



**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Facultad de Ingeniería Eléctrica**  
**Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica**



**TRABAJO DE DIPLOMA**

**"Simulación de escenarios de comunicaciones inalámbricas a través de modelos de pequeña escala usando MatLab"**

**Autor: Alfredo Ruiz Luis**

**Tutor: Ing. Maddiel Alemán López**

**Santa Clara**

**2011**

**"Año 55 de la Revolución"**



**Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica**



**TRABAJO DE DIPLOMA**

**“Simulación de escenarios de comunicaciones inalámbricas a través de modelos de pequeña escala usando MatLab”**

**Autor: Alfredo Ruiz Luis**

**Tutor: Ing. Maddiel Alemán López**

[maleman@uclv.edu.cu](mailto:maleman@uclv.edu.cu)

**Santa Clara**

**2013**

**"Año 55 de la Revolución"**



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Telecomunicaciones, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

---

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del Tutor

---

Firma del Jefe de  
Departamento donde se  
defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de  
Información Científico-Técnica

## **PENSAMIENTO**

*“Los científicos descubren el mundo tal cual es,  
los ingenieros crean el mundo que nunca fue”*

*Theodore von Karmán*

## DEDICATORIA

*A mi familia por ser un caudal inagotable de paciencia, por brindarme su apoyo incondicional y ser siempre la luz que ilumina mi camino. A todo el que ha inculcado voluntad, carácter, firmeza y que ha influido mucho en mis pensamientos para ser un ingeniero de estos tiempos.*

## AGRADECIMIENTOS

- *A mis padres por todo su amor.*
- *A Dios por haberme concedido este gran sueño desde los diez años.*
- *A mi tutor por su acertado consejo y su ayuda imprescindible.*
- *A mi abuela Estrella que siempre quiso que este sueño se hiciera realidad.*
- *A mis tíos por profesarme el amor y confianza de verdaderos padres.*
  - *A mi esposa por su ayuda en momentos difíciles de la carrera.*

## TAREA TÉCNICA

Las tareas realizadas en este trabajo son:

1. Realizar una búsqueda de información sobre las principales características de los modelos de canales inalámbricos incluidos en el software MatLab y trabajos científicos relacionados con el tema.
2. Modelación de varios escenarios de canales inalámbricos usando la herramienta Simulink del MatLab.
3. Análisis de la influencia del canal de comunicación sobre una señal modulada digitalmente transmitida a través de este.
4. Confección del informe que recopile la descripción de los métodos, procedimientos y resultados alcanzados a través de estos, relativos a la modelación y simulación del canal inalámbrico utilizando el software MatLab/Simulink.

---

Firma del Autor

---

Firma del Tutor

## RESUMEN

El presente trabajo de diploma se dedicó a la simulación de varios escenarios que usan como medio de transmisión el canal inalámbrico, para lo cual se utilizó software de simulación MatLab, específicamente su herramienta SIMULINK. Para lograr este objetivo se realizó una búsqueda de información sobre las principales características de los sistemas de comunicaciones específicamente los de comunicaciones inalámbricas y se profundizó además en el estudio de los modelos de canales que incluye el software en sus bibliotecas.

Se realizó la modelación y simulación de cinco escenarios, tres de ellos usaron el modelo de canal Rayleigh y dos de ellos el modelo Rician, una vez realizadas las simulaciones se analizaron los principales resultados de cada variante usada y se arribaron a conclusiones.

## TABLA DE CONTENIDOS

|   |     |
|---|-----|
| PENSAMIENTO.....  | I   |
| DEDICATORIA.....  | II  |
| AGRADECIMIENTOS.....  | III |
| TAREA TECNICA.....  | IV  |
| RESUMEN.....  | V   |
| CAPITULO 1 SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICO.....   | 3   |
| 1.1 Sistema básico de comunicación.....   | 3   |
| 1.1.1 Ventajas de la utilización de sistemas digitales.....   | 5   |
| 1.1.2 Costos asociados con un sistema de comunicación digital.....  | 6   |
| 1.1.3 Elementos que conforman un sistema comunicación<br>digital inalámbrico.....   | 6   |
| 1.1.4 Ventajas que brindan las comunicaciones inalámbricas<br>en comparación con los sistemas comunicación cableados.....       | 8   |
| 1.1.6 Desventajas de los sistemas de acceso inalámbrico fijo.....   | 9   |
| 1.2 El canal inalámbrico como medio de transmisión.....   | 10  |
| 1.2.1 Desvanecimiento en el canal.....  | 11  |
| 1.2.2 Clasificación de los desvanecimientos dentro del canal.....   | 12  |
| 1.2.3 Modelo general para representar los desvanecimientos y efectos<br>que surgen en un canal de comunicación inalámbrico..... | 13  |
| 1.2.4 Parámetros y características del modelo general de desvanecimientos....   | 16  |
| 1.2.5 Métodos empíricos de predicción de propagación.....   | 18  |

|   |    |
|---|----|
| 1.2.6 Modelos a gran escala de propagación del canal inalámbrico.....   | 19 |
| 1.2.7 Modelos de pequeña escala de propagación del canal inalámbrico.....   | 21 |
| 1.3. Modulaciones digitales.....  | 21 |
| 1.3.1 Modulación BPSK.....  | 23 |
| 1.3.3 Modulación QPSK.....  | 24 |
| 1.3.5 Modulación QAM.....   | 25 |
| 1.3.6 Modulación 16-QAM.....  | 26 |
| 1.4. Introducción al software MatLab/Simulink.....  | 27 |
| 1.5. Uso de Matlab/Simulink para analizar las métricas de calidad<br>del canal inalámbrico.....                       | 31 |
| 1.6. Conclusiones parciales del capítulo.....   | 33 |
| CAPITULO 2 MODELACIÓN DE ESCENARIOS DE COMUNICACIONES<br>INALÁMBRICAS EN MATLAB MEDIANTE SU HERRAMIENTA SIMULINK..... |    |
| 2.1. Procesamiento de la señal en los bloques de Simulink.....  | 34 |
| 2.2. Modelos de canal que presenta MatLab/Simulink y sus características..  | 35 |
| 2.2.1 Multipath Rayleigh Fading Channel.....  | 36 |
| 2.2.2 Multipath Rician Fading Channel.....  | 40 |
| 2.2.3 El bloque AWGN Channel.....   | 41 |
| 2.3 Relación entre modos de varianza del ruido.....   | 42 |
| 2.4 Partes de la interfaz gráfica de usuario para<br>visualizar el canal multitrayecto.....                           | 45 |
| 2.5 Metodología para la modelación del canal inalámbrico.....   | 50 |
| 2.5.1 Simulación de los escenarios y sus características.....   | 50 |

|   |    |
|---|----|
| 2.5.2 Montaje de los modelos de Simulink<br>en la ToolBox de Comunicaciones.....      | 55 |
| 2.6 Conclusiones parciales del capítulo.....  | 57 |
| Capitulo 3 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN.....                                 | 58 |
| 3.1 Análisis de los escenarios con canal Rayleigh.....                                | 58 |
| 3.2 Análisis de los escenarios con canal Rician.....                                  | 60 |
| 3.3 Conclusiones parciales de la simulación de las cinco variantes.....               | 62 |
| 3.4 Cambio en la tasa de transmisión de las<br>variantes del anexo III y anexo V..... | 63 |
| 3.5 Conclusiones parciales del capítulo.....  | 66 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....   | 67 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....   | 69 |
| ANEXOS.....   | 71 |

## INTRODUCCIÓN

Desde finales de la década de los 80, la situación de las redes de computadoras ha cambiado de manera sustancial. Se han producido constantes actualizaciones de la tecnología y un incremento de la variedad de las formas de acceso. A las redes que usan transmisión por hilo, se han sumado las que utilizan medios inalámbricos, debido a las ventajas como la flexibilidad de operación, bajo costo y la facilidad de instalación. Estas transformaciones han sido impulsadas por nuevas circunstancias comerciales, el desarrollo tecnológico avanzado y la evolución de los requerimientos y necesidades de los usuarios.

Actualmente el desarrollo de las redes de comunicaciones y las necesidades de los usuarios demandan el soporte de la movilidad. Es precisamente este requerimiento el que resulta ser uno de los mayores retos para dar soporte de interconectividad entre los usuarios de las redes de datos. Ya que el medio que se utiliza es el canal inalámbrico. Está sujeto a constantes variaciones y múltiples efectos en dependencia del tipo de señal que lo atraviese [1].

El uso de la tecnología inalámbrica permite hacer desaparecer las limitaciones de espacio y tiempo, dando la posibilidad de brindar conexión a cualquier dispositivo en cualquier lugar con ciertas limitaciones que dependen de las condiciones del canal por donde se establece la conexión. Esta tendencia de las tecnologías de comunicaciones apunta a la necesidad de tener una conexión inalámbrica segura y estable de los dispositivos que conforman el sistema de comunicación digital [3].

En nuestra universidad no se cuenta con estudios detallados de simulación del canal inalámbrico que utilicen la herramienta de simulación MatLab. Los resultados pueden ser usados como una vía para un mejor conocimiento del comportamiento del canal inalámbrico y para su utilización en estudios e investigaciones posteriores.

Se trazó como objetivo general: modelar escenarios que usen canal inalámbrico como medio de transmisión y analizar la influencia de sus parámetros sobre señales moduladas digitalmente y transmitidas a través de este, usando el software MatLab/Simulink.

Para cumplir el objetivo general anterior se trazaron los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una búsqueda de información sobre las principales características de los modelos de canales inalámbricos incluidos en el software MatLab.
- Determinar las principales facilidades que brinda el software MatLab/SIMULINK para simulaciones de escenarios que usen canales inalámbricos.
- Modelar y simular varios escenarios que usen canales inalámbricos como medio de transmisión mediante el software MatLab/SIMULINK.
- Analizar la influencia del canal de comunicación sobre una señal modulada digitalmente transmitida a través de este.

### **Organización del informe:**

El informe se estructura en introducción, capítulos, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

El primer capítulo tiene por título "Sistema de comunicación inalámbrico". En este capítulo se trata los conceptos fundamentales relacionados con los sistemas digitales de comunicaciones, lo referente al canal inalámbrico y la valoración del MatLab como software de modelación y simulación.

El segundo capítulo tiene por título " Modelación de escenarios de comunicaciones inalámbricas en MatLab mediante su herramienta Simulink ". A lo largo de este capítulo se preparan cinco variantes de dos modelos de canal y se realiza una

---

descripción de cómo se usa la herramienta de simulación para la modelación de estos.

El tercer capítulo tiene por título “Resultados obtenidos de la simulación de los escenarios”. En este capítulo se detallan y concluyen los resultados de las simulaciones llevadas a cabo.

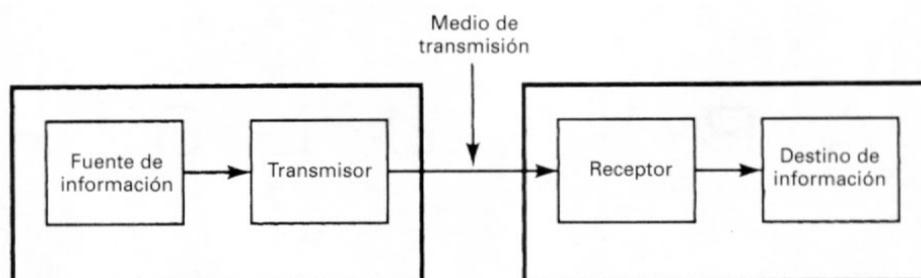
## Capítulo 1 SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICO.

### 1.1 Sistema básico de comunicación

Se puede definir un sistema de comunicación por: el proceso de intercambio de información de una fuente llamada transmisor y un destino llamado receptor. Con la utilización de un medio de transmisión por donde difundir el mensaje o la información que se desea intercambiar. El objetivo fundamental de un sistema básico es transferir información de un lugar a otro [1]. Se puede caracterizar de forma general por cinco componentes fundamentales:

- Fuente.
- Transmisor.
- Medio de transmisión.
- Receptor.
- Destino.

En la figura 1.1 se muestra un sistema simple de comunicación. Al principio todos los sistemas y el procesamiento de las señales fueron analógicos pero en la actualidad la tendencia al uso de tecnologías digitales es ampliamente difundida.



**Figura 1.1 Sistema básico de comunicación.**

El transmisor es un conjunto de uno o más dispositivos que convierte la información de la fuente original en una señal. Donde se presta más a su transmisión a través de determinado medio de transmisión. El medio de transmisión transporta las señales desde el transmisor hasta el receptor. Puede ser tan sencillo como un par de conductores de cobre que propaguen las señales en forma de flujo de corriente eléctrica. También se puede convertir la información

en forma de ondas electromagnéticas luminosas y propagarlas a través de cables de fibra óptica hechas de vidrio o de plástico. Otra alternativa es utilizar el espacio libre para transmitir ondas electromagnéticas de radio. Aprovechando las grandes distancias sobre terrenos irregulares de difícil acceso y el elevado costo para instalar un cable físico. El receptor es un conjunto de dispositivos y circuitos electrónicos que acepta del medio de transmisión las señales transmitidas y las reconvierte a su forma original.

Los dos tipos de comunicaciones utilizados son los analógicos y los digitales. En un sistema de comunicación analógico las señales que se transmiten y reciben son analógicas. Una señal de variación continua, por ejemplo una onda sinusoidal. En estos sistemas tanto la información de la fuente como la portadora son señales analógicas [1] [3].

Los sistemas digitales abarcan una gran variedad de sistemas de comunicación, entre ellos esta:

- La transmisión digital.
- La radio digital.

La transmisión digital es un sistema digital legítimo, donde los pulsos digitales se transfieren entre dos o más puntos en un sistema de comunicaciones. Con la transmisión digital no hay portadora analógica y la fuente de la información puede tener forma digital o analógica. Los sistemas de transmisión digital requieren una instalación física entre el transmisor y el receptor, por ejemplo un cable de fibra óptica [2].

La radio digital es la transmisión de portadoras analógicas moduladas digitalmente entre dos o más puntos en un sistema de comunicaciones. Aquí la señal moduladora y demoduladora son pulsos digitales. Estos pulsos pueden originarse en una fuente digital como por ejemplo una computadora. También pueden ser una señal analógica codificada en binario. En los sistemas digitales de radio el medio de transmisión puede ser un medio físico o la atmósfera terrestre. Los sistemas analógicos de comunicaciones fueron los primeros en ser

desarrollados. Entre ellos se puede mencionar el nacimiento de la radio difusión comercial y el posterior desarrollo de los primeros sistemas de televisión. También fueron desarrollados sistemas de comunicaciones inalámbricas. Con la creación de nuevas técnicas de procesamiento de señales se comenzó a implementar la transmisión digital [2].

### **1.1.1 Ventajas de la utilización de sistemas digitales**

Ventajas de un sistema de comunicación digital:

- Se produce una tasa de error extremadamente baja reproduciéndose una señal de alta fidelidad. Con posibilidad de detección de error y corrección por un proceso que no es compatible con los analógicos.
- Son más seguros y pueden ser producidos a un costo más bajo que los circuitos analógicos.
- El hardware digital presenta una mayor flexibilidad para su implementación que el hardware analógico. La combinación de señales digitales usando multiplexión por división de tiempo (TDM) es más simple que la combinación de señales analógicas usando multiplexión por división de frecuencia (FDM).
- Diferentes tipos de señales digitales pueden ser tratadas con señales similares y ser transmitidas y switcheadas bit a bit. También por un swicht conveniente, los mensajes digitales pueden ser transmitidos en grupos autónomos denominados paquetes.
- La técnica digital presenta condiciones naturales para el procesamiento de la señal que la protegen de interferencia y ruido para proveer encriptación y privacidad [2].

### **1.1.2 Costos asociados con un sistema de comunicación digital**

Los sistemas digitales sirven para realizar un procesamiento intensivo de la señal comparado con el analógico. Estos necesitan alcanzar un alto grado de sincronización, en los sistemas analógicos esto es más simple.

Una desventaja de los sistemas digitales es la utilización de grandes anchos de banda. Cuando la relación señal-ruido alcanza un cierto nivel, la calidad del servicio puede pasar de muy buena a muy mala. En contraste con los sistemas de comunicación analógicos donde tenemos una degradación más natural.

La principal diferencia entre los sistemas de comunicación analógicos y digitales tiene que ver con la evaluación del desempeño. Los sistemas analógicos tienen una forma de onda continua, así se tiene un conjunto que es infinito, un receptor tendrá que decidir entre un conjunto infinito de posibilidades de señales recibidas. La figura de merito del desempeño de un sistema de comunicaciones analógico estará ligada a un criterio de fidelidad, como la relación señal-ruido, porcentaje de distorsión, o esperar un error cuadrático medio entre las formas de ondas transmitidas y recibidas. [19] Mientras un sistema de comunicaciones digital transmite señales que representan dígitos. Estos dígitos forman un conjunto finito o alfabeto, y este conjunto es conocido a priori por el receptor. La figura de merito de un sistema de comunicación digital es la probabilidad de detectar incorrectamente un dígito o la probabilidad de error ( $P_e$ ) [20].

### **1.1.3 Elementos que conforman un sistema comunicación digital inalámbrico**

En dependencia del sistema existen partes que son esenciales que no pueden ser excluidas. Cada elemento representa una transformación, es decir lo que se tiene a la salida de cada uno es la entrada transformada. Donde cada transformación es una etapa de procesamiento de la señal.

---

Todos los sistemas de comunicaciones digitales inalámbricos constan de las siguientes partes:

- **Formateo:** Se encarga justamente de realizar una transformación. Por ejemplo, si la fuente de señal es analógica, entonces la etapa FORMAT se encarga de realizar el procedimiento de conversión analógico-digital que incluye muestreo, retención y cuantificación, para luego codificarse de acuerdo a un alfabeto particular del sistema.
- **Codificación de Fuente:** Este proceso realiza básicamente una descripción eficiente de la fuente de información y crea una representación fiel de la fuente de información con la menor tasa de bits posible, al tiempo que demanda un uso eficiente de la memoria del sistema.
- **Encriptación:** Es utilizada para proveer privacidad en la comunicación, previene el uso no autorizado del mensaje comprimido y la inyección de falsos mensajes en el sistema.
- **Codificador de canal:** Se caracteriza básicamente por el tipo y por la tasa de codificación la cual se mide como la cantidad de bits de entrada con relación a la salida; siempre es un número menor que 1 y se estila representarlo por medio de una fracción.
- **Sincronización:** Maneja las estimaciones de todos los tiempos y las frecuencias, es un elemento clave, una señal de reloj que ajusta todo el control del procesamiento de la señal en el sistema.

- **Modulación:** Realiza el proceso por el cual los símbolos digitales son transformados a formas de ondas que son compatibles con las características del canal. En el caso de modulación en banda base, estas formas usualmente tienen la forma de pulsos. Pero en el caso de modulación en banda pasante las formas de pulsos modulantes es una sinusoidal llamada *señal portadora* o simplemente una portadora para transmisiones de radio.
  
- **Canal inalámbrico:** está compuesto por la atmósfera del planeta siendo el único medio de transmisión que ofrece a los sistemas de comunicaciones flexibilidad y movilidad. Es el medio más utilizado desde el origen mismo de los sistemas comunicación por su amplio rango de operación. Su espectro está constituido por la amplia escala del espectro electromagnético [3].

#### **1.1.4 Ventajas que brindan las comunicaciones inalámbricas en comparación con los sistemas comunicación cableados**

- Capacidad para un gran número de suscriptores.
  
- Uso eficiente del espectro electromagnético debido a la utilización repetida de frecuencias.
  
- Prestación de servicios para aplicaciones de datos, voz y video.
  
- Calidad del servicio (en el caso de la voz) comparable al servicio telefónico tradicional y accesible al público en general.
  
- Bajo costo de implementación.

- Poco tiempo de instalación [6].

### 1.1.6 Desventajas de los sistemas de acceso inalámbrico fijo

A pesar de las ventajas de la tecnología inalámbrica, muchas de las empresas no tienen incentivos financieros significativos para invertir en la satisfacción de los servicios básicos, por lo que se convierten en obstáculos para la implementación de estas tecnologías.

