertura al 95% de la superficie terrestre.

- Satélites de Orbita Media (MEO)

Situados a una altitud entre 9.000 y 14.500km. Recorren una vuelta a la tierra en 6 horas. Un observador en la superficie de la tierra “vería” uno de estos satélites durante unas 2 horas. Son necesarios entre 10 y 15 satélites para abarcar toda la Tierra.

- Satélites de Órbita Baja (LEO)

Son los más cercanos a la tierra y se encuentra entre 725 y 1.450km de altitud. Recorren una vuelta a la tierra en menos de 2 horas y son necesarios más de 40 satélites para la cobertura total. Un observador solo tendrá cobertura por un satélite durante 10 minutos.

En la tabla siguiente se muestran algunas características importantes de las distintas constelaciones existentes:

Sistema	.Constelación	Altura	Masa de Lanzamiento:	Tiempo de iluminación	Periodo orbital	Retardo
ORBCOMM	Pequeño LEO	770km	24 satélites	8 minutos	101 minutos	2.56ms
TELEDESIC	Broadband LEO	1350km	288 satélites	11 minutos	113 minutos	4.5ms
GLOBALSTAR	Gran LEO	1400km	56 satélites	12 minutos	114 minutos.	4.6ms
IRIDIUM.	Gran LEO	780km	72 satélites	10 minutos	101 minutos	2.6ms
ICO	MEO	10300km	24 satélites	2 horas	360 minutos	34.3ms
ODYSSEY	MEO	10300km	18 satélites	2 horas	360 minutos	34.3ms
METEOSAT	GEO	35783km	1 satélite	23h, 56mn, 4.1seg.	23h, 56 minutos	120ms

Cada sistema tiene un tiempo de retardo en las comunicaciones asociado a la distancia con la tierra. En sistemas unidireccionales como el Meteosat o la TV por satélite, este retardo se considera despreciable. Pero en sistemas de telefonía móvil como Iridium se ha minimizado al máximo para ofrecer una conexión suficientemente asequible.

Entre las diversas opciones, nos encontraremos con casos en que un solo satélite no es suficiente para mantener una cobertura fiable. En un entorno urbano lo más probable es que la señal encuentre edificios, árboles, farolas... o incluso que el receptor atraviese un túnel (a diferencia de las comunicaciones con satélites de televisión o meteorológicos que se encuentran fijos y en línea directa). En estos casos la señal recibida estará formada por la línea de transmisión directa, LOS, y por las reflexiones con los alrededores, llegará degradada y su calidad dependerá de la potencia de emisión, de la velocidad del receptor, de la dispersión, del retardo debido al multitrayecto o de la dispersión Doppler que producirá una expansión espectral de la señal.

Sistemas a menor escala ya se han utilizado en comunicaciones inalámbricas terrestres, constituidos en entornos urbanos, el ejemplo mas claro es la distribución en celdas de los teléfonos móviles. Plantear un nuevo uso de las comunicaciones móviles y trabajar con técnicas basadas en el uso de múltiples transmisores que explotan la diversidad espacial vía satélite empieza a cobrar sentido.

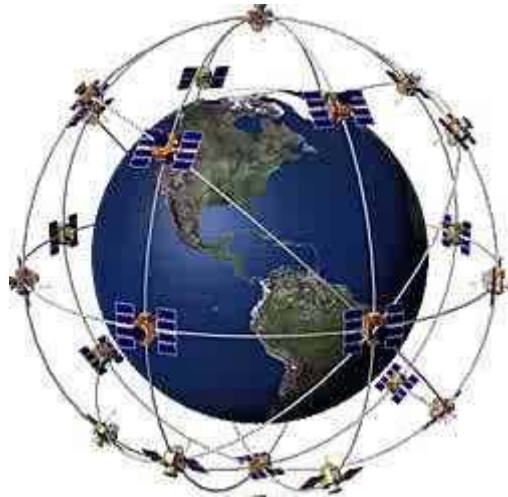


Figura 15.- Constelación de satélites GPS

Como veremos en el apartado siguiente, en entornos móviles será necesario proporcionar una cobertura constante y una calidad de señal óptima. Para ello se deberá trabajar con sistemas basados en la diversidad de señal. Cada sistema estará compuesto por una red de varios satélites que se encargaran de transmitir el mismo mensaje hacia un receptor móvil evitando así que haya el menor número de zonas oscuras en el recorrido, lo que supone minimizar la probabilidad de error.

Capítulo 4.

DISEÑO CON DIVERSIDAD DE SATÉLITES

Llegados a este punto conocemos los diferentes modelos de transmisión en comunicaciones, añadiendo los métodos de diversidad terrestres con sus ventajas y desventajas, pasaremos a combinar los conceptos para llevar a cabo el diseño de sistemas de diversidad con sistemas de satélites.

En este proyecto se analizan las técnicas de diversidad Alamouti, basada en diversidad de señal, y selección de satélite, basado en diversidad de transmisores, frente al modelo de un solo satélite.

Para realizar el análisis se han realizado una serie de simulaciones mediante Matlab que se encargan de poner en práctica los modelos de canal y los métodos de detección estudiados en los capítulos anteriores.

En este capítulo veremos en profundidad los métodos de diversidad tanto de señal como de transmisores, adaptados a la comunicación por satélite.

El objetivo es poder distinguir la calidad de los enlaces para cada técnica de modo que se puedan comparar las probabilidades de error de cada enlace y su efectividad.

4.1 DIVERSIDAD APLICADA A SATELITES

Los modelos utilizados en comunicaciones inalámbricas terrestres se pueden trasladar hacia el ámbito de las comunicaciones por satélite. Como se ha visto en el Capítulo 3 el principio de diversidad se basa en disponer de múltiples emisores que ofrezcan al receptor variedad en la calidad de los enlaces.

En la Figura 16 podemos ver los esquemas de sistemas de diversidad aplicados a comunicaciones por satélite.

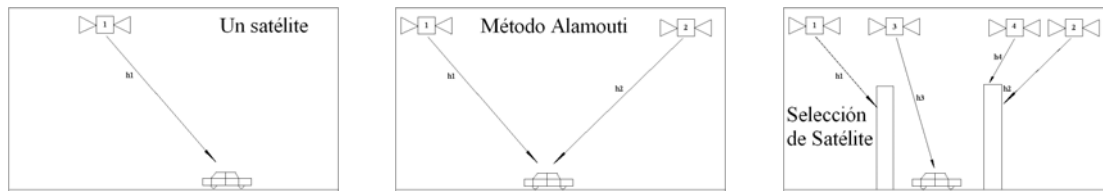


Figura 16.- Esquemas de un solo satélite (izquierda), método Alamouti (centro) y esquema de selección de satélite (derecha) con satélites

El método Alamouti aprovecha las propiedades de diversidad de señal para mejorar la calidad de los enlaces. El método de selección de satélite elige al satélite que ofrece mejor calidad de transmisión y el método de un solo satélite no permite elección alguna dado que no puede elegir.

4.1.1 ESTUDIOS RELACIONADOS

Son muchos los investigadores que trabajan en el diseño de sistemas por satélite, sistemas de diversidad y la combinación de ambos. Podemos encontrar estudios centrados en el análisis del canal de transmisión para su predicción, en técnicas para explotar la diversidad... De la revista del IEEE y de la web www.ieeexplore.org se pueden extraer documentos como los listados a continuación:

- “*Satellite Channel Impairment Mitigation by Diversity Techniques*”. Se investiga la forma de explotar los satélites MIMO, cuya transmisión es en cifrado de espacio-tiempo. Investigan técnicas para explotar la diversidad entre múltiples satélites, es un sistema útil para evitar zonas oscuras de cobertura [6].
- “*Modelling the land mobile satellite channel: a review*”. Trata sobre la implementación de la tercera generación de comunicaciones móviles vía satélite mediante la transmisión LMS (Land Mobile System). También clasifica y compara los distintos modelos existentes.
- “*Hybrid Selection/MRC for DVB-S2/RCS in Land Mobile Satellite Scenarios*”. Analizan técnicas de sistemas de telecomunicación basadas en múltiples antenas sobre trenes. Se basa en un escenario con trazado ferroviario donde se consideran los efectos de los arcos y de los túneles. Utiliza técnicas basadas en Selección Híbrida para mejorar la SER y la eficiencia espectral. Esta técnica se centra en mantener activas solo las antenas con la mejor recepción de un total de N antenas [7].

- “*SIMO Diversity with Antenna Selection for DVB-S2/RCS in LMS Scenarios*”. Sistema de satélites basado en DVB-S2 (TV digital por satélite). Se proponen utilizar el sistema SIMO (Single Input Multiple Output) para obtener diversidad en la conexión vía satélite en escenarios móviles o LMS (Land Mobile Satellite).
- “*Análisis of CDMA for Non-Geostationary Satellite Systems. Part 1: Forward Sevice Link in Rician Fading Channel with Satellite Diversity and Power Control*”. Analiza métodos de comunicación con múltiples satélites en transmisiones DS-SS CDMA, aprovecha la diversidad de señal y el control de la potencia para optimizar la tasa del receptor. Se centra en la utilización de satélites LEO y MEO, donde los modelos se ven caracterizados por la distancia, elevación y azimut. Como conclusiones expone que al trabajar con DS-SS CDMA para un servicio con mensaje de retorno bajo un entorno con canal Rice la probabilidad de que el mensaje se pierda es menor debido al aprovechamiento de diversidad.
- “*Performance of Alamouti Transmit Diversity Over Time-Varying Rayleigh-Fading Channels*”. Analiza la forma de optimizar transmisiones mediante técnicas de diversidad con alamouti bajo canal Rayleigh variante en el tiempo. Propone estrategias para detección con alamouti.
- “*Adaptive Channel-Matched Extended Alamouti Space-Time Code Exploiting Partial Feedback*”. Presenta una variante simple de EA-STBC (como codificación alamouti) donde se combina con un canal limitado en información de vuelta del Rx al Tx. El transmisor cambia entre varios EA-STBCs, en función del canal de conocimiento parcial, con el fin de aproximar un espacio libre de interferencias de transmisión de datos redundantes en la medida de lo posible. Se demuestra que este sencillo sistema de transmisión con uno o dos bits de retorno por bloque de código mejora la de transmisión de código y mejora los canales y la diversidad.
- “*Analysis of satellite WCDMA systems applying space-time codes with imperfect channel estimation*”. Investigan como combinar un sistema WCDMA con código espacio tiempo. Considerados difíciles de tratar por la necesidad de LOS. Aprovecha las propiedades de la diversidad con alamouti para transmitir en un esquema de satélites WCDMA.
- “*Experimental Broadband OFDM System*”. Experimenta el comportamiento de OFDM por implantación de sistemas de telefonía de 4G. Trabaja a una frecuencia de 20MHz como experimental y pasa a los 3.6GHz. Estudia entornos urbanos. Realiza estudios con combinaciones de antenas 1x1, 2x1, 2x2 en función del sistema sobre el que transmita el Terminal móvil. Aprovecha la diversidad con alamouti para estos esquemas de antena.
- “*An Fpga Implementation Of Alamouti’s Transmit Diversity Technique*”. Implementa un sistema FPGA con múltiples antenas basado en diversidad de alamouti en sistemas gíreles. Trabaja sobre canales a 2.4GHz. utiliza técnicas de sincronización temporal, recuperación de portadora y estimación de canal, diseñados específicamente para transmisores con sistemas de diversidad.

- “*On the Satellite Diversity in CDMA based Mobile Satellite*”. Trabaja con satélites no GEO para evitar zonas de sombra y utilizar técnicas de diversidad. El usuario tiene visión con varios satélites, de modo que la probabilidad de LOS aumenta. Trata dos esquemas híbridos de satélites. Un sistema de diversidad con selección donde elige el sistema con mejor SNR y otro que utiliza un sistema CDMA para aprovechar la diversidad espacial.
- “*Satellite Diversity Exploitation in Mobile Satellite CDMA Systems*”. Explora la diversidad de una red móvil de satélites. Trabaja con enlaces CDMA con múltiples satélites y con múltiples haces. Analiza los efectos del “path blockage”, control imperfecto de la potencia y correlación con desvanecimiento.

4.2 MODELO DE TRANSMISIÓN CON SISTEMA ALAMOUTI

El sistema Alamouti es un tipo de STBC (*Space Time Block Code*), una técnica utilizada en comunicaciones inalámbricas cuya finalidad es la de transmitir múltiples copias de un flujo de datos a través de una serie de antenas. Permite explotar así las diversas versiones recibidas de los datos para mejorar la fiabilidad de transmisión de datos.

El hecho de que la señal transmitida deba atravesar entornos difíciles, en la mayoría de casos sujetos a efectos de dispersión, reflexión, refracción, etc al receptor le supone que algunas de las copias recibidas de los datos serán mejor que otras.

Esta redundancia se traduce en mayor probabilidad de aprovechar uno o varios ejemplares recibidos para decodificar correctamente la señal recibida. De hecho la codificación en “espacio-tiempo” combina todas las copias de cada señal recibida de forma óptima para extraer la mayor cantidad de información de cada uno de ellos como sea posible [3].

La topología utilizada en este diseño consta de **dos antenas transmisoras y una receptora**. Cada símbolo es transmitido por ambas antenas en distintos períodos, de forma que un símbolo ocupa dos slots de un bloque de transmisión.

La potencia de este sistema recae en aprovechar la diversidad de la transmisión, cuanto mayor sea la diversidad disponible mejor será el descifrado de éste método.

Este modelo depende de la calidad de los enlaces proporcionados de forma distinta a los otros modelos puesto que aprovecha la contribución de señal de cada canal. En la Figura 17 tenemos el esquema de transmisión del modelo Alamouti, aunque el canal 2 no ofrece la misma calidad que el canal 1, la información recibida no se deshecha.

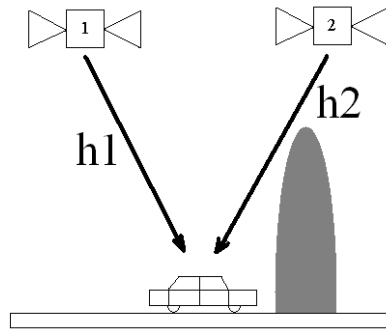


Figura 17. – Esquema de transmisión Alamouti

Como se puede ver en la Figura 18 en el instante $t=1$ el satélite 1 transmite el primer símbolo, a su vez el satélite 2 transmite el segundo símbolo. En el siguiente instante se intercambian los papeles, el satélite 1 transmite el símbolo 2, el satélite 2 transmite el símbolo 1 y así sucesivamente.

El hecho de disponer del mismo símbolo en dos instantes distintos produce la llamada **diversidad de señal**. Este sistema permite reducir la velocidad de bit necesaria para alcanzar una determinada probabilidad de error [8].

Satélite 1	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Satélite 2	-S2	S1*	-S4	S3*	-S6	S5*	-S8	S7*
	$t=0$	$t=1$	$t=2$	$t=3$	$t=4$	$t=5$	$t=6$	$t=7$

Figura 18.- Representación del código Alamouti

De un modo más visual podemos ver la Figura 19 donde se muestra el esquema de codificación de Alamouti empleando dos antenas en transmisión y una antena en recepción.

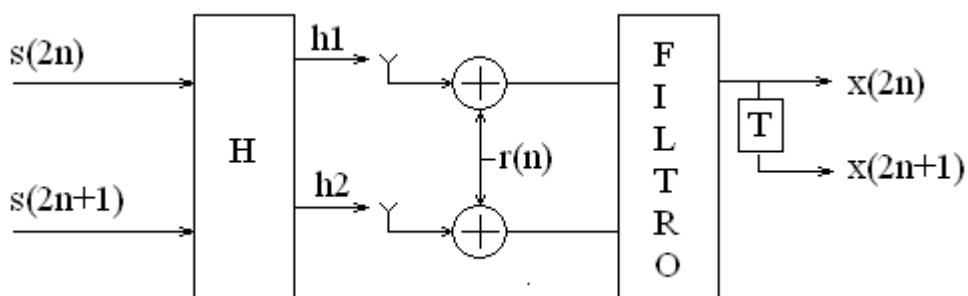


Figura 19.- Esquema de transmisión Alamouti

En este esquema se considera una fuente S que genera un símbolo complejo $s(n)$ en cada instante de tiempo n . Cada par de símbolos $[s(2n) \ s(2n+1)]$ se generan en un instante y son procesados en bloque por el codificador Alamouti. El esquema resultante se puede escribir en forma de matriz y se puede expresar normalizando la energía de los símbolos como:

$$S(n) = \sqrt{\frac{E_s}{2}} \begin{bmatrix} s(2n) & -s^*(2n+1) \\ s(2n+1) & s^*(2n) \end{bmatrix}$$

Considerando la primera columna el instante $2n$ y la segunda el instante $2n+1$ de transmisión del codificador.

La técnica de Alamouti es capaz de descifrar un símbolo aunque se haya transmitido a través de un canal con mala calidad. Al observar dos instantes consecutivos podemos analizar los bloques en conjunto, es decir, tal y como se ha visto en la Figura 18, podemos analizar los símbolos 1 y 2 a la vez, después los símbolos 3 y 4 y así sucesivamente.

Para comprender matemáticamente lo que sucede primero se deben definir una serie de conceptos:

- El vector $x(n)$ de observaciones se puede representar matricialmente:

$$x(n) = \begin{bmatrix} x(2n) \\ x^*(2n+1) \end{bmatrix}$$

Cada $x(n)$ forma parte de la información recibida del conjunto de emisores.

- La matriz de canal 'H' representa la ganancia entre cada antena de transmisión y la antena de recepción:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix}$$

- El vector $s(n)$ se representa cada conjunto con símbolos emitidos por la fuente original:

$$s(n) = \sqrt{\frac{E_s}{2}} \begin{bmatrix} s(2n) \\ s(2n+1) \end{bmatrix}$$

- El vector $r(n)$:

$$r(n) = \begin{bmatrix} r(2n) \\ r^*(2n+1) \end{bmatrix}$$

Representa al ruido, la atenuación, el efecto Doppler y, en general, todos los efectos no deseados de la transmisión.

- Finalmente las observaciones de dos instantes consecutivos vendrán descritas por las ecuaciones:

$$x(2n) = s(2n) \cdot h_1 + s(2n+1) \cdot h_2 + r(2n)$$

$$x^*(2n+1) = -s^*(2n+1) \cdot h_1 + s^*(2n) \cdot h_2 + r^*(2n+1)$$

La expresión que relaciona el proceso completo de transmisión viene dada por:

$$\begin{bmatrix} x(2n) \\ x^*(2n+1) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{E_s}{2}} \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s(2n) \\ s(2n+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r(2n) \\ r^*(2n+1) \end{bmatrix}$$

Expresado en forma resumida:

$$x(n) = \mathbf{H} \cdot s(n) + r(n)$$

Como cada $x(n)$ tiene su propio símbolo 1 y símbolo 2 y se recibe un par $[x(2n) \ x(2n+1)]$, trabajamos con dos muestras en recepción del mismo símbolo. De modo que al sumar los dos instantes:

$$x(2n) + x(2n+1) = |s(2n)|(h_1 + h_2) + |s(2n+1)|(h_1 + h_2) + r(2n) + r(2n+1)$$

De modo que para cada símbolo resultará:

$$\left. \begin{aligned} x(2n) &= |s(2n)|(h_1 + h_2) \\ x(2n+1) &= |s(2n+1)|(h_1 + h_2) \end{aligned} \right\} + \text{ruido}$$

Cada $s(2n)$ y $s(2n+1)$ recibe la contribución de h_1 y h_2 , de modo que aunque uno de los canales sea peor que el otro, por pequeña que sea su contribución se sumará al resultado final.

En el aspecto de procesamiento aunque a priori parezca que tarde el doble por el hecho de transmitir en dos instantes el mismo símbolo, a la práctica supone una velocidad equivalente a transmitir un símbolo en cada instante de un sistema SISO (Single Input Single Output). La velocidad obtenida con Alamouti hace que sea competitivo frente al sistema de selección de satélite o el sistema con un solo satélite.

4.3 MODELO DE TRANSMISIÓN CON SELECCIÓN DE SATÉLITE

El modelo de transmisión con selección de satélite tiene como función principal utilizar **un solo transmisor en cada instante** en función del estado del canal. De este modo permite variar de satélite emisor en función de la calidad del enlace ofrecido por cada uno de los disponibles. Así solo se utiliza un satélite en cada instante y éste transmite con toda la potencia P en cada enlace.

Dadas las características del receptor, seleccionar el satélite que ofrece mayor calidad de señal permite evitar las zonas oscuras de cobertura y garantiza que en todo momento se esté conectado a un satélite.

