

Guía metodológica para la implementación de canales con desvanecimiento a pequeña escala en MATLAB

Jonathan Jaramillo, Andrés Mera, Martha Cecilia Paredes Paredes
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información
Escuela Politécnica Nacional,
Ladrón de Guevara E11-253, 70525, Quito - Ecuador

Abstract— In the subject of wireless communications, the concepts of propagation in channels with small-scale fading are studied. For students it is often difficult to implement channel models in MATLAB, so this article presents a methodological guide on how to implement these channels using such software. Two options are presented, and its operation is demonstrated by a simulated OFDM transmission system. Finally, the results of the simulations carried out are shown giving a brief explanation of each graphic obtained.

Keywords: *Propagation types, MATLAB simulation, Ricean Channel, Rayleigh Channel, implementation guide.*

I. MOTIVACIÓN

Las comunicaciones inalámbricas dependen en su totalidad del canal sobre el cual se van a transmitir datos. Por lo general en estos sistemas, la propagación de ondas se ve afectada por fenómenos físicos como la difracción, dispersión y reflexión, adicional a esto, las señales transmitidas experimentan cambios significativos en parámetros como frecuencia, tiempo y amplitud, estas variaciones afectan la calidad de la información transmitida y son denominadas como desvanecimiento o fading [1]. El desvanecimiento se da principalmente por dos causas, la primera es la existencia de obstáculos como edificios o montañas en medio de la línea de vista entre el transmisor y receptor [2]. La segunda se debe al multitrayecto, la cual produce varias copias de la señal con diferente atenuación, fase y retardo proporcional a la distancia que recorre cada versión de la señal por uno de los distintos caminos que se han creado durante la transmisión [2].

Entre los efectos más notables de desvanecimiento se encuentran [1]:

- Cambios rápidos en la potencia de la señal al viajar por distancias cortas o pequeños intervalos de tiempo.
- Modulación de frecuencia aleatoria debido a la variación Doppler en señales multitrayecto.
- Eco o dispersión en tiempo de la señal causada por el retardo multi trayecto.
- Copias de señales destructivas o constructivas que afectan a la señal recibida afectando la información.

Los puntos mencionados afectan a la transmisión de información por canales inalámbricos de manera que se pueden tener repeticiones no deseadas de la señal en recepción, puede

llegar con retrasos o desfase o no llegar ningún tipo de información debido a anulación de esta con otra señal.

Para modelar el efecto de desvanecimiento a pequeña escala en canales se emplean modelos estadísticos, como: Rayleigh, Rician, Nakagami, etc. Estos modelos de canal se pueden implementar en los sistemas de comunicaciones a simular empleado diferentes herramientas de simulación como: MATLAB, NS3, Omnet++, entre otros.

Para comprender mejor estos conceptos y evidenciar el comportamiento de los canales en el proceso de transmisión de información es fundamental que los alumnos que cursen materias relacionadas con las comunicaciones inalámbricas realicen la simulación por medio de algún software de estos canales y puedan entender la manera en la cual los parámetros de la señal son afectados por los distintos fenómenos existentes en el medio y por medio de esto el estudiante desarrolle la capacidad de encontrar soluciones para mitigar dichas problemáticas.

Para los alumnos implementar estos modelos de canal en muchas ocasiones resulta complicado debido a que deben revisar mucha información en la red, comprender adecuadamente los conceptos, estar familiarizados con el uso de MATLAB, etc. Por lo que en este artículo se propone una guía clara, concisa y ordenada de dos opciones para modelar canales con desvanecimiento a pequeña escala en MATLAB.

Por tanto, el presente trabajo se encuentra orientado como una ayuda para el estudiante que se encuentre cursando la asignatura de Comunicaciones Inalámbricas y que tenga dificultad en el entendimiento de la programación y la sintaxis de funciones y objetos utilizados para la creación de simulaciones. Únicamente se requieren conocimientos básicos sobre el lenguaje y el uso de la documentación oficial de MATLAB como referencia. La mayor dificultad existente al simular canales es la de tener una gran cantidad de datos que se emplearán al definir el valor final de la simulación, esto se debe a que se emplea el método de simulación de Monte Carlo que calcula estadísticamente dicho valor final.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. En la Sección II se revisan brevemente los conceptos de desvanecimiento a pequeña escala, en la sección III se muestra el diseño en MATLAB de estos canales, en la sección IV se analizan y muestran los resultados obtenidos mediante la simulación de Monte Carlo y finalmente la sección V refleja las

conclusiones obtenidas a partir de los resultados conseguidos en la simulación y de esta guía metodológica.

