

# Simulación de los métodos LS y MMSE para estimación de canal en sistemas OFDM

Elvis Espinosa, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito-Ecuador  
Diego Reinoso, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito-Ecuador



**Resumen**— En el presente artículo se realiza la estimación de canal en sistemas OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) utilizando los algoritmos LS (Least Square) y MMSE (Minimum Mean-Square Error). La estimación de canal en un sistema OFDM consiste en encontrar la respuesta en frecuencia para cada una de las subportadoras que conforman el símbolo OFDM. Para estimar esta respuesta es necesario que el transmisor envíe ciertos símbolos conocidos, los cuales se denominan pilotos. Tanto pilotos como datos serán transmitidos en la comunicación, por lo cual es necesario el uso de una estructura para distribuirlos. Las estructuras de pilotos usadas en el presente proyecto son block type y comb type. La importancia de la estimación de canal radica en que mientras más próxima sea al canal real se recuperará una señal más similar a la enviada, disminuyendo el número de bits errados. La aplicación desarrollada permite configurar aspectos de la transmisión como el orden de modulación, el PDP del canal, el algoritmo de estimación de canal y la distribución de pilotos. Mediante las simulaciones realizadas se comprobó que el algoritmo MMSE funciona mejor que el algoritmo LS para estimación de canal.

**Palabras Clave**— canal Rayleigh, estimación de canal, LS, MMSE, OFDM.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha producido un crecimiento en la demanda de servicios de comunicaciones móviles y de accesos inalámbricos a Internet. Cada vez, los usuarios solicitan mayores velocidades de transmisión por lo cual es necesario el uso de tecnologías que permitan un acceso rápido y eficiente a la red [1].

El rendimiento de un sistema de comunicación inalámbrico se encuentra estrechamente relacionado con las características del canal utilizado. En una comunicación inalámbrica se utiliza la propagación por ondas de radio para enviar la información desde el transmisor hacia el receptor [1]. Las ondas de radio usadas se ven afectadas principalmente por: reflexión, difracción, dispersión y desvanecimiento [2], [3]. La importancia del canal inalámbrico radica en comprender que su funcionamiento es la base para desarrollar futuras tecnologías de transmisión [1].

Los sistemas multiportadora son una forma eficiente de satisfacer los requerimientos de los usuarios, por lo cual son utilizados en diferentes estándares. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) es uno de esos sistemas de transmisión multiportadora. OFDM tiene como ventaja la robustez en entornos multitrayecto, un entorno muy común en comunicaciones inalámbricas. Esta característica es la que

permite a OFDM realizar transmisiones de datos a altas velocidades a pesar del uso de un canal inalámbrico, el cual es dinámico e impredecible. Debido a las características del canal antes mencionadas es necesario el proceso de estimación de canal, ya que conociendo el comportamiento del canal se puede compensar los cambios ocurridos en la señal [4].

La estimación de canal en OFDM es un tema de gran interés en los últimos años, por lo cual varias técnicas de estimación de canal han sido propuestas en diferentes estudios y trabajos publicados [5]–[8]. Todas estas técnicas parten del cálculo de las estimaciones de canal en posiciones piloto, para a partir de ellas calcular las estimaciones del canal en el resto de las posiciones de la rejilla tiempo-frecuencia.

Para el proceso de estimación de canal se pueden usar diferentes métodos entre los que se destacan los algoritmos LS (Least Square) y MMSE (Minimum Mean-Square Error), los cuales son los que usarán en el estudio. Con respecto al algoritmo LS ha sido ampliamente utilizado debido a su baja complejidad comparado con otros métodos de estimación de canal, pero su mayor inconveniente radica en un alto valor de MSE (Mean Square Error). Con respecto al algoritmo MMSE se puede mencionar que presenta una mayor complejidad que el algoritmo LS pero que su desempeño es mejor que el LS cuando el canal presenta variaciones temporales [5].