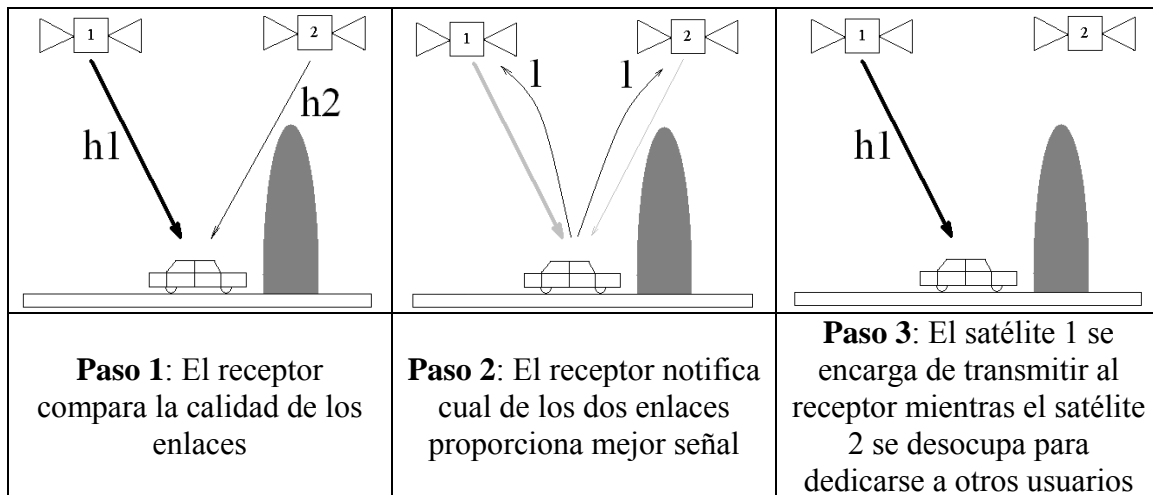


Figura 20.- Esquema de selección de satélite

Para poder utilizar mecanismos de selección será imprescindible que el receptor notifique al conjunto de emisores cual es el canal que ofrece la mejor calidad, el resto podrá dedicar sus recursos a otros usuarios. Dicho de otra manera, utilizar un sistema de estas características permite “liberar” a los satélites que no ofrecen una calidad óptima de transmisión para un usuario determinado.

Tal como se representa en la Figura 20, dado que la cobertura del satélite “2” es suficiente no necesitará al satélite “1” en su transmisión, permitiéndole dedicar sus recursos a otro usuario cuya calidad si pueda garantizar.

Esta estructura aprovecha la **diversidad de emisores** en lugar de la diversidad de señal y, como ya se ha comentado, solo uno de los satélites se ocupará de la transmisión en cada instante.

La necesidad de comunicar al conjunto de satélites de cual es el que ofrece mejor calidad de enlace en un instante determinado puede producir dos situaciones no deseadas:

- Errores en el mensaje de selección. Si el mensaje de selección de satélite se degradado hasta el punto que se confunda la elección, se elegirá el erróneo y se recibiría la señal del peor satélite.
- Variaciones rápidas de canal. Al tratar con receptores móviles el canal óptimo puede variar muy rápidamente. El retardo entre el mensaje de selección y la selección, cercano a los 3ms puede ocasionar que el enlace ya no se realice con el mejor satélite.

4.4 MODELO DE TRANSMISIÓN CON UN SOLO SATÉLITE

Este modelo no dispone de ningún tipo de diversidad, ya que solo es capaz de ofrecer un enlace emisor-receptor cada vez. Por otra banda, es el modelo más económico dado que no requiere de múltiples satélites para transmitir.

No es un sistema útil para comunicaciones móviles dado que la rápida variación del receptor impide que la calidad del canal sea siempre buena.

Basando el estudio en un modelo de satélite geoestacionario desaparecen una serie de efectos que perjudicaban a la señal en los casos anteriores:

- No existen retardos de selección.
- Por muy rápido que varíe el canal no se verá afectado.

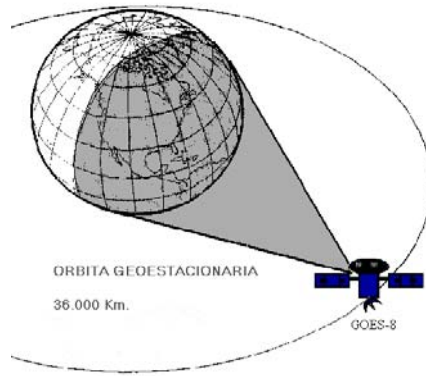


Figura 21.- *Satélite geoestacionario*

A diferencia de los sistemas anteriores, transmitir utilizando un solo satélite implica no disponer de sistema de diversidad de ningún tipo. Se trata de un sistema rígido, no distingue si el canal es bueno o malo dado que solo hay uno.

Este sistema será equiparable al método de selección de canal cuando tenga muchos errores, ya sea de selección de canal como de variación de canal, y las probabilidades de error de símbolo de ambos sistemas se equiparen.

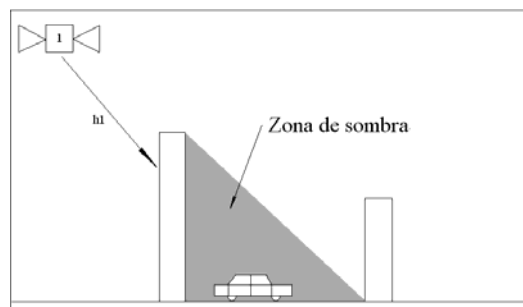


Figura 22.- *Esquema de un solo satélite*

Si por algún motivo el canal queda interrumpido como en la Figura 22 y las reflexiones no ofrecen suficiente calidad de enlace, solo se podrá esperar a salir de la zona de sombra o esperar a que aparezca otro satélite al que conectarse.

Capítulo 5.

SIMULADOR MATLAB

En este capítulo se muestran los resultados de simular entornos de transmisión sometidos a los canales descritos.

Con la finalidad de estudiar el comportamiento de los enlaces vía satélite se han realizado una serie de simulaciones que se encargan de emular escenarios en los que puede viajar la señal. Comparando las estructuras de transmisión con un solo satélite, Alamouti y de selección del mejor emisor explicadas en los apartados 4.2, 4.3 y 4.4 respectivamente podremos analizar como sería su implementación real.

Las simulaciones se han realizado usando el programa Matlab ya que ofrece gran versatilidad para simular los entornos descritos y su parecido con el lenguaje C++ ofrece agilidad de programación. A la hora de simular se han seguido los pasos explicados en el siguiente apartado, de modo que la simulación pueda proporcionar los datos más exactos posibles.

5.1 ESTRUCTURA DEL SIMULADOR

El código en Matlab simula los pasos que daría una señal al viajar desde los satélites hasta el receptor. Se han realizado distintos bloques encargados de realizar cada paso en la transmisión.

En cada simulación se genera un bloque de símbolos que siguen la codificación QPSK como se ve en la Figura 23. Cada símbolo se multiplicará por un canal, Rayleigh, Rice, Lognormal o Suzuki (simulando la transmisión). Se verá afectado por los efectos del ruido. Posteriormente se procederá a la detección utilizando las tres técnicas enunciadas,

Alamouti, selección de satélite y un solo satélite. La detección, a su vez, permitirá comparar los símbolos enviados de los recibidos y contabilizar los símbolos recibidos erróneos en función de la relación señal a ruido (SNR).

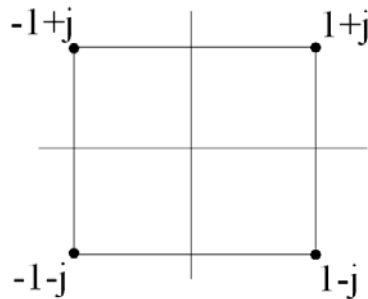


Figura 23.- Esquema de codificación QPSK

Cada simulación sigue una estructura de la siguiente forma:

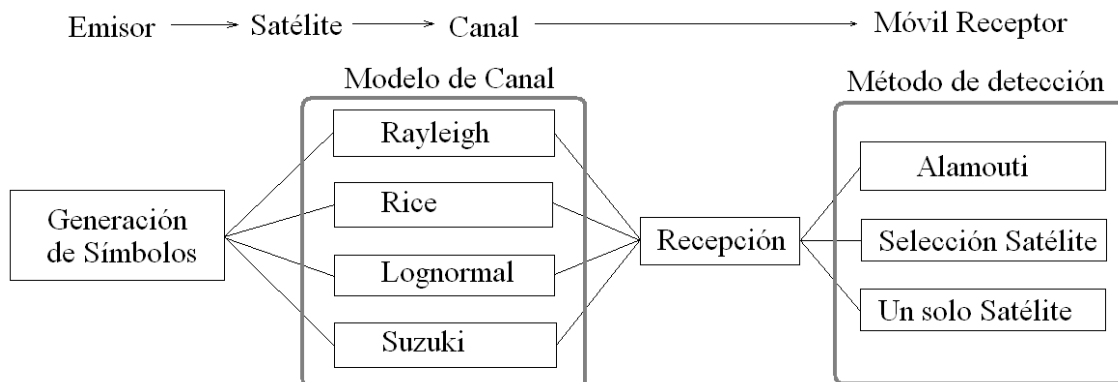


Figura 24.- Estructura del Simulador

Como se muestra en la Figura 24, el simulador está formado por:

- Bloque de generación de símbolo: encargado de generar símbolos aleatorios de codificación QPSK, es decir, del tipo: $(+1+j)$, $(-1+j)$, $(+1-j)$ y $(-1-j)$.
- Bloque de modelado de canal: se simulan los diferentes modelos de canal estudiados simulando su comportamiento, añadiendo los efectos del ruido y la degradación de la señal.
- Bloque de recepción: se trata de detectar los símbolos enviados mediante las diferentes técnicas (Alamouti, selección de satélite y un solo satélite). En función de los errores de símbolo respecto a los enviados podremos determinar la probabilidad de error (BER).

Cada simulación se ha realizado con un modelo de canal sometido a diferentes circunstancias y utilizando los tres métodos de detección de señal. En las simulaciones se han descrito los modelos de propagación de la señal en canales del tipo Rayleigh, Rice, Lognormal y Suzuki descritos en el apartado

5.2 ESCENARIO ANALIZADO

Como ya se ha explicado, cada modelo de canal simula una situación distinta. Rayleigh no ofrece visión directa, Rice sí dispone de línea de visión directa además de los rayos reflejados, Lognormal está sujeto a movimientos circulares en un entorno con obstáculos para la visibilidad directa y Suzuki combina los casos de Rayleigh y Lognormal.

Se han realizado simulaciones para cada tipo de canal con los respectivos métodos de detección teniendo en cuenta que se producen errores en la selección de satélite debido al mensaje de retorno, es decir, en vez de elegir el satélite con el mejor canal, el mensaje de selección de satélite fallará un tanto por cien de veces. De modo que cuanto más falle, en más ocasiones se estará eligiendo el satélite con peor canal, empeorando la transmisión.

En cada caso se ha simulado una transmisión con una frecuencia de 20GHz, con una tasa de transmisión de 24Mbaudios/segundo, datos muy parecidos al estándar DVB-S2 utilizado en televisión por satélite.

Se han realizado dos bloques de simulaciones, como se muestra en la Figura 25, para distintas velocidades del móvil una de 10m/s y otra de 100m/s. En cada caso se generan 40000 símbolos y de cada gráfica se extraen los valores de probabilidad de error para una SNR de 0, 5, 10, 15 y 20dB. Con estos datos se construye las gráficas finales donde se verá la evolución de la probabilidad de error del mensaje de retorno en función del número de errores con una SNR fija.

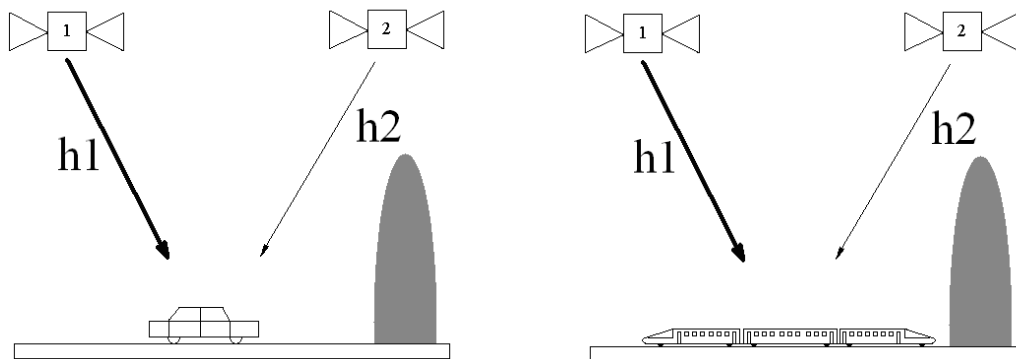


Figura 25.- Modelos estudiados, vehículo urbano (izquierda) y tren de alta velocidad (derecha)

El tipo de canal utilizado en las simulaciones caracteriza los diferentes entornos urbanos en los que se simula. Caminando entre edificios, por la mitad de un parque, espacios cerrados o entrando y saliendo de túneles, son circunstancias que se pueden dar al desplazarse a través de una ciudad, y son este tipo de situaciones las que se quieren estudiar.

Dado que el estudio está centrado en los errores en el mensaje de selección de satélite, éste será el único sistema que se verá afectado ya que el método Alamouti y el de un solo satélite no precisan de selección alguna.

Con un solo satélite la conexión establecida ofrecerá un canal de alta calidad alrededor del 50% de las ocasiones mientras que el otro 50% será un enlace de mala calidad.

El sistema de selección de satélite aprovecha la probabilidad estadística de que no puedan suceder dos errores por ambos canales en el mismo instante, pero esta ventaja se ve afectada por la selección de satélite.

Alamouti aprovecha la señal de ambos satélites sin “importar” la calidad que ofrezca cada uno y es capaz de detectar señales en umbrales muy por debajo del resto.

Los errores que se producen en el **caso de selección de satélite**, como se ve en la Figura 26, siguen los pasos siguientes descritos a continuación. En el primer instante el receptor elige al primer satélite como mejor enlace, pero cuando el receptor notifica con cual de los dos satélites se quiere quedar se produce un error en el mensaje de subida y se queda con el que tiene peor canal.

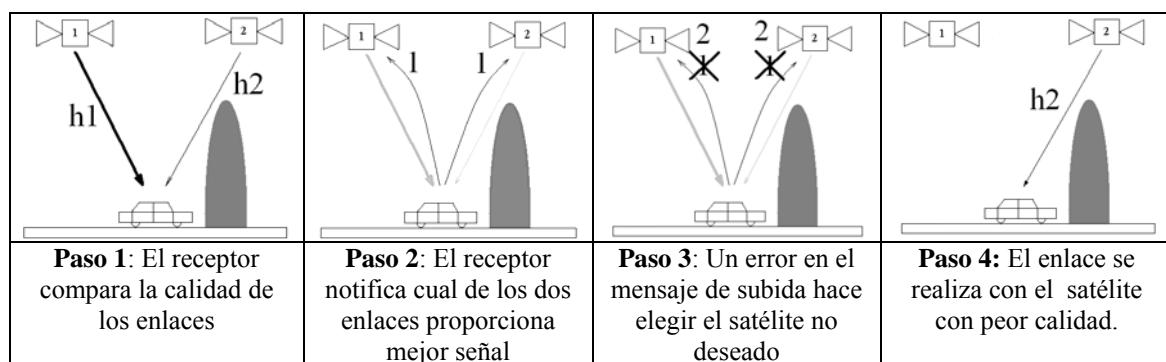


Figura 26.- Proceso de selección de satélite con errores en el mensaje de retorno

En los apartados siguientes se mostrarán los resultados de las simulaciones para cada uno de los modelos de canal en función de la velocidad que se haya tomado.

Las gráficas muestran la evolución de la probabilidad de error a medida que aumenta el ruido. El **eje x** corresponde a la **SNR del sistema** y el **eje y** a la probabilidad de error de símbolo (**BER**).

Se grafican los tres sistemas de transmisión estudiados (Alamouti, selección de satélite y un solo satélite) con la particularidad que el sistema de selección de mejor satélite tiene errores en la elección.

5.3 DESPLAZAMIENTO A 10m/s

Como ya se ha comentado, se trabaja con dos tipos de receptores móviles, uno de alta velocidad y otro más cotidiano. Empezaremos viendo la evolución de los modelos con una velocidad de 10m/s.

En los apartados siguientes se mostrará la evolución de la probabilidad de error para los cuatro modelos de canal sometidos a tres tipos de detección. En cada uno se mostrará la evolución de los tres modelos de detección a medida que aumenta la probabilidad de error en el mensaje de retorno.

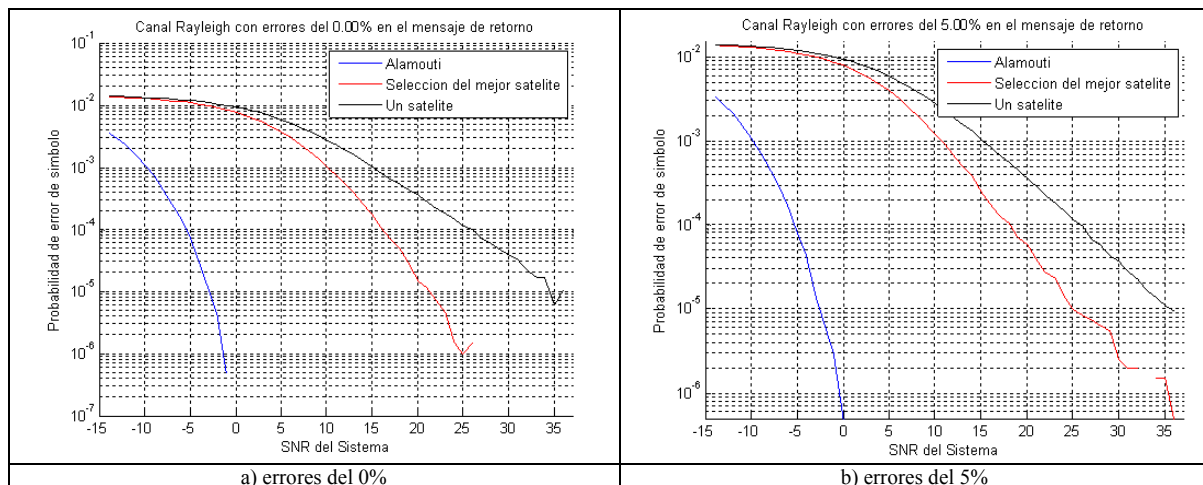
5.3.1 MODELADO CON CANAL RAYLEIGH A 10m/s

En este primer apartado se muestran los cambios del modelo de selección de satélite para un móvil que se desplaza a una velocidad de 10m/s.

A medida que aumenta la probabilidad de error en el mensaje de retorno, el sistema de selección de satélite va empeorando su calidad.

La variación del sistema de selección de satélite se hace de forma progresiva sin presentar saltos abruptos en la calidad de los enlaces.

En la Figura 27 hay representadas cada una de las gráficas correspondientes a cada nivel de errores en el mensaje de retorno.



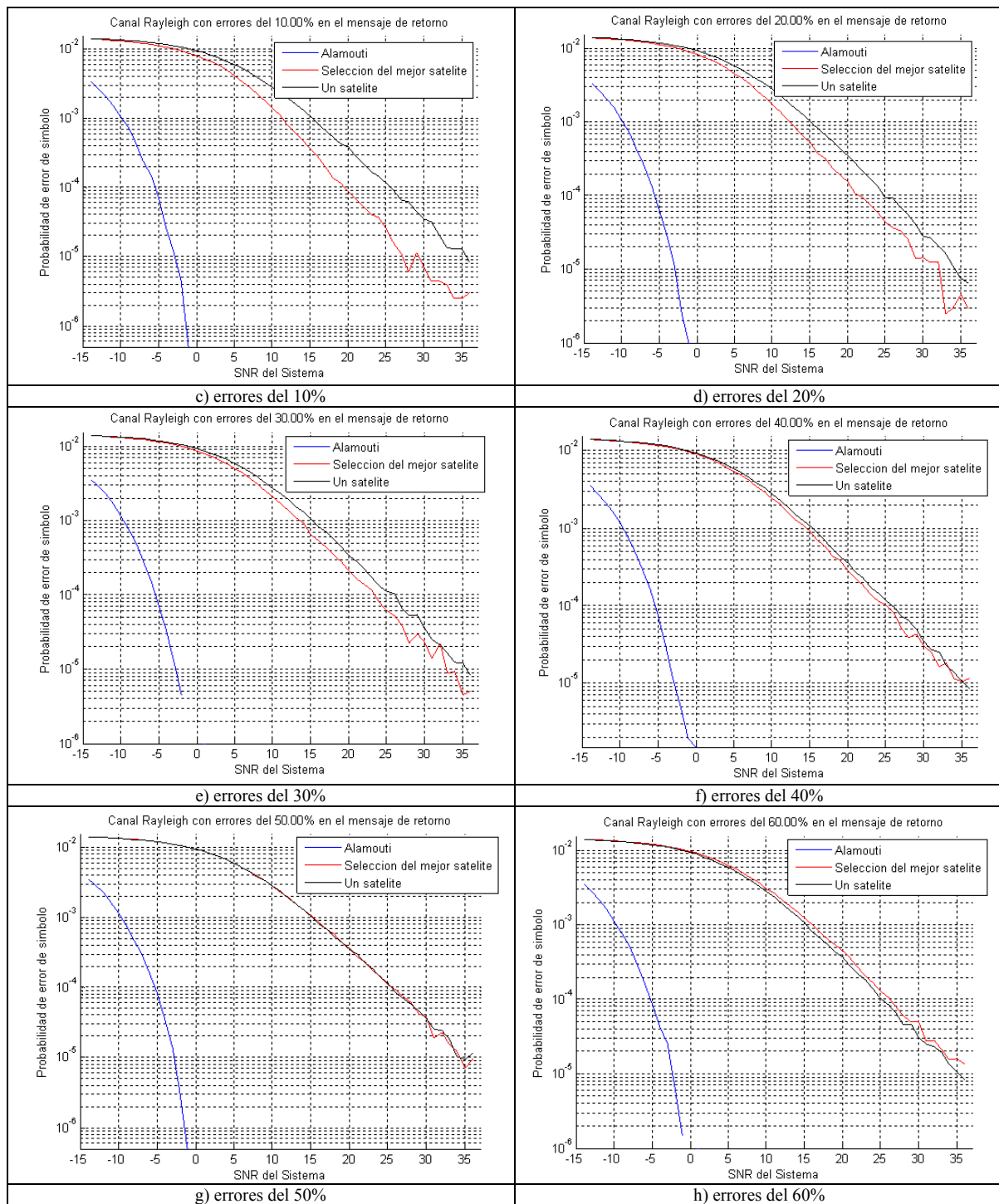


Figura 27.- Evolución de la probabilidad de error para incrementos de los errores en el mensaje de retorno con canal Rayleigh a 10m/s

Como se puede apreciar, la línea roja, correspondiente al modelo de selección de satélite avanza progresivamente hacia la línea negra, un solo satélite, hasta superarla en el nivel del 60% de errores en el mensaje de retorno.