II. DESVANECIMIENTO A PEQUEÑA ESCALA

Es importante comprender el concepto de desvanecimiento que según W. Stallings en [2] indica que, “El término desvanecimiento se refiere a la variación en el tiempo de la potencia de la señal recibida causada por cambios en el medio de transmisión o la(s) ruta(s). En un entorno fijo, el desvanecimiento se ve afectado por los cambios en las condiciones atmosféricas, tales como la lluvia. Pero en un entorno móvil, donde una de las dos antenas se está moviendo con relación a la otra, la ubicación relativa de varios obstáculos cambia con el tiempo, creando efectos de transmisión complejos.”

A. Tipos de desvanecimiento

1) Desvanecimiento a gran escala

Como se habló brevemente en la introducción, el desvanecimiento a gran escala se debe a la presencia de obstáculos en el camino existente entre el transmisor y el receptor, la interferencia causada por los objetos que impiden un paso directo de la señal produce que la potencia de esta se reduzca de manera significativa. Las ondas electromagnéticas sufren de sombreado (*Shadowing*) por los obstáculos existentes y la pérdida de potencia de acuerdo con la distancia recorrida.

a) Path loss

El término “*path loss*” hace referencia cantidad de potencia recibida, esta tiene una relación inversa con la distancia que recorre la señal hasta llegar a su destino; mientras mayor sea la distancia, menor será la potencia de llegada [3].

b) Shadowing

De acuerdo con las zonas en las cuales se realice el sistema de comunicaciones pueden existir edificios, árboles o montañas, la geografía es un factor para considerarse ya que esta desvía la potencia de las señales enviadas y afecta a la calidad de la transmisión [4].

2) Desvanecimiento a pequeña escala

El desvanecimiento a pequeña escala se debe a factores como la propagación multirayecto, la velocidad de los móviles, la velocidad de los objetos cercanos a la recepción y el ancho de banda de la señal, es decir, a los cambios rápidos o fluctuaciones en la potencia de la señal recibida en pequeños periodos de tiempo y cortas distancias [4].

a) Desvanecimiento debido a la dispersión de frecuencia

• Desvanecimiento selectivo de frecuencia:

Afecta a varios de los componentes del espectro de una señal de radio con diferentes amplitudes, se basa en el desplazamiento Doppler, el termino se usa por que la amplitud de la respuesta en frecuencia varia con la frecuencia [3]. En este tipo de desvanecimiento la aparición de interferencia Inter símbolo (ISI) se da en el dominio del tiempo, ya que la dispersión del retardo del canal es mayor a la del periodo del símbolo [3].

• Desvanecimiento no selectivo de frecuencia:

La señal recibida sufre un desvanecimiento no selectivo en la frecuencia siempre que el ancho de banda del canal

inalámbrico sea más ancho que el del ancho de banda de la señal, mientras se mantiene una respuesta de fase lineal y de amplitud constante dentro de una banda de paso [4].

b) Desvanecimiento debido a la dispersión de tiempo

• Desvanecimiento rápido:

El desvanecimiento rápido ocurre cuando la respuesta impulso del canal cambia de manera rápida en relación con la duración del símbolo [1]. Esto causa que se produzca una dispersión en frecuencia que se traduce como una distorsión de la señal. El desvanecimiento rápido tiene que ver por completo con la velocidad del cambio de canal debido al movimiento del receptor con respecto al transmisor.

• Desvanecimiento lento:

En el desvanecimiento lento la respuesta impulso del canal cambia en intervalos mucho más lentos que el mencionado en el punto anterior. La velocidad del móvil o los objetos en el canal determinan si la señal sufrirá de desvanecimiento lento. Para comprender de mejor manera el funcionamiento de un canal, se debe implementar el mismo en una simulación de MATLAB

B. Modelos de canales

Para modelar el efecto que tiene el desvanecimiento a pequeña escala en un sistema de comunicación inalámbrica se emplean modelos estadísticos como por ejemplo Rayleigh, Rician, Hoyt, Nakagami, a continuación, se listan algunos de los modelos mencionados.