- Por motivo de las condiciones sociales y políticas, las tarifas para llamadas locales se mantienen en forma artificial muy bajas, y a menudo por debajo del costo. Como resultado de esto, las rentabilidades de las inversiones en la infraestructura para los servicios básicos son en extremos muy bajos.
- Desde la perspectiva financiera, lo atractivo para las operaciones e inversiones inalámbricas en el servicio básico es que mejorarán conforme a los gobiernos.
- Existen dificultades como accesibilidad a las frecuencias por saturación del espectro, la instalación de torres de antenas en ciudades, o la obtención de permisos de instalación en azoteas e interior de inmuebles.
- Si el ancho de banda que se solicita es limitado, también lo será la capacidad del sistema.

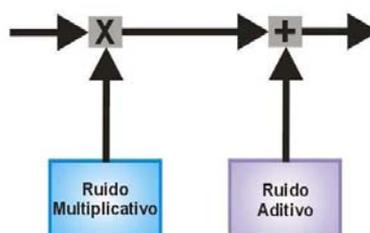
Existe una tendencia a diseñar e implementar sistemas inalámbricos móviles como requisito fundamental de toda tecnología actual. Esto se debe a la creciente integración de plataformas tecnológicas como la Internet dentro de los

servicios más demandados por usuarios de telefonía móvil y el acelerado desarrollo de las redes de nueva generación [2].

## 1.2 El canal inalámbrico como medio de transmisión

El canal inalámbrico incluye la ionosfera, la troposfera y el espacio libre. En todo caso se introducen distintos tipos de ruido, interferencias y fenómenos que influyen en la calidad de la señal recibida.

En la Figura 1.2 se muestra dos clases de ruido, estos están presentes en cualquier comunicación debido a procesos de interacción de la onda con el entorno y con los mismos equipos que la generan, transmiten y reciben. Estos efectos a la hora de realizar un estudio o planificación de un enlace inalámbrico son de suma importancia y al final definen el desempeño del sistema limitando la tasa de transmisión efectiva que pudiera obtenerse.



**Figura 1.2 Tipos de ruido en un sistema de comunicación.**

**Ruido aditivo:** comúnmente llamado ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN), generalmente se origina en la recepción por efectos térmicos debido a los dispositivos activos y pasivos, por fuentes externas como efectos atmosféricos, radiaciones cósmicas e interferencias de otros transmisores.

**Ruido multiplicativo:** Se origina por varios procesos en el camino de la antena transmisora a la receptora. Se le denomina de forma general Fading y es el desvanecimiento que sufre la señal al llegar al receptor.

- La característica direccional de la antena transmisora y receptora (patrones de radiación).
- Reflexión ocasionada por paredes, montañas, edificios.
- Absorción ocasionada por paredes, árboles, atmósfera, ionosfera.
- Dispersión ocasionada por lluvia, superficies irregulares, el océano, ramas de árboles.
- Difracción por bordes, techos de edificios.
- Refracción debida a las capas atmosféricas y tipos de material donde se lleva a cabo la propagación [4] [23].

### 1.2.1 Desvanecimiento en el canal

La propagación de las señales eléctricas a través de diversos medios está sujeta a la variabilidad de sus características físicas. La pérdida básica de propagación es una variable aleatoria. Suponiendo invariable con el tiempo el valor medio de la potencia transmitida, la variabilidad de la pérdida básica implica que la potencia recibida sea variable. Se denomina potencia recibida nominal al valor mediano de la potencia recibida y suele ser uno de los objetivos de diseño de los sistemas de radiocomunicaciones [5].

Se conoce como desvanecimiento a toda disminución de la potencia recibida de señal con relación a su valor nominal [4]. La diferencia entre este nivel nominal y el nivel recibido en condiciones de desvanecimiento se llama profundidad de desvanecimiento y se expresa en dB. Al intervalo de tiempo que media entre la disminución y la recuperación del nivel nominal, se le llama duración del desvanecimiento [6].

### 1.2.2 Clasificación de los desvanecimientos dentro del canal

Hay diversos criterios para la caracterización de los parámetros del desvanecimiento. En la Tabla 1.1 se ofrece una clasificación según diversas características.

Un desvanecimiento muy profundo suele ser selectivo, se produce por interferencia multitrayecto y se modela por una distribución Rayleigh. Es plano cuando la caída de nivel afecta por igual a todas las componentes del espectro de una portadora modulada. En cambio los desvanecimientos selectivos producen distorsión en el espectro de la señal modulada, al afectar de modo diferente a unas frecuencias y a otras. Ello provoca a su vez una degradación en la señal demodulada.

**Tabla 1.1 Caracterización de los desvanecimientos.**

| Característica              | Tipo de desvanecimiento |                |
|-----------------------------|-------------------------|----------------|
| Profundidad                 | Profundo                | Muy profundo   |
| Duración                    | Lento                   | Rápido         |
| Característica espectral    | Plano                   | Selectivo      |
| Mecanismos de producción    | Factor k                | Multitrayecto  |
| Distribución probabilística | Gaussiano               | Rayleigh, Rice |
| Dependencia temporal        | Continuado              | Puntual        |

Por este motivo es necesario dotar algunos sistemas de radiocomunicaciones de contramedidas protectoras para los desvanecimientos selectivos.

Se llaman desvanecimientos de potencias o de "factor k" a los producidos por variaciones en el índice de refracción troposférica que al aumentar la curvatura

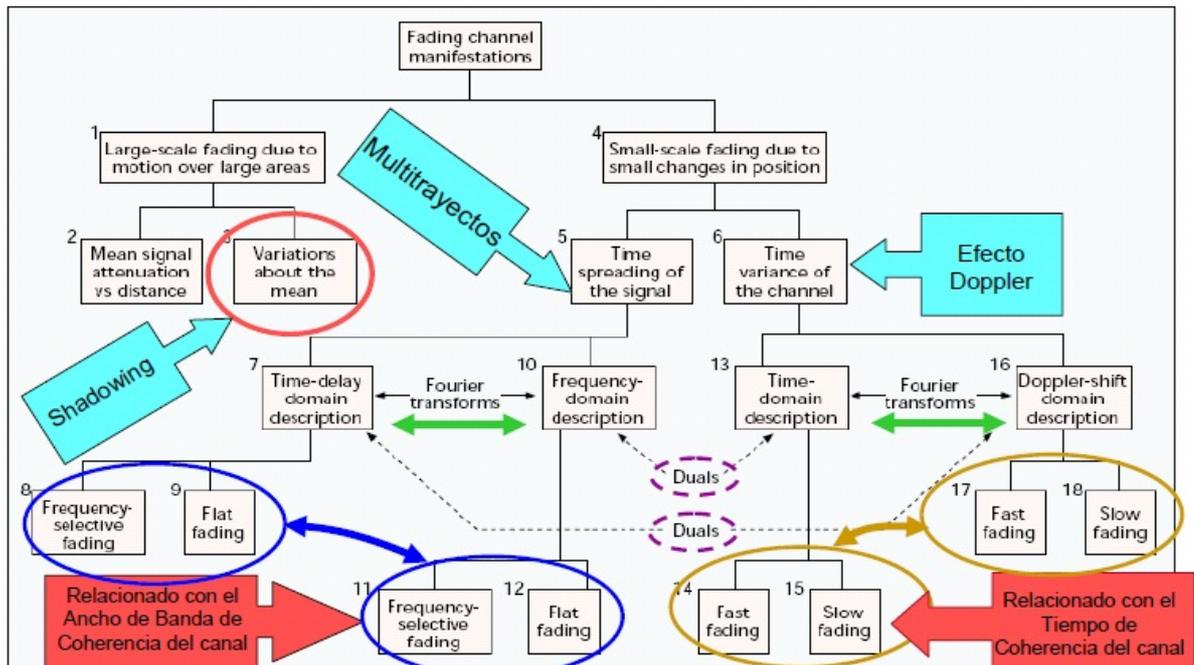
aparente de la tierra, reducen el margen libre de obstáculos pudiendo llegar a convertir un trayecto con visibilidad directa en otro obstruido. Este tipo de desvanecimiento suele ser lento, con duración larga y profundidades de hasta 6dB. Como el radio de Fresnel depende de la frecuencia, este desvanecimiento también variara con la frecuencia, pero a gran escala. De una banda a otra pero no dentro de la misma banda. Se trata pues de un desvanecimiento plano. Pueden producirse también por mecanismos de superrefracción y formación de conductos que desenfocan el haz radioeléctrico. Las variaciones de nivel correspondientes se modelan mediante distribuciones gaussianas o expresiones empíricas. Estos pueden controlarse mediante la elección adecuada de las alturas de las antenas.

En condiciones normales de propagación, suele estar presente otro desvanecimiento de pequeña intensidad originado por irregularidades en la troposfera, denominado "centelleo" y que se modela mediante una distribución gaussiana.

Debido a su intensidad y al hecho de ser selectivo en frecuencia en muchas ocasiones produce una importante atenuación y distorsión de la señal recibida, por lo que ejerce una marcada influencia sobre la calidad de los sistemas de radiocomunicaciones. Hay que tener en cuenta que la reflexión especular o difusa en el suelo suele ser previsible y puede contrarrestarse en cierto grado [5].

### **1.2.3 Modelo general para representar los desvanecimientos y efectos que surgen en un canal de comunicación inalámbrico**

La figura 1.4 muestra un modelo que tiene en cuenta las características y el tamaño del sistema de radiocomunicación. El significado de cada bloque dentro del modelo es el siguiente:



**Figura 1.4 Modelo general de desvanecimientos**

- Bloque 1, 2, 3 - Large Scale Fading: Se caracteriza por la potencia media recibida, las pérdidas del trayecto y el shadowing.
- Bloque 4, 5, 6 - Small Scale Fading: Se manifiesta en dos mecanismos. dispersión temporal y variación del canal en el tiempo. En móviles el canal es variante en el tiempo debido al movimiento del equipo terminal.
- Bloque 6 - Time Variance of the Channel: Las variaciones del canal con el tiempo se pueden representar en el dominio del tiempo (13) o en el dominio de la frecuencia (16); usando la transformada de Fourier se puede pasar de un dominio a otro.

Bien sea a partir de los bloques 13 o 16 se definen dos tipos de Fading:

- Bloque (15, 18) – Slow fading: Cuando el tiempo de coherencia ( $T_{coh}$ ) es mayor que el tiempo de símbolo, el canal permanece casi constante durante el tiempo de símbolo.
- Bloque (14, 17) – Fast fading: cuando el  $T_{coh}$  es menor que el tiempo de símbolo.
- Bloque (5) - Dispersión Temporal de la Señal: Esta dispersión se manifiesta en el hecho que la respuesta al impulso está formada por varios impulsos separados en tiempo de acuerdo con el retardo de los diferentes trayectos. Si el canal no fuese dispersivo, la respuesta al impulso sería también un impulso y su respuesta en frecuencia sería completamente plana. Dado que esto no sucede entonces el canal tiene un ancho de banda limitado. Entonces el efecto del canal sobre la comunicación depende de la relación entre el ancho de banda de la información ( $B_i$ ) y el ancho de banda de coherencia ( $B_{coh}$ ).
- Bloque (9, 12) – Flat fading: Cuando  $B_i \leq B_{coh}$ , entonces la respuesta del canal se considera plana y el desvanecimiento es igual en todas las frecuencias, y se denomina desvanecimiento plano.
- Bloque (8, 11) – Frequency selective fading: Cuando  $B_i \geq B_{coh}$ , entonces la respuesta del canal no es plana y tenemos desvanecimiento selectivo en frecuencia.

La correlación entre la respuesta al impulso del canal en dos instantes de tiempo diferentes se define por el tiempo de coherencia  $T_{coh}$  y como el tiempo para el cual la correlación decrece 3dB. Es una medida estadística del tiempo durante el cual el canal permanece casi constante [4].

### 1.2.4 Parámetros y características del modelo general de desvanecimientos

#### **Shadowing:**

Es el fenómeno que se produce cuando la línea de vista (LOS) se obstruye debido a los obstáculos que pueden estar en el trayecto de propagación. Dado que las características de todos estos son aleatorias, también lo será el valor de la potencia recibida. Este fenómeno produce una variación aleatoria muy lenta en el valor medio de la señal recibida, debido a que es producto de la combinación de diversas variables. Causa grandes variaciones en la SNR y se considera el hecho de que a una misma distancia del transmisor se pueden obtener valores aleatorios de potencia debido a la presencia de obstáculos [23].

#### **Multitrayectos:**

Los multitrayectos no son exclusivos de los sistemas inalámbricos, de hecho puede haber y en realidad hay multitrayectos en sistemas cableados. Sobre todo cuando el acoplamiento de impedancias no es óptimo. Estos desacoples producen una gran cantidad de ondas reflejadas con diferentes amplitudes que llegan al receptor con diferentes retardos.

Los desvanecimientos multitrayecto se originan por la propagación de varios caminos de propagación entre el transmisor y el receptor. De forma que se produce una interferencia entre los rayos directos y los que alcanzan la antena receptora con diversos ángulos tras recorrer otros trayectos de propagación. La señal resultante es la suma de una componente prácticamente constante de señal directa y otras componentes de amplitudes variables en función de las amplitudes y fases instantáneas de las componentes [23].

#### **Efecto Doppler:**

Este efecto tiene gran importancia cuando es un sistema móvil de comunicación inalámbrico. Comúnmente llamado efecto Doppler es cuando existe un movimiento relativo entre el transmisor y el receptor, la frecuencia de la señal recibida no es la misma que la enviada. Si el transmisor y el receptor se alejan la frecuencia recibida es menor, y si se acercan es mayor a la transmitida. Este efecto se produce cuando uno o ambos extremos del proceso de comunicación se desplazan. En el caso particular de las redes celulares, la estación base está fija mientras que el equipo terminal se desplaza a una velocidad variable en el tiempo. Este efecto se caracteriza por el Doppler Spread, que es una representación en frecuencia de la variación de la densidad espectral de potencia debida al desplazamiento del móvil.

Cuando el terminal móvil se desplaza, el canal de radio varía en el tiempo, por lo que se tiene un canal denominado variante en el tiempo; en este tipo de canales, en cada posición del móvil obtendríamos una  $h(t)$  distinta, la cual está relacionada con  $H(w)$  a través de la transformada de Fourier. Estas variaciones del canal dependen de la velocidad de desplazamiento del móvil, de la frecuencia de la portadora y del ángulo de llegada.

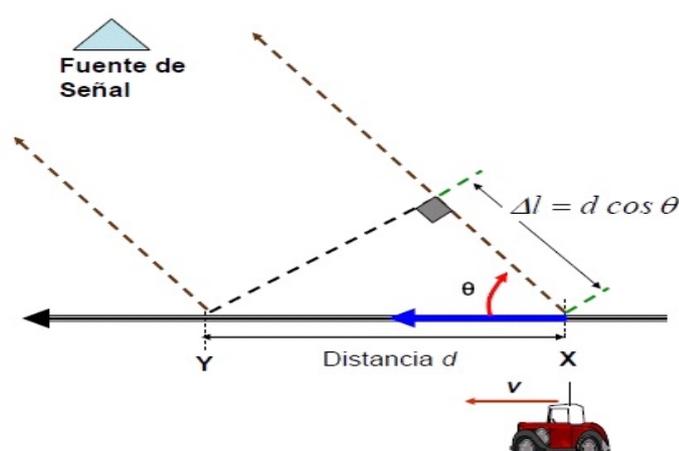


Figura 1.7 Efecto doppler.

La variación de  $f$  representa el cambio introducido en la frecuencia de la portadora, de manera que el móvil recibe una señal cuya frecuencia es  $f_c \pm \Delta f$ ; si el móvil se está acercando se usa el signo positivo y si se está alejando se usa el signo negativo. El máximo cambio absoluto en la frecuencia se obtiene cuando  $\theta = 0$  o para  $\theta = \pi$ . En ese caso llegamos a:

Este es un resultado determinístico, ya que en la práctica tanto la velocidad del móvil como el ángulo  $\theta$  son totalmente aleatorios [4] [23].

### 1.2.5 Métodos empíricos de predicción de propagación

Se han desarrollado procedimientos empíricos para la estimación de la pérdida básica de propagación y de la intensidad del campo. Estos procedimientos se fundamentan en amplias campañas de mediciones y en una posterior correlación de las medidas con características generales descriptivas del medio de propagación. Como los servicios de comunicación de tipo zonal por antonomasia son los de radiodifusión y los móviles. Estos han representado los primeros y más destacados destinatarios de estos métodos de predicción de propagación.

Los primeros métodos se presentaron en forma de ábaco y curvas de propagación normalizadas para su utilización manual. Posteriormente se han desarrollado versiones y ampliaciones de los mismos, adaptadas al cálculo por ordenador. Con el fin de incorporarlas en programas informáticos. Estos métodos proporcionan una estimación rápida de la pérdida básica de propagación o de la intensidad de campo en cualquier punto en torno a un transmisor. Son de utilización rápida y sencilla pero obviamente su exactitud es mediocre. La media cuadrática del error entre el valor estimado por uno de estos métodos y el valor medido puede ser del orden de 10 a 14dB [5].

### 1.2.6 Modelos a gran escala de propagación del canal inalámbrico

Los modelos a gran escala utilizan métodos empíricos que permiten conocer el valor de las pérdidas de la potencia de la señal para distancias muy grandes comparadas con la longitud de onda. Estiman el valor promedio de señal para separación típica entre  $T_x$  y  $R_x$  de cientos de metros o varios kilómetros y se utilizan para calcular el radio de cobertura, espacio libre y reflexión desde la Tierra.

**Modelo de Okumura – Hata:** Modelo empírico obtenido a través de mediciones en las banda de 150 a 1920 MHz, pero puede ser extendido a 3000 MHz, es uno de los más usados para aplicaciones móviles en áreas urbanas.

La fórmula fundamental de Hata da la pérdida básica de propagación para medios urbano, suburbanos y rurales. El modelo de Okumura está completamente basado en una amplia campaña de mediciones en la ciudad de Japón. Por lo que no proporciona ninguna explicación analítica.

Este modelo conlleva una gran serie de cálculos de factores de corrección que deben estimarse a partir de gráficas y tablas, lo que hace el modelo engorroso. Sin embargo, es muy fácil de usar y es casi un clásico en la planificación de sistemas móviles modernos, se adapta muy bien para áreas urbanas y suburbanas. Pero no para áreas rurales. La desviación estándar entre los valores estimados por el modelo y las medidas está entre unos 10 y 14 dB.

El modelo inicial presentado por Okumura, está soportado por una serie de datos gráficos, la necesidad de informatizar el modelo condujo a Hata realizar a partir de éstos últimos una formulación del modelo de Okumura que facilita el cálculo de las pérdidas [5].

**Modelo COST231-Hata:** COST es una organización europea intergubernamental para la cooperación científica y tecnológica. Los primeros estudios sobre GSM se iniciaron con un proyecto COST. El rango de utilización del modelo es:

- Frecuencia portadora: 1500-2000 MHz

- Altura de la estación base: 30-200 metros
- Altura de la estación móvil: 1-10 metros
- Distancia de 1 a 20 Km

A pesar que tanto el modelo de Okumura-Hata, y el COST231-Hata están basados en la suposición que las antenas de la BS deben tener una altura superior o igual a 30m, es posible usarlos cuando la antena de estación base esté a alturas menores. No se recomienda para ambientes urbanos y debe usarse para distancias superiores a 1 Km.

**Modelo COST 231 Walfisch-Ikegami:** Es un modelo muy completo y bastante usado para el cálculo de cobertura. Brinda una gran exactitud, ya que en ambientes urbanos la propagación está dominada por el plano vertical y el efecto de los techos de las edificaciones.

El modelo toma en cuenta las edificaciones en el plano vertical, así considera las características de las estructuras de las ciudades. La gama de valores de los parámetros dentro del cual es aplicable el modelo es la siguiente:

- Para una frecuencia entre 800 a 2000Mhz.
- Para una altura de la antena estación base de 4 a 50 metros.
- Para una altura de la antena estación móvil de 1 a 3 metros.
- Para una d entre 0.02 a 5 kilómetros.

Como se desprende de estos rangos de valides el modelo resulta especialmente aplicable a los nuevos sistemas de radiocomunicaciones móviles celulares. En las nuevas bandas de frecuencias atribuidas a los mismos y con celdas de pequeño radio de los medios urbanos [5].

### **1.2.7 Modelos de pequeña escala de propagación del canal inalámbrico**

En estos modelos se consideran varias longitudes de ondas alrededor de una posición dada y estiman variaciones rápidas de la señal en periodos muy cortos de tiempo. Considera cambios instantáneas por múltiples trayectos.