Es común que en simulaciones de sistemas OFDM no se realice el proceso de estimación de canal, debido a que se asume un canal inalámbrico conocido. Sin embargo, esto no es cierto. De hecho, el no conocer el comportamiento del canal impacta en la eficiencia del sistema. Por esta razón se implementa la simulación de un sistema OFDM en el cual se realizará estimación de canal utilizando los algoritmos LS y MMSE para mejorar el desempeño del sistema.

El presente artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: la sección 2 presenta un resumen de las principales características de OFDM y de los bloques que conforman el transmisor y el receptor. La sección 3 describe diferentes distribuciones de pilotos que se pueden utilizar en un esquema de transmisión OFDM. La sección 4 menciona características básicas de la interpolación. La sección 5 resume las técnicas de estimación de canal LS y MMSE. Finalmente, las secciones 6 y 7 muestran los resultados y las conclusiones, respectivamente.

## II. OFDM

OFDM es un esquema de transmisión que se ha adoptado por sistemas de comunicaciones inalámbricas con altas velocidades, como: IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac e IEEE



802.16e por ser adecuado para canales con desvanecimiento selectivo en frecuencia [7],[9]. OFDM divide los símbolos en diferentes flujos, los cuales se transmiten usando subportadoras que son paralelas y ortogonales. Con el uso de esta transmisión en paralelo, el periodo del símbolo se incrementa logrando una señal más robusta frente a la ISI [10].

En una señal OFDM la ISI puede ocurrir dentro de los diferentes subflujos, para mitigar los efectos de la ISI en el canal se inserta un intervalo de guarda en el dominio del tiempo denominado prefijo cíclico. El prefijo cíclico consiste en una copia de los últimos  $N_G$  símbolos en el dominio del tiempo. Una señal OFDM puede causar interferencia de canal adyacente, para mitigar este efecto se usan las subportadoras externas (virtual carriers, VC) como bandas de guarda [1], [10],[11].

Un sistema OFDM se encuentra integrado por los bloques mostrados en la Fig. 1.

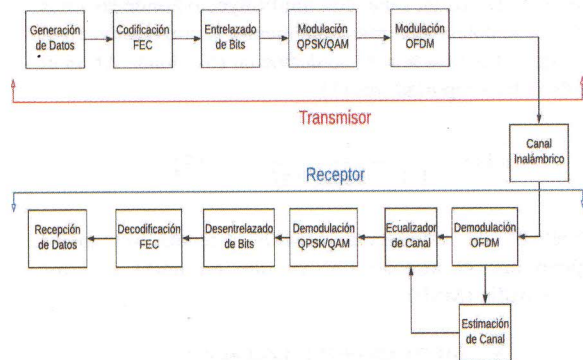


Fig. 1 Esquema de un sistema OFDM.

En un sistema OFDM, el transmisor modula la secuencia de bits del mensaje en símbolos PSK (Phase Shift Keying) o QAM (Quadrature Amplitude Modulation), posteriormente realiza la IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) convirtiendo los símbolos en señales en el dominio del tiempo y los envía a través de un canal (inalámbrico). La señal recibida suele estar distorsionada por las características del canal. Para recuperar los bits transmitidos, el efecto del canal se debe estimarse y compensarse en el receptor [1].

En general, el canal puede estimarse utilizando un preámbulo o símbolos piloto conocidos tanto por el transmisor como por el receptor. Para elegir la técnica de estimación de canal para un sistema OFDM se deben tener en cuenta muchos aspectos como: el rendimiento requerido, la complejidad computacional y la variación temporal del canal [1].

### III. DISTRIBUCIÓN DE PILOTOS

Dependiendo de la disposición de los pilotos, se consideran tres tipos de distribuciones de pilotos: block type, comb type y lattice type [1].

#### A. Block Type

En esta distribución se transmiten periódicamente símbolos OFDM con pilotos en todas sus subportadoras (ver Fig. 2).