Si quisiéramos disponer de una comunicación sin errores, 100% fiable, nos bastaría utilizar el método Alamouti con 0dB de SNR. En cambio con el método de selección o con el método de un solo satélite se debería superar los 40dB de SNR, valor

impracticable en comunicaciones por satélite si se pretende ofrecer servicio a múltiples usuarios.

A continuación se mostrarán las tablas con la evolución de las gráficas anteriores centradas en un nivel de SNR fija. De este modo, acompañados de la correspondiente gráfica, se podrá visualizar la evolución de tres puntos concretos de la SNR.

En cada gráfica se podrá ver desde que punto de diferencia parte cada probabilidad de error y con que velocidad tiende a variar.

- SNR=5dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	0	0	0	0	0	0	0	0
Selección satélite (10^{-3})	3.709	3.966	4.135	4.497	5.029	5.4	5.918	6.341
Un solo satélite (10^{-3})	5.824	5.891	5.865	5.871	5.836	5.923	5.869	5.907

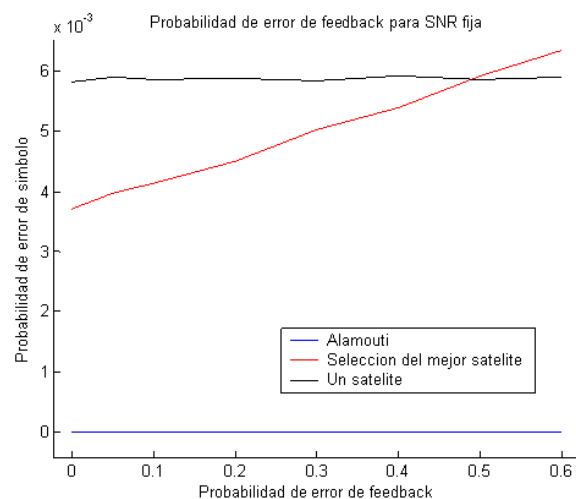


Figura 28.- Evolución para SNR de 5dB

La alta diversidad del sistema permite al método Alamouti no presentar errores de transmisión en ningún nivel de SNR. Como veremos para los casos de SNR de 10 y 20dB la probabilidad de error del sistema de selección y de un solo satélite mejorará con el aumento de SNR.

- SNR=10dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	0	0	0	0	0	0	0	0
Selección de satélite (10^{-3})	1	1.201	1.384	1.73	2.076	2.398	2.812	3.02
Un solo satélite (10^{-3})	2.741	2.775	2.792	2.77	2.757	2.787	2.761	2.775

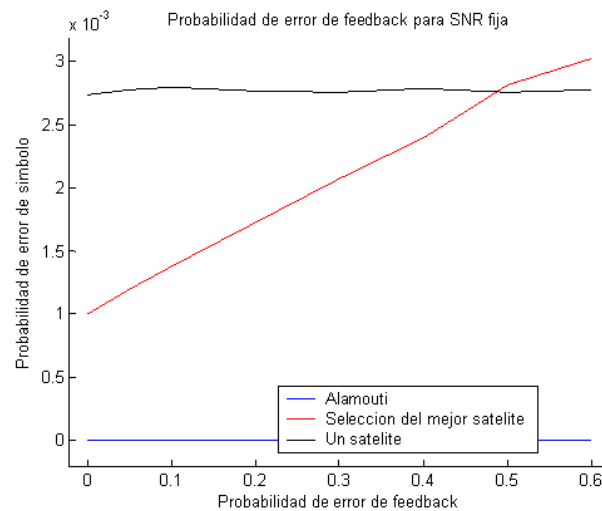


Figura 29.- Evolución para SNR de 10dB

Como se puede ver en la Figura 29 la probabilidad de error de los sistemas de detección y el de un solo satélite ha disminuido considerablemente gracias al aumento de potencia.

- SNR=20dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	0	0	0	0	0	0	0	0
Selección de satélite (10^{-3})	0.0145	0.0575	0.087	0.154	0.2095	0.2815	0.3575	0.4485
Un solo satélite (10^{-3})	0.3545	0.3555	0.374	0.3505	0.335	0.3595	0.3425	0.363

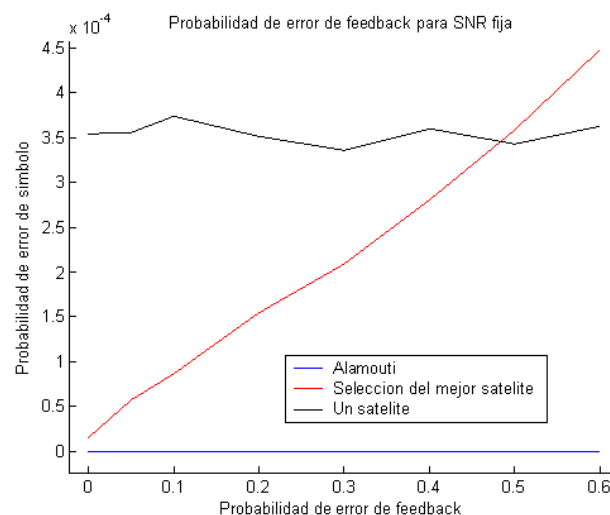


Figura 30.- Evolución para SNR de 20dB

En los tres casos SNR de 5, 10 y 20dB los sistemas Alamouti y un solo satélite no presentan apenas variaciones. Se consideran constantes dado que no dependen de la

selección de satélite, las pequeñas variaciones se deben a pequeñas variaciones en cada realización.

Se hace relevante como con una SNR pequeña el nivel de la probabilidad de error entre el sistema de selección y el de un solo satélite están muy cercanos y a medida que aumenta la probabilidad de error del mensaje de retorno se aproximan cada vez mas, hasta superarlo pasado el 50%.

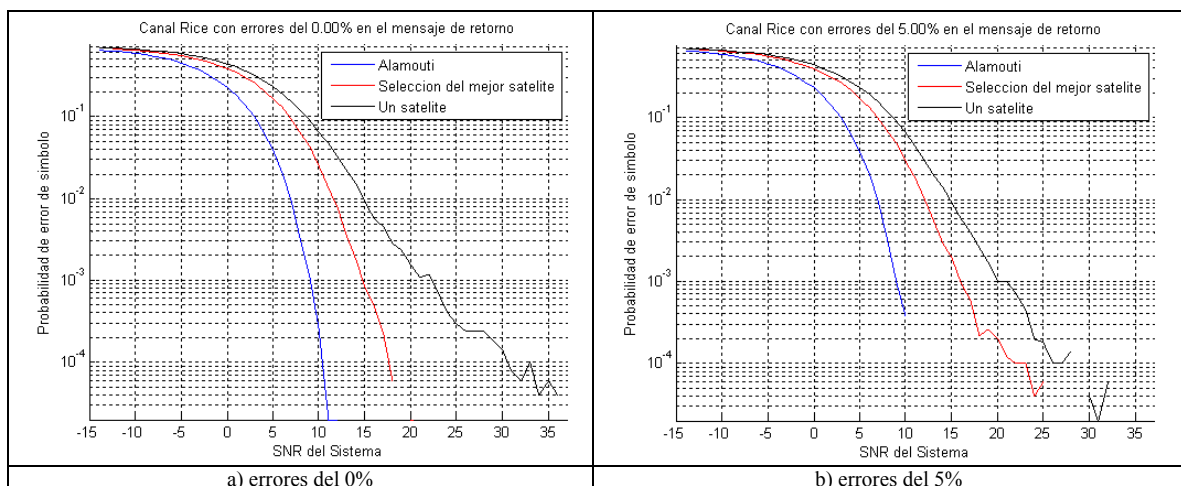
Para una SNR de 20 dB la variación, a medida que aumenta la probabilidad de error en el mensaje de retorno, se hace muy rápida dado que la calidad del enlace empieza siendo muy alta.

5.3.2 MODELADO CON CANAL RICE A 10m/s

En este apartado se mostrará el comportamiento bajo un modelo de canal con distribución Rice.

Como se ha explicado en el apartado 4.2, el sistema Alamouti aprovecha la diversidad de las reflexiones multitrayecto para aumentar la calidad de sus enlaces. El modelo de transmisión Rice se caracteriza por disponer de línea de visión directa con el receptor, además que la línea de visión directa tiene mas energía que la suma de las reflexiones. Esto es sinónimo de tener menor diversidad, en consecuencia el sistema Alamouti funciona peor que en el caso Rayleigh, aunque haya línea de visión directa.

Las gráficas mostradas a continuación en la Figura 31 muestran la evolución de los sistemas Alamouti, selección de satélite y un solo satélite. Como se ha comentado, destaca el hecho que el sistema Alamouti funcione bastante peor que en el caso de tener un canal Rayleigh.



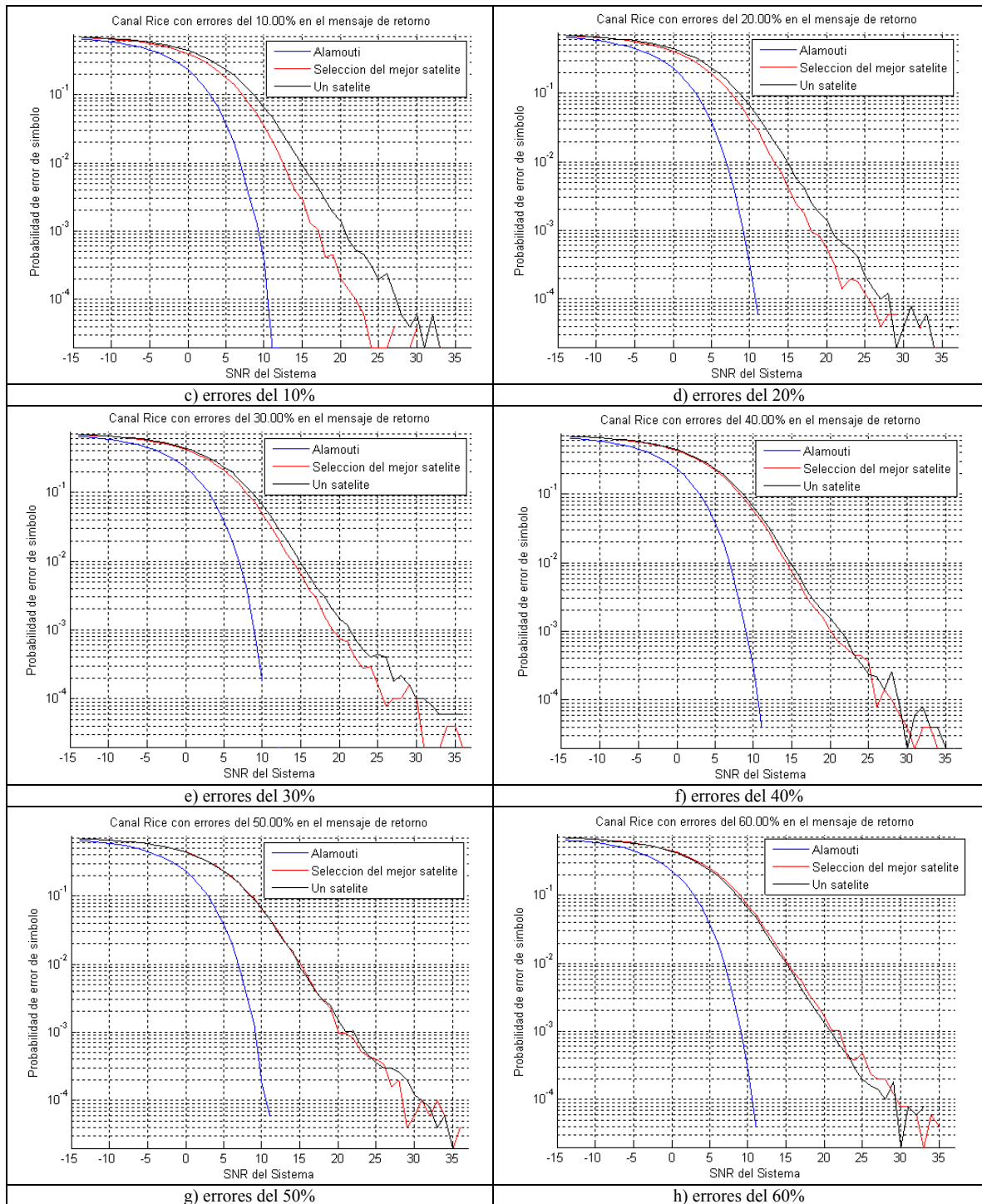


Figura 31.- Evolución de la probabilidad de error para incrementos de los errores en el mensaje de retorno con canal Rice a 10m/s

Alamouti sigue siendo el sistema que ofrece una menor tasa de errores para cualquier nivel de SNR dadas sus propiedades.

Para no tener ningún tipo de errores en ninguno de los tres sistemas deberíamos trabajar con una SNR de, como mínimo, 30dB para los sistemas de selección de satélite y un solo satélite. Mientras que con el método Alamouti bastaría con superar ligeramente los 10dB de SNR.

Con el fin de ver en detalle la evolución de la probabilidad de error para una SNR determinada se han tomado medidas de varios puntos. Se puede visualizar gráficamente la diferencia de probabilidad de error de los tres métodos de detección.

Trasladar este resultado a comunicaciones por satélite supone una diferencia de potencia muy considerable de cara a asegurar energía para múltiples usuarios.

- SNR=5dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti (10^{-3})	38.48	38.48	37.58	38.52	38.9	38.72	38.76	37.48
Selección satélite (10^{-3})	166.8	171.9	176.3	192.1	209.7	221.6	230.8	246.7
Un solo satélite (10^{-3})	230.3	231.7	231.3	232.9	231.9	233.3	233.9	232.6

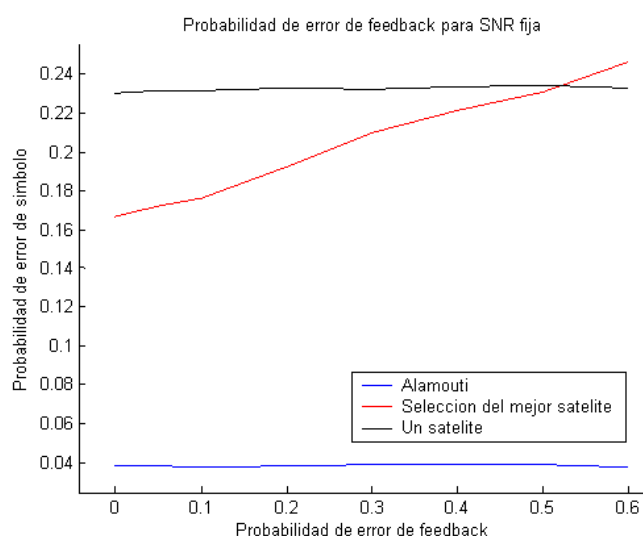


Figura 32.- Evolución para SNR de 5dB

Con una SNR de 5dB la probabilidad de error de símbolo es elevada para los tres sistemas, claro que hay bastante diferencia como ya se ha comentado con el sistema Alamouti. Tanto el sistema de selección como el sistema con un solo satélite tienen probabilidades de error muy cercanas.

Si se quisiera trabajar con esta SNR, no saldría muy a cuenta disponer de dos satélites para las selecciones.

- SNR=10dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti (10^{-3})	0.38	0.38	0.38	0.32	0.18	0.3	0.18	0.28
Selección de satélite (10^{-3})	25.3	29.3	34.02	40.66	48.7	55.84	62.82	70.92
Un solo satélite (10^{-3})	63.12	65.16	63.16	65.52	65.8	64.38	65.96	64.7

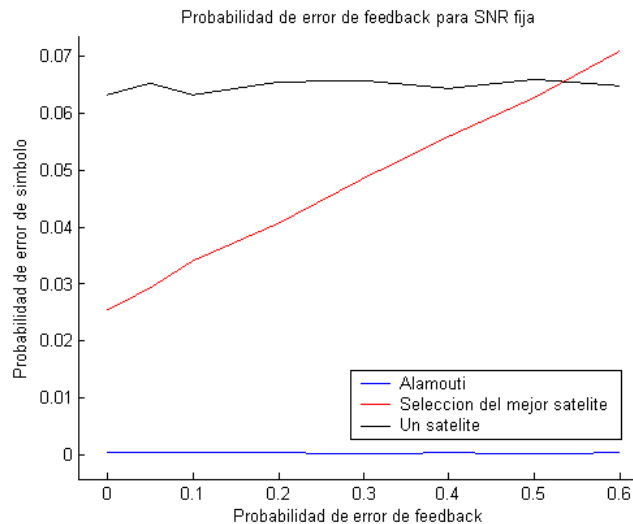


Figura 33.- Evolución para SNR de 10dB

A diferencia de trabajar con 5 dB de SNR, si pasamos a ver la evolución para 10dB podemos ver como la calidad del modelo de selección de satélite se diferencia bastante con el modelo de un solo satélite. Claro que a medida que aumenta la tasa de errores del mensaje de retorno pierde calidad más deprisa.

- SNR=20dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti(10^{-3})	0	0	0	0	0	0	0	0
Selección de satélite (10^{-3})	0	0.2	0.2	0.54	0.74	0.98	0.98	1.6
Un solo satélite (10^{-3})	1.42	1.35	1.4	1.38	1.44	1.5	1.48	1.5

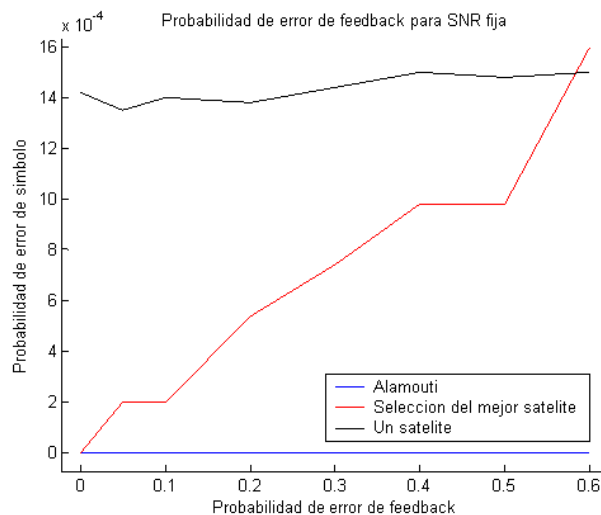


Figura 34.- Evolución para SNR de 20dB

Pasamos ahora a analizar el caso de una SNR de 20dB, la calidad que proporciona este nivel de potencia hace equiparable el sistema Alamouti con el de selección de satélite. La parte negativa de esta situación es que con pequeñas variaciones del error del mensaje de retorno, el nivel de la probabilidad de error aumenta muy rápidamente hasta superar el sistema con un solo satélite.