Para propósitos de procesamiento de la señal recibida y para su análisis, de modelos de pequeña escala del canal inalámbrico, entre los más populares tenemos:

- Modelo de Rayleigh.
- Modelo de Rice o Rician.

Estos permiten calcular parámetros que influyen directamente en la capacidad del canal y en su ancho de banda. Se basan en formulas de probabilidad para obtener los resultados en graficas. Cuando existe una componente dominante de rayo directo, la resultante tiende a medirse por la distribución probabilística de Rice. Si en cambio las componentes tienen amplitudes instantáneas similares la resultante es de tipo Rayleigh. Esta situación se produce típicamente cuando no existe el rayo directo por encontrarse obstruido el trayecto de propagación como por ejemplo los sistemas comunicaciones móviles [6] [23].

### **1.3. Modulaciones digitales**

Como a menudo no es práctico propagar directamente las señales de información por los diferentes medios de transmisión, con frecuencia es necesario modular la información de la fuente, con una señal analógica de mayor frecuencia, llamada portadora. En esencia, la señal portadora transporta la información a través del sistema. La señal de información modula a la portadora, cambiando su amplitud, su frecuencia o su fase. Modulación no es más que el proceso de cambiar una o más propiedades de la portadora, en proporción con la señal de información [3].

La modulación se realiza con el objetivo de obtener un mejor aprovechamiento del canal de transmisión y proteger la señal del ruido. Según la portadora sea una señal analógica o digital, las diferentes formas de modulación se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Modulación por onda continua.
- Modulación por pulsos.

La modulación digital en fase (PSK) es similar a la modulación en fase convencional, excepto que con PSK la señal de entrada es una señal digital binaria y son posibles un número limitado de fases de salida. Dado que lo más común es codificar un número entero de bits por cada símbolo, el número de fases a tomar es una potencia de dos:

- BPSK con 2 fases
- QPSK con 4 fases

A mayor número de fases, mayor es la cantidad de información que se puede transmitir utilizando el mismo ancho de banda, pero mayor es también su sensibilidad frente a ruidos e interferencias dado el hecho de que las fases están más cerca la una de la otra y podría ser más fácil confundirlas [20].

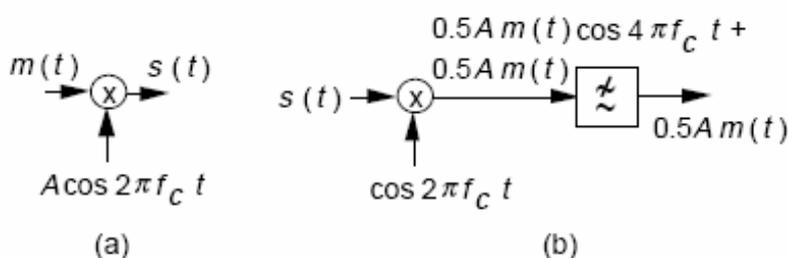
La transmisión por desplazamiento de fase diferencial (DPSK), es una forma alterna de modulación digital en donde la información de entrada binaria está contenida en la diferencia, entre dos elementos sucesivos de señalización, en lugar de la fase absoluta. Con DPSK no es necesario recuperar una portadora coherente en fase. En lugar de eso, se retarda un elemento de señalización por una ranura de tiempo y luego se compara al siguiente elemento recibido de señalización. La diferencia, en fase, de los dos elementos de señalización determina la condición lógica de los datos.

La ventaja principal del DPSK es la simplicidad con la que se puede implantar. Con DPSK, no se necesita circuito de recuperación de la portadora. Una desventaja del DPSK es que requiere de entre 1 y 3 dB más de relación señal a ruido para alcanzar la misma tasa de errores de bits que el PSK absoluto [1].

### 1.3.1 Modulación BPSK

Con la transmisión por desplazamiento de fase binaria (BPSK), son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia de portadora. Una fase de salida representa un 1 lógico y la otra un 0 lógico. Conforme la señal digital de entrada cambia de estado, la fase de la portadora de salida se desplaza entre dos ángulos que están desfasadas  $180^\circ$ . El BPSK es una forma de modulación de onda cuadrada de portadora suprimida de una señal de onda continua.

La figura 1.10 muestra los diagramas de bloques de un modulador (a) y un demodulador (b) BPSK.



**Figura 1.10 a) Modulador BPSK b) Demodulador BPSK.**

La figura 1.11 indica que conforme la señal digital de entrada cambia, la fase de la salida varía entre  $0^\circ$  o  $\pi$  ( $180^\circ$ ).

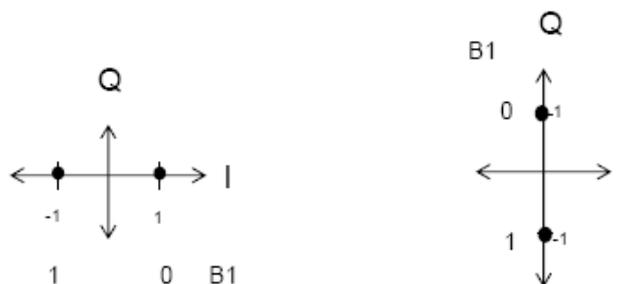


Figura 1.11 Constelación de la modulación BPSK

### 1.3.3 Modulación QPSK

La modulación por cambio de fase en cuadratura está conformada por dos moduladores BPSK combinados en paralelo, como puede observarse en la figura 1.12 [13]

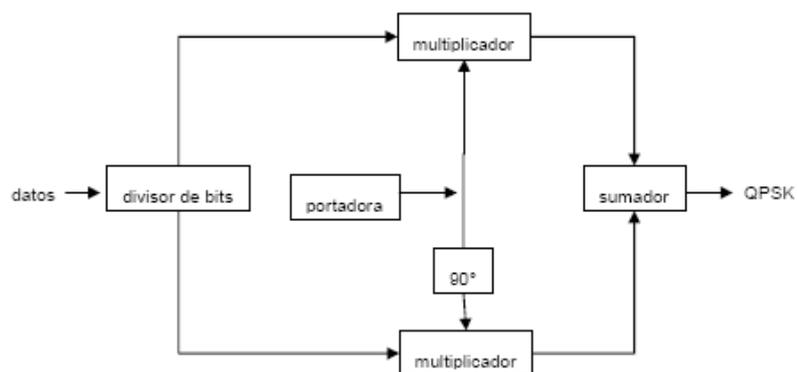
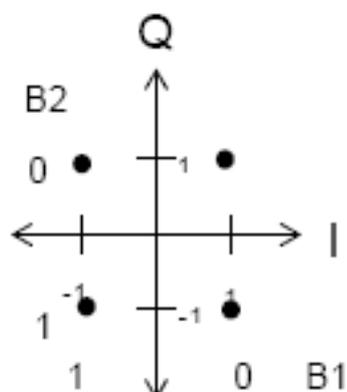


Figura 1.12: Esquema de modulación QPSK

En esta modulación hay cuatro fases como se muestra en la figura 1.13 en la que se representan los dígitos 00, 01, 11, 10 donde cada fase transmite dos bits[3].



**Figura 1.13 Constelación de la modulación QPSK.**

### 1.3.5 Modulación QAM

La modulación de amplitud en cuadratura, es una forma de modulación digital donde la información está contenida tanto en la amplitud como en la fase de la portadora. Una de las ventajas de este tipo de modulación es que al tener, por ejemplo en 8-QAM cuatro desfasamientos y dos amplitudes, se tienen 8 estados diferentes de transmisión, por lo que se pueden codificar 3 bits diferentes para cada símbolo transmitido, lo que incrementa la velocidad de transmisión. El QAM de ocho (8-QAM), es una técnica de codificación M-ario, en donde  $M = 8$ . A diferencia del 8-PSK, la señal de salida de un modulador de 8-QAM no es una señal de amplitud constante [3] [13].

### 1.3.6 Modulación 16-QAM

16-QAM es un sistema M-ario, donde  $M = 16$ . Esta modulación actúa sobre los datos de entrada en grupos de cuatro ( $2^4 = 16$ ). Como con el 8-QAM donde, tanto la fase como la amplitud de la portadora transmisora, son variadas.

La figura 1.14 muestra el diagrama de bloques para un transmisor de 16-QAM donde los datos de entrada binaria se dividen en cuatro canales: I, I', Q y Q' y la

tasa de bits de cada canal es igual a un cuarto de la tasa de bits de entrada.

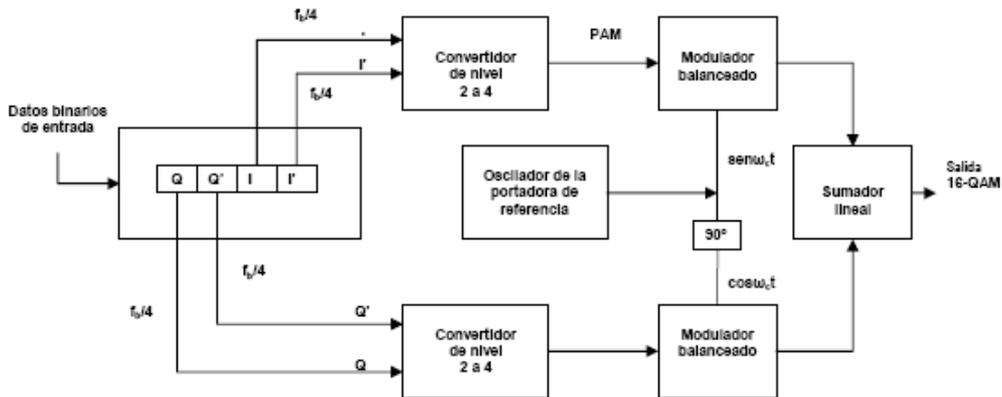


Figura 1.14 Esquema de modulación 16-QAM

En la modulación 16-QAM hay dieciséis fases como se muestra en la figura 1.15 en la que se representan los dígitos 0000, 0001, 0010, 0011, 0100, 0101, 0110, 0111, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110, 1111 donde cada fase transmite cuatro bits[3].

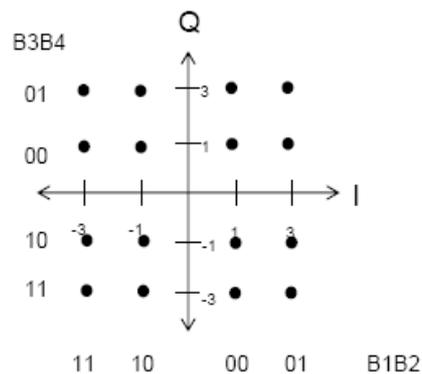
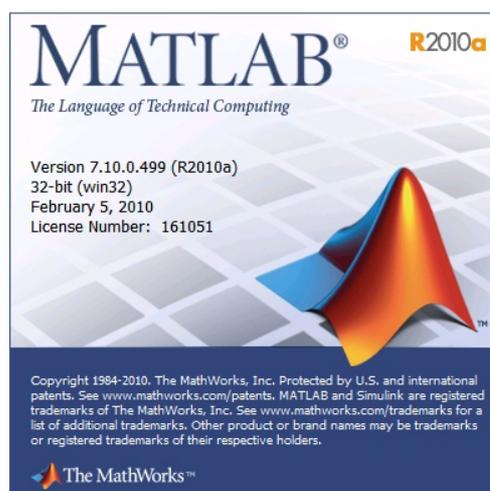


Figura 1.15 Constelación de la modulación 16-QAM.

## 1.4. Introducción al software MatLab/SIMULINK

El laboratorio de matrices (MatLab) es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac OS X. Ver figura 1.17.



**Figura 1.17 Presentación de Matlab.**

Entre sus prestaciones básicas se hallan:

- Manipulación de matrices.
- Representación de datos y funciones.
- Implementación de algoritmos.
- Creación de interfaces de usuario.
- Comunicación con programas en otros lenguajes [7].

El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones: la plataforma de simulación multidominio (SIMULINK) y el editor de interfaces de usuario (GUIDE). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes), dichos toolboxes constituyen colecciones abarcadoras de funciones que extienden el

ambiente de MATLAB para así solucionar problemas muy particulares; y las de SIMULINK con los paquetes de bloques (block sets).

Los usos y aplicaciones típicos de MATLAB son:

- Matemática y computación.
- Desarrollo de algoritmos.
- Adquisición de datos.
- Modelado y simulación.
- Análisis y procesamiento de datos.
- Gráficos científicos y de ingeniería.
- Desarrollo de aplicaciones, entre otros.

MATLAB ha evolucionado a lo largo de varios años. En ambientes universitarios es la herramienta de instrucción estándar para cursos introductorios y avanzados en matemáticas, ingenierías y ciencias. En industrias es la herramienta de preferencia usada para investigaciones de alta productividad, desarrollo y análisis [8].

**SIMULINK** es un software para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Soporta tanto sistemas lineales como no lineales; realiza simulaciones de cualquier sistema que pueda ser definido por ecuaciones diferenciales continuas y ecuaciones diferenciales discretas, esto significa que se pueden modelar sistemas continuos en el tiempo, discretos en el tiempo o sistemas híbridos. Los sistemas pueden ser también multifrecuencia, es decir, tienen diferentes partes que se muestrean o actualizan con diferentes velocidades.

Miles de científicos e ingenieros en todo el mundo usan SIMULINK para modelar y resolver problemas reales en gran variedad de industrias, incluyendo:

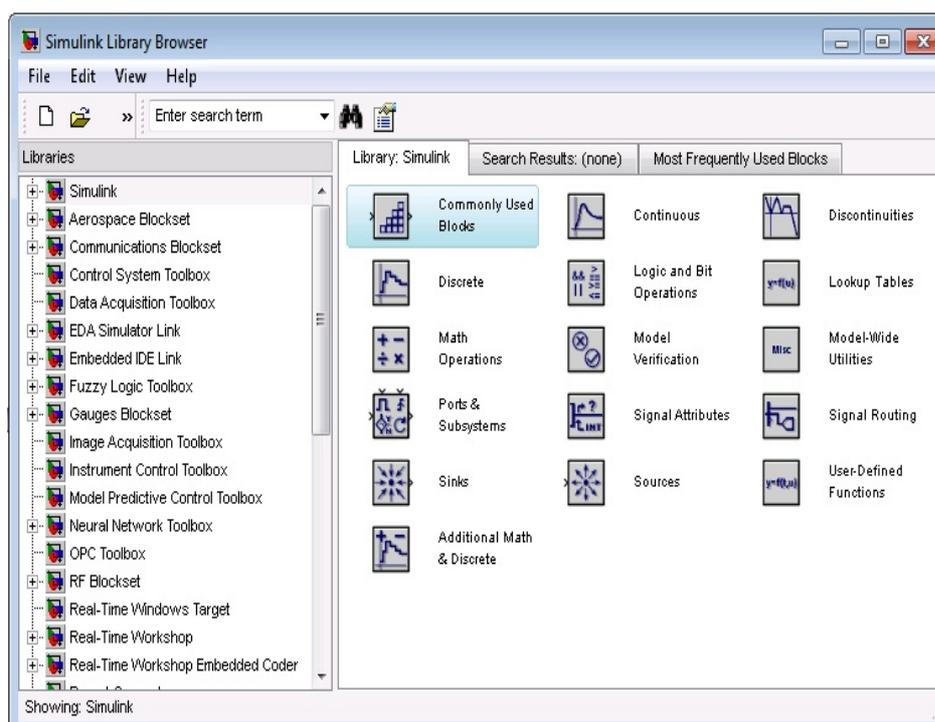
- Aeroespacial y Defensa.
- Automotriz.
- Comunicaciones.
- Electrónica y Procesamiento Digital de Señales (DSP).

➤ Instrumentación Médica.

SIMULINK tiene dos fases de uso: la definición del modelo y el análisis del modelo. La definición del modelo significa construir el modelo a partir de elementos básicos construidos previamente, tales como, fuentes de valor constante, compuertas lógicas, terminales, etc. El análisis del modelo significa ejecutar la simulación y valorar los resultados obtenidos.

Las herramientas de análisis de modelos que incluyen linealización y determinación de estados estacionarios pueden ser accedidas desde la línea de comandos del MATLAB, así como las muchas utilidades que MATLAB y sus toolboxes de aplicación poseen, y como MATLAB y SIMULINK están integrados, pueden simular, analizar y revisar sus modelos en uno u otro entorno en cualquier momento [9].

En SIMULINK, un modelo es una colección de bloques que, en general, representa un sistema. Hay dos clases principales de elementos: bloques y líneas. Los bloques se utilizan para generar, modificar, combinar, salida y visualización de señales. Las líneas se utilizan para transferir señales de un bloque a otro. SIMULINK incluye una amplia biblioteca de bloques de terminales, fuentes, componentes lineales y no lineales y conectores. Permite además personalizar y crear bloques propios. Ver figura 1.2.



**Figura 1.18 Librería de SIMULINK/Matlab.**

En la figura 1.18 se muestra el blockset de comunicaciones que extiende el software de Simulink, con una biblioteca exhaustiva de bloques para diseñar y simular la capa física de sistemas de comunicaciones y componentes. Ayuda en el diseño de sistemas de comunicaciones así como en la elaboración de un diseño que permite representar de forma general o específica las características, condiciones y resultados obtenidos de forma clara.

Las características del blockset de comunicaciones son:

- Bloques para diseñar y simular la capa física de sistemas de comunicaciones, incluyendo la modulación, la fuente y la codificación de canal y tipos de canales.
- La habilidad de afinar modelos y visualizar los resultados.
- Modelos jerárquicos, bloques basados en componentes para expresar diseños complicados visualmente.

Podemos utilizar bloques independientes de otra librería con el objetivo general de:

- Generar diferentes tipos de señales.
- Mostrar graficas en tiempo real del estado de la señal.
- Mostrar graficas del rendimiento del sistema para una determinada configuración [8][10].

### 1.5. Uso de Matlab/Simulink para analizar las métricas de calidad del canal inalámbrico

Existe una gran cantidad de parámetros para medir el desempeño y la calidad de la señal en el receptor. Para realizar mediciones se necesita comparar la señal que sale del transmisor y llega al receptor en un punto determinado y específico. Donde se obtiene una señal con diferencias a la transmitida. En la figura 1.19 se muestra en que parte del receptor se definen las distintas métricas [4].

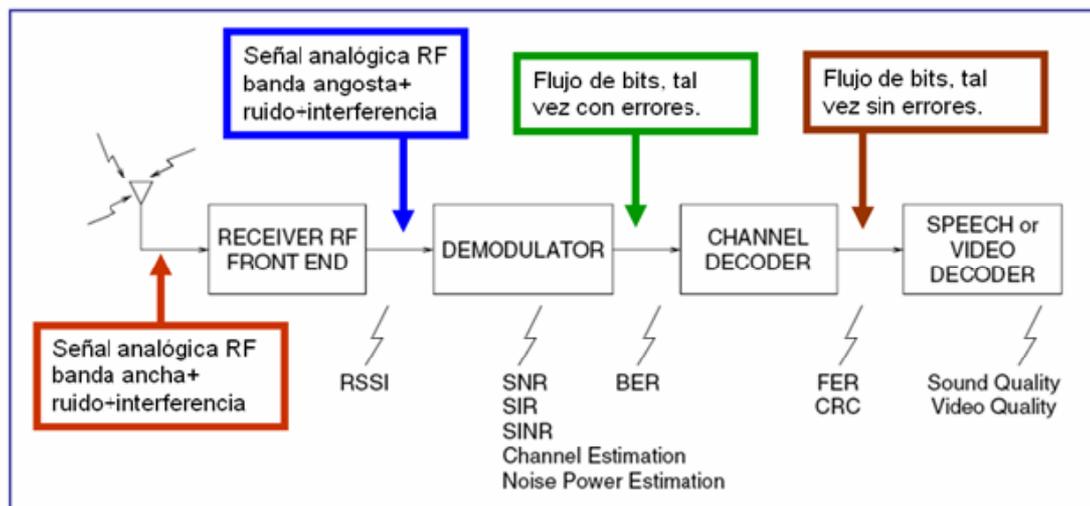


Figura 1.19 Métricas de calidad en el receptor.

**Mediciones antes de la modulación.**

**RSSI: Receive Signal Strength Indication:** Suministra una indicación muy sencilla de las pérdidas del trayecto y del fading a pequeña escala y se mide a la salida del receptor, antes del demodulador. La medición del RSSI es un proceso muy importante en el scanning de las estaciones base cuando el móvil se encuentra en posición de handoff. El valor de RSSI también es usado por los algoritmos de control de potencia.