1) Canal Rayleigh

En el modelo Rayleigh se asume que no existe una línea de vista entre el transmisor y el receptor. El comportamiento de este canal se puede modelar mediante la siguiente función de distribución de probabilidad descrita en la ecuación (1) [5].

$$f_x(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, & 0 \leq x \leq \infty \\ 0, & x < 0 \end{cases}, \quad (1)$$

donde, $2\sigma^2 = E[X^2]$ es el tiempo promedio de la potencia de la señal antes de detectar la envolvente, X^2 corresponde a una variable aleatoria chi-cuadrado y σ es el valor RMS de la señal de voltaje recibido antes de la detección de la envolvente de la señal.

2) Canal Rician

En el modelo Rician se añaden los componentes pertenecientes a la línea de vista y los no pertenecientes a línea de vista [5]. El comportamiento descrito por este tipo de canal inalámbrico se puede modelar mediante la siguiente función de distribución de probabilidad descrita en la ecuación (2).

$$f_x(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+A^2)}{2\sigma^2}} I_0\left(-\frac{A^2}{\sigma^2}\right), & A \geq 0, x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

donde, A es la amplitud de la señal dominante, $I_0(\cdot)$ es una función de Bessel de orden cero modificada de primer tipo.

III. DISEÑO EN MATLAB DE CANALES CON DESVANECIMIENTO A PEQUEÑA ESCALA

Para simular el comportamiento de un determinado canal inalámbrico, primero se debe explicar en qué consiste los bloques involucrados en un sistema de comunicación inalámbrico. Para probar los diferentes canales (específicamente AWGN, Rayleigh y Rician) sobre MATLAB se ha diseñado un sistema de transmisión OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), como el dado en [6].

Para el caso de esta guía didáctica, el sistema OFDM contiene los siguientes elementos:

A. Transmisor OFDM

- Fuente: genera una secuencia de bits aleatorios (mediante una función `randn`)
- Bloque modulador: agrupa los bits según el nivel de modulación ($m = 2$ para QPSK y $m = 4$ para 16QAM) y asigna a cada grupo de bits un símbolo que dependerá de la posición en el diagrama de constelación. Para modular los bits se puede usar el *toolbox* de comunicaciones el cual proporciona herramientas útiles para diseño y simulación de diversos sistemas de comunicación [4].
- Bloque convertidor serie/paralelo: la información en forma de símbolos modulados se encuentra almacenada en un vector fila; para continuar con el procesamiento de los símbolos en el bloque posterior, se realiza una transformación fila a columna. En MATLAB se debe tomar en cuenta que al trasponer una matriz, sus elementos pasan a ser el conjugado de los elementos originales (recuerde que los símbolos son números complejos, y no conviene que al trasponer el vector la parte imaginaria de dichos símbolos invierta su signo) así que para trasponer un vector que contiene números complejos sin que se altere la información contenida en dicho vector, se debe entonces, además de utilizar el carácter comilla (‘) que sirve para trasponer matrices, colocar un punto antes de la comilla (‘.').
- Bloque OFDM: al vector columna anterior se le aplica una transformada inversa de Fourier (`ifft`), y a ese nuevo vector columna, que también contiene números complejos, se le añade un prefijo cíclico, es decir, del total de elementos del vector columna, se copia una fracción de los últimos elementos para ser ubicado al inicio de dicho vector. Por ejemplo, luego de aplicar la `ifft` al vector columna de $N = 64$ símbolos modulados, y si se tiene como parámetro de simulación un prefijo cíclico de longitud $N/4$, entonces de los 64 elementos se replican los 16 últimos elementos para ser adicionados al inicio del vector, dando como resultado un nuevo vector con 80 símbolos.
- Bloque paralelo/serie: al nuevo vector se lo convierte de vector columna a vector fila, tomando en cuenta la sintaxis respectiva para no conjugar dichos elementos

(es decir, debe mantenerse el signo original de la parte imaginaria de cada uno de los elementos).