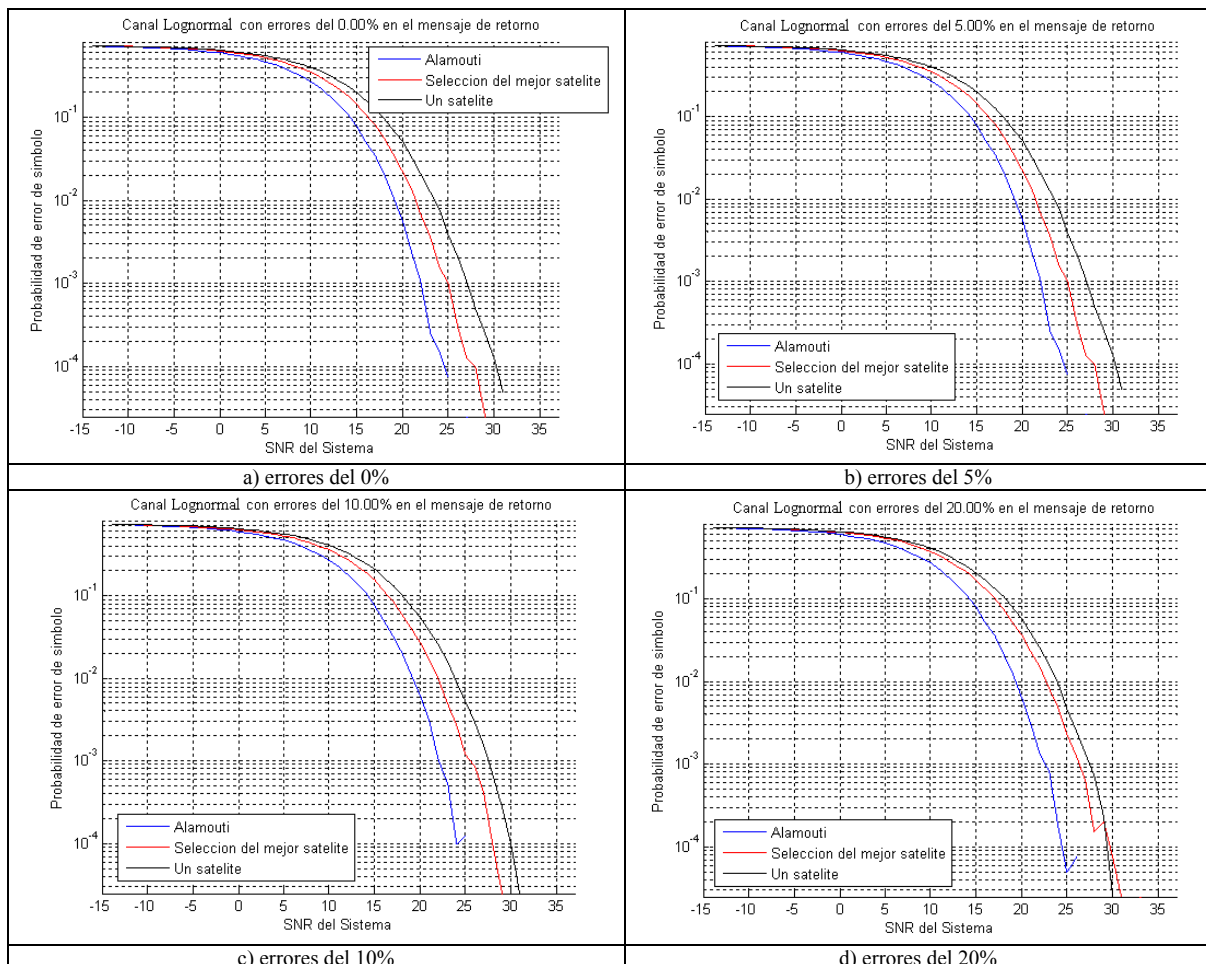
5.3.3 MODELADO CON CANAL LOGNORMAL A 10m/s

En este apartado se mostrará la evolución de la probabilidad de error de símbolo bajo los efectos de un canal Lognormal. Como se ha explicado en el apartado 2.4.4, este tipo de modelo de canal se da en espacios cerrados sin línea de visión directa, con el móvil en movimiento y con obstáculos de las reflexiones.

El hecho de que además este modelo tenga pequeñas variaciones en instantes muy pequeños hará que la evolución de la probabilidad de error de símbolo tome recorrido de forma logarítmica.

A continuación se mostrarán las gráficas correspondientes al aumento en la probabilidad de error del mensaje de retorno. Cabe destacar que los tres métodos de detección tienen un comportamiento muy parecido.

A diferencia de los casos anteriores, el método Alamouti, aunque sigue siendo el que ofrece mejor calidad, también se ve afectado en gran medida por las condiciones de este tipo de canal.



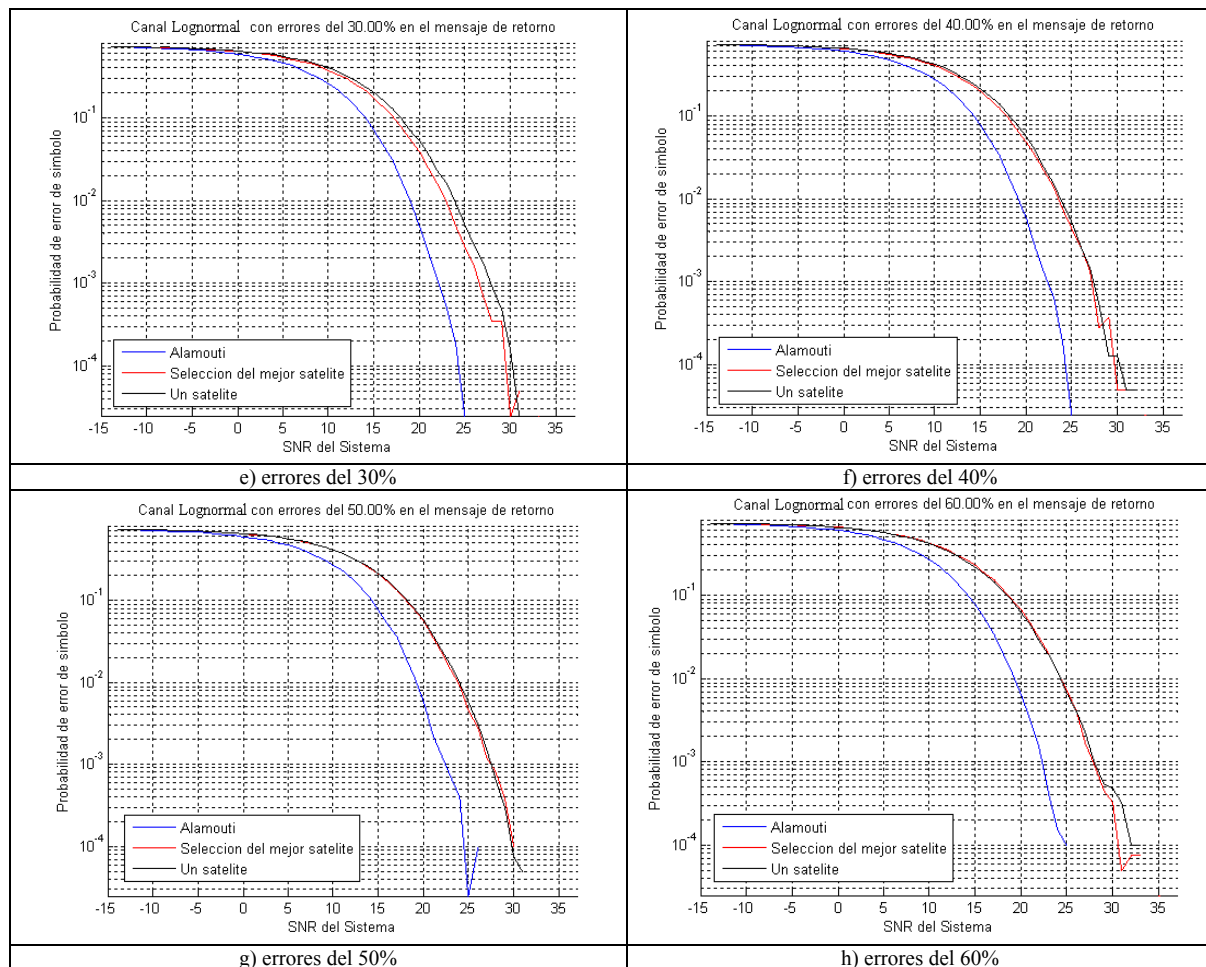


Figura 35.- Evolución de la probabilidad de error para incrementos de los errores en el mensaje de retorno con canal Lognormal a 10m/s

Como en los casos anteriores, los errores del mensaje de retorno en selección de canal solo influyen sobre el sistema de selección de satélite. En la Figura 35 podemos ver la evolución del sistema de selección de satélite a medida que aumenta la tasa de errores en el mensaje de retorno.

En esta ocasión, dadas las características del canal, si nos interesara reducir la probabilidad de error a 0, deberíamos trabajar con una SNR de 30dB para el método Alamouti y mayor de 30dB para los otros dos métodos.

Las propiedades de este canal afectan a los tres sistemas de forma considerable. Si pasamos a visualizar las probabilidades de error para SNR fijas podremos ver la influencia sobre cada sistema.

- SNR=5dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti (10^{-3})	464.8	464.8	468.3	465.9	466.9	469.7	468.2	461.3
Selección satélite (10^{-3})	512.5	517.7	528.1	529.6	534.8	556.3	553.6	563.3
Un solo satélite (10^{-3})	557.6	556.8	555.4	552.1	552.6	558.4	558.5	565.3

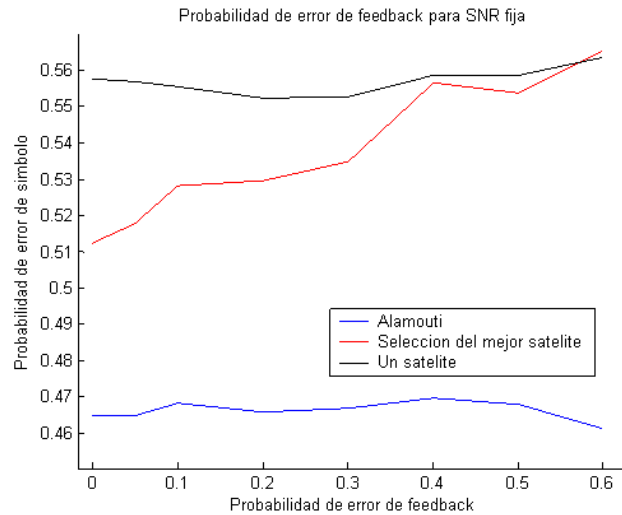


Figura 36.- Evolución para SNR de 5dB

Como se puede observar en la Figura 36, el modelo de canal Lognormal hace que el comportamiento que, en los casos anteriores (Rayleigh y Rice), era constante ya no siga una línea recta. Para una SNR de 5dB se ha representado como en cada realización varía significativamente. Destaca que en esta situación el sistema de la selección de satélite alcanza el nivel de un solo satélite para errores de más del 50%, esto es debido a que las rápidas variaciones entre realizaciones hacen que sea un canal poco predecible.

- SNR=10dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti (10^{-3})	263.4	263.4	266.2	269.1	257.5	274.3	269.5	263.9
Selección satélite (10^{-3})	340.2	346.6	361.8	370.2	373.4	400.6	409.4	421.3
Un solo satélite (10^{-3})	404.7	396.7	405.8	402.6	400.4	412.5	407.3	411.1

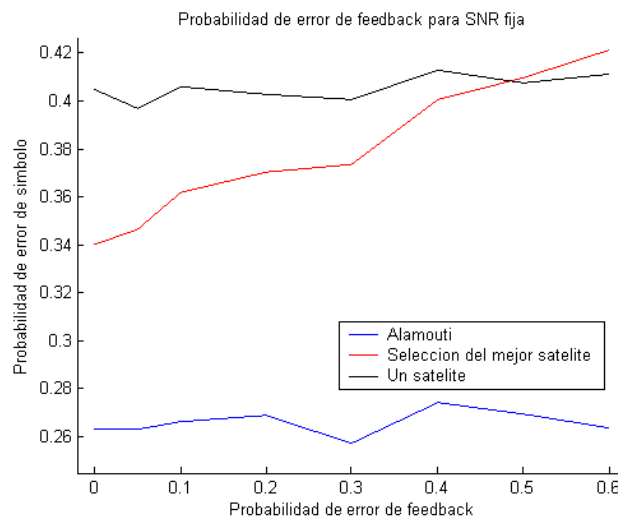


Figura 37.- Evolución para SNR de 10dB

La probabilidad de error de símbolo para el caso de 10dB, como se puede ver en la Figura 37, se ha reducido casi a la mitad respecto al caso de SNR de 5dB. Del mismo

modo que para 5dB los resultados de un satélite y Alamouti siguen sin tener un comportamiento constante dadas las rápidas variaciones del canal.

- SNR=20dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti(10^{-3})	5.55	5.55	5.975	6.225	4.7	5.675	5.675	6.125
Selección satélite (10^{-3})	20.4	21.67	26.57	35.77	37.72	47.77	54.95	65.73
Un solo satélite (10^{-3})	50.95	50.27	53.12	55.95	52.3	54.35	56.75	60.2

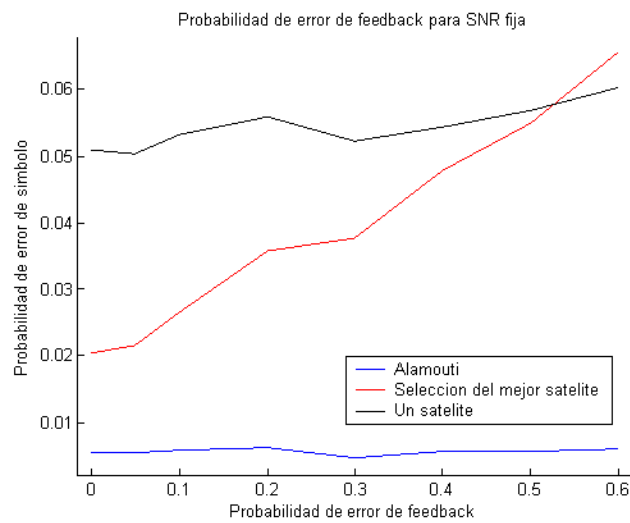


Figura 38.- Evolución para SNR de 20dB

Para el caso de SNR de 20dB de la Figura 38 se hace notar el comportamiento logarítmico de este modelo de canal, respecto al caso de 5dB la probabilidad de error se ha reducido cerca de un 50% y, respecto al caso de 10dB se ha reducido casi un 25%. Aumentando al doble la SNR (de 10 a 20dB) ha mejorado de forma considerable la probabilidad de error de símbolo.

5.3.4 MODELADO CON CANAL SUZUKI A 10m/s

En este apartado se mostrara el comportamiento de las transmisiones sometidas a un canal Suzuki.

Como se ha explicado en el apartado 2.4.5 *MODELO CON DISTRIBUCIÓN SUZUKI*, este canal combina los efectos de una transmisión Rayleigh y una Lognormal. En las gráficas de las simulaciones realizadas veremos como la componente Rayleigh de la transmisión afecta de forma significativa a la probabilidad de error.

En la Figura 39 podemos ver tres gráficas correspondientes al modelo Rayleigh, Lognormal y Suzuki para una probabilidad en el mensaje de retorno del 0%. En estas gráficas se puede apreciar la contribución como la contribución Rayleigh tiene mas influencia que la lognormal.

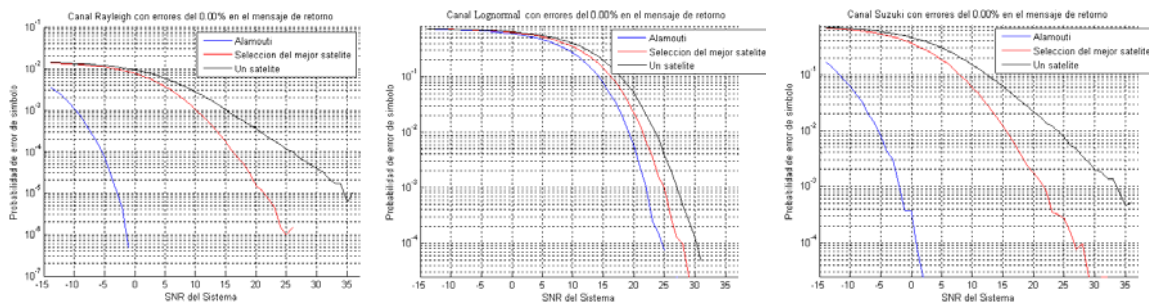
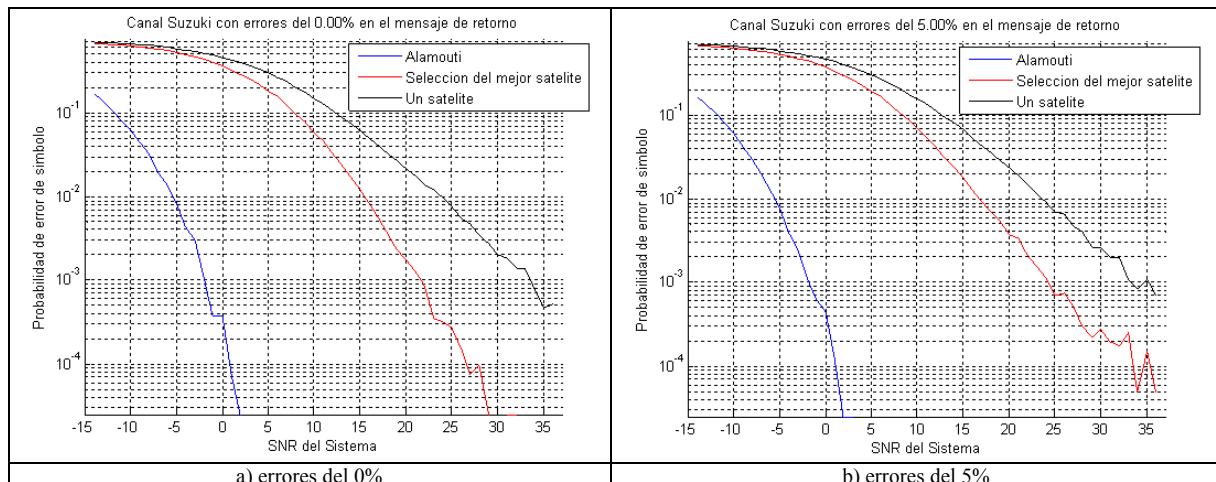


Figura 39.- Probabilidad de error de símbolo de los casos Rayleigh, Lognormal y Suzuki

Este modelo de distribución de canal refleja un comportamiento más cercano a la realidad, el modelo Lognormal representa un escenario con múltiples obstáculos que impiden el paso a los rayos reflejados para un receptor en movimiento. Este modelo se acerca a un escenario sin tantos obstáculos que superar.

A la práctica, la contribución Rayleigh, permitirá que el sistema Alamouti aproveche los efectos de diversidad de señal. Mostrará un comportamiento mucho mejor que el de los otros sistemas.

A continuación se mostrarán las gráficas de la evolución de los tres sistemas frente al aumento de la tasa de errores en el mensaje de retorno.



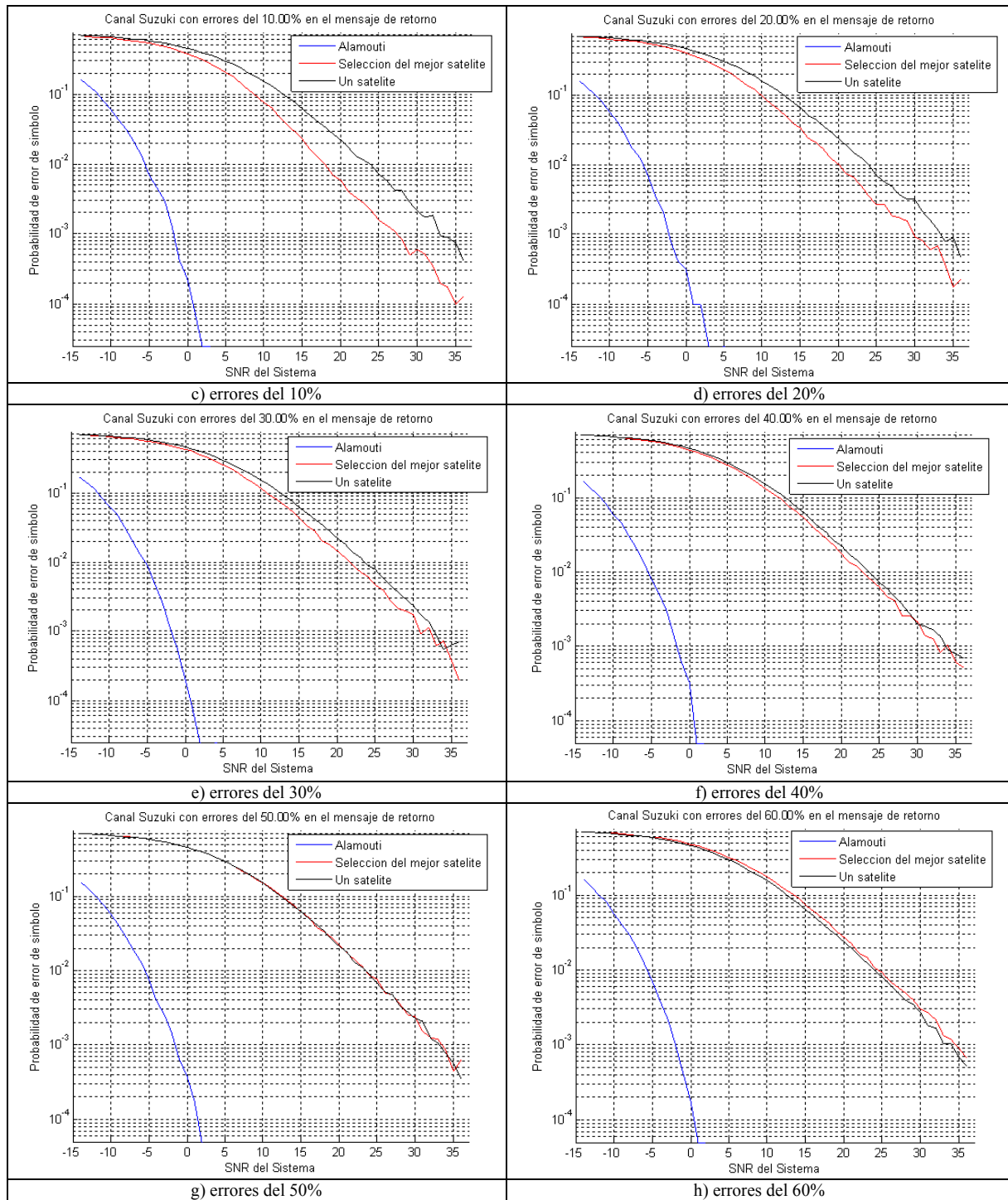


Figura 40.- Evolución de la probabilidad de error para incrementos de los errores en el mensaje de retorno con canal Suzuki a 10m/s

La diferencia entre el sistema de selección de satélite y el sistema de un solo satélite empieza siendo considerable (Figura 40 a)) pero a medida que aumenta la tasa de errores en el mensaje de retorno esta diferencia se estrecha.