**El CINR (Carrier to Interference plus noise ratio):** Es una medida de que tan grande es la portadora con relación al ruido más la interferencia, esta medición se hace en RF. Mientras que el SINR se mide en banda base. Esa es la definición que tal vez establezca una diferencia entre CINR y SINR, pero por lo general en telecomunicaciones ambos términos se usan indistintamente.

#### **Mediciones durante y después de la modulación:**

El SNR, SIR, y SINR son las cantidades que comúnmente se miden para estimar la calidad del canal durante o después de la modulación de la señal recibida. En el caso de comunicaciones móviles, los cuales son limitados en interferencia, el SIR y el SINR son las cantidades más usadas. Estas mediciones suministran información más precisa que el RSSI, pero con mayor complejidad de computo e introduciendo un retardo adicional. Los procesos de modulación y codificación adaptativa, tasa de bits, y control de potencia usan estos parámetros para la toma de decisión. Estos parámetros suministran información del valor relativo de la señal en banda, en comparación con el ruido y la interferencia.

Pero para el cálculo de la BER se necesita saber cuáles fueron los bits que se transmitieron para compararlos con los recibidos. Entonces lo que se hace es comparar los bits a la entrada del modulador de canal con los que se generan a la salida del demodulador. En caso de utilizar una codificación lo que se hace es implementarse de igual forma en estos bloques [4].

**Mediciones después del decodificador de canal:**

La calidad del canal también puede medirse basado en los datos obtenidos después de demodulación y decodificación. Todas las métricas relacionadas con cantidad de errores de cualquier tipo, tiene que ver de una manera u otra con los datos que se obtienen a la salida del decodificador de canal. En otras palabras se permite primero que el decodificador de canal haga su trabajo y corrija todo lo que pueda corregir y luego se calculan las métricas. En este rango de mediciones se pueden mencionar BER, SER (Symbol Error Rate), FER (Frame Error Rate) y el CRC.

El FER es la relación de tramas erradas divididas por el total de tramas recibidas durante la transmisión; como el FER se mide después del decodificador de canal aquellas tramas que aún tengan errores es porque el decodificador no las pudo recuperar; de manera similar se define el SER.

El CRC se introduce en el transmisor antes del codificador de canal, y en el receptor se analiza a la salida del decodificador de canal; el CRC permite calcular la calidad de la trama, y se evalúa a partir de los bits de paridad conociendo el polinomio de redundancia cíclica, el CRC indica si una trama está errada o no, pero no puede calcular la cantidad de bits errados,

y por supuesto mucho menos su posición. El FER se evalúa a partir de un promedio de la información obtenida del CRC y una cantidad determinada de tramas. Cuando una trama no puede ser recuperada por el FEC, dependiendo de la aplicación [4].

**1.6. Conclusiones parciales del capítulo**

En este capítulo se vio el concepto general de sistema de comunicación y las partes que lo integran. Las principales características del canal inalámbrico y los efectos presentes en un canal con desvanecimiento. Los modelos que se utilizan en el cálculo de un canal con desvanecimiento ya sea de gran escala o de pequeña escala. Se exponen la importancia del Matlab como software de simulación y las distintas métricas de calidad del canal.

## **Capítulo 2 MODELACIÓN DE ESCENARIOS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS EN MATLAB MEDIANTE SU HERRAMIENTA SIMULINK**

### **2.1 Modelación de escenarios de comunicaciones inalámbricas en MatLab mediante su herramienta Simulink.**

En el presente capítulo se realiza la simulación de escenarios que utilizan canal inalámbricos como medio transmisión a través de la herramienta Simulink, con el objetivo de analizar el comportamiento de los diferentes modelos de canales inalámbricos. Se implementan tres modelos de canal de los cuatro que brinda el Matlab. Se realizan la combinación de estos modelos para lograr varios escenarios a simular.

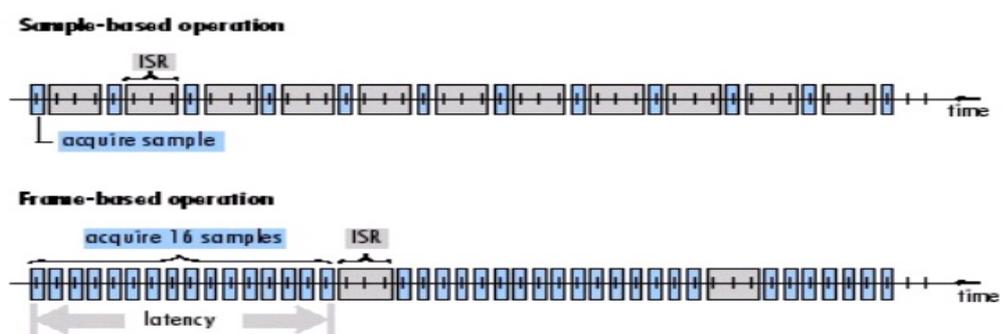
#### **2.1. Procesamiento de la señal en los bloques de Simulink.**

Muchos de los bloques pueden utilizar el procesamiento basado en trama o en muestras. Una trama de datos es una colección de muestras secuenciales con multiplexación de solo un canal o canales múltiples. Se modelara con tramas de solo un canal que son representadas por una matriz de  $M$  filas por un vector de columna. Donde  $M$  representa el tamaño de la trama o el número de muestras por trama. Las muestras son elementos únicos que se procesan uno a uno. Mientras que en el procesamiento basado en trama todas las muestras de una trama se procesan simultáneamente. La ventaja de este procesamiento es que incrementa la velocidad de simulación enormemente. Si después de simulado el modelo las líneas son dobles entonces es una simulación con procesamiento basado en trama.

Este tipo de procesamiento tanto en sistemas en tiempo real o simulaciones es mucho más eficiente. Los sistemas en tiempo real procesan típicamente datos en tramas. Los equipos físicos de adquisición de datos a menudo funcionan

acumulando muchas muestras de señal a una alta tasa y propagan estas muestras en sistemas de tiempo real como un bloque de datos. Esta operación maximiza la eficiencia del sistema distribuyendo el proceso de sobrecarga a través de muchas muestras. Tal distribución permite la adquisición de datos relativamente rápida para que se interrumpa menos por el procesamiento de datos relativamente lento después que cada trama es adquirida, sino más bien después de cada muestra individual [8].

La figura 2.2 ilustra cómo se incrementa el caudal de proceso y transferencia en la adquisición de datos basados en trama, aportándole un mejor rendimiento al sistema. Los bloques finos representan el momento transcurrido durante la adquisición de cada una de las muestras.



**Figura2.2**

Los bloques más amplios representan el momento transcurrido durante la rutina del servicio de interrupción (ISR) del equipo físico que recoge los datos. En este ejemplo, la operación basada en trama adquiere tramas de 16 muestras entre cada ISR. Todos los objetos del sistema soportan el procesamiento basado en muestra y algunos objetos soportan ambos procesamientos [11].

## 2.2. Modelos de canal que presenta MatLab/Simulink y sus características

Cada bloque en Simulink presenta entradas y salidas en dependencia de cómo se va a utilizar. Dentro del Simulink, en su biblioteca de canales, se puede encontrar 4 bloques de canales. De estos se utilizarán tres para representar el canal

inalámbrico con desvanecimiento de pequeña escala y el fenómeno de ruido gaussiano. [12].

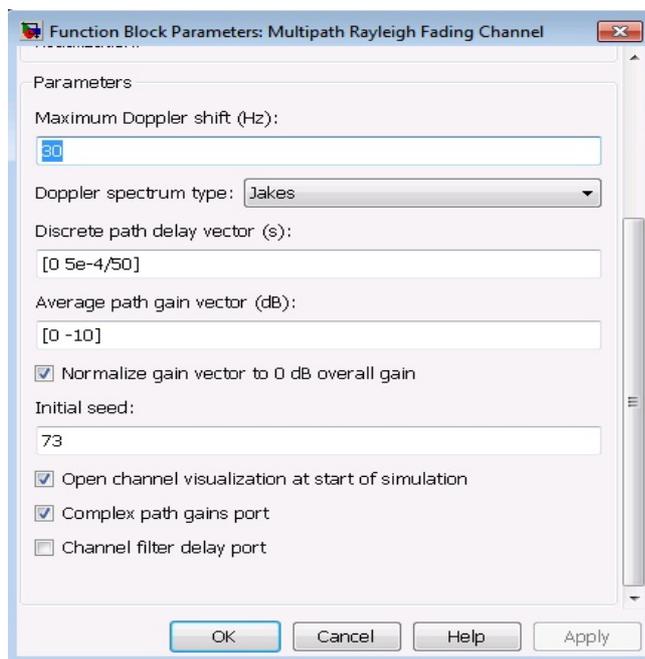
Para la simulación del canal hay que conocer las características que brinda cada bloque. A continuación se explican los bloques de canal que se utilizan en la simulación:

- Multipath Rayleigh Fading Channel
- Multipath Rician Fading Channel " AWGN Channel "

### **2.2.1 Multipath Rayleigh Fading Channel**

Este bloque puede procesar señales complejas en banda base. Se puede usar para hacer un modelo de sistema de comunicación inalámbrico móvil. Este bloque acepta solamente señales de entrada basadas en tramas complejas. Para trabajar con entradas basadas en muestras, se usa el bloque de conversión de trama del blockset de procesamiento de señal para reformatear la señal.

El bloque hereda el tiempo de muestreo de la señal de entrada. Esta debe tener un tiempo de muestreo discontinuo mayor que 0. En la figura 2.3 se muestran sus características [12].



**Figura 2.4 Bloque multitrayecto Rician.**

El relativo movimiento entre el transmisor y receptor causan desplazamiento Doppler en la frecuencia de la señal. Se puede especificar el espectro Doppler del proceso de Rayleigh sobre el cual se va a correr la simulación a través:

Maximum Doppler shift (Hz): Un valor escalar positivo que indica el máximo desplazamiento. Un cambio Doppler máximo a cero corresponde a un canal estático e invariable que utiliza distribución Rayleigh. Este valor debe ser menor que  $1/10 \cdot T_s$ .

Doppler spectrum type: Este parámetro especifica el tipo de espectro Doppler dentro del proceso Rayleigh. Para canales con rutas múltiples, se puede asignar un espectro Doppler diferente a cada ruta, entrando el tipo de espectro en el campo de Doppler spectrum. Este parámetro por defecto es Jakes. Alternativamente se puede elegir entre:

- Jakes: Este espectro de potencia está basado en la suposición de que los ángulos que arriban al receptor móvil son uniformemente distribuidos,

donde cubre todo el espectro uniformemente siendo el espectro Doppler máximo.

- Flat: Contiene solamente una propiedad "Spectrum Type" y es de un valor fijo y plano. Se aplica en ambiente isotrópico disperso donde los ángulos de llegada son distribuidos uniformemente en el azimut de elevaciones planas.
- Gaussian: Este espectro de potencia es considerado como buen modelo para componentes multitrayecto con largas demoras en comunicaciones UHF.
- Rounded: Este espectro redondeado es propuesto como una medición del espectro Doppler calculado de componentes dispersas de canales fijos inalámbricos a 2.5GHz.
- Restricted Jakes: Este espectro de potencia está basado en la suposición de que los ángulos de la llegada en el destinatario móvil son distribuidos uniformemente.
- Asimmetrical Jakes: Este espectro de potencia está basado en la suposición de que los ángulos de la llegada en el destinatario móvil son distribuidos asimétricamente. Contiene las mismas características que el anterior.
- Bi-Gaussian: Consiste en un espectro de potencia con dos desplazamientos en frecuencias gaussiano.

- Bell: Fue propuesto en los modelos inalámbricos en redes de área local para canales de múltiples entradas y múltiples salidas.

Discrete path delay vector (s): Un vector que especifica la demora del tiempo de propagación. Por convenio, la primera demora es puesta típicamente a cero. La primera demora correspondiente al primer sendero que arriba.

Para ambientes en interiores, la demora de trayecto después del primero está típicamente entre 1 y 100 nanosegundos. Es decir entre  $1e - 9$  a  $1e - 7$ . Para ambientes al aire libre, la demora de trayecto después del primero está típicamente entre 100 nanosegundos y 10 microsegundos. Que es entre  $1e - 7$  y  $1e - 5$ .

Para demoras muy grandes en este rango podrían corresponder, por ejemplo a un área rodeada de montañas. La habilidad de una señal de resolver rutas discretas está relacionada con su ancho de banda. Si la diferencia entre las demoras de trayecto grandes y pequeñas son menores que el uno por ciento del periodo de símbolo, entonces la señal experimenta el canal como si pasara solamente un camino discreto.

Average path gain vector (dB): Un vector que especifica la ganancia para cada trayecto. La ganancia media de trayecto dentro del canal indica la ganancia promedio de potencia para cada trayecto con desvanecimiento. En la práctica, es un valor grande de decibeles negativo. Sin embargo, los modelos informáticos usan una ganancia de trayecto media entre -20 y 0 decibeles. Los valores de decibeles se descomponen a menudo aproximadamente lineal como una función de demora. Pero el perfil de demora específico depende del ambiente de propagación. Para asegurar que el valor esperado de potencia total de trayecto sea cero decibeles, usted debe normalizar los aumentos de trayecto por la opción "Normalize Path Gains property".

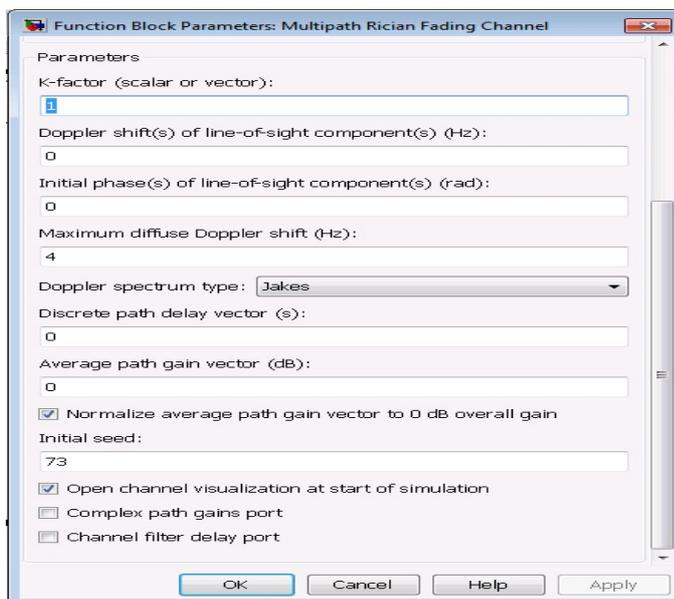
Normalize average path gain vector to 0 dB overall gain: Opción de verificación que causa que el bloque adapte el parámetro de vector de ganancia efectiva del canal teniendo en cuenta todas rutas a 0 decibeles.

Complex path gains port: Esta opción crea un puerto que produce los valores de las ganancias de trayecto complejas para cada uno. En la trama multicanal es M por N, N representa el número de muestras por trama y M representa el número de trayectorias discontinuas (el numero de demoras). Este puerto es utilizado cuando se desea implementar esta ganancia en un ecualizador de canal.

Channel filter delay port: Esta opción crea un puerto que produce el valor de la demora en muestras que resulta de la operación de filtrando de este bloque. Esta demora es cero si solo una ruta es simulada, pero puede ser más grande que cero si más de un trayecto está presente [12].

### **2.2.2 Multipath Rician Fading Channel**

Procesa señales complejas en banda base. Utiliza algunos de los parámetros ya explicados en el bloque anterior. Usted puede usar este bloque para hacer un modelo de sistema de comunicación inalámbrico móvil cuando la señal transmitida puede desplazarse al receptor a lo largo de un trayecto directo(LOS). Este bloque acepta solamente señales basadas en tramas y de entrada complejas. Para trabajar con entradas basadas en muestras, use el bloque de conversión de trama del blockset de procesamiento de señal para reformatear la señal. El bloque hereda el tiempo de muestreo de la señal de entrada. Esta debe tener un tiempo de muestreo discreto mayor que 0. En la figura 2.4 se ven sus características:



**Figura 2.4 Bloque multitrayecto Rician.**

**K-factor:** Es la proporción de potencia en la componente LOS por la potencia en componentes difusos. Es expresado linealmente, no en decibeles.

Para un canal Rician corresponden valores entre uno y 10. Para un valor de cero corresponden a un canal Rayleigh. Si el K-factor es un vector del mismo tamaño que el Discrete path delay vector, entonces cada trayecto discreto es un proceso Rician fading con un K-factor dado por el elemento correspondiente del vector.

**Doppler shift(s) of line-of-sight components(s) (Hz):** El desplazamiento Doppler con componente LOS debe ser un escalar si el K-Factor es un escalar y un vector del mismo tamaño que el K-factor.

Si este parámetro contiene un valor escalar, entonces el componente LOS del primer sendero discontinuo tiene que especificarse el desplazamiento Doppler, mientras que permanecen los trayecto discreto como procesos independientes de Rayleigh fading. Si el parámetro contiene un vector, entonces la componente de NLOS de cada sendero discreto tiene un desplazamiento Doppler dado por el elemento correspondiente del vector.

Initial phase(s) of line-of-sight component(s) (rad): La fase inicial de la componente LOS. Debe ser un escalar (si K- Factor es un valor escalar) o un vector del mismo tamaño que el K-factor.

Muchas aplicaciones inalámbricas, prefieren especificar el desplazamiento Doppler en términos de la velocidad del móvil. Si el móvil se mueve  $v$  representa el movimiento y un ángulo  $\theta$  con la misma dirección de la onda del movimiento

### 2.2.3 El bloque AWGN Channel

Este es el bloque más utilizado en simulaciones. El bloque de canal de AWGN añade el ruido aditivo blanco gaussiano a la señal de entrada. Esta señal puede ser real o compleja. Cuando la señal de contribución es real, este bloque añade ruido gaussiano real y causa una señal de producto real. Cuando la señal de entrada es compleja, este bloque añade ruido gaussiano complejo y causa una señal de producto complejo. Este bloque hereda su tiempo de muestreo de la señal de entrada. Utiliza proceso aleatorio para generar la señal de ruido. Los números aleatorios son generados usando el método de Ziggurat, que es el mismo método usado por el comando `randn` de MATLAB. La señal de entrada puede ser de tipo `single` o `double`. Los tipos de datos de puerto son heredados de la señal de entrada [12].

### 2.3 Relación entre modos de varianza del ruido.

Para señales de entrada complejas, en MatLab el bloque de canal de AWGN relaciona  $E_b/N_0$ ,  $E_s/N_0$ , y SNR de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$E_s/N_0 \text{ (dB)} = E_b/N_0 \text{ (dB)} + 10 \log_{10}(k) \text{ in dB}$$

En los sistemas de comunicaciones,  $k$  puede causar influencia en el tamaño del alfabeto de modulación en la tasa de código de control de errores. Por ejemplo, un

sistema que usa una tasa de codificación de  $\frac{1}{2}$  y modulación 8-PSK. Entonces el número de bits de información  $k$  es el producto de la tasa de codificación y el número de bit de codificación por símbolos de codificación en la ecuación 2.2.

$$\frac{1}{2} \log_2 (8) = 3/2 \quad (2.2)$$

En este sistema tres bit de información corresponden a seis bits de código, en correspondencia a dos símbolos de la 8-PSK.

La relación de  $E_s/N_0$  y SNR es:

$E_s/N_0$  (dB) =  $10 \log_{10} ( T_{\text{sym}} / T_{\text{samp}} ) + \text{SNR}$  (dB) para señales de entrada compleja.

$E_s/N_0$  (dB) =  $10 \log_{10} (0.5T_{\text{sym}} / T_{\text{samp}}) + \text{SNR}$  (dB) para señales de entrada real.