Usando estos pilotos, se realiza una interpolación en el dominio del tiempo para estimar el canal. Dado que los pilotos se insertan en todas las subportadoras del símbolo piloto, con un cierto período de tiempo, este tipo de distribución es adecuada para canales selectivos en frecuencia. [1].

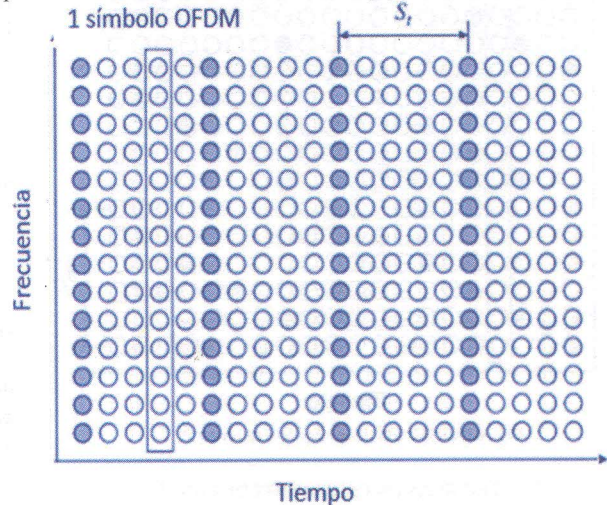


Fig. 2 Distribución de pilotos block type [1].

#### B. Comb Type

La distribución de pilotos comb type se muestra en la Fig. 3. En esta distribución se tiene los pilotos insertados cada cierto número de subportadoras en todos los símbolos OFDM, estos pilotos se usan para una interpolación en el dominio de la frecuencia. La distribución comb type es adecuada para canales con desvanecimiento en tiempo [1].

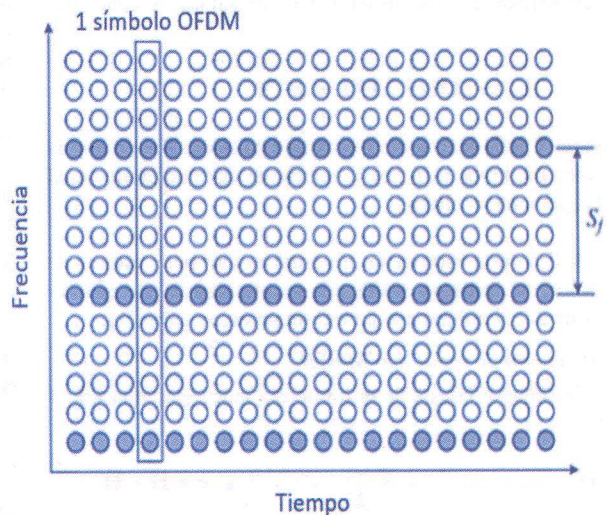


Fig. 3 Distribución de pilotos comb type [1].

#### C. Lattice Type

En esta distribución, los pilotos se insertan a lo largo de los ejes del tiempo y de la frecuencia con ciertos períodos determinados (ver Fig. 4). Los pilotos que se encuentran dispersos tanto en los ejes del tiempo como de la frecuencia



facilitan las interpolaciones en los dos ejes para lograr la estimación del canal [1].

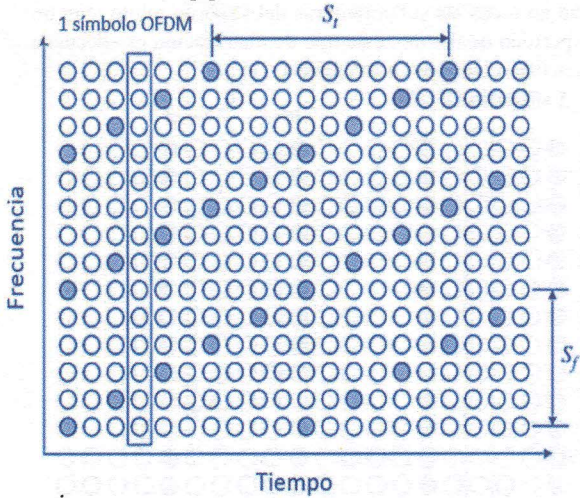


Fig. 4 Distribución de pilotos lattice type [1].