Del mismo modo que en el caso Rayleigh, para el modelo de canal Suzuki también aparece una gran diferencia entre los sistemas Alamouti y selección de satélite. Teniendo el primero una probabilidad de error 1000 veces por debajo del sistema de selección.

Si quisiéramos una transmisión con una probabilidad de error de 10^{-2} , con el sistema Alamouti bastaría una SNR de -6dB, mientras que para el sistema de selección de satélite, sin tener en cuenta errores en el mensaje de retorno, harían falta unos 15dB de SNR. Y para el sistema con un solo satélite subiría hasta los 22dB.

Para mostrar la evolución de la probabilidad de error de símbolo se han tomado muestras en diferentes SNR fijas, a continuación aparecen los valores de la probabilidad de error correspondiente a cada incremento de la tasa de error del mensaje de retorno.

- SNR=5dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	0	0	0	0	0	0	0	0
Selección satélite (10^{-3})	182.4	195.6	203.4	232.6	251.9	274.1	293.6	318.5
Un solo satélite (10^{-3})	300.3	301.4	293.2	304.2	296.5	294.7	294.9	301

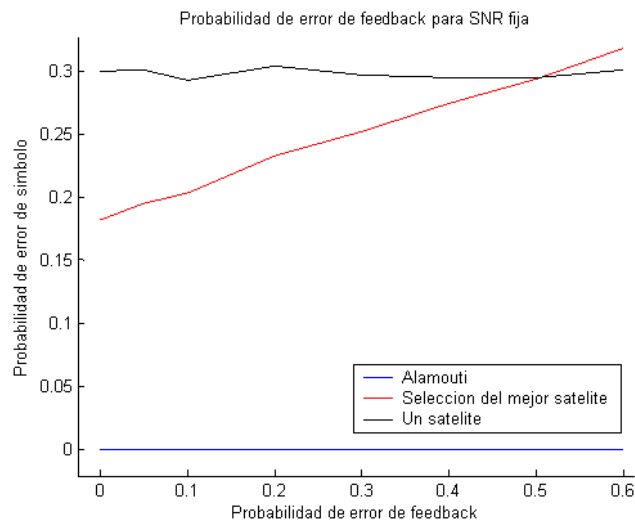


Figura 41.- Evolución para SNR de 5dB

Para una SNR de 5dB el sistema Alamouti no tiene errores, el sistema de selección de satélite está cercano al sistema de un solo satélite y la evolución que sigue, a medida que aumenta la tasa de errores en el mensaje de retorno, no es muy rápida.

El siguiente caso evalúa el comportamiento para una SNR de 10dB:

- SNR=10dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	0	0	0	0	0	0	0	0
Selección satélite (10^{-3})	58.35	68.25	75.72	97.5	114	132.6	150.2	173.8
Un solo satélite (10^{-3})	147.6	157.3	151.5	156.1	151.5	152.2	150.6	156.4

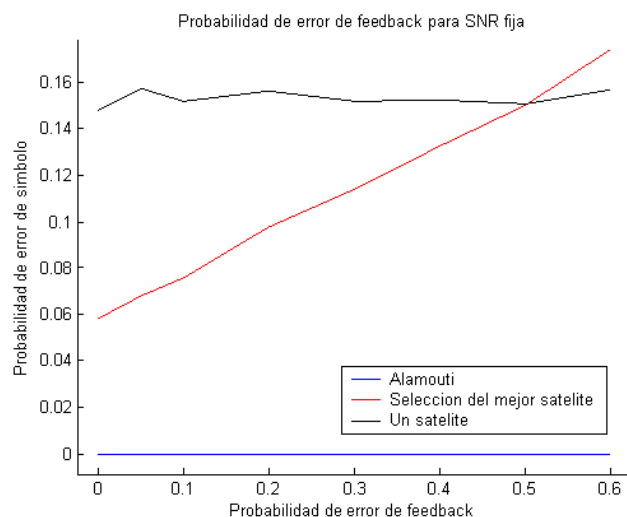


Figura 42.- Evolución para SNR de 10dB

El aumento de la potencia hace que tanto el sistema de selección como el de un solo satélite presenten probabilidades de error casi a la mitad que en el caso de SNR=5dB.

- SNR=20dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	0	0	0	0	0	0	0	0
Selección satélite (10^{-3})	1.75	3.75	5.75	10	14.22	17.12	21.8	27.22
Un solo satélite(10^{-3})	21.52	23.7	22.12	23.27	22.2	22.02	21.1	23.42

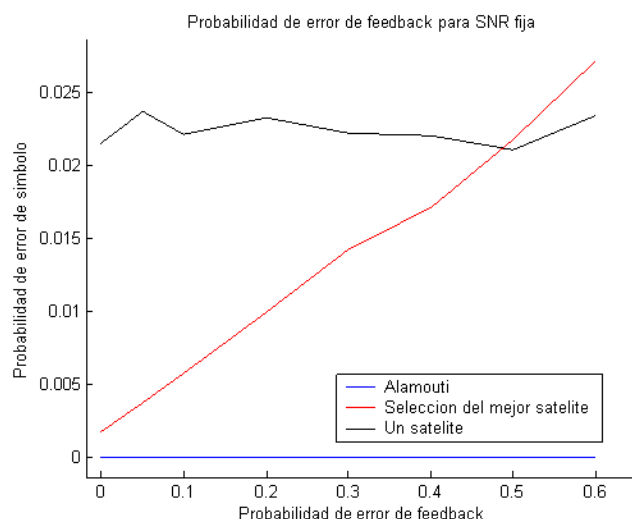


Figura 43.- Evolución para SNR de 20dB

Con una SNR de 20dB el sistema de selección presenta un comportamiento muy por debajo del sistema de un solo satélite, con este nivel se puede equiparar al comportamiento del sistema Alamouti. Por contrapartida, con pequeños aumentos en la tasa de errores del mensaje de retorno, el comportamiento del sistema de selección de satélite empeora muy deprisa.

5.4 DESPLAZAMIENTO A 100m/s

En este apartado veremos la evolución de la probabilidad de error sobre receptores móviles de alta velocidad. En esta ocasión, el receptor se desplazará a 100m/s o lo que es lo mismo, a 360km/h. velocidad alcanzada por los trenes de alta velocidad.

Se pretende hacer un estudio del funcionamiento del sistema de diversidad en alta velocidad, sin tener en cuenta los efectos que puedan tener las sujeciones metálicas de la catenaria o la propia catenaria.

En los apartados siguientes se mostrará la evolución de la probabilidad de error para los cuatro modelos de canal sometidos a tres tipos de detección. En cada uno se mostrará la evolución de los tres modelos de detección a medida que aumenta la probabilidad de error en el mensaje de retorno.

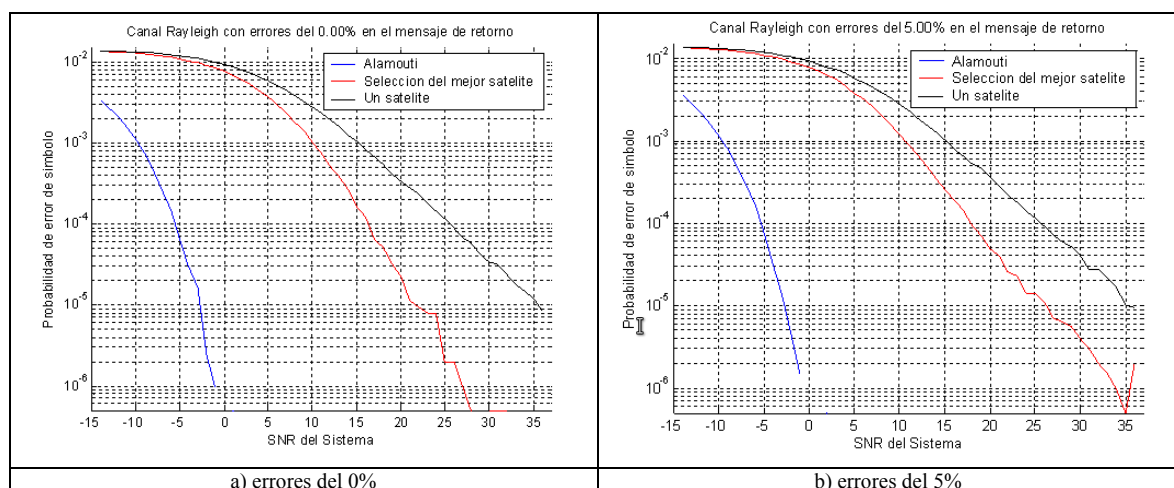
En cada caso se podrá comparar el modelado de baja velocidad con el de alta velocidad y se detallarán las diferencias.

5.4.1 MODELADO CON CANAL RAYLEIGH A 100m/s

En este apartado veremos el comportamiento de los tres sistemas estudiados sometidos a una transmisión con canal Rayleigh y con errores en el mensaje de retorno del sistema de selección de satélite. A diferencia del apartado anterior en esta ocasión la velocidad del móvil se ha aumentado hasta los 100m/s (360km/h). Al principio, el sistema de selección de satélite presentará una tasa de errores por debajo del sistema de un solo satélite. A medida que aumente el error del mensaje de retorno, el comportamiento del sistema de selección de satélite se aproximará al comportamiento del sistema de un solo satélite hasta llegar a funcionar peor.

Veremos como a medida que aumentamos la tasa de errores del mensaje de retorno la gráfica de selección de satélite se irá aproximando a la gráfica de un solo satélite dado que su comportamiento será cercano al 50% de calidad que puede ofrecer un solo satélite.

A continuación se muestra la Figura 44, donde se muestra la evolución de la probabilidad de error en el sistema de selección de satélite a medida que aumenta la tasa de errores en el mensaje de retorno. Veamos como evoluciona:



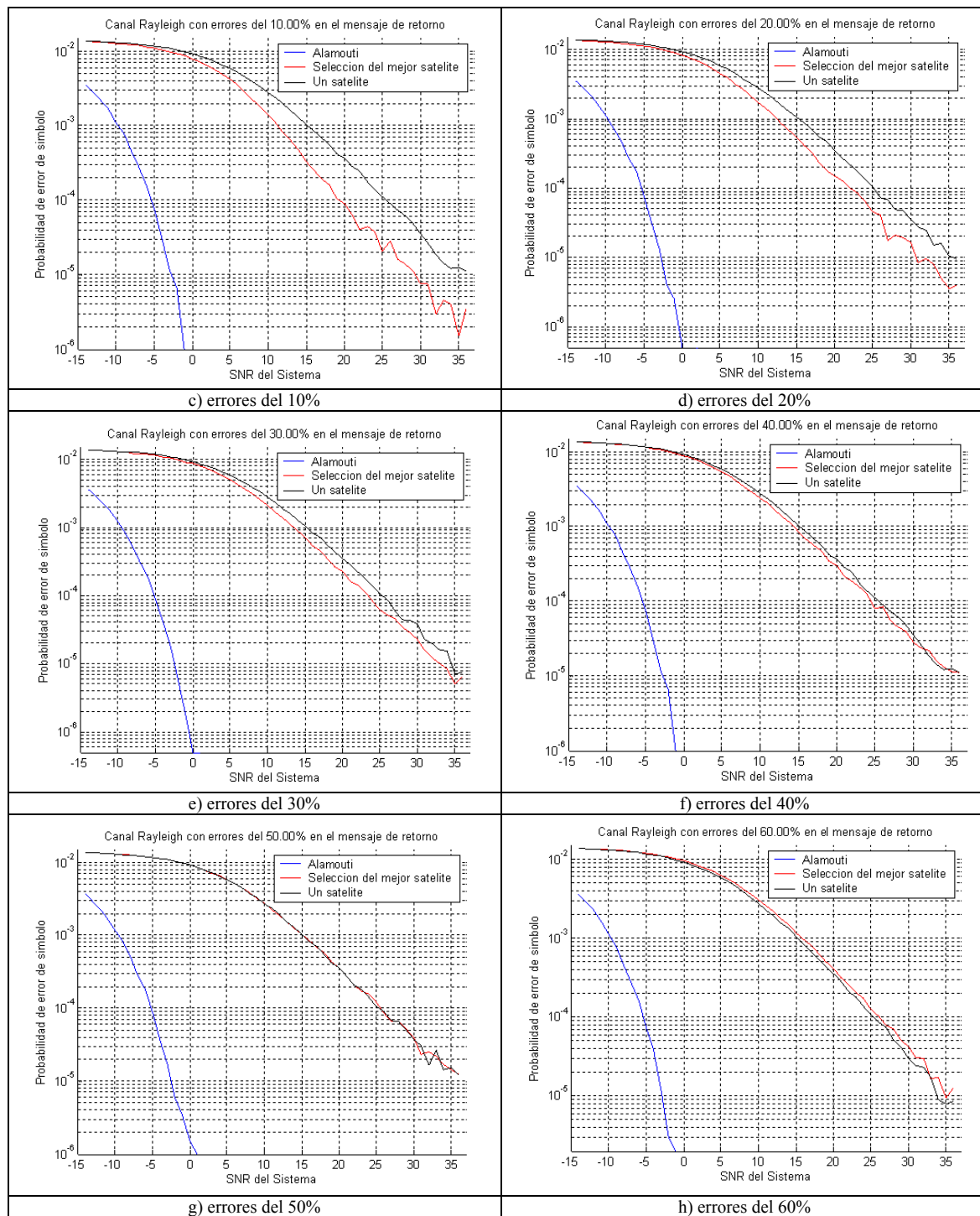


Figura 44.- Evolución de la probabilidad de error para incrementos de los errores en el mensaje de retorno con canal Rayleigh

El sistema de selección de satélite (rojo) empieza siendo claramente mejor que el sistema de un solo satélite (negro).

En la Figura 44 b) apenas se puede apreciar como influye tener un 5% de errores en el mensaje de retorno, se trata de una tasa de errores muy baja para que sea relevante.

Si nos fijamos en la Figura 44 c) veremos como la tasa de errores del 10% hace que la gráfica de selección (roja) se aproxime ligeramente a la gráfica de un solo satélite, las probabilidades de error son muy parecidas al caso anterior.

Para las gráficas de la Figura 44 e) y f), correspondientes a los casos del 30 y el 40% de errores en el mensaje de retorno, se hace relevante el desplazamiento de la gráfica de selección de satélite, se acercan bastante al comportamiento de un solo satélite.

Para el caso del 50% de la Figura 44 g) podemos ver como tanto el sistema de selección como el sistema de un solo satélite toman los mismos valores dado que su comportamiento es prácticamente el mismo. La probabilidad de error en este caso tiene una diferencia mínima.

Seguidamente en el caso del 60% de la Figura 44 h) el método de selección de satélite tiene peor comportamiento incluso que el caso de un solo satélite. Vemos en esta ocasión que la probabilidad de error para el método de selección está por encima del método de un solo satélite.

De la Figura 44 extraemos que el sistema Alamouti (azul) se impone en calidad de enlace, apenas presenta errores en la transmisión. A diferencia de los sistemas de selección y de un solo satélite.

Éstas gráficas describen como el comportamiento del sistema de selección de satélite presenta una menor probabilidad de error cuando los errores en la selección son pequeños (se elige el mejor satélite), pero a medida que la probabilidad de elegir el mejor satélite disminuye, la probabilidad de error aumenta dado que tiende a elegir el peor satélite.

Para poder apreciar mejor la evolución del sistema de selección, se han extraído los valores de la probabilidad de error para tres puntos de SNR. A continuación se muestran las variaciones en la probabilidad de error observadas en varios puntos de SNR fija. La siguiente tabla corresponde a un punto de observación de 5dB, estos son los resultados obtenidos:

- SNR=5dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	0	0	0	0	0	0	0	0
Selección de satélite (10^{-3})	3.67	3.95	4.09	4.54	4.97	5.50	5.94	6.32
Un solo satélite (10^{-3})	5.82	5.82	5.84	5.87	5.88	5.79	5.84	5.89

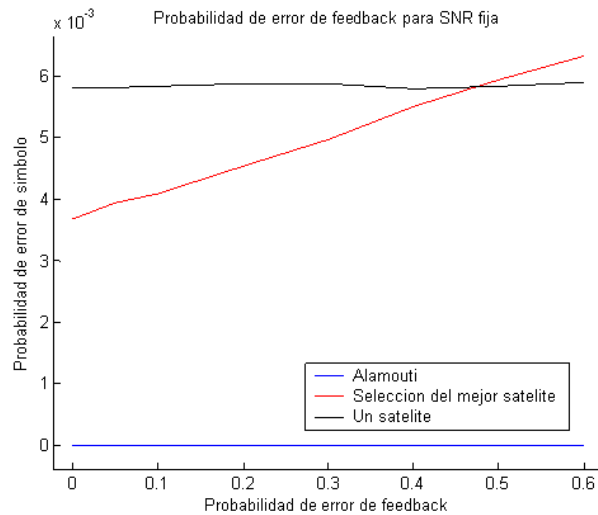


Figura 45.- Evolución para SNR de 5dB

Dado el bajo nivel de SNR, mostrado en la Figura 45, las gráficas de selección de satélite y un solo satélite presentan comportamientos cercanos, parten de $P_e=4.1 \cdot 10^{-3}$ y $P_e=5.9 \cdot 10^{-3}$ respectivamente.

- SNR=10dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	0	0	0	0	0	0	0	0
Selección de satélite (10^{-3})	1.037	1.249	1.407	1.73	2.027	2.42	2.74	3.25
Un solo satélite (10^{-3})	2.76	2.81	2.81	2.75	2.76	2.75	2.75	2.75

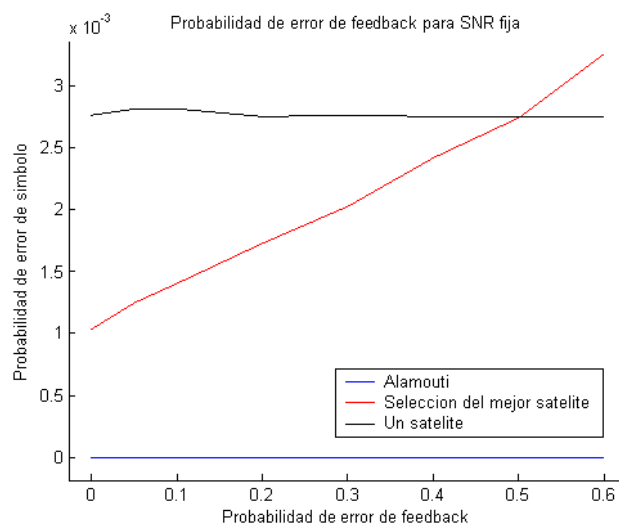


Figura 46.- Evolución para SNR de 10dB

En esta ocasión la gráfica de la Figura 46 está situada sobre el punto de observación de 10dB, por este motivo, tanto el sistema de selección como el de un solo satélite parten de probabilidades de error inferiores. Al partir de niveles inferiores pero más distantes entre ellos, el sistema de selección de satélite tiene mayor pendiente que para el caso de 5dB.

- SNR=20dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	0	0	0	0	0	0	0	0
Selección de satélite (10^{-3})	0.0165	0.054	0.092	0.144	0.275	0.29	0.36	0.4
Un solo satélite (10^{-3})	0.323	0.342	0.342	0.331	0.36	0.35	0.35	0.36

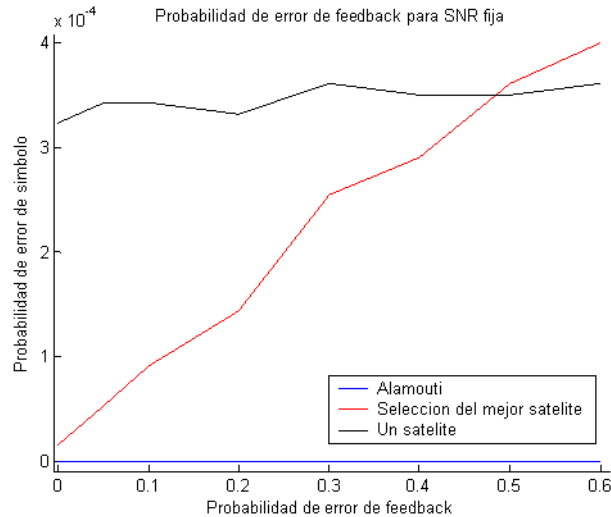


Figura 47.- Evolución para SNR de 20dB

La gráfica de la Figura 47 está situada sobre el punto de observación de 20dB. En este nivel de SNR, el comportamiento del sistema de selección presenta niveles muy cercanos al sistema alamouti cuando no hay errores en el mensaje de retorno, pero empeora considerablemente a medida que la probabilidad de error de retorno aumenta.