Donde:

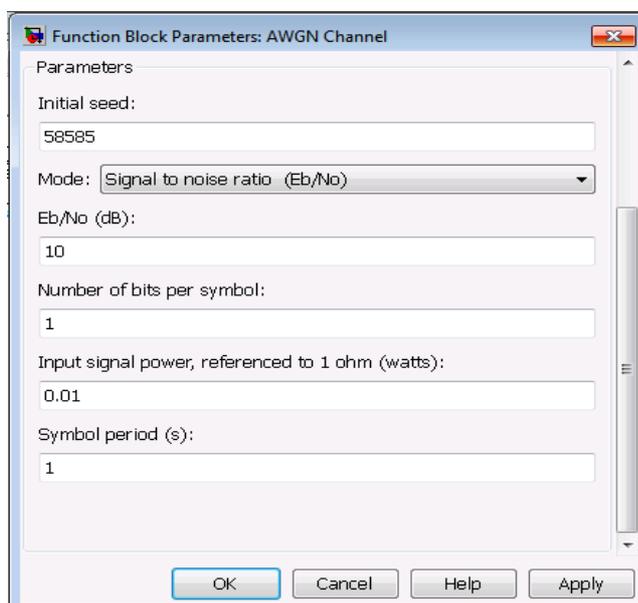
- $E_s$  = Energía de señal (Joules).
- $E_b$  = Energía de bit (Joules).
- $N_0$  = Densidad espectral de potencia de ruido (Watts/Hz).
- $T_{\text{sym}}$  = es el parámetro período de símbolo del bloque en modo  $E_s/N_0$ .
- $k$  = es el número de bits de información por símbolos de entrada.
- $T_{\text{samp}}$  = es el tiempo de muestreo inherente a cada bloque en segundos.

Para las entradas de señal reales, el bloque de canal de AWGN relaciona  $E_s / N_0$  y SNR de acuerdo con la ecuación mostrada:

$$E_s/N_0 = 0.5 (T_{\text{sym}}/T_{\text{samp}}) \cdot \text{SNR}$$

Note que la ecuación para el caso real es diferente que para la ecuación correspondiente para el caso complejo por un factor de 2. Es así porque el bloque utiliza una densidad espectral potencia de ruido de  $N_0 / 2$  watts/Hz para señales de entrada real. También aplicamos esta ecuación para señales complejas.

En la figura 2.2 se muestran los parámetros del bloque:



**Figura 2.2 Canal AWGN.**

**Initial seed:** El número inicial aleatorio para iniciar el generador de ruido gaussiano complejo. Aparece en muchos de los bloques.

**Mode:** El modo por el que se especifica la varianza del ruido: Signal to noise ratio (Eb/No), Signal to noise ratio (Es/No), Signal to noise ratio (SNR), Variance from mask, or Variance from port.

**Eb/No (dB):** La proporción de la energía de bit por símbolo por densidad espectral de potencia de ruido. Este campo aparece sólo si el modo es puesto a Eb / no.

**Es/No (dB):** La proporción de la energía de señal por símbolo por densidad espectral de potencia de ruido. Este campo aparece sólo si el modo es puesto a Es/No.

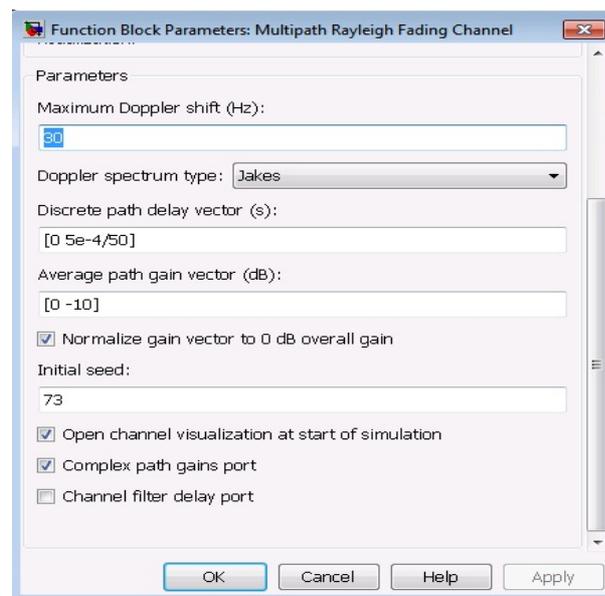
SNR (dB): La proporción de potencia de señal sobre potencia de ruido. Este campo aparece sólo si el modo es puesto a SNR.

Number of bits per symbol: El numero de bits de entrada por símbolos. Este campo aparece solo si es puesto a  $E_b/N_0$ .

Input signal power, referenced to 1 ohm (watts): La potencia media cuadrada de la entrada de símbolos o muestras, en watts. Este campo aparece para cualquier Mode.

Symbol period (s): La duración de símbolos en el canal. Este campo aparece para cualquier modo.

Variance: La varianza para ruido aditivo blanco gaussiano. Este campo aparece solo para el Mode, Variance from mask [12].



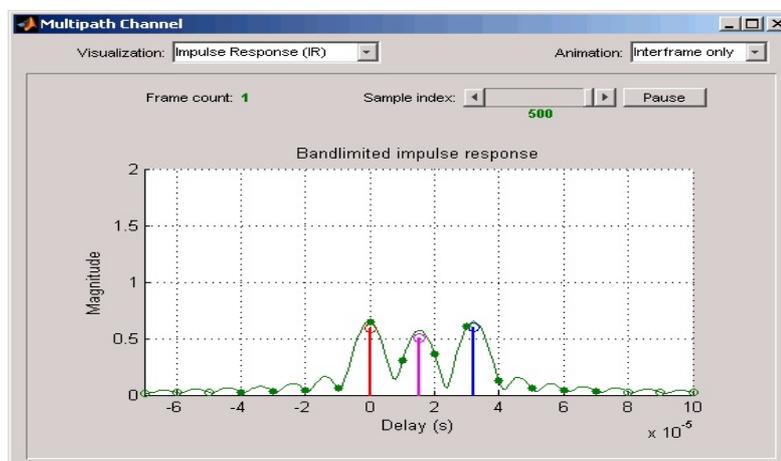
**Figura 2.3 Bloque multitrayecto Rayleigh.**

## 2.4 Partes de la interfaz gráfica de usuario para visualizar el canal multitrayecto

Aquí se muestra el recuento de trama que indica los valores de trama en curso. Muestra el número de tramas procesadas por método de filtro desde que el objeto de canal fue construido o reseteado. La trama es un vector de elementos  $M$ , interpretando  $M$  como muestras sucesivas que son espaciadas uniformemente en el tiempo. Por un periodo de muestra igual al especificado por el canal.

El control deslizante del índice de muestreo indica que instantánea del canal está siendo exhibida en ese instante. Mientras que el botón de pausa detiene la animación que está corriendo hasta que usted hace clic en él. Este control deslizante y el botón de pausa son aplicables a todas las visualizaciones excepto al espectro Doppler.

El menú desplegable permite que usted escoja como quiere visualizar las imágenes del canal con cada trama. Configurar que disminuya la velocidad hace que la herramienta muestre imágenes del canal sucesivamente partiendo de la muestra establecida por el control deslizante del índice de muestra. Seleccionar medio o rápido hace que se visualicen menos imágenes uniformemente espaciadas, permitiendo que usted vea las imágenes del canal más rápidamente. Seleccionando "Interframe only" impide la animación automática de imágenes dentro de la misma trama.



### Figura 2.6 Respuesta al impulso.

En la figura 2.6 se muestra la opción **Impulse response** donde se indican las magnitudes de dos respuestas:

- La respuesta del multitrayecto de ancho de banda infinito.
- La respuesta del canal en banda limitada.

La respuesta multitrayecto es representada por tallos, cada una corresponde a una componente multitrayecto. La componente con muy pequeña demora es mostrada en rojo y la componente con demora más grande se muestra en azul. Para componentes de demoras intermedios son tonos de color entre el rojo y el azul, se pone más azul para demoras más grandes. La respuesta del canal en banda limitada se representa por la curva verde. Esta respuesta es el resultado de convolucionar la respuesta al impulso multitrayecto. Descrito en la figura como un pulso sinc de periodo  $T$ , igual al periodo de muestra de la señal de entrada. Los círculos verdes sólidos representan la respuesta muestreada del filtro de canal a una tasa de  $1/T$ . La salida del filtro de canal es la consolución de la señal de entrada (muestreada una tasa de  $1/T$ ) con la respuesta del filtro de canal FIR de tiempo discreto. Para la velocidad computacional la respuesta es truncada.

Note que estas respuestas de impulso varían con el tiempo. Usted puede usar el control deslizante para ver cómo cambia durante el tiempo de la trama en curso.

- **Frequency response:** Muestra la magnitud de la respuesta de frecuencia del canal multitrayectoria sobre el ancho de banda de la señal. Al igual que la visualización de la respuesta al impulso aquí se ve como la respuesta de frecuencia cambia con el tiempo.
- **IR waterfall:** La evolución de la magnitud de la respuesta al impulso con el tiempo. Aquí se muestran 10 imágenes de la respuesta al impulso del canal en banda limitada dentro de la última trama. Con la curva verde más oscura vemos la respuesta en curso. La compensación de tiempo es el momento de la instantánea de canal en comparación con la respuesta en tiempo.

- **Phasor trajectory:** Se muestran los fasores, que son los vectores que representan la magnitud y la fase para cada componente de multitrayecto. Usando el mismo código de colores que fue usado para el gráfico de la respuesta al impulso. El fador es conectado del final al final del orden de demora de trayectoria y la trayectoria del fador resultante y es trazada como una línea verde. Este resultado es referido como fador de banda estrecha. Este gráfico es usado para determinar el impacto del canal multitrayecto en una señal de banda estrecha. Este tipo de señal es definida aquí como tener un periodo de muestra mucho más grande que el espacio de demora del canal multicamino. Alternativamente un ancho de banda más pequeño que el ancho de banda de coherencia del canal. De este modo, el canal multitrayecto puede ser representado por una ganancia compleja individual, que es la suma de todas las componentes de ganancia multicamino. Cuando la trayectoria del fador de banda estrecha pasa completamente cerca del origen, corresponde a un desvanecimiento intenso en banda estrecha.
  
- **Multipath components:** Las componentes multicamino y el trazado de las magnitudes de las ganancias multitrayecto sobre una señal en banda estrecha. El marcador de triángulo y la línea vertical que corre representan el inicio de la trama en curso. Si una trama a sido procesada antes, su ganancia multicamino también se pueden visualizar.
  
- **Multipath Gain:** Como vemos las ganancias colectivas para el canal multitrayecto tiene tres anchos de banda de señal. Una ganancia colectiva es la suma de las magnitudes de las componentes. Por ejemplo:  
  
Puntos en magenta (Banda estrecha): esta es la magnitud del fador de banda estrecha en la trama de la trayectoria anterior. Esta curva muchas veces se refiere como desvanecimiento sobre banda estrecha.

Línea azul corrida (Ancho de banda de la señal en curso): esta es la suma de las magnitudes de las muestras de la respuesta de impulso del filtro de canal (los puntos verdes sólidos en la trama de respuesta al impulso). Esta curva representa la energía de señal máxima que puede ser capturada al usar el receptor de RAKE.

Línea roja sólida (Ancho de banda infinito): esta es la suma de las magnitudes de las componentes de ganancia multitrayecto. En general, la variabilidad de esta ganancia de multitrayecto o de la señal cuando pierde intensidad disminuye cuando el ancho de banda de la señal es incrementado, porque las componentes multicamino se hacen más solubles. Si la curva de ancho de banda de señal sigue a la curva de banda estrecha aproximadamente, usted puede describir la señal como banda estrecha. Si la curva de ancho de banda de la señal sigue a la curva de ancho de banda infinito aproximadamente, se puede describir la señal como de banda ancha. Con el receptor correcto una señal de banda ancha explota la diversidad de trayecto inherente a un canal multitrayectoria.

- **Doppler Spectrum:** El primer espectro Doppler representado por una línea roja espaciada. Es un espectro teórico sobre la base del filtro de Doppler que el modelo usó el modelo de canal multitrayectoria. En este caso el espectro Doppler usado es el modelo de Jakes. En muchos casos el Doppler tazado es normalizado para tener una potencia total de uno. Es usado para determinar una respuesta del filtro Doppler. Para los propósitos prácticos, la respuesta del filtro Doppler es truncada y tiene el efecto de modificar el espectro Doppler.

El segundo espectro Doppler, representado por los puntos azules, es determinado midiendo el espectro de potencia del canal con desvanecimiento multicamino cuando el modelo genera la ganancia de trayecto. Esta medición es significativa solo después que suficientes ganancias de camino han sido generadas. El título encima del gráfico informa de cuantas muestras necesitan ser procesadas por el canal antes

de que el primer espectro Doppler o espectro actualizado pueda ser trazado.

La caja de edición o número de ruta permite que usted visualice los números de ruta especificada. Este está en un rango entre uno y la longitud de la propiedad "Path Delay". En cuanto usted cambia el valor, el nuevo espectro aparecerá tan pronto como el procesamiento de trama haya concluido. Si el espectro Doppler medido es una buena aproximación del Doppler teórico, el modelo de canal multitrayectoria ha generados los suficientes aumentos de desvanecimiento para producir una representación razonable de las estadísticas del canal. Por ejemplo, si usted quiere determinar la BER promedio de un enlace de comunicaciones con un canal multitrayecto y desea una medida estadísticamente razonable exacta de este promedio. Puede querer asegurarse de que el canal ha procesado suficientes muestras para producir al menos una medición del espectro Doppler.

- **Scattering Function:** Aquí se ven los espectros Doppler de cada ruta. Utilizando el mismo código de colores que el grafico de la respuesta impulsiva. El principio de operación aquí es similar al grafico " **Doppler Spectrum**" y la diferencia principal es que los espectros Doppler del grafico no son normalizados, en orden de mejorar la visualización del perfil retardo de potencia.
- También hay opciones de visualizar gráficos de forma combinada en una sola ventana de procesamiento [12].

### **2.5 Metodología para la modelación del canal inalámbrico.**

La metodología para crear escenarios usando los modelos que brinda MatLab depende de la magnitud y dimensiones del sistema que se desea implementar. Simulink brinda la posibilidad de incluir todos los bloques que están en su librería en un mismo sistema. Teniendo en cuenta que para realizar cualquier modelo es

necesario conocer a fondo todas las características y funcionamiento general de un sistema comunicación. Los bloques se conectan a través de líneas continuas y con dos clics se puede variar sus características y propiedades. Todas las variables y tipos de datos tienen que estar especificadas dentro de cada bloque [11].

### 2.5.1 Simulación de los escenarios y sus características

Para la simulación de los escenarios se utilizó la combinación de varios bloques. Para lograr así canales que introdujeran más influencia en la señal transmitida a través de él. En caso de presentar problemas en la corrida de la simulación, MatLab brinda todos los errores con una pequeña explicación con la ubicación del bloque y el error que presenta. La mayoría de estos errores son causados por desconocimiento en el manejo de los datos y por problemas en el tipo de señal que hereda cada bloque del anterior. El tipo de dato que se implementa en cada bloque es double. En la figura 2.7 se muestra el modelo general a simular.

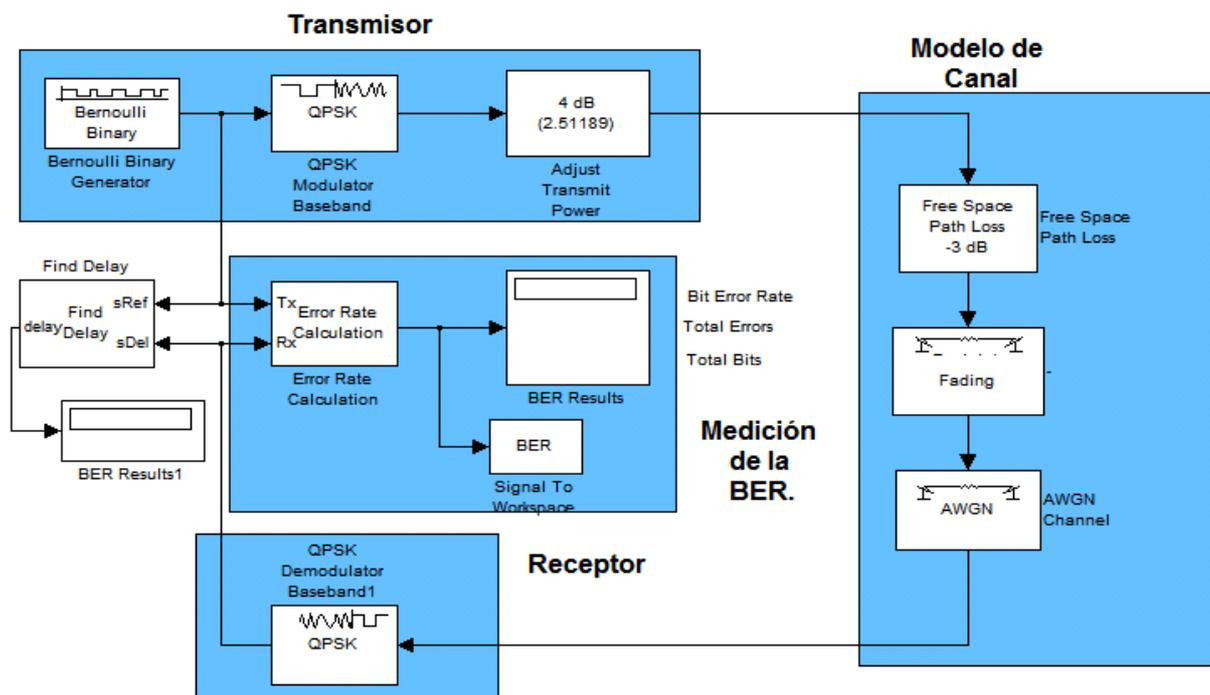


Figura 2.7 Modelo general de simulación.

### **El transmisor está compuesto por:**

- Un bloque generador binario de Bernuolli: Generador binario basado en ensayos de Bernuolli. Se especifica una probabilidad de generar ceros de 0.5, un tiempo de muestreo de  $1/10e+6$  y el número de muestras por trama es 200.
- Un bloque modulador digital QPSK: Se escogió por presentar similar rendimiento a BPSK. Al aumentar el orden de la PSK disminuye la distancia entre los puntos de la constelación, aumentando el ancho de banda de transmisión y la señal se hace más susceptible a ruidos presentes en el canal. La QPSK es el tipo de modulación de carga de muchos sistemas de comunicaciones modernos y es utilizado por muchos formatos inalámbricos actuales. El corrimiento de fase es cero, el orden de la constelación es "Gray" y el tipo de señal a la entrada es "Bit".
- Un bloque para ajustar la potencia del transmisor: se especifica una ganancia de 4dB en potencia sobre la señal de entrada. Se puede especificar en amplitud o potencia.

### **El receptor está compuesto por:**

- Un demodulador digital QPSK: presenta un corrimiento de fase de cero, el orden de la constelación es "Gray", el tipo de señal de entrada es "Bit", el tipo de decisión usada es "Hard decesion". Se implementa cuando el valor de salida es siempre entero, pero por defecto maneja el mismo valor que a la entrada. Este parámetro se puede escoger "Log-likelihood" o "Approximate log-likelihood" cuando el valor del dato de salida es el mismo que el valor de dato a la entrada y se tiene que especificar la varianza del ruido en la señal de entrada.

### **La medición de la BER se realiza con:**

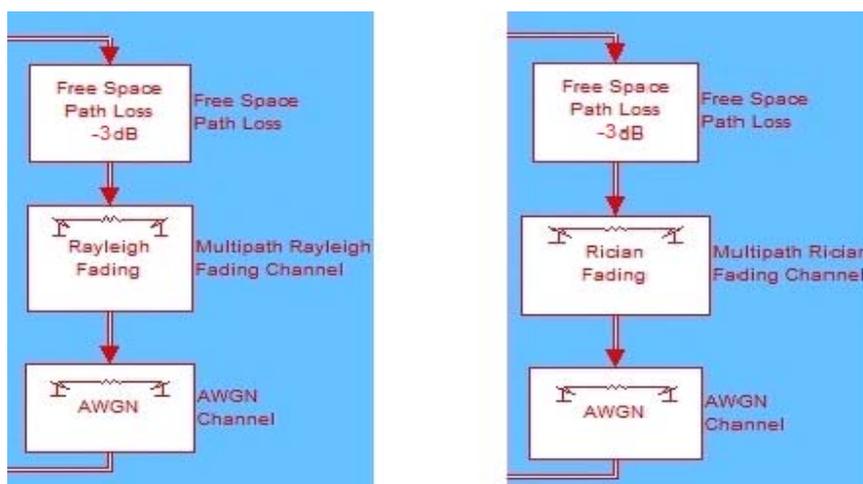
- El bloque Error Rate calculation: en este bloque se especifica la "Receive delay" a un valor que se puede encontrar con el bloque "Find Delay" dentro de la librería de comunicaciones. Así se obtiene el valor para este parámetro después de correr el modelo por primera vez.