IV. TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE CANAL

La señal recibida se encuentra distorsionada por las características del canal, para recuperar los bits transmitidos, el efecto del canal se debe estimar y compensar en recepción. La señal transmitida puede recuperarse estimando la respuesta del canal de cada subportadora. Al disponer de símbolos de entrenamiento se puede usar técnicas de estimación como: LS y MMSE [1].

A. Estimación de canal tipo LS

La estimación de canal usando el algoritmo LS está dada por [1].

$$\hat{H}_{LS} = (X^H X)^{-1} X^H Y = X^{-1} Y \quad (1)$$

Donde:  $X$  es la matriz de pilotos transmitidos,  $Y$  es la matriz de pilotos recibidos y  $H_{LS}$  es la matriz de estimación de canal para las posiciones pilotos.

El MSE de esta estimación de canal es alto para valores de SNR bajos, sin embargo debido a la simplicidad de este método se ha utilizado ampliamente para estimación de canal [1].

B. Estimación de canal tipo MMSE

El estimador consta de la estructura mostrada en la Fig. 5 [1].

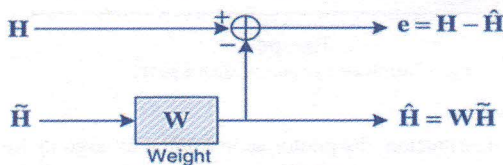


Fig. 5 Estimador tipo MMSE [1].

El estimador tipo MMSE se define en (2), donde  $\tilde{H}$  es el estimador LS y  $W$  es una matriz de pesos.

$$\hat{H} \triangleq W \tilde{H} \quad (2)$$

Para hallar la estimación de canal MMSE se utiliza (3), donde  $R_{H\tilde{H}}$  es la matriz de correlación cruzada entre el vector de la respuesta real del canal ( $H$ ) y el vector de la estimación de canal LS ( $\tilde{H}$ ) y  $R_{\tilde{H}\tilde{H}}$  es la matriz de autocorrelación de  $\tilde{H}$  [1].

$$\hat{H} = W \tilde{H} = R_{H\tilde{H}} R_{\tilde{H}\tilde{H}}^{-1} \tilde{H} \quad (3)$$

Los elementos de las matrices de correlación cruzada y autocorrelación se definen como:

$$E\{h_{k,l} \tilde{h}_{k',l'}\} = E\{h_{k,l} h_{k',l'}^*\} = r_f[k - k'] r_t[l - l'] \quad (4)$$

donde  $k$  y  $l$  denotan el índice de subportadora y el índice del símbolo OFDM, respectivamente [1].

Usando el PDP de un canal con multitrayecto donde las rutas disminuyen su potencia exponencialmente, la correlación en el dominio de la frecuencia  $r_f[k]$  se define en (5), donde  $\Delta f$  es el espaciado entre subportadoras [1].

$$r_f[k] = \frac{1}{1 + j2\pi\tau_{rms}k\Delta f} \quad (5)$$

El método de estimación MMSE presenta un mejor desempeño que el método LS, ya que minimiza el error cuadrático medio (MSE).

V. MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN

La interpolación es el proceso de estimar en una función un valor intermedio a partir de una tabla de valores conocida, encontrando valores que no existían en la tabla. Para estimar la respuesta del canal de las subportadoras de datos, la estimación de las subportadoras piloto debe interpolarse [1].

A. Interpolación lineal:

La interpolación lineal es el método más simple. La función interpolante en este tipo de interpolación es una línea recta entre los dos puntos.

B. Interpolación spline cúbico:

El objetivo de los splines cúbicos es generar una función de interpolación usando un polinomio cúbico con una primera derivada suavizada y una segunda derivada continua, tanto dentro de los intervalos como en los puntos a interpolarse [12].