En estas gráficas podemos ver el comportamiento constante de los sistemas Alamouti (0 errores) y un solo satélite ($P_e=5.9 \cdot 10^{-3}$ errores para SNR de 5dB) en el nivel de SNR de 5, 10 y 20dB.

Una vez superado el 50% de errores en la probabilidad de error de retorno, la mayoría de elecciones recaen sobre el satélite con peor canal, por este motivo es incluso peor que el sistema con un solo satélite.

Del mismo modo que hemos visto para el caso de SNR=5dB y el de SNR=10dB, los sistemas Alamouti y un solo satélite tienen un comportamiento constante. En esta ocasión un solo satélite parte del nivel de $P_e=2.75 \cdot 10^{-3}$, casi la mitad que para 5dB. El sistema de selección de satélite empieza por debajo del nivel de un solo satélite, sigue un ritmo ascendente a medida que aumentan los errores de retorno hasta superar el 50%, donde su comportamiento es peor que el de un solo satélite.

Resalta la robustez del sistema Alamouti que no presenta errores en ninguna de las simulaciones realizadas. Esto es debido a que el método Alamouti aprovecha la diversidad de señal y, como en Rayleigh no existe línea de visión directa, toda la potencia llega a través de las reflexiones de la señal por el entorno.

En la Figura 48 analizamos el comportamiento bajo las dos velocidades:

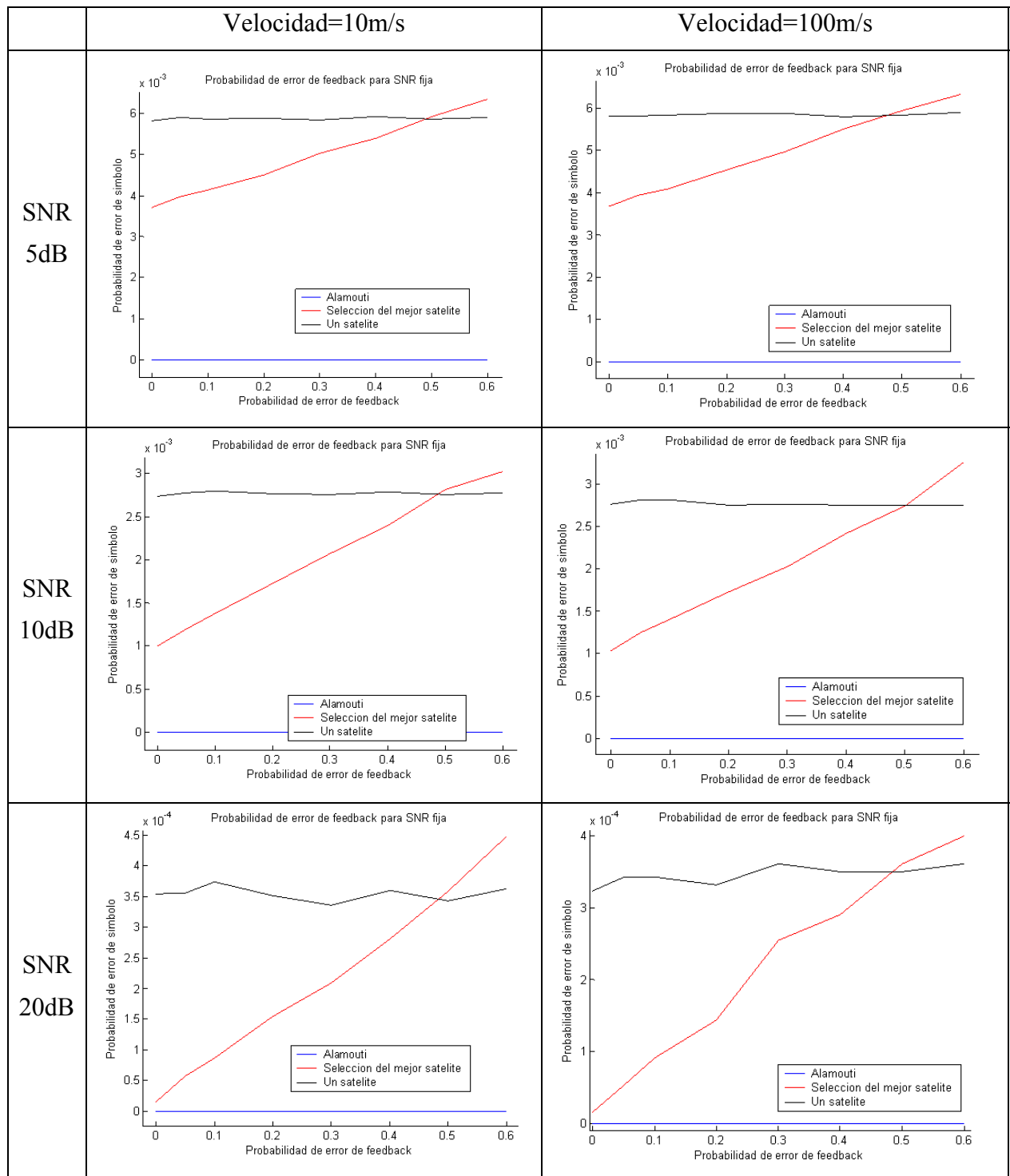


Figura 48.- Comparativa modelado Rayleigh a distintas velocidades

Como podemos ver en la Figura 48 no se aprecia ninguna diferencia relevante cuando modelamos los sistemas a diferentes velocidades. Las características de la distribución Rayleigh hacen que tenga una dependencia mínima con la velocidad del móvil.

5.4.2 MODELADO CON CANAL RICE A 100m/s

En este apartado veremos el comportamiento de los tres sistemas estudiados sometidos a una transmisión con canal Rice y con errores en el mensaje de selección del sistema de selección de satélite.

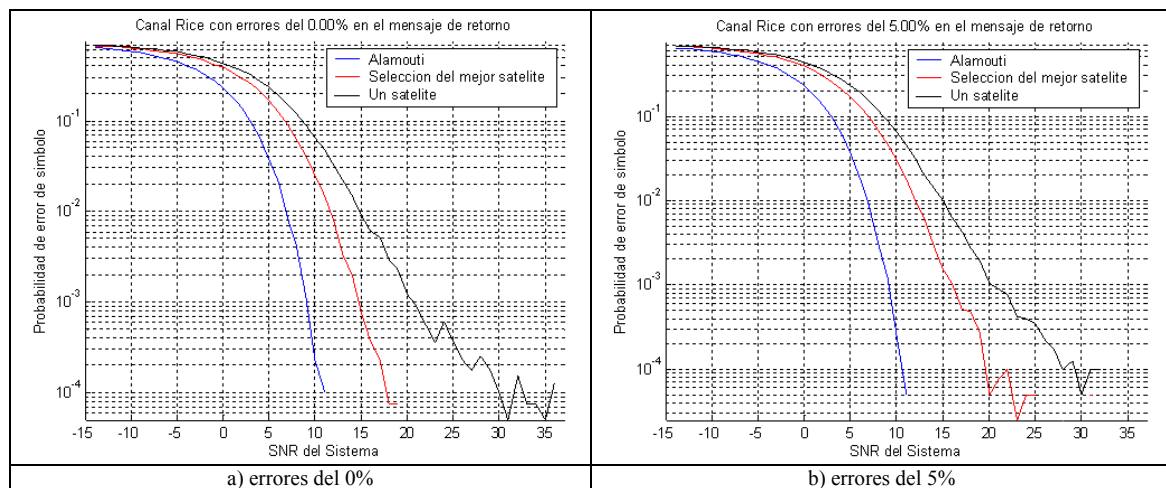
Uno de los aspectos más relevantes en el caso de transmisión Rice es el caso del sistema Alamouti, que en esta ocasión presentará mas errores de símbolo que en el caso Rayleigh. Como se ha explicado en el apartado 4.2 *MODELO DE TRANSMISIÓN CON SISTEMA ALAMOUTI*, y del mismo modo que hemos visto para el caso de 10m/s, el aumento de la tasa de errores es debido a que el canal Rice dispone de menor diversidad al tener línea de visión directa.

En la Figura 49 se mostrará la evolución de la probabilidad de error de símbolo a medida que aumenta el error del mensaje de retorno.

Del mismo modo que sucedía en el caso Rayleigh, para una tasa de errores del 5% (Figura 49 b)) no se aprecia diferencia relevante.

A medida que aumentamos el nivel de errores de retorno se aproximará más la probabilidad de error de símbolo de los casos de selección de satélite y un solo satélite. Se puede apreciar la diferencia entre la probabilidad de error de retorno para los casos del 10 y el 20% de error de retorno de la Figura 49 c) y d).

En las gráficas de la Figura 49 g) y la Figura 49 h) se observa perfectamente el empeoramiento del sistema de selección de satélite frente al sistema de un solo satélite, superando ligeramente el sistema de un solo satélite para el caso de errores del 60% en el mensaje de retorno.



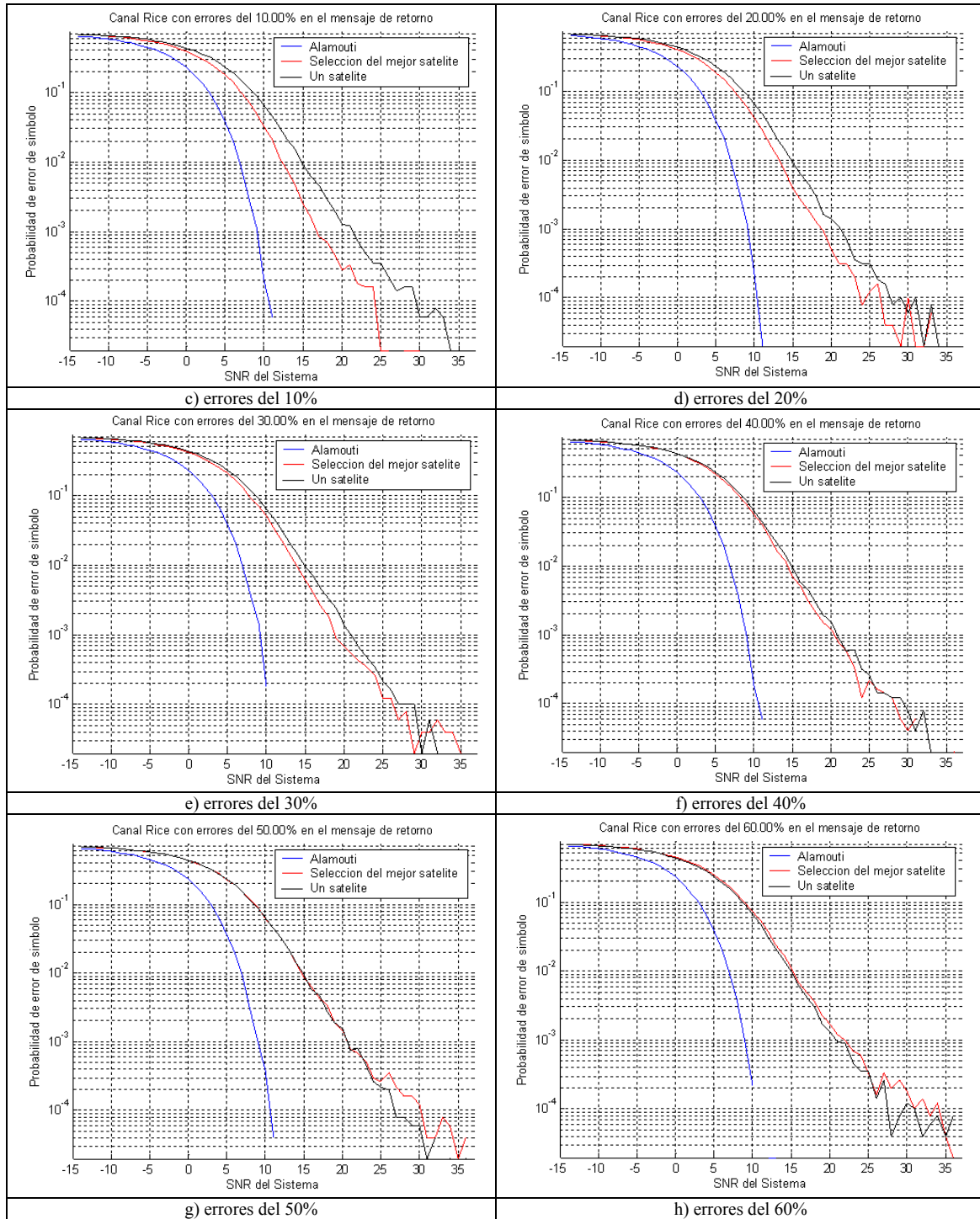


Figura 49.- Evolución de la probabilidad de error para incrementos de los errores en el mensaje de retorno con canal Rice

Como podemos ver, el sistema Alamouti requiere de menor SNR que el sistema de selección y el de un solo satélite.

A continuación se muestran las variaciones en la probabilidad de error observadas en varios puntos de SNR fija. Las siguientes tablas corresponden a varios puntos de observación, estos son los resultados obtenidos:

- SNR=5dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Selección de satélite	0.17	0.18	0.19	0.2	0.21	0.21	0.23	0.26
Un solo satélite	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23

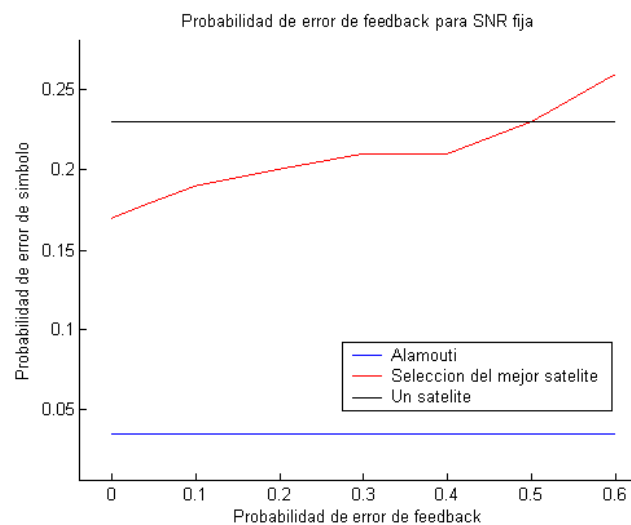


Figura 50.- Evolución para SNR de 5dB

De la Figura 50 podemos extraer que dada la baja diversidad, debido a la existencia de rayo de visión directa, el sistema Alamouti se ve afectado en pequeña medida. La baja SNR en este caso hace que los sistemas de selección y un solo satélite tengan probabilidades de error muy cercanas.

- SNR=10dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Selección de satélite	0.025	0.03	0.035	0.04	0.05	0.059	0.064	0.07
Un solo satélite	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064

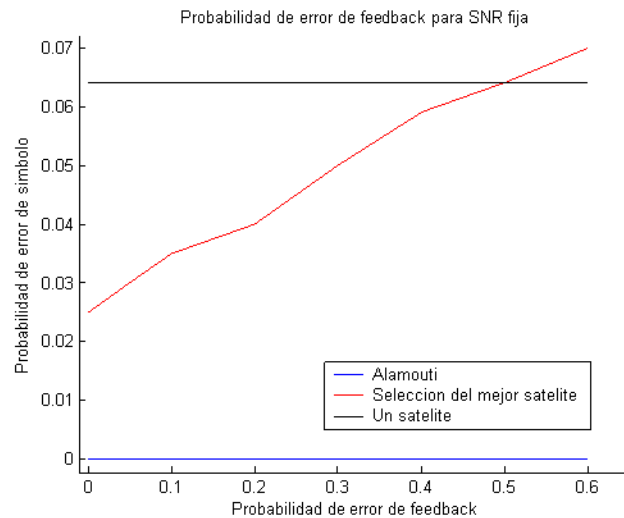


Figura 51.- Evolución para SNR de 10dB

Para una SNR de 10dB el sistema Alamouti apenas presenta errores en la transmisión y el sistema de selección de satélite, para tasas de error del mensaje de retorno, mejora su probabilidad de error un factor 100. El sistema con un solo satélite también mejor de forma considerable, pero está lejos de acercarse al método Alamouti.

- SNR=20dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	0	0	0	0	0	0	0	0
Selección satélite (10^{-3})	0	0.05	0.3	0.5	0.65	1.1	1.2	1.8
Un solo satélite(10^{-3})	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

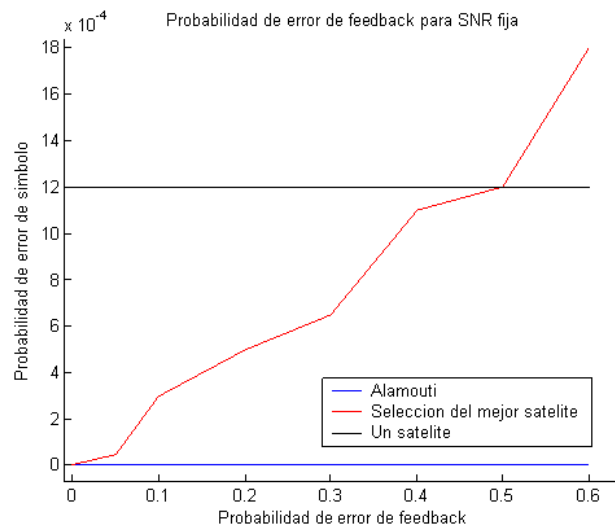


Figura 52.- Evolución para SNR de 20dB

En cada caso la probabilidad de error del sistema de selección de satélite supera al sistema de un solo satélite a partir del 50% de errores en el mensaje de retorno. A partir de ese nivel se comporta peor dado que tiende a seleccionar más el peor satélite.

Como hemos visto en el caso de los canales Rayleigh, el sistema Alamouti es el que presenta mejor transmisión con la menor de las tasas de error.

En la Figura 53 analizamos el comportamiento bajo las dos velocidades:

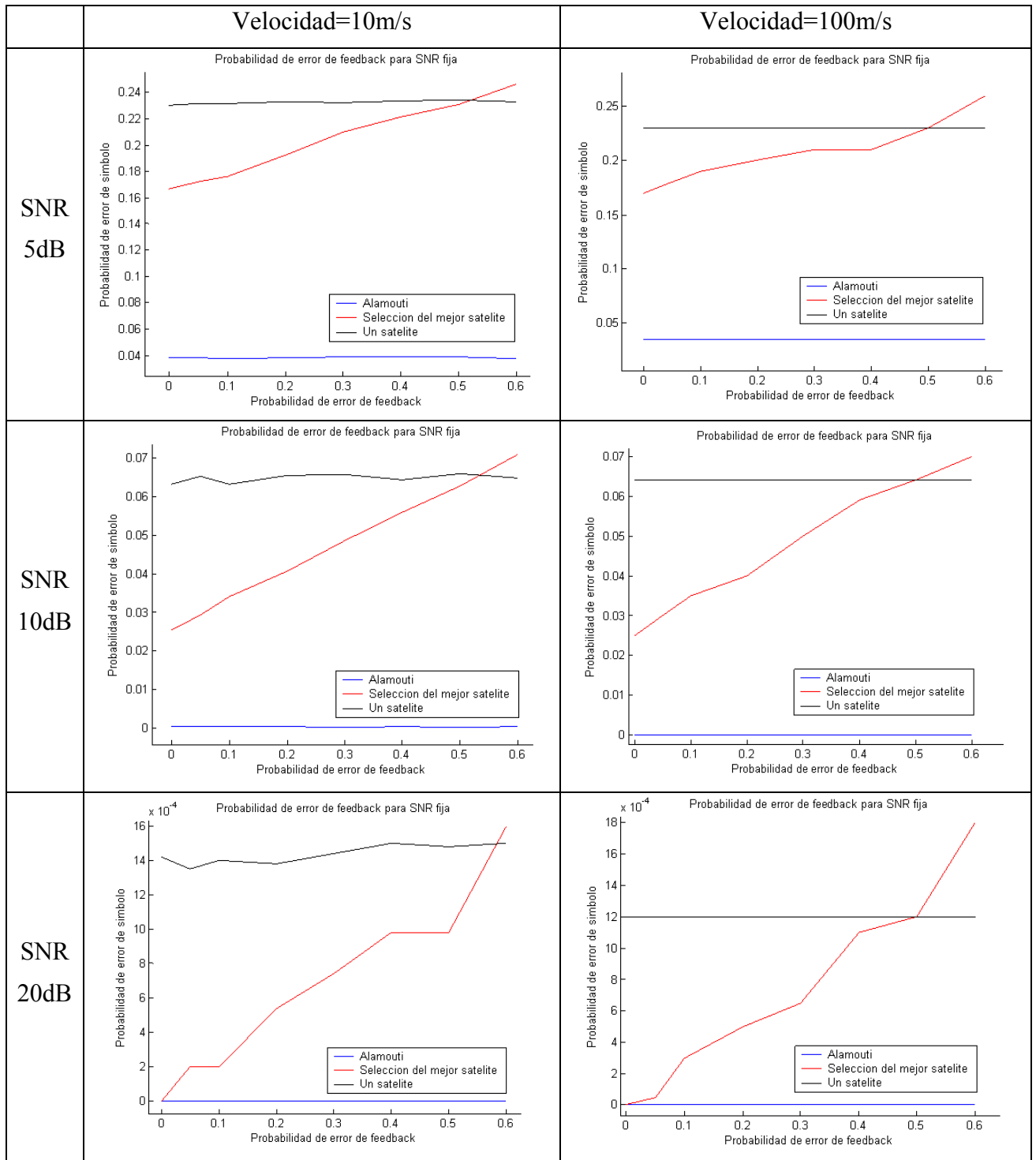


Figura 53.- Comparativa modelado Rice a distintas velocidades

En la Figura 53 y al igual que hemos visto en el caso de la comparativa Rayleigh de la Figura 48, apenas se aprecia diferencia entre el caso de una velocidad y otra. La variación más importante aparece en el caso de 20dB para el sistema de un solo satélite, en el caso de 10m/s presenta una probabilidad de error sobre $14 \cdot 10^{-4}$ y para 100m/s se reduce a $12 \cdot 10^{-4}$.