La "Computation delay" es un valor que se busca con el bloque "Find Delay". El "Mode" usado es "Entire Frame". El parámetro "Output Data" especifica hacia donde enviaremos el valor de salida. Se elige como "Port" para poder sacarlo por el puerto de salida a un Display por una matriz de tres por uno, para mostrar el número total de bits, el número de bits errados y la BER. También podemos elegir el valor "Workspace" y darle un nombre a la variable de salida para llamar el valor entrando la variable en el espacio de trabajo del MatLab. El parámetro "Stop simulation" se especifica que corra solamente hasta que el bloque detecte un número específico de errores o represente un número específico de comparaciones. El primero de los dos que se ejecute primero entonces se detiene la simulación.

- El bloque "Signal To Workspace" se utiliza para escribir la entrada de la matriz especificada en la zona de trabajo principal de MatLab. El dato no está disponible hasta que la simulación es pausada o detenida. Se utiliza llamando la variable BER desde la zona de trabajo del MatLab. Se especifica "Limits Data Point to Last" con un valor de uno, el parámetro "Frames" se elige como "Concatenate frames (2-D array)" donde este valor no especifica el fin de la primera trama y comienzo de la próxima. Para el valor "Concatenate frames (3-D array)" si muestra fácilmente cada trama ordenada en el espacio de trabajo del MatLab.
- El bloque "Find Delay" se alimenta de las dos entradas del bloque "Error Rate Calculation" y da a la salida con el uso del bloque de "Display" el valor de demora en la recepción. Es un valor que expresa el retardo en la diferencia entre el número de muestras que llegan al receptor. Así podemos especificar este valor dentro de las comparaciones de la BER.

**Canal inalámbrico:**

➤ El canal estará compuesto por un bloque para especificar las pérdidas por espacio libre, otro bloque que representa el tipo de multitrayecto que se simulara y un bloque de AWGN para especificar el ruido aditivo blanco gaussiano. Así variando los parámetros a estos tres bloques podemos representar los escenarios que se presentaran y ver su influencia sobre la tasa de error de bits. En ninguno de los casos se normaliza la ganancia a 0dB dentro de los bloques multitrayecto. Cada variante de un escenario modifica las condiciones del canal agregando atenuación y multitrayectos para modelar un canal más crítico. En la figura 2.8 se muestran los dos modelos de canal.



**Figura .2.8. Modelo general de simulación.**

A continuación se muestra en la tabla 2.1 y la tabla 2.2 los valores que toman las cinco variantes para los dos escenarios de canal Rayleigh y Rician.

**Tabla 2.1 Variantes del canal Rayleigh.**

| Parámetro                | Variante 1 | Variante 2 | Variante 3 |
|--------------------------|------------|------------|------------|
| Free Space Path Loss(dB) | -3         | -3         | -3         |

|   |                                  |                                  |                                  |
|---|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| <b>Maximum Doppler Shift (Hz):</b>                  | 20                               | 50                               | 80                               |
| <b>Discrete Path Delay Vector (s)</b>               | [0 10e-9 50e-9]                  | [0 80e-9 100e-9<br>3000e-9 ]     | [0 3e-6 5e-6 10e-6<br>9e-6]      |
| <b>Average Path Gain Vector (dB)</b>                | [0 -2 -5]                        | [0 -8 -10 -13]                   | [0 -13 -15 -20 -19]              |
| <b>Mode</b>   | <b>Signal to<br/>noise radio</b> | <b>Signal to<br/>noise radio</b> | <b>Signal to<br/>noise radio</b> |
| <b>SNR (dB)</b>                                     | 3                                | 3                                | 3                                |
| <b>Input signal power, refered<br/>1ohm (watts)</b> | 1                                | 1                                | 1                                |

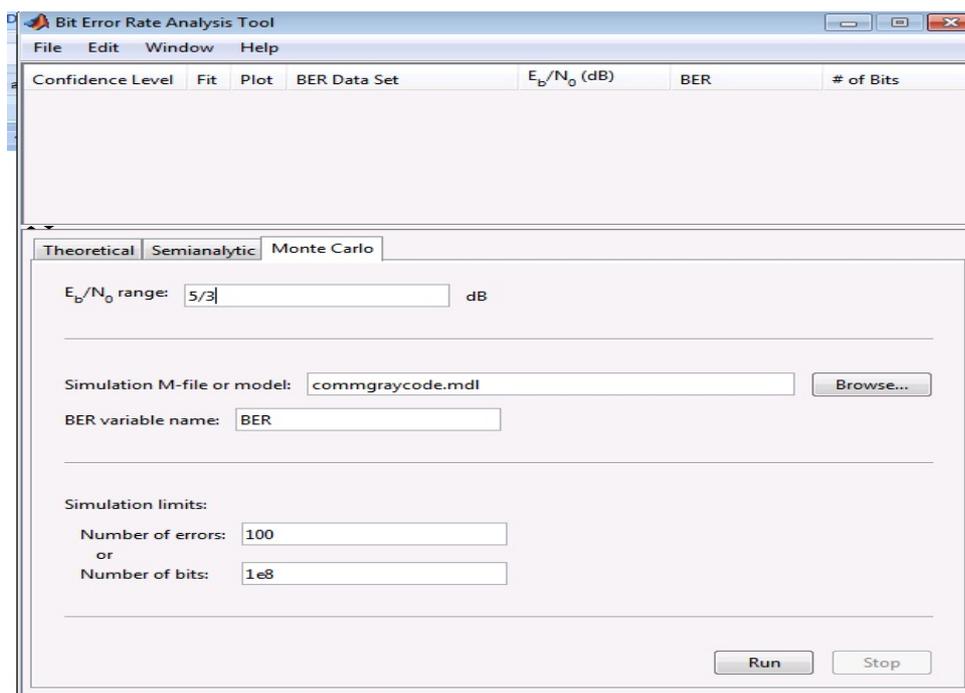
La tabla 2.2 muestra los valores de las variantes para el canal Rician.

**Tabla 2.2 Variantes del canal Rician.**

| <b>Parámetro</b>  | <b>Variante 1</b>                | <b>Variante 2</b>                |
|---|----------------------------------|----------------------------------|
| <b>Free Space Path Loss(dB)</b>                                 | -3                               | -3                               |
| <b>K-Factor:</b>  | 5                                | 2                                |
| <b>Doppler shift(s) of line-of-sight<br/>components(s) (Hz)</b> | 5                                | 10                               |
| <b>Maximum Doppler Shift (Hz):</b>                              | 20                               | 50                               |
| <b>Discrete Path Delay Vector (s)</b>                           | [0 20e-9]                        | [0 20e-9 100e-9 1e-<br>6 ]       |
| <b>Average Path Gain Vector (dB)</b>                            | [0 -4]                           | [0 -4 -4 -10]                    |
| <b>Mode</b>   | <b>Signal to<br/>noise radio</b> | <b>Signal to<br/>noise radio</b> |
| <b>SNR (dB)</b>   | 3                                | 3                                |
| <b>Input signal power, refered 1ohm</b>                         | 1                                | 1                                |

### 2.5.2 Montaje de los modelos de Simulink en la Toolbox de Comunicaciones.

Se puede utilizar la herramienta BERTool de la Toolbox de comunicaciones en conjunción con los modelos creados en Simulink para generar y analizar los datos desde un gráfico de la BER contra  $E_b/N_0$  si se desea. Para acceder a esta opción basta con escribir "bertool" en el espacio de trabajo de Matlab. En la figura se muestra esta herramienta donde ingresando el valor de  $E_b/N_0$ , la dirección donde está el modelo y el nombre de la variable que contiene los datos. También se especifica las dos condiciones para detener el modelo, por el número de errores encontrados o por la cantidad de bits analizados. La primera de condición que llegue a cumplirse.



**Figura 2.9 Herramienta de cálculo BERTool.**

Parámetros necesarios para el montaje de los modelos en la BERTool:

- Utilizar en el bloque de canal AWGN el parámetro  $E_b/N_0$  y sus características.

- Especificar dentro del bloque "Error Rate Calculation" los valores "maxNumerrs" y "maxNumBits".
- Utilizar procesamiento basado en trama y un valor grande en la longitud de trama.
- Implementar el bloque "Signal To Workspace" para llamar los datos desde entorno trabajo del MatLab.

Este es el bloque fundamental donde se nombra la variable, en este caso se eligió como nombre "BER". Se debe deshabilitar la opción de visualización dentro del bloque de canal con desvanecimiento para proveer mayor velocidad en la simulación de los datos.

Esta herramienta realiza diferentes simulaciones del canal inalámbrico para el cálculo de la BER. Contiene dentro tres tipos de modelos para el cálculo, "Theoretical", "Semianalitic" y "Monte Carlo". Estas utilizan diferentes procedimientos para realizar el cálculo de los resultados. Con la primera se puede simular el canal AWGN o Rayleigh o Rician, uno de los tres canales para cualquiera de las modulaciones digitales que ofrece. Con el segundo solamente se puede simular el canal AWGN y en conjunto con las simulaciones digitales. Además contiene otras características según el tipo de modelo que desee ejecutar. Pero con el Monte Carlo se pueden simular las variantes de canal creadas en Simulink y obtener graficas de la BER diferenciando algunos parámetros. Esto ayuda a modelar los resultados y presentarlos en forma de grafica.

## **2.6 Conclusiones parciales del capítulo**

En este capítulo se logró analizar cada parámetro de los modelos de canal Rayleigh, Rician y AWGN. Se explicó a fondo el funcionamiento las gráficas que brindan los bloques de canal Rayleigh y Rician. Se presentó un modelo de comunicaciones general que utiliza modulación QPSK. Se crearon dos modelos de canal con desvanecimiento. Así, variando sus parámetros se presentan tres

variantes para el modelo de canal Rayleigh y dos modelos de canal Rician. También se explicó cómo podemos montar estos modelos en la herramienta "BERTool" de la Toolbox de comunicaciones.

## Capítulo 3 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS

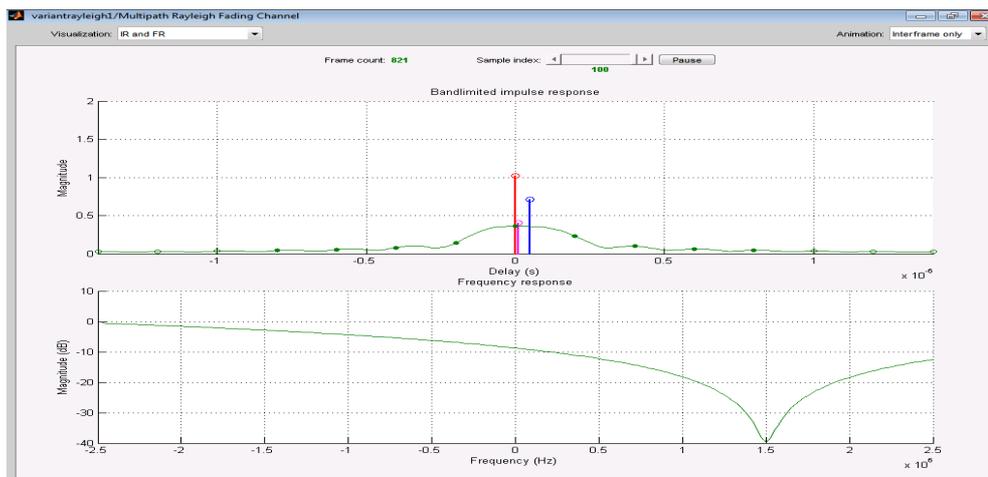
En este capítulo se analizan los resultados de cada uno de los escenarios simulados, resultados de la combinación de las variantes propuestas para los modelos de canal presentes en el MatLab/SIMULINK, con el objetivo de mostrar cómo se afecta la señal con la variación de los datos dentro del canal.

### 3.1 Análisis de los escenarios con canal Rayleigh.

De la variante uno del canal Rayleigh que se encuentra mostrada en el anexo I se obtuvieron los siguientes resultados:

#### Escenario 1:

La simulación de esta variante uno arrojó como resultado las respuestas al impulso y de frecuencia (IR y FR) que se muestran en la figura 3.1. Su respuesta al impulso (IR) tiene variación media, los valores de magnitud oscilan entre 0.2 hasta 2. La respuesta de frecuencia (FR) es relativamente plana con valores promedios de 10dB a -10dB llegando a ser selectiva por debajo de -11dB a frecuencias de 1.5MHz a 2MHz dentro de todo el ancho de banda del canal de 2.5Mhz. Contiene una variación media de los componentes multitrayecto de 7dB hasta -30dB. La ganancia multitrayecto oscila de -5dB a 5dB con variación media y un comportamiento de señal de banda estrecha.



### Figura 3.1 Respuesta IR y FR variante uno.

La BER comienza en 0.25 y a medida que se procesan mayor número de bits aumenta por la función de la respuesta del canal llegando a estabilizarse a 0.49.

#### Escenario 2:

De la variante dos del canal Rayleigh que se muestra en el anexo II se obtuvieron los siguientes resultados:

La simulación de esta variante dos arrojó como resultado las respuestas al impulso y de frecuencia (IR y FR) que se muestran en la figura 3.2. En la gráfica de IR se observa una variación lenta con valores de magnitud de 0.5 a 2. La respuesta de frecuencia es también lenta con diferencia de valores de 2dB para el mejor comportamiento hasta -10dB donde llega afectar los 2.5MHz de ancho de banda de la señal con desvanecimientos profundos de -40dB. Las componentes multitrayecto contienen variaciones relativas de atenuación entre -5dB a -20dB llegando hasta -30dB. La señal sigue un comportamiento de banda estrecha con ganancias de hasta 7dB.

La BER comienza en 0.30 y a medida que se procesan mayor número de bits aumenta en función de la respuesta del canal llegando a estabilizarse a 0.49.

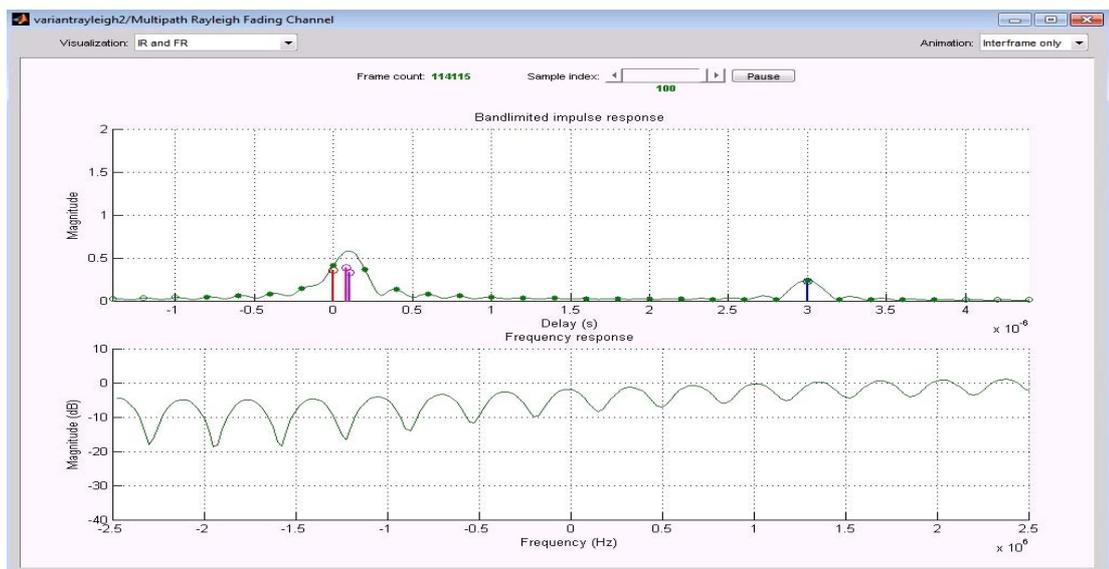


Figura 3.2 Respuesta IR y FR variante dos.

### Escenario 3:

De la variante tres del canal Rayleigh que se muestra en el anexo III se obtuvieron los siguientes resultados:

En esta variante, cuyas respuestas IR y RF se observan en la figura 3.3, la respuesta al impulso tiene una variación lenta con valores de magnitud de 0.6 a 2. La respuesta de frecuencia es muy selectiva con diferencia de valores de 2dB para el mejor comportamiento. Se observa también un comportamiento crítico de -30dB que llega a afectar los 2.5MHz de ancho de banda de la señal con desvanecimientos muy profundos de más de -40dB. Afectando de forma muy selectiva todo el ancho de banda del canal. Las componentes multitrayecto contienen variaciones relativas de atenuación entre -5dB a -30dB llegando hasta -40dB para algunas componentes. Contiene una ganancia de trayectoria de 5dB a -20dB con un comportamiento de la señal en banda ancha. La BER comienza en 0.40 y a medida que se procesan mayor número de bits aumenta en función de la respuesta del canal llegando a estabilizarse a 0.5.

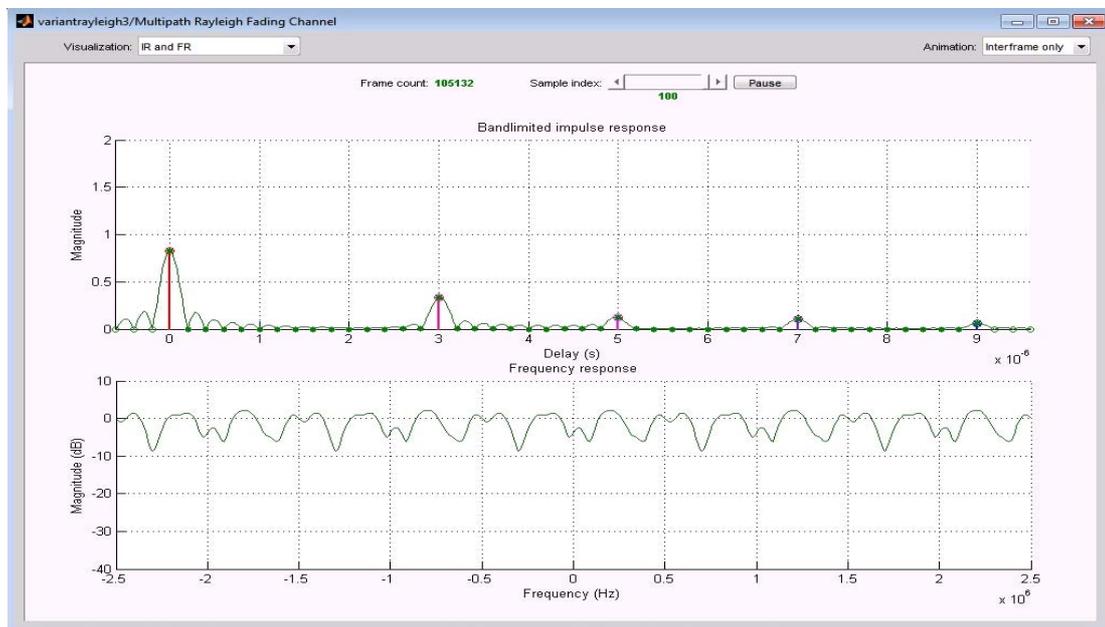


Figura 3.3 Respuesta IR y FR variante tres.

## 3.2 Análisis de los escenarios con canal Rician

### Escenario 4:

De la variante uno del canal Rician que constituye el cuarto escenario que se muestra en el anexo IV se obtuvieron los siguientes resultados:

Dentro del canal Rician, específicamente esta variante se obtiene como resultado de la simulación su respuesta IR y FR mostradas en la figura 3.4. La respuesta al impulso presenta una variación lenta dentro de magnitudes de 0.7 a 2 dB.

La respuesta en frecuencia tiene una variación lenta con un comportamiento plano llegando alcanzar valores de 7dB. Comienza a perder esta característica a medida que decrece la respuesta al impulso llegando a presentar una caída ondulada de -25dB que recorre poco a poco los  $2.5 \times 10^6$  Hz de ancho de banda del canal. La componente multitrayecto presenta una variación lenta con valores que oscilan de -5dB a -20dB.

Tiene una ganancia hasta 5dB con un comportamiento de banda estrecha. La BER comienza en 0.32 y a medida que se procesan mayor número de bits aumenta en función de la respuesta del canal llegando a estabilizarse a 0.49.

### Escenario 5:

Del escenario cinco, la segunda variante del canal Rayleigh, que se encuentra en el anexo V se obtuvo los siguientes resultados:

De esta variante se muestra su respuesta IR Y FR en la figura 3.5. La respuesta al impulso tiene una variación media con valores relativos desde 0.2 a 1.5.