B. Canal inalámbrico

Un transmisor y receptor se unen mediante un canal de tipo AWGN (*Additive White Gaussian Noise*), es decir, al símbolo OFDM se añade ruido aditivo blanco gaussiano, en función de un valor de relación señal a ruido SNR (*Signal-to-Noise Ratio*). Sin embargo, en sistemas de comunicación reales, el canal inalámbrico no solo añade ruido al símbolo por su paso por el canal, sino que además el símbolo sufre una alteración conocida como desvanecimiento que puede ser modelado por una función de distribución de probabilidad, dando como resultado varios tipos de canales inalámbricos que siguen una determinada función de distribución de probabilidad, según las características particulares de cada medio de transmisión como Rayleigh, Rician, etc. Es decir, aparte del ruido AWGN que aparece durante la transmisión sobre el canal inalámbrico, la señal sufre de desvanecimiento.

Por tanto, es de interés aprender a modelar no solo canales AWGN sino también con desvanecimiento. A continuación, se detallan dos maneras distintas de crear canales con desvanecimiento tanto Rayleigh como Rician en MATLAB.

1) Rayleigh Multitrayecto (NLOS)

A continuación se detallan dos formas fáciles y didácticas de crear canales Rayleigh, la una a través de la función `rayleighchan` y la segunda creando objetos.

a) Utilizando funciones

El software MATLAB brinda la herramienta `rayleighchan` que modela este canal. Los parámetros de esta función son un desplazamiento Doppler (`fd`, expresado en Hz), un tiempo de muestra de la señal de entrada (`ts`, expresado en segundos), y, el perfil retardo potencia caracterizado tanto por el vector de retardos `Tao` (expresado en microsegundos) como el vector de potencias de las múltiples señales recibidas en la antena receptora producto del multitrayecto (`Pdb`, expresado en dB). Por tanto, antes de utilizar la función se deben dar valores a dichos parámetros como se indica en la siguiente sección de código.

```
ts=1/(fd*1000); % Tiempo de muestra de la
% señal de entrada
fd=100; % Desplazamiento doppler
Tao=[0,1.5,4];
Pdb=[0,-4,-8];
chan_ray=rayleighchan(ts,fd,Tao,Pdb);
```

Una vez creado el canal, para añadir el efecto de desvanecimiento sobre la señal, ésta debe pasar por un filtro (usando el comando `filter`) cuyas características son las dadas en `rayleighchan`. Por ejemplo, la señal OFDM `simbolo_OFDM` pasa por el filtro y se obtiene `simbolo_OFDM`.

```
simbolo_OFDM_Ray=filter(chan_ray,simbolo_OFDM);
```

Finalmente, se añade a `simbolo_OFDM_Ray` el respectivo ruido AWGN.

b) Creando objetos

El *toolbox* de comunicaciones de MATLAB permite crear un objeto para filtrar una señal de entrada a través de un canal de desvanecimiento Rayleigh

```
rayChan = comm.RayleighChannel(...  
    'SampleRate',100000, ...  
    'PathDelays',[0 1.5 4], ...  
    'AveragePathGains',[0 -4 -8], ...  
    'MaximumDopplerShift',100);  
Tx_ray = (step(rayChan,Tx.')).';
```

La sintaxis para ingresar cada uno de los parámetros característicos de un canal multitrayecto se describe a continuación:

- **Sample rate:** frecuencia de muestreo de la señal (al ser la frecuencia de muestreo el inverso del tiempo de muestro, se puede fácilmente obtener este parámetro si se desea modelar un canal Rayleigh con los valores de los parámetros de entrada utilizados en la forma de modelar un canal Rayleigh descrito en el apartado anterior.
- **PathDelays:** vector de retardos, expresado en microsegundos (obtenido del perfil retardo-potencia)
- **AveragePathGains:** vector de potencias de las señales múltiples, expresadas en dB.
- **MaximumDopplerShift:** desplazamiento Doppler.

Para añadir el respectivo desvanecimiento, se necesita seguir la sintaxis descrita en la última línea del código anterior, debido a que los objetos solo pueden procesar vectores columna (se realiza la transformación fila/columna antes de llamar al objeto, y se realiza la transformación columna/fila luego de obtener los valores con desvanecimiento).