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones mediante: curvas del MSE (entre el canal real y la estimación de canal) versus la relación  $E_b/N_0$ . También se presentan las curvas de la BER vs.  $E_b/N_0$  tanto sin codificación ni interleaving, así como con codificación convolucional e interleaving, para diferentes esquemas de pilotos (comb type cada 8 subportadoras, comb type cada 4 subportadoras y block type).



A. Escenario de simulación

Las opciones que se puede seleccionar para la transmisión se las resume en la Tabla I.

TABLA I.  
OPCIONES DEL SISTEMA OFDM.

Parámetro	Opciones
Estimación perfecta de canal	Si, No
Codificación convolucional (Tasa 1/2) + Interleaving	Si, No
Número de transmisiones	Seleccionable por el usuario
Esquema de modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM
Método de estimación	LS, MMSE
Tipo de interpolación	Lineal, Spline
Esquema de pilotos	Comb cada 8 subportadoras
	Comb cada 4 subportadoras
	Block

Los parámetros que se han predefinido para el sistema OFDM se especifican en la Tabla II.

TABLA II  
PARÁMETROS DEL SISTEMA.

PARÁMETRO	VALOR
Número de subportadoras nulas (VC)	12
Número de subportadoras de datos+pilotos	52
Número de subportadoras totales	64
Tamaño de la IFFT	64
Longitud del prefijo cíclico	16

En la modulación OFDM se inserta de las subportadoras pilotos necesarias para la estimación de canal, para lo cual previamente los pilotos se han generado usando alguna de las estructuras de piloto especificadas en las Tablas III-V, en donde P=Piloto, VC= Subportadora Nula y D=Subportadora de Datos.

TABLA III.  
ESTRUCTURA DE PILOTOS PARA LA DISTRIBUCIÓN COMB TYPE CADA 8 SUBPORTADORAS.

# Port	1-6	7	15	23	31	33	39	47	55	60-64
	VC	P	P	P	P	VC	P	P	P	VC

TABLA IV.  
ESTRUCTURA DE PILOTOS PARA LA DISTRIBUCIÓN COMB TYPE CADA 4 SUBPORTADORAS.

# Port	1-6	7	11	15	19	23	27	31	33	35	39	43	47	51	55	59	60-64
	VC	P	P	P	P	P	P	P	VC	P	P	P	P	P	P	P	VC

TABLA V.  
ESTRUCTURA DE PILOTOS PARA LA DISTRIBUCIÓN BLOCK TYPE.

# Port	1-6	7-32	33	34-59	60-64
	VC	P/D	VC	P/D	VC

En caso de usar el esquema de pilotos block type se asumió que el canal no presenta variaciones en el tiempo, por lo cual no es necesaria la interpolación. Al utilizar el algoritmo MMSE tampoco se necesita realizar interpolación ya que este algoritmo permite obtener la respuesta en frecuencia del canal para todas

las subportadoras del símbolo OFDM.

El número de transmisiones por cada Eb/No se configuró en 10000 con el fin de obtener curvas con trazos definidos. El canal inalámbrico que se utilizó es un canal tipo Rayleigh con una distribución de rayos exponencial, el canal se encuentra especificado en la Tabla VI.

TABLA VI.  
PDP DEL CANAL UTILIZADO

Trayecto	Retraso Relativo(ns)	Potencia Promedio (dB)
1	0	0.0
2	100	-3
3	200	-6

B. Pruebas de funcionamiento

Con el fin de comprobar que el estimador de canal implementado funcione correctamente, es decir que el canal estimado sea similar al canal real, se presentan curvas comparando el canal real versus la estimación de canal realizada. Además de graficar las estimaciones de canal, cuando se utiliza el algoritmo LS se grafica los pilotos. Esto se realizó para observar cómo los métodos de interpolación afectan a la estimación de canal.