La respuesta en frecuencia es oscilatoria con valores de 3dB a 5dB. Esta se hace selectiva con caídas profundas a frecuencias relativas de  $2.2 \times 10^6$  Hz a  $1 \times 10^6$  Hz. Se observa también una variación lenta de las componentes multitrayecto con valores relativos de -5dB a -40dB. Tiene una ganancia hasta 8dB con un comportamiento de banda estrecha. La BER comienza en 0.49 y se mantiene así durante toda la simulación.

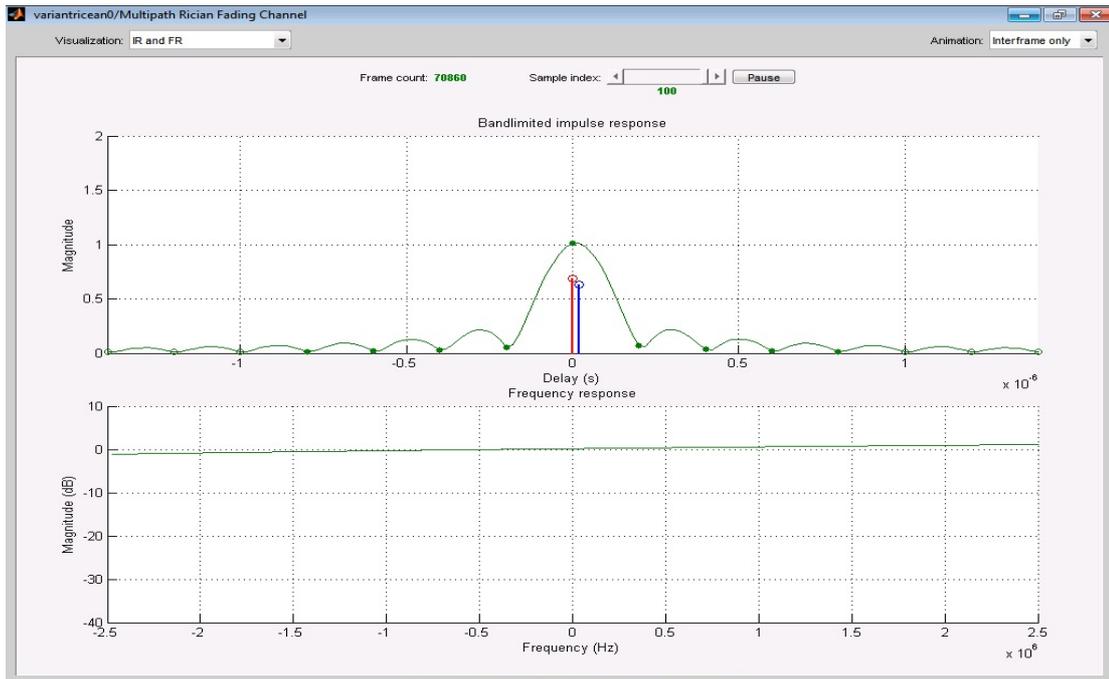


Figura 3.4 Respuesta IR y FR variante cuatro.

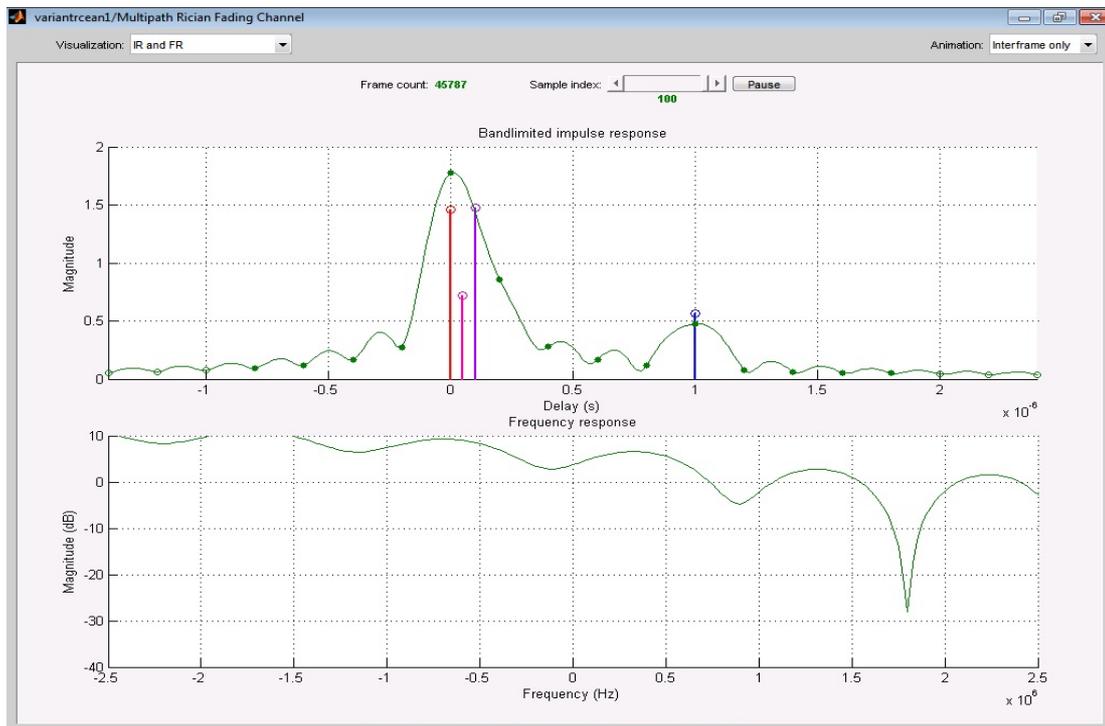


Figura 3.5 Respuesta IR y FR variante cinco.

### 3.3 Conclusiones parciales de la simulación de las cinco variantes

A medida que incrementamos el ancho de banda (BW) de la señal, podemos ver mucho más distorsión en la constelación de la señal. Esta distorsión es interferencia intersímbolos (ISI) que viene dada por la dispersión en tiempo del BW de la señal. Entonces la resultante IR en banda limitada no es bien aproximada a un pulso sinc. La respuesta de frecuencia se hace más selectiva a medida que el canal empeora sus características [8].

El cambio de parámetros dentro del canal inalámbrico no realiza variación notable de la BER. El comportamiento de la BER es casi constante aproximándose a 0.49 para el total de bits de cada variante simulada.

Específicamente, para casos donde hay uno o dos trayectos con pequeña demora en orden de los nanosegundos y una atenuación menor que 5, la BER comienza en 0.2 y a medida que se transmite datos continuamente llegando al millón de bits, la respuesta del canal va influyendo para incrementarla así hasta 0.49. Esta puede contener variaciones de décimas por encima o por debajo del promedio para cada ensayo.

Al aumentar el número de trayectos la respuesta al impulso pierde su condición de pulso sinc y pierde magnitud. Aumenta la ISI y su número de ocurrencias en el período de tiempo. La respuesta en frecuencia se hace más selectiva con aumento de la magnitud de su profundidad. Con mayor número de trayectos y trabajando a una alta razón de bits de  $10 \times 10^6 \text{ Hz}$  se obtienen variaciones muy lentas de todas las respuestas dentro del canal, obteniendo así, un canal con un tiempo de coherencia elevado. Para mejorar esta condición crítica del canal se puede disminuir la tasa de transmisión a  $10 \times 10^4 \text{ Hz}$  para obtener una respuesta aceptable de todas las características del canal pero sin ejercer influencia sobre la BER. Con este cambio todos los parámetros del canal inalámbrico varían rápidamente aportando mejoras en sus respuestas.

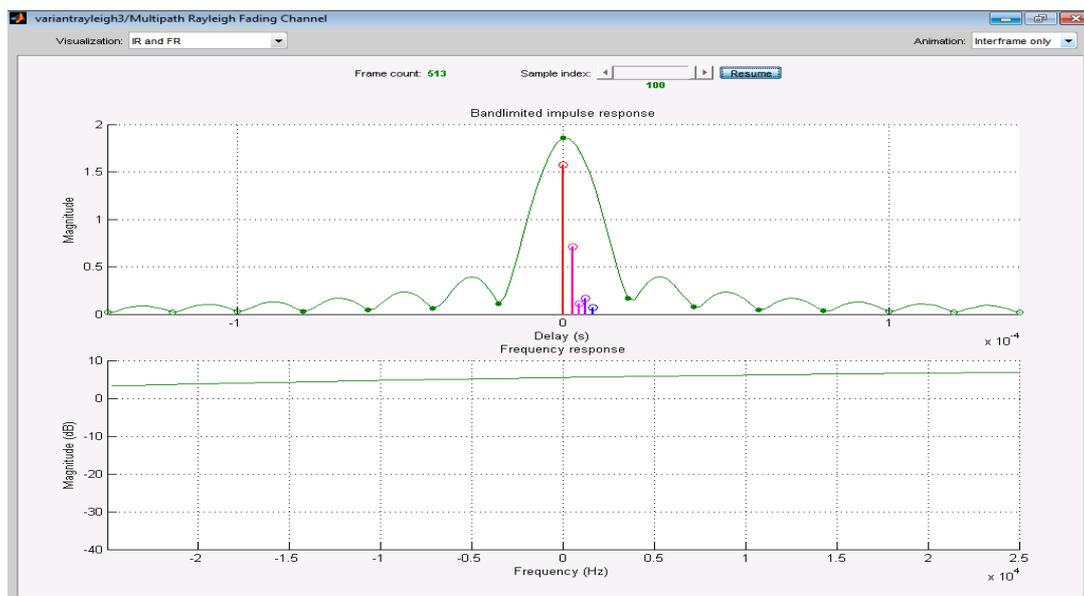
### **3.4 Cambio en la tasa de transmisión de los escenarios tres y cinco.**

Al reducirse la tasa de transmisión de  $10 \times 10^6 \text{ Hz}$  a  $10 \times 10^4 \text{ Hz}$  en los escenarios tres y cinco (Anexos III y IV), que son los escenarios más críticos de cada modelo de

canal por presentar mayor número de trayectos y una mayor atenuación, las respuestas IR y RF cambian significativamente:

### Escenario III:

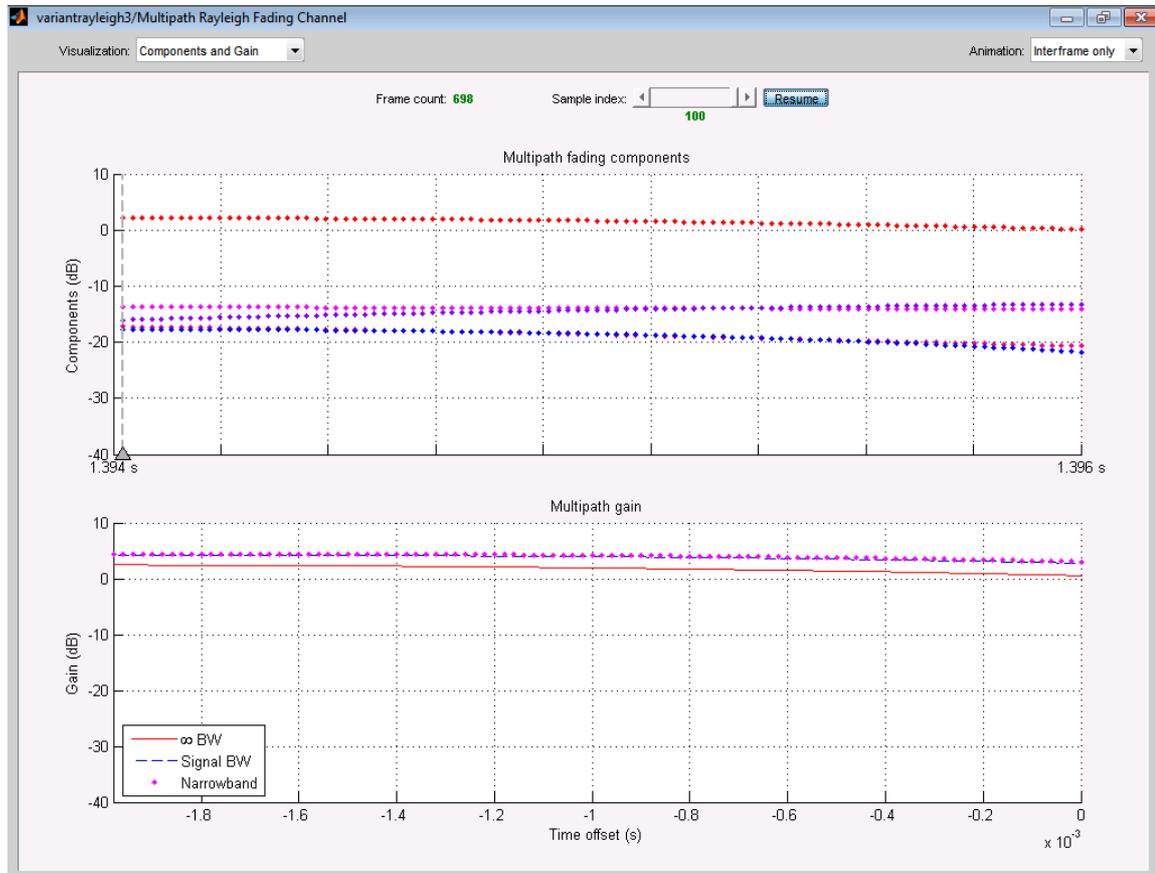
Las respuestas del canal Rayleigh que se muestran en la figura 3.6, muestra una variación significativa ya que se logra obtener una respuesta en frecuencia plana para valores de 10dB hasta -10dB.



**Figura 3.6 Mejora de FR e IR de la variante tres del canal Rayleigh.**

Esta se hace selectiva por debajo del valor anterior y el BW disminuye con el cambio en la razón de bits. La respuesta al impulso se hace mas impulsiva llegando a parecer más un pulso sinc. También se logra disminuir en número y tiempo la ISI.

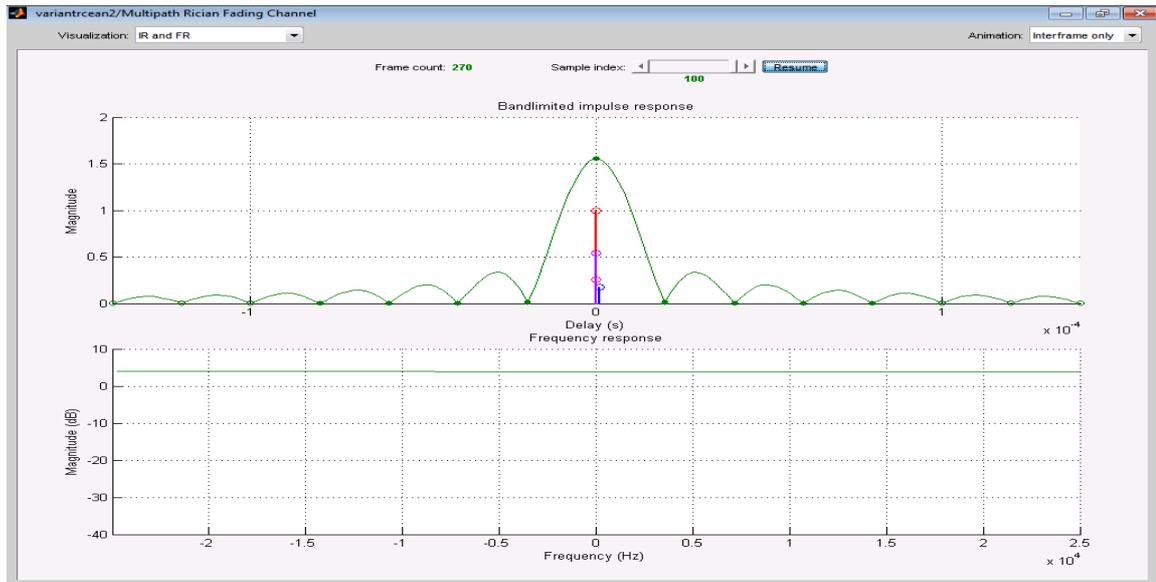
El tiempo de coherencia del canal se hace más pequeño con la reducción en la tasa de transmisión. En la figura 3.7 se ve como la señal sigue un comportamiento de banda estrecha y la variación de las componentes es muy rápida logrando cambios rápidos entre los valores de atenuación y ganancia. El valor de la BER no efectúa variación alguna quedando con el valor promedio de 0.5.



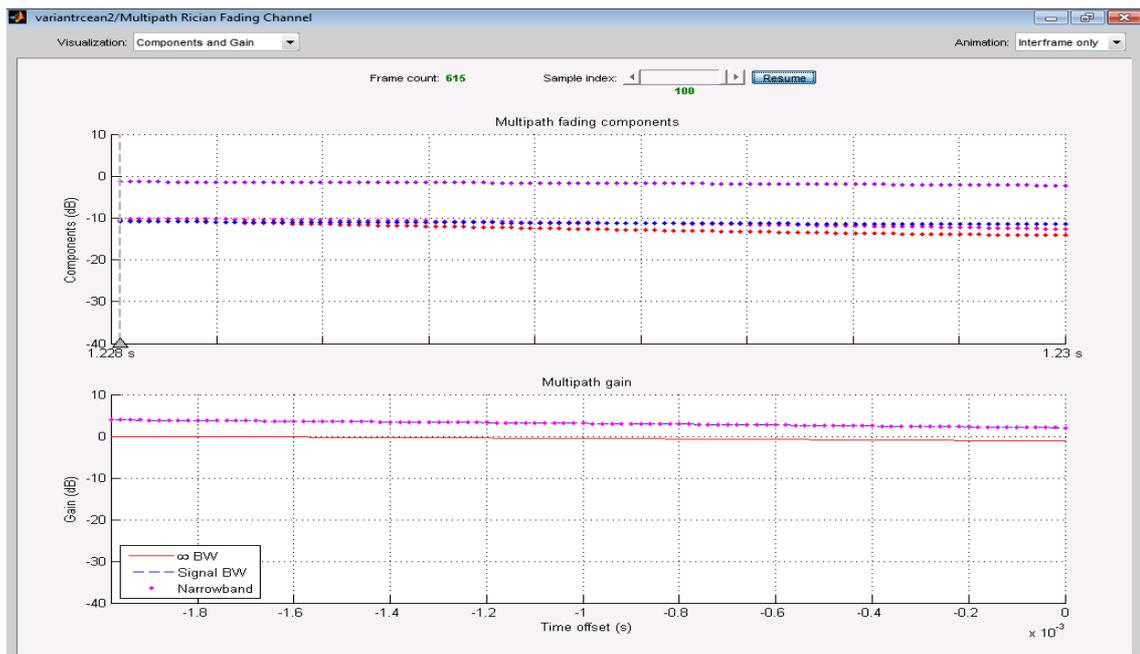
**Figura 3.7 Mejora de la ganancia multitrayecto del canal Rayleigh.**

#### Escenario IV:

Con la reducción de la tasa de transmisión de  $10 \times 10^6 \text{ Hz}$  a  $10 \times 10^4 \text{ Hz}$  en el escenario VI correspondiente a la segunda variante del canal Rician las respuestas IR y RF varían notablemente. En la figura 3.8 podemos apreciar una respuesta en frecuencia plana en todo el BW de la señal y una respuesta impulsiva con menor dispersión temporal que la correspondiente al mismo escenario cuando se usó la razón de transmisión de  $10 \times 10^6 \text{ Hz}$ . Los cambios en la ganancia multitrayecto siguen un comportamiento de banda estrecha como se ve en la figura 3.9.



**Figura 3.8 Mejora de la FR e IR para el canal Rician**



**Figura 3.9 Mejora de la ganancia multitrayecto del canal Rician.**

En el presente capítulo se logró la simulación de los dos modelos de canal inalámbrico propuesto en el capítulo dos. Simulando tres variantes del canal Rayleigh y dos variantes del canal Rician con sus respectivos cambios de

parámetros mostrados en los anexos. Se obtuvieron los gráficos para cada una de las simulaciones y se caracterizaron los más importantes. Se llegó a la siguiente conclusión basándose en los resultados obtenidos:

## CONCLUSIONES:

Al culminar el presente trabajo se llegaron a las conclusiones siguientes:

- Se realizó un estudio sobre las principales características de los modelos de canales incluidos en el software MatLab haciendo énfasis en los bloques de canal inalámbrico Rayleigh y Rician.
- Se escogió la modulación digital QPSK para utilizarla en los escenarios de las simulaciones.
- Se logró la modelación y simulación de tres variantes de canal inalámbrico Rayleigh y dos variantes de canal inalámbrico Rician, simulándose así cinco escenarios diferentes.
- Se analizaron los principales resultados de cada uno de los escenarios simulados.