Esta variación se debe a que en el modelo de distribución Rice la línea de visión directa tiene más potencia que las reflexiones y cuanto más rápida sea la velocidad del móvil menos energía tendrán estas reflexiones.

5.4.3 MODELADO CON CANAL LOGNORMAL A 100m/s

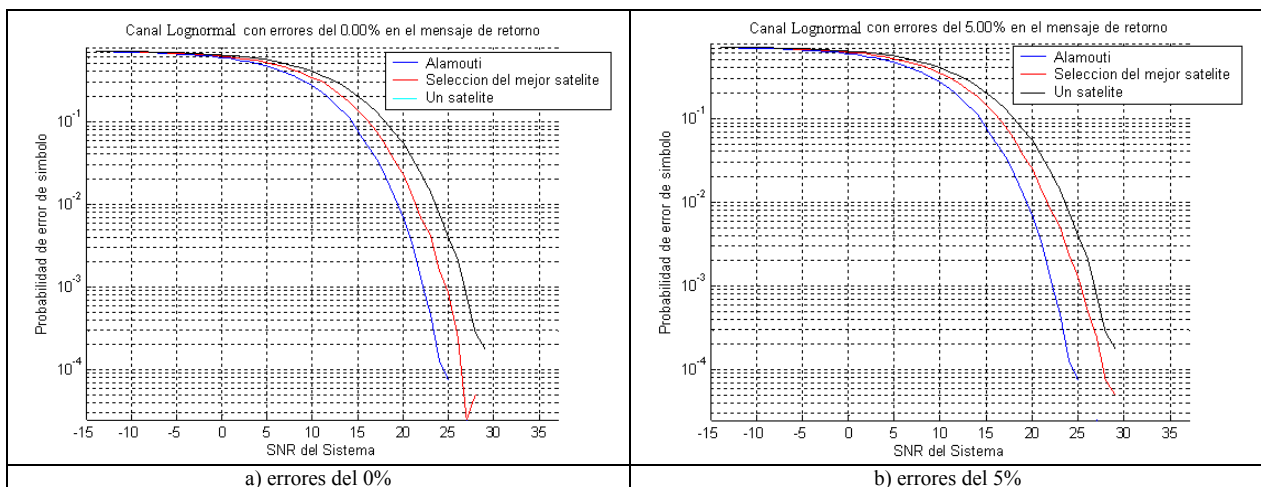
En este apartado se ha simulado el caso de tener una recepción bajo un canal Lognormal. Como en casos anteriores se analiza la evolución de la probabilidad de error de símbolo en función de los errores en el mensaje de retorno del sistema de selección de satélite.

Del mismo modo que sucedía para los casos de canal Rayleigh y Rice y como podemos ver en la Figura 54, tanto Alamouti como el sistema con un solo satélite no se ven afectados por el mensaje de retorno al no depender de ningún mensaje de retorno.

Destaca, de todos modos, que el comportamiento de los tres sistemas es muy parecido y está sujeto al comportamiento logarítmico de este tipo de distribución de canal. No ofrece demasiada flexibilidad en las transmisiones dada la rápida variación del móvil y el hecho de no disponer de línea de visión directa. Por este motivo tanto Alamouti, selección de satélite como un solo satélite presentan probabilidades de error muy cercanas.

Observando las gráficas de la Figura 54 podemos ver el comportamiento del sistema de selección de satélite. Como se ha visto en casos anteriores para probabilidades de error en el mensaje de retorno presenta un comportamiento más cercano al método Alamouti que al método de un solo satélite. A medida que aumenta la probabilidad de error del mensaje de retorno el comportamiento del sistema de selección de satélite tiende a comportarse peor que el sistema con un solo satélite.

La variación de un caso a otro es muy pequeña, pero dada la proximidad de los tres casos, se hace apreciable a partir de una tasa de errores del 30%, donde el comportamiento del sistema de selección de satélite ya tiene varios puntos entre si solapados.



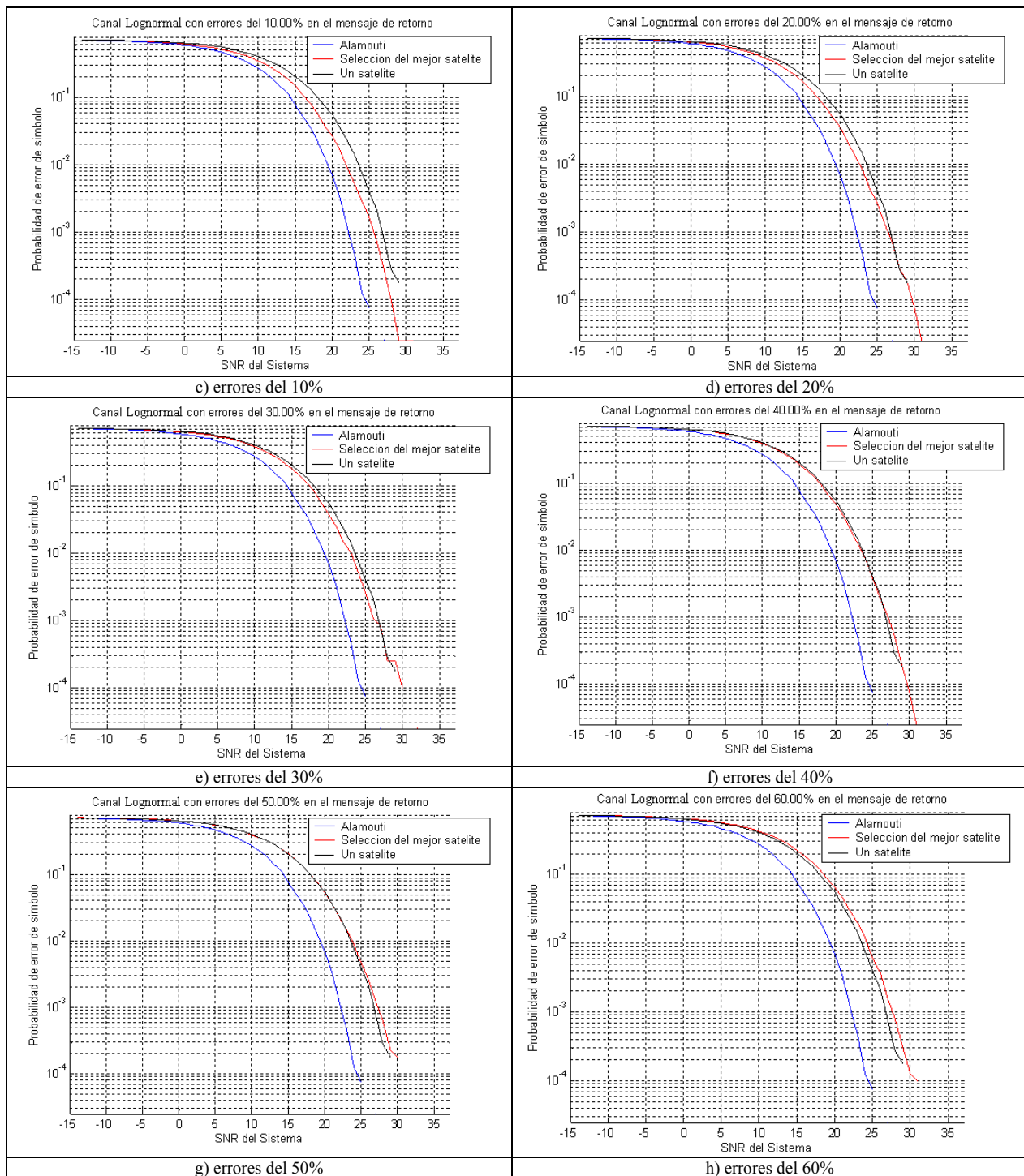


Figura 54.- Evolución de la probabilidad de error para incrementos de los errores en el mensaje de retorno con canal Lognormal

Como ya se ha comentado, por las características de este canal los tres modelos de detección presentan probabilidades de error muy parecidas.

A continuación encontraremos las tablas correspondientes a los puntos de observación para SNR fijas, lo que permitirá ver la evolución del error del mensaje de retorno para puntos de 5, 10 y 20 dB de SNR.

- SNR=5dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
Selección de satélite	0.5	0.5	0.5	0.56	0.565	0.57	0.58	0.59
Un solo satélite	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58

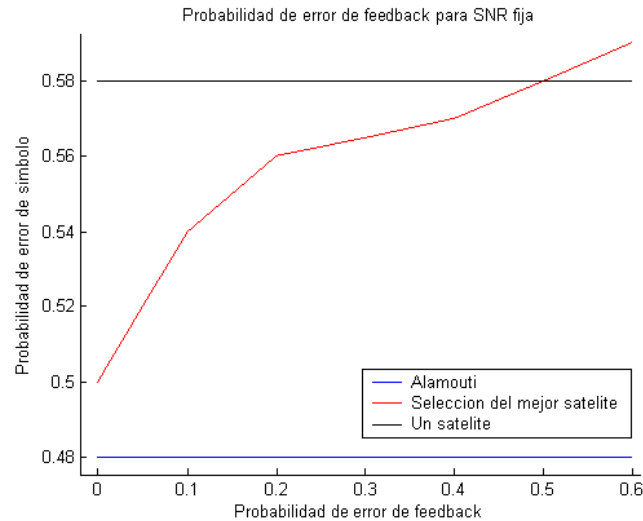


Figura 55.- Evolución para SNR de 5dB

Las variaciones que sufre el sistema de selección para una SNR de 5dB se presentan en la Figura 55, tiene una evolución con mucha pendiente y pasa de estar cerca del nivel de Alamouti a superar el nivel de un solo satélite de forma bastante rápida.

- SNR=10dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
Selección de satélite	0.35	0.35	0.35	0.36	0.38	0.39	0.4	0.41
Un solo satélite	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

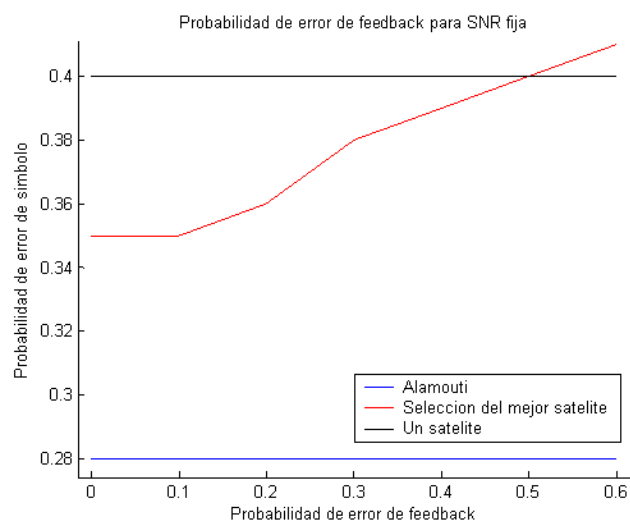


Figura 56.- Evolución para SNR de 10dB

Como se ha comentado para la Figura 56, la variación del sistema de selección de satélite es bastante pequeña. Pero dada la proximidad entre las probabilidades de error de los tres sistemas los efectos del mensaje de retorno erróneo empiezan a parecerse al sistema de un solo satélite a partir del 30%.

- SNR=20dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti(10^{-3})	7	7	7	7	7	7	7	7
Selección satélite	0.02	0.03	0.035	0.042	0.044	0.049	0.055	0.06
Un solo satélite	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055

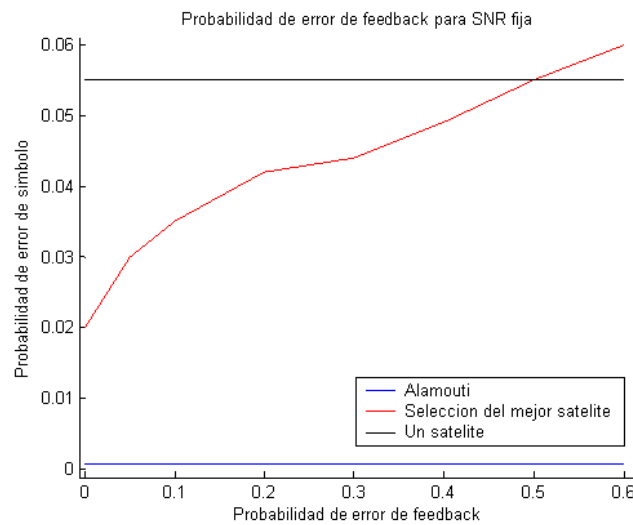


Figura 57.- Evolución para SNR de 20dB

Como hemos visto en otras ocasiones, utilizar una SNR de 20dB proporciona una calidad muy alta frente a los casos de 5 y 10dB. En la Figura 57 se hace visible como el sistema de selección empieza su recorrido partiendo de una probabilidad de error de 0.02 mientras que en el caso anterior superaba los 0.35. Para el sistema de un solo satélite también supone una importante mejora ya que ha pasado de los 0.4 a los 0.055.

En la Figura 58 analizamos el comportamiento bajo las dos velocidades:

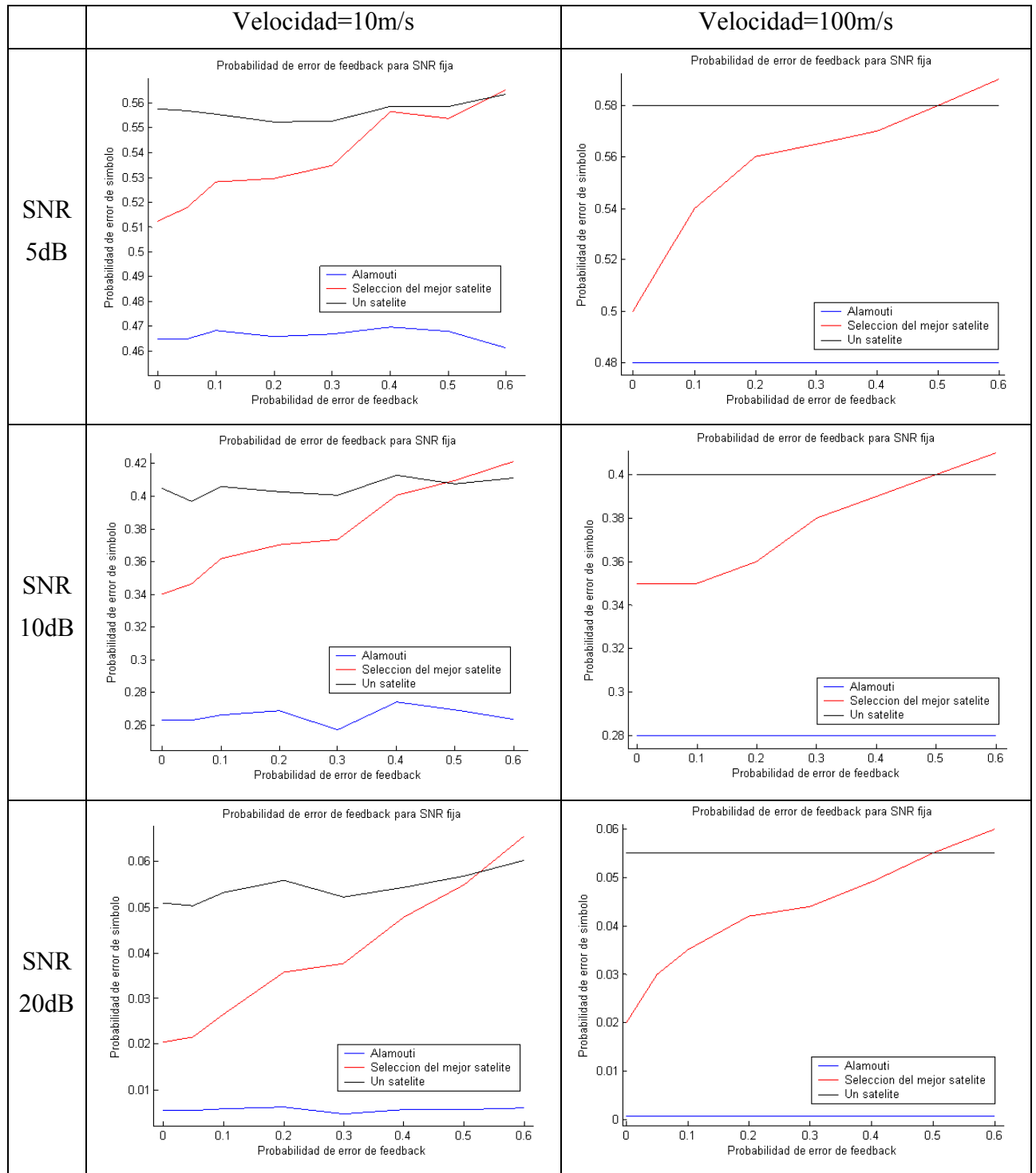


Figura 58.- Comparativa modelado Lognormal a distintas velocidades

En la Figura 58 se compara el comportamiento del modelado con distribución Lognormal. Este tipo de distribución es muy sensible a las pequeñas variaciones y se hace relevante entre un caso y el otro. En general, los tres métodos de detección presentan mejor probabilidad de error para una velocidad de 10m/s que para 100m/s.

Aunque no suponga una diferencia muy grande, estas simulaciones se han realizado para 40.000 símbolos y, a la práctica, se transmitirían millones de símbolos. En ese caso sí sería de una relevancia mucho mas importante.

5.4.4 MODELADO CON CANAL SUZUKI A 100m/s.

Como se ha explicado en el apartado 2.4.5, y del mismo modo que hemos visto para el caso del móvil desplazándose a 10m/s, éste canal combina los efectos de una transmisión Rayleigh y una Lognormal. En las gráficas de las simulaciones realizadas veremos como la componente Rayleigh de la transmisión afecta de forma significativa a la probabilidad de error.

En la Figura 59 podemos ver tres gráficas correspondientes al modelo Rayleigh, Lognormal y Suzuki para una probabilidad en el mensaje de retorno del 0%. En estas gráficas se puede apreciar la contribución como la contribución Rayleigh tiene mas influencia que la lognormal.

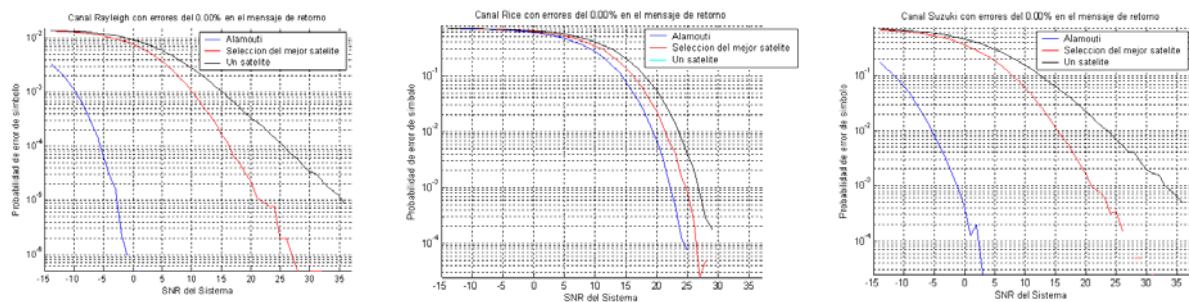
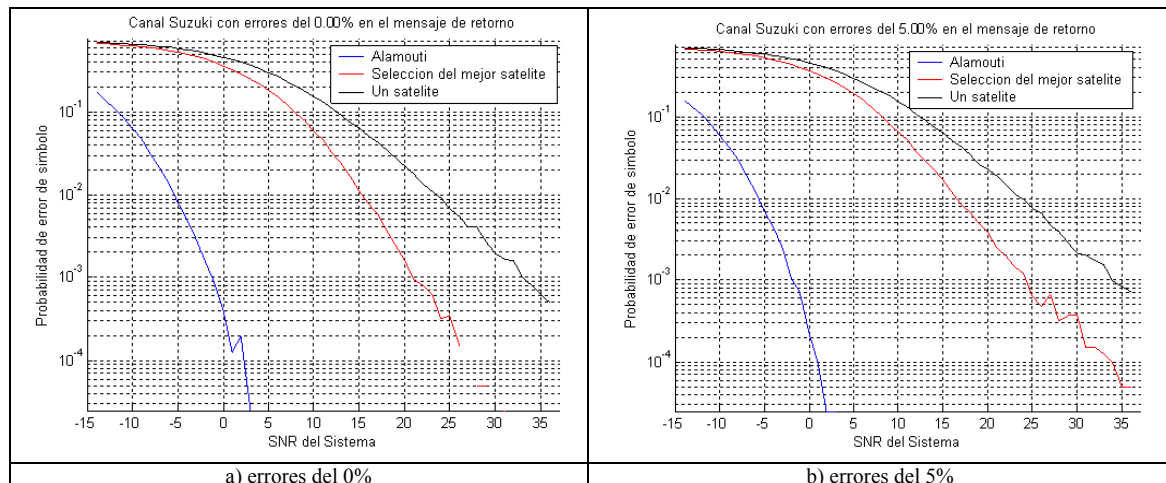


Figura 59.- Probabilidad de error de símbolo de los casos Rayleigh, Lognormal y Suzuki

Del mismo modo que en los casos anteriores, la variación de la probabilidad de error del sistema de selección de satélite avanzará con la probabilidad de error de mensaje de retorno, hasta comportarse peor que el sistema con un solo satélite.