2) Rician Multitrayecto

Dicho desvanecimiento (utilizado para modelar canales inalámbricos cuyas antenas transmisora y receptora sí poseen una línea directa de vista) puede ser modelado mediante las siguientes formas en MATLAB:

a) Utilizando funciones

El MATLAB incorpora la función `ricianchan`. Los parámetros de entrada utilizados para construir un canal Rician son los mismos a los utilizados para construir un canal Rayleigh; y se añade un nuevo parámetro de entrada k , que consiste en un factor de Rician.

```
ts=1/(fd*1000); % Tiempo de muestra de la  
% señal de entrada  
fd=100; % Desplazamiento doppler  
k=8;  
Tao=[0,1.5,4];  
Pdb=[0,-4,-8];  
chan_ric =ricianchan(ts,fd,k,Tao,Pdb);
```

Luego de creado las características del filtro, la señal OFDM pasa por un filtro (usando comando `filter`), donde se especifica sus características con `chan_ric`. Finalmente, se añade ruido AWGN.

```
simbolo_OFDM_Ric=filter(chan_ric,simbolo_OFDM);
```

b) Creando objetos

El *toolbox* de comunicaciones de MATLAB permite crear un objeto para filtrar una señal de entrada a través de un canal de desvanecimiento Rician

```
ricianChan = comm.RicianChannel(...  
    'SampleRate',100000, ...  
    'PathDelays',[0 1.5 4], ...  
    'AveragePathGains',[0 -4 -8], ...  
    'KFactor',2.8,...  
    'MaximumDopplerShift',100);  
Tx_ric = (step(ricianChan,Tx.')).';
```

La sintaxis para ingresar cada uno de los parámetros característicos de un canal multitrayecto Rician son similares a los parámetros utilizados para modelar un canal basado en el modelo de Rayleigh, tomando en cuenta el factor k de Rician. Se añade el desvanecimiento de Rician utilizando la sintaxis descrita anteriormente.

C. Receptor OFDM

Luego de que el símbolo OFDM atraviese el canal de comunicaciones, sufriendo desvanecimiento producto de la naturaleza imperfecta del canal y añadido además ruido AWGN, el receptor es el encargado de procesar la señal recibida de tal forma que se haya perdido la menor cantidad de información posible en la transmisión. Esto se puede visualizar mediante el cálculo de la tasa de bits errados (BER, *Bit Error Rate*), la cual consiste en una relación entre el total de bits errados sobre el total de bits transmitidos. Para que el receptor procese la señal recibida de tal forma de obtener los bits y calcular el BER, el receptor cuenta con los siguientes elementos:

- Bloque serie/paralelo: paso previo al bloque demodulador OFDM.
- Bloque demodulador OFDM: elimina el prefijo cíclico del símbolo OFDM recibido, es decir, si tomamos en cuenta los valores dados al inicio de esta explicación, del vector de 80 elementos recibidos, solo se tomarían en cuenta los 64 últimos elementos para el procesamiento de la señal y la posterior obtención de los bits, descartando los 16 primeros elementos correspondientes al prefijo cíclico de longitud $N/4$; luego de descartado el prefijo cíclico de la señal se realiza el cálculo de la transformada rápida de Fourier mediante la función de MATLAB `fft`.
- Bloque paralelo/serie.
- Bloque demodulador: a cada uno de los símbolos obtenidos por medio de la `fft` se demodulan para obtener la secuencia de bits respectiva, de acuerdo con el punto más cercano en el diagrama de constelación.

Luego de obtener el tren de bits en el receptor, se realiza el cálculo del BER, para cada valor de SNR, y se realiza la gráfica de BER vs SNR, en escala lineal en el eje x (SNR) y logarítmica en el eje y (BER). Debido a que la fuente genera una secuencia de bits aleatoria, para obtener resultados más confiables, se repite la simulación durante un total de al menos mil veces,

donde en cada una se calcula los respectivos valores de BER para cada SNR y se obtiene un valor de BER promedio. Este método de simulación se conoce como simulación de Monte Carlo.

D. Simulación de Monte Carlo

Debido a que en la simulación se encuentran involucradas variables aleatorias (secuencia de bits generadas por la fuente en el bloque transmisor), el realizar una sola simulación no generará resultados confiables de BER. Para conseguir resultados cercanos a las curvas teórica, se debe realizar/simular al menos $N_{trials} = 1000$ simulaciones y dichos resultados se promedian al final para obtener un valor de BER. Los resultados finales dependen del valor de simulaciones escogido, así por ejemplo para $N_{trials} = 1000$, las curvas de BER alcanzarán una probabilidad de 10^{-3} . Este método de simulación se conoce como simulación de Monte Carlo, altamente utilizado en estudio y simulaciones de sistemas de comunicación inalámbrica.