**Recomendaciones:**

Se recomiendan los siguientes aspectos:

- Profundizar en el estudio de la modelación y simulación de sistemas de comunicaciones en SIMULINK.
  
- Ampliar la investigación de la simulación del canal inalámbrico usando SIMULINK incluyendo varios bloques adicionales que brinda el software como los bloques de codificación y ecualización de canal.

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] TOMASI, W. (ed.) 2003. "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", DeVry Institute of Technology Phoenix, Arizona.

[2] Juan Leonel Hernández Cárdenas. 2011. "Sistemas inalámbricos fijos". Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

[3] B. Sklar, *Digital Communications. Fundamentals and Applications.*, First ed., Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1988.

[4] M. Diogenes. WiMAX Móvil. En: *El canal móvil*. Capítulo 1. [En línea] Disponible en: [www.atelasesores.com.ve](http://www.atelasesores.com.ve) [Accedido en marzo del 2013]

[5] J. M. H. Rábano, "Transmisión por radio ", 4ta ed, 2001.

[6] J. M. H. Rábanos, *Comunicaciones Móviles*. Madrid: Editorial Centro de Estudios Ramón Areces S.A., 1997.

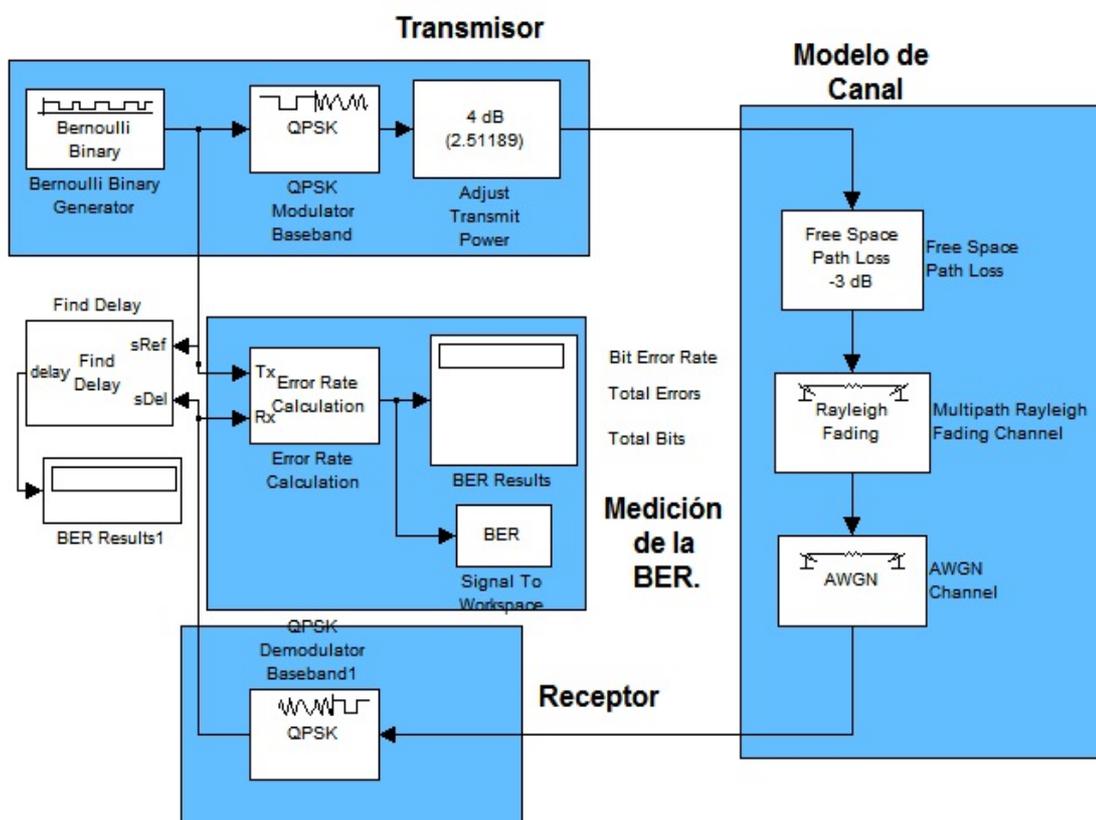
[7] GRIFFITHS, D. F. 2009. "An introduction to MatLab".

[8] MATHWORKS, T. 2010. "MatLab"

[9] LÓPEZ, F. 2001. "Introducción a Simulink".

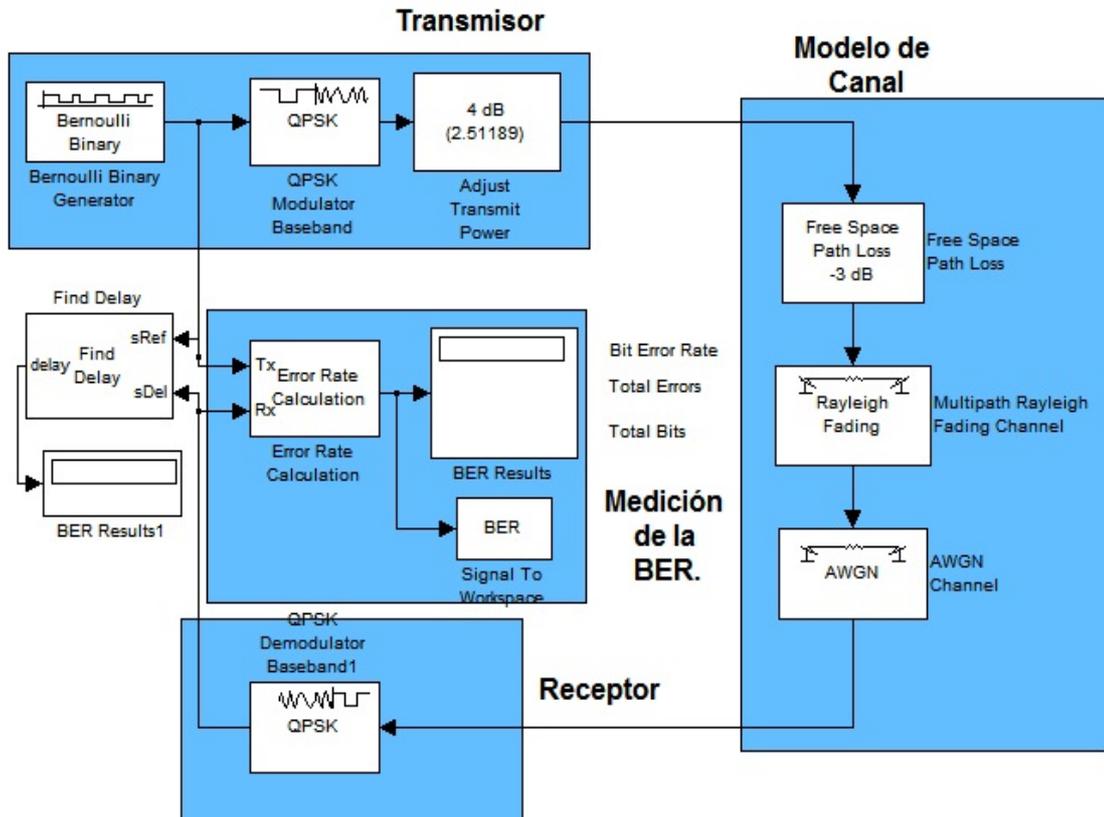
- [10] GÓMEZ-ESTERN, J. A. Y. F. 2007. "Introducción a MatLab y Simulink".
- [11] EDUARDO, N. 2005. "MatLab", Departamento de Matemáticas. Southern Illinois University en Carbondale.
- [12] MathWorks, "MATLAB Help," 2010].
- [13] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4ta ed., New York: McGraw Hill, 2001.
- [14] M. P. Dolujano, Propagación de Ondas de Radio.
- [15] K.Feher., *Wireless Digital Communications*: Prentice Hall 1995.
- [16] Krauss, *Estado Sólido en Ingeniería de Radiocomunicación*, 1990.
- [17] G. d. I. O. F. Marante, "Sistemas de Radiocomunicaciones," 1987.
- [18] Dolukhanov, Propagación de ondas de radio.
- [19] C. W. B. H. C. Krauss, F. H. Raab., *Estado Sólido en Ingeniería de Radiocomunicaciones*: Ediciones Limusa, 1984.
- [20] B.P.LATHI, *Introducción a la teoría y sistemas de comunicación*: Ediciones Limusa, 2003.
- [21] M.Shiff, *Introduction to Communications Systems Simulations*: Ediciones ARTECH HOUSE, 2006.
- [22] Michael P.Fits, *Fundamentals of Communications Systems*: McGraw Hill, 2007.
- [23] Alexis Paolo García Ariza, septiembre 2005: "Caracterización de la señal recibida en un sistema de comunicación inalámbrico móvil". Universidad Politécnica de Valencia.

## Anexo I Variante uno del canal Rayleigh.



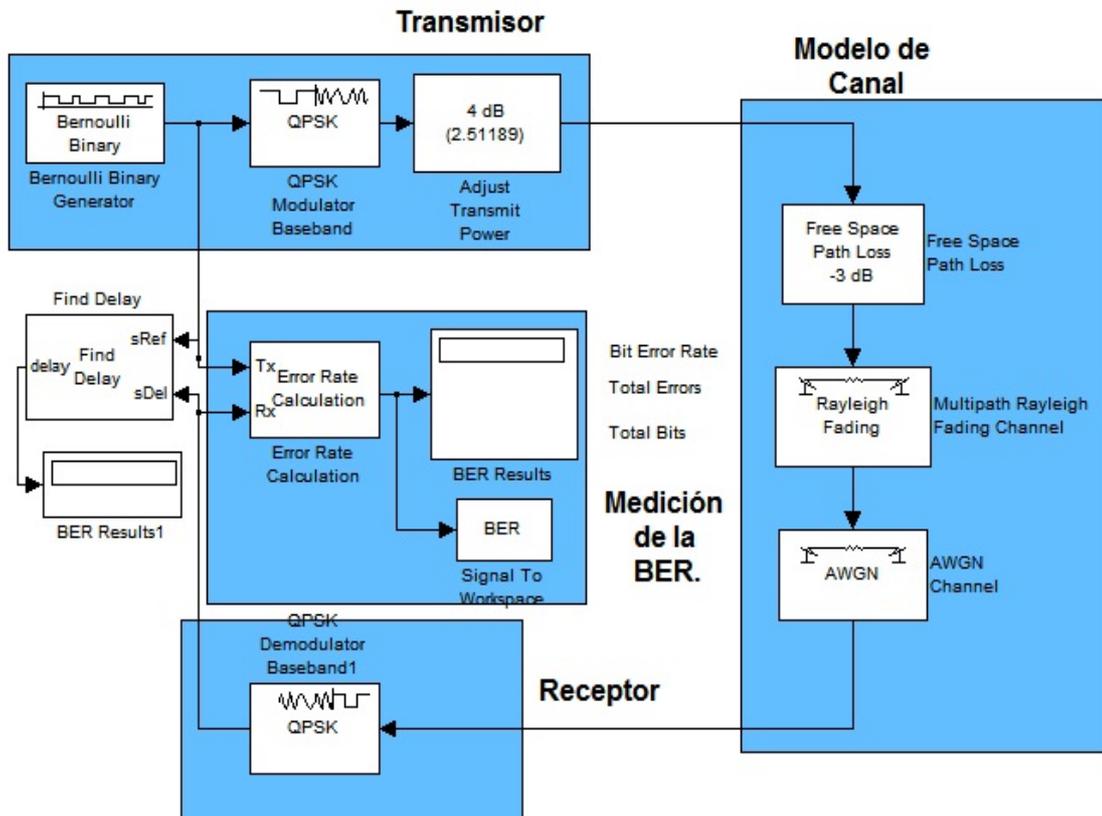
| Parámetro                        | Valor                 |
|----------------------------------|-----------------------|
| Free Space Path Loss(dB)         | -3                    |
| Maximum Doppler Shift (Hz):      | 20                    |
| Discrete Path Delay Vector (s):  | [0 10e-9 50e-9]       |
| Average Path Gain Vector (dB)    | [0 -2 -5]             |
| Mode                             | Signal to noise ratio |
| SNR (dB)                         | 3                     |
| Input signal power, refered 1ohm | 1                     |

**Anexo II Variante dos del canal Rayleigh.**



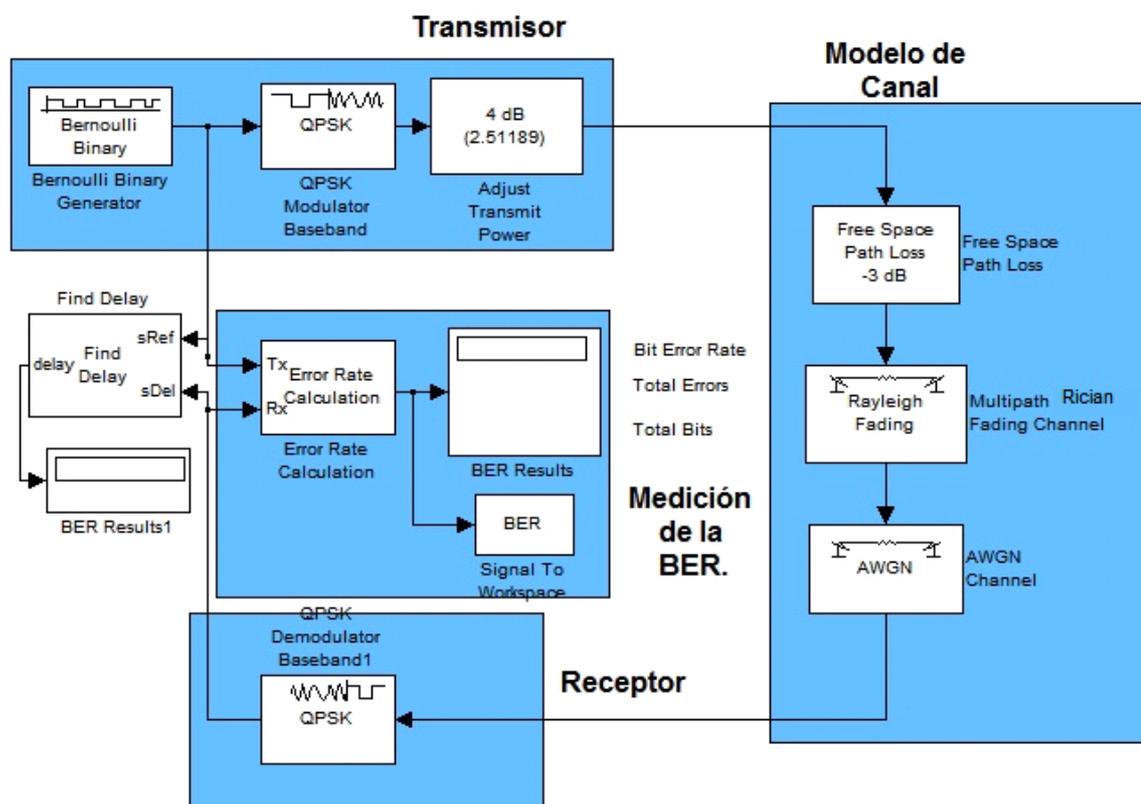
| Parámetro                        | Valor                    |
|----------------------------------|--------------------------|
| Free Space Path Loss(dB)         | -3                       |
| Maximum Doppler Shift (Hz):      | 50                       |
| Discrete Path Delay Vector (s):  | [0 80e-9 100e-9 3000e-9] |
| Average Path Gain Vector (dB)    | [0 -8 -10 -13]           |
| Mode                             | Signal to noise ratio    |
| SNR (dB)                         | 3                        |
| Input signal power, refered 1ohm | 1                        |

### Anexo III Variante tres del canal Rayleigh.



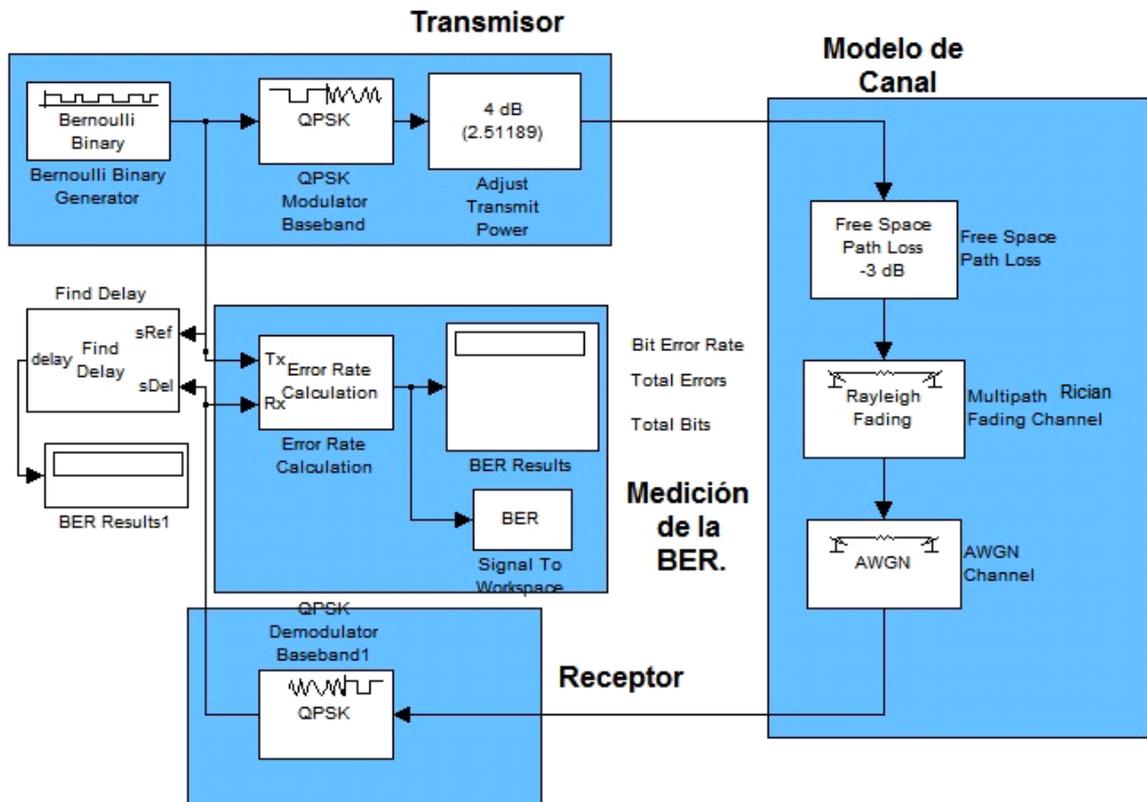
| Parámetro                        | Valor                    |
|----------------------------------|--------------------------|
| Free Space Path Loss(dB)         | -3                       |
| Maximum Doppler Shift (Hz):      | 80                       |
| Discrete Path Delay Vector (s):  | [0 3e-6 5e-6 10e-6 9e-6] |
| Average Path Gain Vector (dB)    | [0 -13 -15 -20 -19]      |
| Mode                             | Signal tonoise radio     |
| SNR (dB)                         | 3                        |
| Input signal power, refered 1ohm | 1                        |

## Anexo IV Variante cuatro del canal Rician



| Parámetro  | Valor                 |
|--|-----------------------|
| Free Space Path Loss(dB)                             | -3                    |
| K-Factor:  | 5                     |
| Doppler shift(s) of line-of-sight components(s) (Hz) | 5                     |
| Maximum Doppler Shift (Hz):                          | 20                    |
| Discrete Path Delay Vector (s):                      | [0 20e-9]             |
| Average Path Gain Vector (dB)                        | [0 -4]                |
| Mode   | Signal to noise ratio |
| SNR (dB)   | 3                     |
| Input signal power, refered 1ohm (watts)             | 1                     |

## Anexo V Variante cinco del canal Rician



| Parámetro  | Valor                  |
|--|------------------------|
| Free Space Path Loss(dB)                             | -3                     |
| K-Factor:  | 2                      |
| Doppler shift(s) of line-of-sight components(s) (Hz) | 10                     |
| Maximum Doppler Shift (Hz):                          | 50                     |
| Discrete Path Delay Vector (s)                       | [0 20e-9 100e-9 1e-6 ] |
| Average Path Gain Vector (dB)                        | [0 -4 -4 -10]          |
| Mode   | Signal to noise radio  |
| SNR (dB)   | 3                      |
| Input signal power, refered 1ohm (watts)             | 1                      |