En las Fig. 6-8 se presenta la respuesta del canal real (en azul) comparada con la estimación de canal usando una estructura comb type cada 8 subportadoras y las diferentes técnicas (en rojo). En las figuras se compara el canal real versus: estimación LS con interpolación lineal (Fig. 6), estimación LS con interpolación spline (Fig. 7) y estimación MMSE (Fig. 8). En las Fig. 7 y 8 además se presenta los pilotos recibidos (en amarillo).

Al usar una estructura de pilotos comb type, donde se tiene un piloto cada 8 subportadoras, se tiene 7 pilotos y 45 subportadoras de datos en cada símbolo OFDM. Esta estructura se usa en las Fig. 6-8, en las que se puede observar que la mejor estimación de canal es usando el algoritmo MMSE (ver Fig. 8), seguido por el algoritmo LS con interpolación lineal (ver Fig. 6) y finalmente la peor es al usar el algoritmo LS con interpolación spline (ver Fig. 7), esto ocurre debido a que no se tiene los suficientes datos para que la interpolación tipo spline se ajuste adecuadamente a las variaciones del canal.

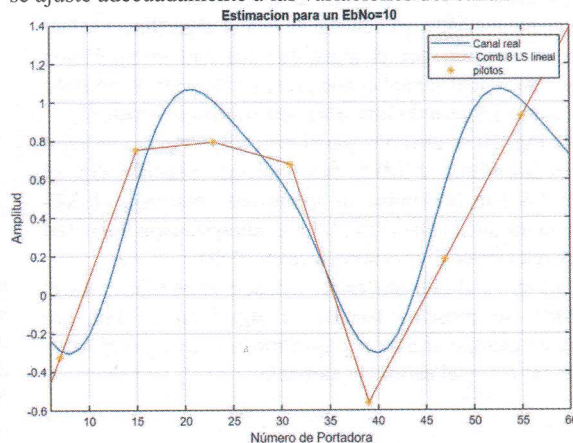


Fig. 6 Canal real y canal estimado usando algoritmo LS e interpolación lineal.

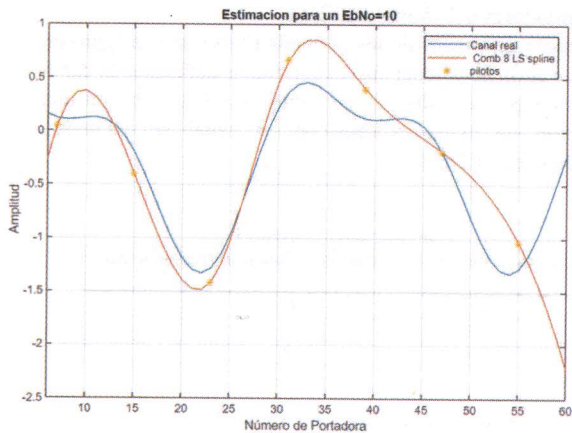


Fig. 7 Canal real y canal estimado usando algoritmo LS e interpolación spline.

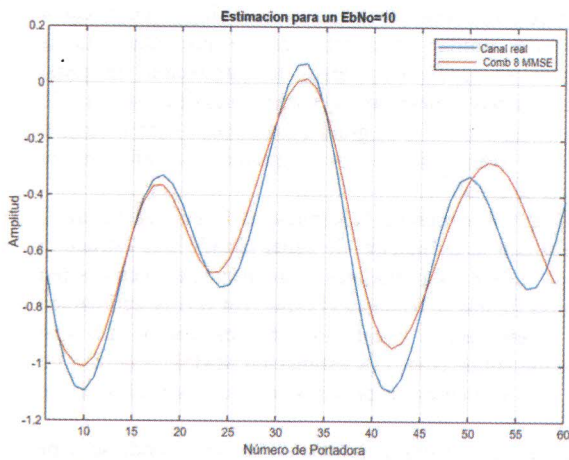


Fig. 8 Canal real y canal estimado usando algoritmo MMSE.