IV. RESULTADOS

Los parámetros de entrada son modificables de acuerdo con la necesidad de la simulación requerida, estos valores se pueden modificar en el archivo principal de la simulación. Los escenarios a simular presentan las características dadas en Tabla I.

TABLA I.

PARÁMETROS DE ENTRADA PARA CADA UNO DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Parámetros de entrada	Curvas obtenidas		
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Modulación	QPSK	QPSK	16QAM
No. Subportadoras (N)	64	128	64
Longitud de Prefijo cíclico	N/4 = 16	N/4 = 32	N/4
PDP (Power-Delay Profile)	P[dB] = [0, -4, -8] τ[μs] = [0, 1.5, 4]		

Se presentan las curvas con las dos opciones propuestas para cada escenario.

- Escenario 1

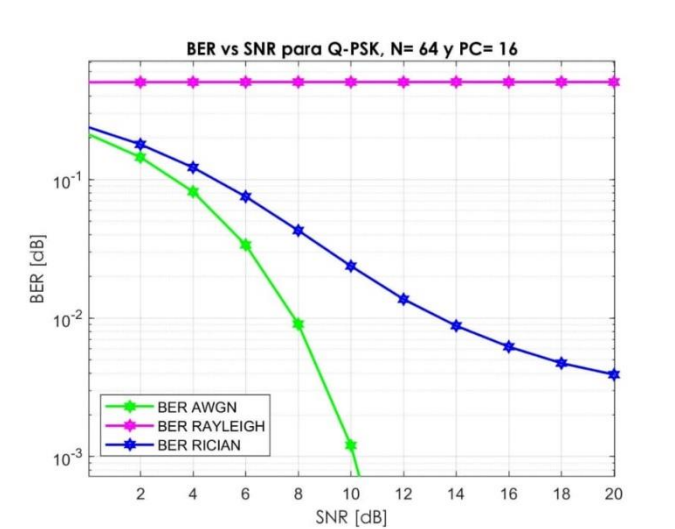


Figura 1: Primera forma: utilizando funciones

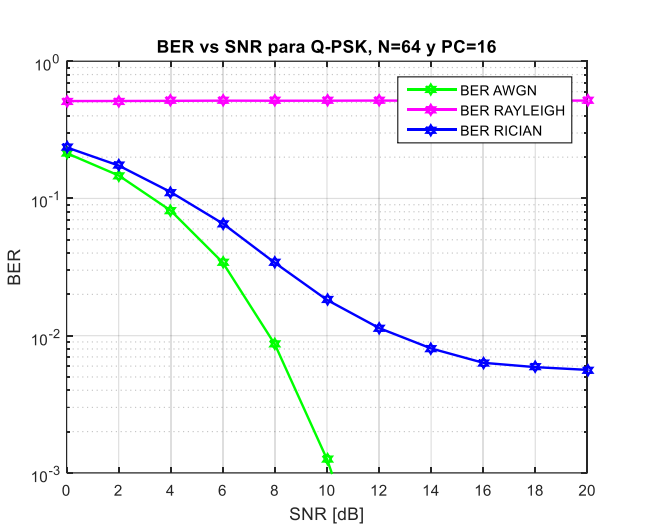


Figura 2: Segunda forma: creando objetos

- Escenario 2

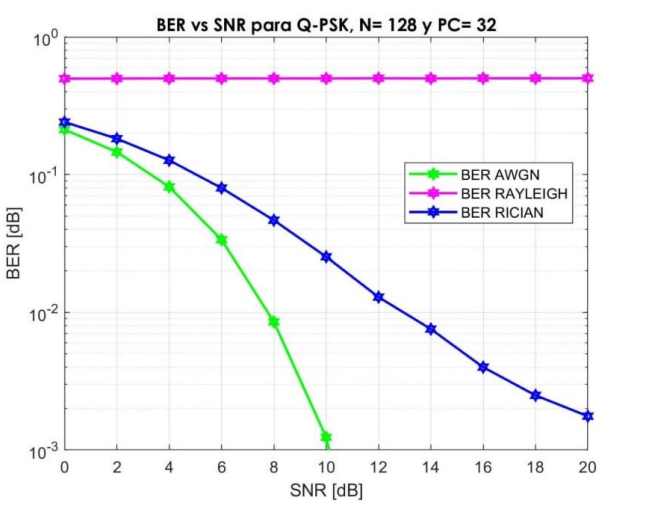


Figura 3: Primera forma: utilizando funciones

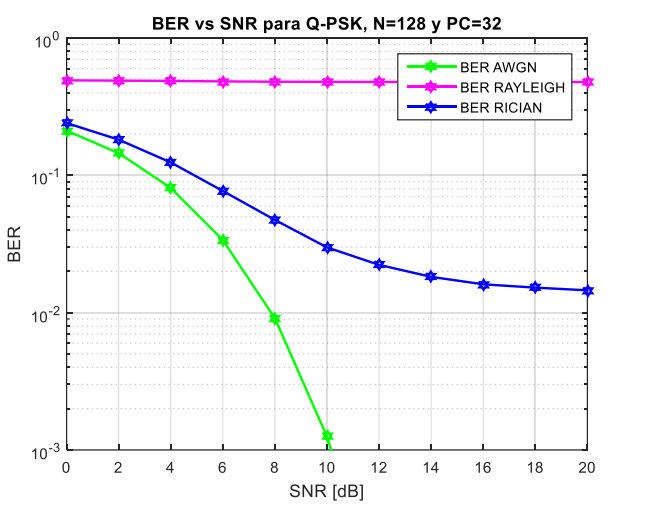


Figura 4: Segunda forma: creando objetos

• Escenario 3