La Figura 60 muestra la evolución de la probabilidad de error de los tres métodos de detección en función del incremento de la tasa de errores en el mensaje de retorno:



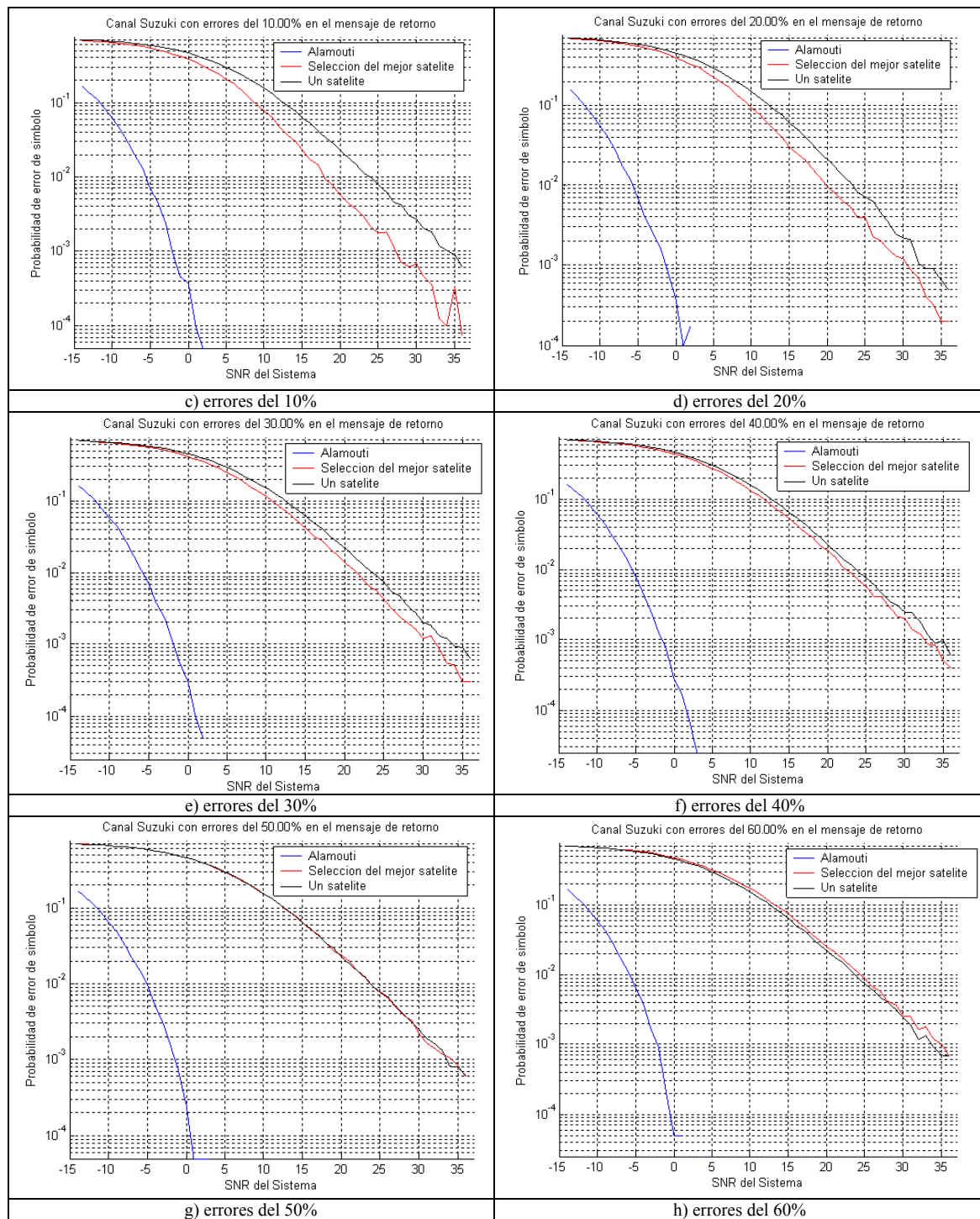


Figura 60.- Evolución de la probabilidad de error para incrementos de los errores en el mensaje de retorno con canal Suzuki

Del mismo modo que en los casos anteriores, para comprender la evolución de la probabilidad de error, centraremos el análisis en tres puntos de SNR concretos, 5, 10 y 20dB:

- SNR=5dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	0	0	0	0	0	0	0	0
Selección satélite (10^{-3})	180	195	200	230	250	280	300	320
Un solo satélite (10^{-3})	300	300	300	300	300	300	300	300

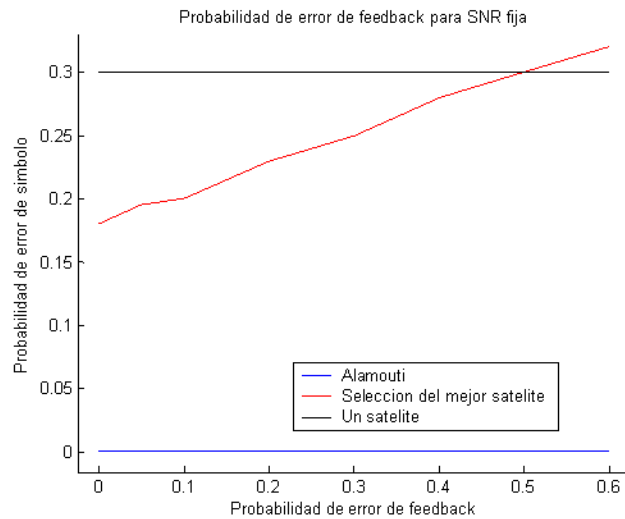


Figura 61.- Evolución para SNR de 5dB

Para una SNR de 5dB el sistema Alamouti no tiene errores, el sistema de selección de satélite está cercano al sistema de un solo satélite y la evolución que sigue, a medida que aumenta la tasa de errores en el mensaje de retorno, no es muy rápida.

El siguiente caso evalúa el comportamiento para una SNR de 10dB:

- SNR=10dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	0	0	0	0	0	0	0	0
Selección satélite (10^{-3})	60	70	80	96	110	140	165	182
Un solo satélite (10^{-3})	170	170	170	170	170	170	170	170

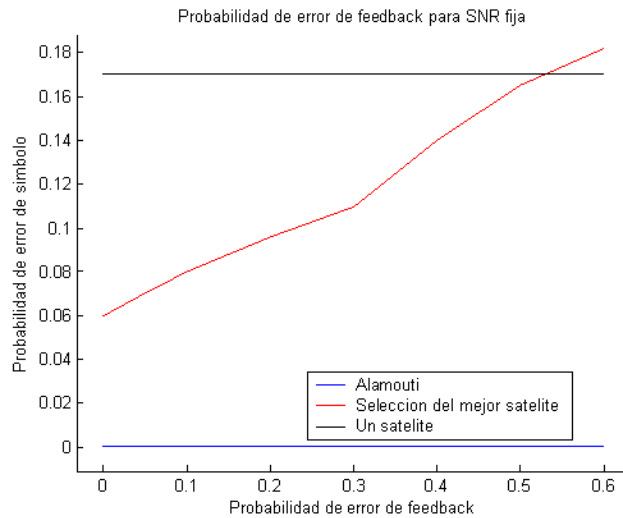


Figura 62.- Evolución para SNR de 10dB

El aumento de la potencia hace que tanto el sistema de selección como el de un solo satélite presenten probabilidades de error casi a la mitad que en el caso de SNR=5dB.

- SNR=20dB:

Errores de retorno (%)	0	5	10	20	30	40	50	60
Método Alamouti	0	0	0	0	0	0	0	0
Selección satélite (10^{-3})	1.7	4	6	9.5	15	19	22	25
Un solo satélite(10^{-3})	21	21	21	21	21	21	21	21

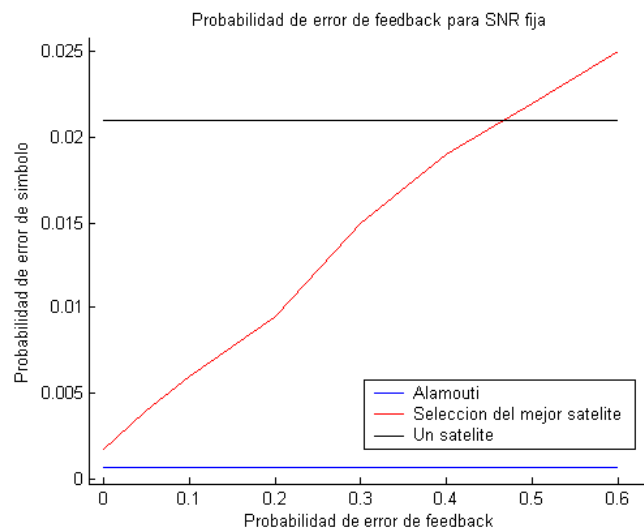


Figura 63.- Evolución para SNR de 20dB

Para una SNR de 20dB, dado el alto nivel de potencia apenas presenta errores en el caso de la selección de satélite cuando tampoco tiene errores en el mensaje de retorno.

En la Figura 64 analizamos el comportamiento bajo las dos velocidades:

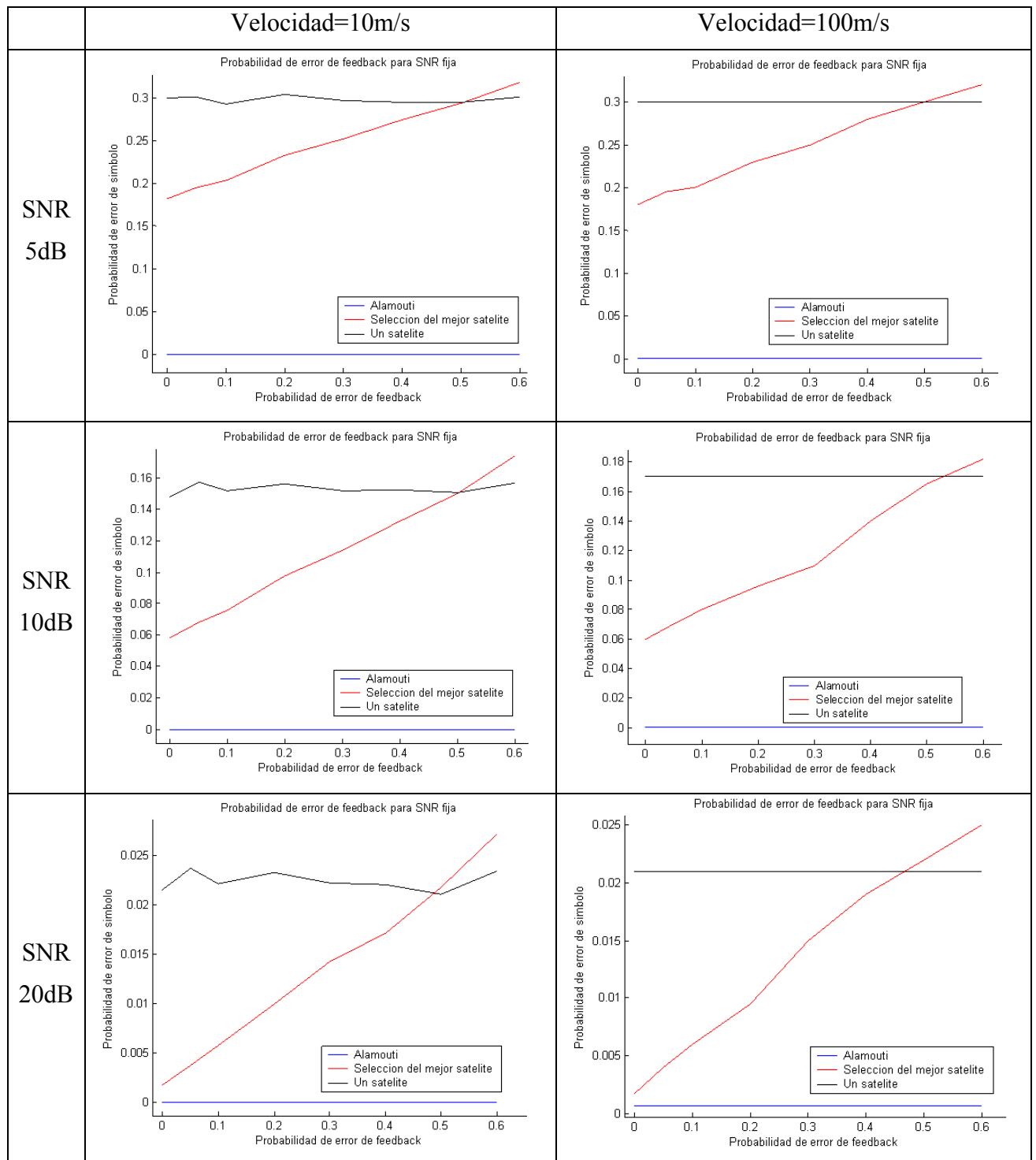


Figura 64.- Comparativa modelado Suzuki a distintas velocidades

En la Figura 64 podemos ver como el sistema de un solo satélite funciona mejor bajo una velocidad de 10m/s que a 100m/s. Los otros dos sistemas no presentan variaciones relevantes entre una velocidad y la otra.

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y PROYECTOS FUTUROS

Los objetivos que se querían conseguir desde un principio se han conseguido tal y como se esperaba.

El Capítulo 2 ha presentado los elementos de un sistema genérico de comunicaciones en donde se han diferenciado los diversos medios de transmisión. Se ha hecho relevante la importancia del arte de la predicción y el modelado de canal. Se han presentado los modelos de distribución de canal más comunes en las comunicaciones.

En el Capítulo 3 se han presentado los sistemas de diversidad actuales basados en comunicaciones terrestres. En esta parte del proyecto ha sido necesario explicar con detalle los diferentes tipos de diversidad y la forma de aprovechar cada uno de ellos. A continuación se han presentado las comunicaciones por satélite, así como los sistemas actuales y las principales características.

En el Capítulo 4 se ha centrado en el modelo propuesto de diversidad aplicada a comunicaciones por satélite. Se ha hecho una breve referencia a los estudios relacionados con diversidad, modelado de canal y comunicaciones por satélite. Para terminar en este capítulo se ha explicado con detalle como funciona cada modelo de transmisión propuesto.

El Capítulo 5 tiene como finalidad describir el simulador diseñado para construir los diferentes modelos de comunicación, como se ha estructurado. Presenta los escenarios bajo los que se ha trabajado y muestra los resultados de las simulaciones realizadas.

Los resultados obtenidos han hecho relevante que el modelo de un solo satélite es útil para transmisiones a receptores estáticos, en todas las pruebas ha sido superado por el sistema de selección (sin errores) y el sistema Alamouti. Por otra banda resulta ser el modelo más económico puesto que si se quisiera lanzar una red de comunicaciones con tres satélites geoestacionarios se podría cubrir prácticamente toda la superficie del planeta.

El modelo de selección de satélite ha demostrado ser un posible rival de Alamouti, aprovecha la diversidad de transmisores para aumentar la fiabilidad de las comunicaciones.

La parte negativa de este sistema radica en los errores de selección de satélite, el receptor debe notificar a los satélites cuál de los dos ofrece mejor calidad, pero un mal receptor no será capaz de transmitir con suficiente fiabilidad este mensaje de retorno. En este caso las comunicaciones de banda ancha se harían inviables.

La diversidad de receptores permite utilizar un solo satélite en cada transmisión, alternando el usuario al que se atiende. De modo que cada satélite proporcione un canal de alta calidad.

El sistema Alamouti es el modelo más sofisticado de los analizados en este proyecto. Claro que no todo son ventajas, el ancho de banda de cada satélite se ve reducido al estar transmitiendo el mismo mensaje desde varios emisores. Un número muy elevado de usuarios provocaría saturación en el sistema, ralentizando las comunicaciones para todos.

RESUMEN

En este proyecto se han presentado los modelos de distribución de canal más comunes que se puede encontrar una señal en una transmisión. Seguidamente se ha presentado el concepto de diversidad en comunicaciones inalámbricas terrestres y se ha trasladado el escenario a comunicaciones por satélite.

Para analizar la calidad de los enlaces con diversidad se ha realizado un simulador, con Matlab, que modele la estructura básica de un sistema de comunicaciones (emisor, canal y receptor). Simulando las comunicaciones entre los diferentes sistemas de diversidad se ha podido comparar la calidad de cada enlace.

El modelo Alamouti ha presentado una robustez y una baja probabilidad de error que hacen que sea la mejor elección a la hora de diseñar un sistema de diversidad para comunicaciones por satélite. Utiliza la diversidad de canal para aprovechar cada pizca de señal que recibe y así poder descifrar el mensaje enviado.

En aquest projecte s'han presentat els models de distribució de canal més comuns que es pot trobar un senyal en una transmissió. Seguidament s'ha presentat el concepte de diversitat en comunicacions inal·làmbriques terrestres i s'ha traslladat l'escenari a comunicacions per satèl·lit.

Per analitzar la qualitat del enllaços amb diversitat s'ha realitzat un simulador, amb Matlab, que modeli l'estructura bàsica d'un sistema de comunicacions (emissor, canal i receptor). Simulant les comunicacions entre els diferents sistemes de diversitat s'ha pogut compara la qualitat de cada enllaç.

El model Alamouti ha presentat una robustesa i una baixa probabilitat d'error que fan que sigui la millor elecció a l'hora de dissenyar un sistema de diversitat per a comunicacions per satèl·lit. Utilitza la diversitat de canal per aprofitar cada bocinet de senyal rebuda i així poder desxifrar el missatge enviat.

In this project have been presented models most common distribution channel that can be found in a signal transmission. He then has been presented the concept of diversity in terrestrial wireless communications and has shifted the scene to satellite communications.

To analyze the quality of links with diversity has made a simulator, with Matlab, which shape the basic structure of a communications system (transmitter, receiver and channel). Pretend communications between various systems of diversity has been able to compare the quality of each link.

The model Alamouti has filed a robustness and a low probability of error that make it the best choice when it comes to designing a system of satellite communications for diversity. Use the diversity of each channel to tap pinch signal it receives and thus able to decipher the message.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Ángeles Vázquez Castro. *Apuntes Comunicaciones Inalámbricas, Tema 2: Modelado del Canal Móvil*. 5º Ingeniería de Telecomunicaciones.
- [2] Radio Propagation Models, Universidad Harvard, 20 de agosto de 2003.
http://people.deas.harvard.edu/~jones/es151/prop_models/propagation.html#
- [3] Treviño Cortés, J. T. *Propagación de RF en las bandas: LF, MF, HF, VHF, UHF y VHF*. Tesis Licenciatura. Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones. Departamento de Ingeniería Electrónica, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla. Diciembre 2003. Capítulo 5 Distribuciones estadísticas
- [4] M.S. Karaliopoulos and F.N. Pavlidou, Modelling the land mobile satellite channel: a review, *Electronics & Communication Engineering Journal*. October 2005
- [5] Andrea Golsmith. “Wireless Communications”, Ed. 2005.
- [6] Meter R. King, Meter Horvath. *Satellite Channel Impairment Mitigation by Diversity Techniques*. IEEE 2006.
- [7] J.L.Vicario, S.Cioni. *Hybrid Selection/MRC for DVB-S2/RCS in Land Mobile Satellite Scenarios*. IEEE 2007.
- [8] Héctor J. Pérez-Iglesias, Adriana Dapena, Utilización de Algoritmos de Separación Ciega de Fuentes en Sistemas con Codificación Alamouti. Departamento de Electrónica y Sistemas, Facultad de Informática Universidad da Coruña Campus de Elviña s/n, 15071, A Coruña, Spain.