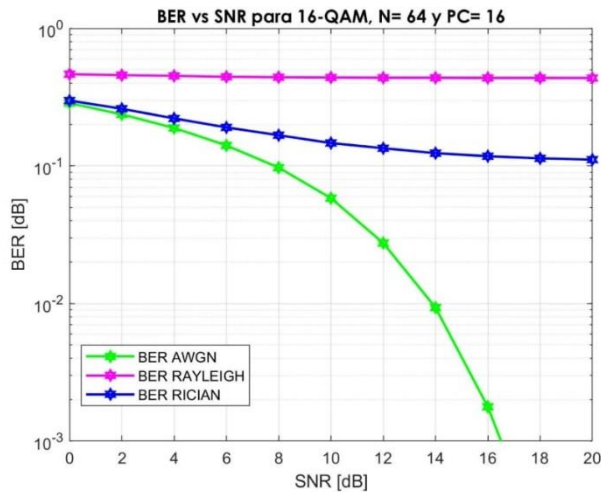


Figura 5: Primera forma: utilizando funciones

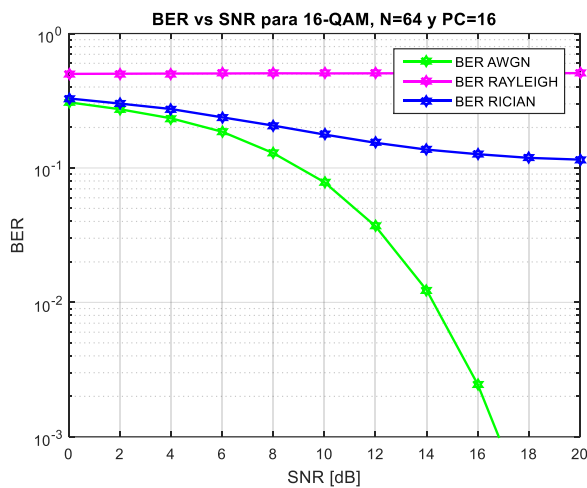


Figura 6: Segunda forma: creando objetos

Al realizar una comparación entre las curvas de BER vs SNR sobre un canal AWGN y sobre canales con desvanecimiento de las dos formas para los tres escenarios presentados, las curvas de BER vs SNR coinciden, por tanto, se puede utilizar cualquiera de ellas.

Además, como se esperaba, se observa que el canal Rayleigh presenta un peor comportamiento con respecto a Rician debido a que no es una comunicación con línea de vista. Usualmente los sistemas de comunicaciones usan un ecualizador en el receptor para compensar dichas pérdidas.

V. CONCLUSIONES

El propósito de este documento es presentar dos formas para modelar canales inalámbricos con desvanecimiento a pequeña escala. Para la simulación se usa MATLAB, la cual ofrece dos poderosas herramientas de modelación: una mediante funciones donde se ingresan determinados parámetros de entrada, y otra creando objetos, donde es necesaria la configuración de las propiedades de los objetos.

Al realizar la comparación del rendimiento entre ambos métodos de diseño de canales inalámbricos, se puede concluir que el método que utiliza menores recursos de memoria del computador es el uso de objetos, esto se pudo corroborar debido a que el tiempo de duración de las simulación es menor (alrededor de media hora por gráfica para simulación de 1000 N_{trials}), en comparación al uso de funciones que requiere mayores recursos de memoria y el tiempo de simulación se encuentra alrededor de las 2 horas por gráfica (tomando en cuenta los mismos 1000 N_{trials}). Sin embargo, ambos métodos de modelado de canales inalámbricos presentan resultados bastante similares en sus gráficas, por lo que se recomienda, si se busca ocupar menos recursos de memoria del computador, utilizar el método de creación de objetos (comm.RayleighChannel y comm.RicianChannel), únicamente asignando los valores correspondientes a las propiedades de los objetos.

RECONOCIMIENTOS

Este artículo se presentó como trabajo final y fue elegido como el más destacado como parte de un concurso interno entre los estudiantes que se encuentran cursando la asignatura de Comunicaciones Inalámbricas con la Dra. Martha Cecilia Paredes en el semestre 2019-A de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional.

REFERENCIAS

- [1] T. Rappaport, "Wireless communications". Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2009, pp. 139 – 146, 167-196.
- [2] W. Stallings, "Wireless communications and networks". Estados Unidos: Pearson Education, Inc., 2005, pp. 115-125.
- [3] M. Golio, Microwave and RF product applications. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- [4] Yong Soo Cho Jaekwon Kim Won Young Yang Chung G. Kang, "MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB". Singapore: IEEE Press, 2010.
- [5] ParedesParedes, Martha Cecilia. "Apuntes de clase - Propagación", Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador, Semestre 2019A.
- [6] A. Aguirre, S. Donoso, I. Montalvo y M. C. Paredes Paredes, "Guía de Implementación y Simulación de la PHYOFDM del Estándar IEEE 802.11 sobre Canales AWGN y Rayleigh en MATLAB", XXVIII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA, no. 28, pp. 72 - 76, 2018.
- [7] "Fading basics types of Fading in wireless communication", *Rfwireless-world.com*, 2019. [Online]. Available: <https://www.rfwireless-world.com/Articles/Fading-basics-and-types-of-fading-in-wireless-communication.html>. [Accessed: 10- Jul- 2019].



Jonathan Esteban Jaramillo Arboleda nació en la ciudad de Quito en el año 1997, curso sus estudios secundarios en el Colegio Técnico Salesiano "Don Bosco", actualmente se encuentra realizando sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional en los últimos semestres de la carrera de Ingeniería Electrónica y Redes de Información. Areas de interés: Desarrollo de software, redes de computadoras y procesamiento digital de señales.



Andrés Patricio Mera Muñoz nació en la ciudad de Quito en el año 1997, curso sus estudios secundarios en el Colegio Municipal Fernandez Madrid, actualmente se encuentra realizando sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional en los últimos semestres de la carrera de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Areas de interés: sistemas de comunicación, radio enlaces y procesamiento digital de señales.



Martha Cecilia Paredes Paredes recibió el título de Ingeniería en Electrónica y Redes de Información en la Escuela Politécnica Nacional (EPN) en Quito - Ecuador en 2008, los títulos de Máster y Doctor en Multimedia y Comunicaciones en la Universidad Carlos III de Madrid, Madrid - España en 2010 y 2014,

respectivamente. Desde 2010 a 2011 trabajó como Profesor Ocasional en la Universidad de las Américas (UDLA), Quito - Ecuador. Actualmente, es Profesor Agregado en el Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información (DETRI) en EPN, donde ha enseñado a varios cursos de grado y postgrado todos relacionadas con las comunicaciones inalámbricas. En cuanto a investigación, ha participado en varios proyectos de investigación nacionales e internacionales sobre comunicaciones inalámbricas. Actualmente es directora del Proyecto de Investigación "Modeling of PER-PAPR in ad hoc networks". Además, ha sido autora y co-autora de más de diez artículos científicos en revistas internacionales y congresos de alto impacto. Sus principales intereses de investigación incluyen el procesamiento de señales para comunicaciones de banda ancha, transmisiones multiportadora, especialmente OFDM y mejoras en capa física en redes 5G.