C. MSE vs Eb/No

Se presenta curvas del MSE vs Eb/No para las estructuras de pilotos: comb type cada 8 subportadoras (ver Fig. 9), comb type cada 4 subportadoras (ver Fig. 10) y block type (ver Fig. 11).

En la Fig. 9 se observa que al usar la estructura de pilotos comb type cada 8 subportadoras, la estimación de canal que presenta el menor MSE es cuando se usa el algoritmo MMSE (en violeta), seguido por el algoritmo LS con interpolación lineal (en rojo) y finalmente el que presenta un peor desempeño es el algoritmo LS usando interpolación spline (en amarillo).

En la Fig. 10 se observa que el mejor desempeño se logra usando el algoritmo MMSE (en violeta), seguido por el algoritmo LS con interpolación spline (en amarillo), el cual funciona mejor que el algoritmo LS con interpolación lineal (en rojo) para relaciones Eb/No superiores a 10 dB.

En la Fig. 11 al usar una estructura de pilotos block type el menor MSE se presenta usando el algoritmo MMSE (en amarillo), en cambio al usar el algoritmo LS (en rojo) el MSE entre el canal real y el estimado aumenta.

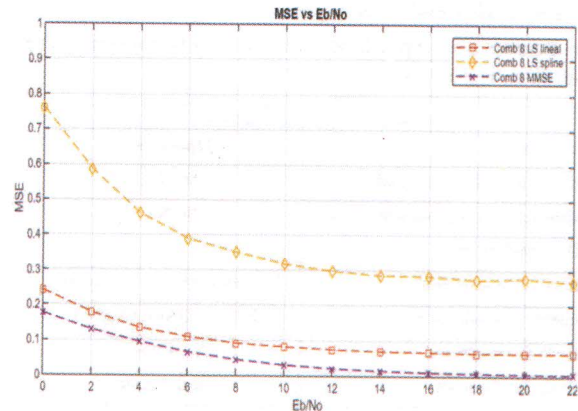


Fig. 9 MSE vs. Eb/No, distribución de pilotos comb 8.

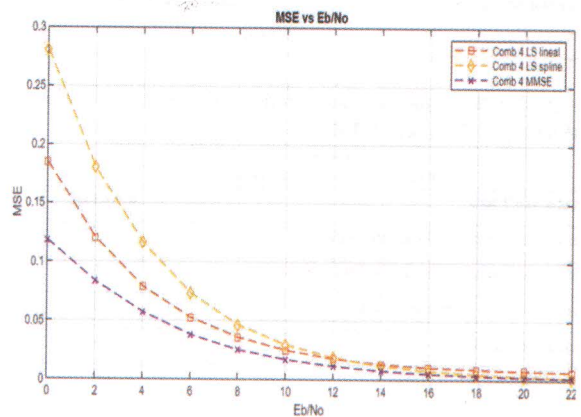


Fig. 10 MSE vs. Eb/No, distribución de pilotos comb 4.

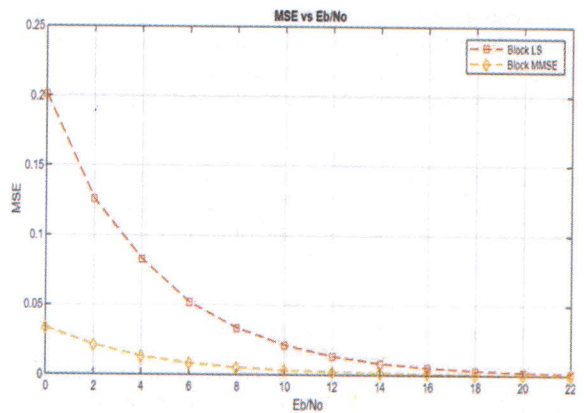


Fig. 11 MSE vs. Eb/No, distribución de pilotos block.

D. BER vs. Eb/No

Se realizaron simulaciones utilizando los esquemas de portadoras: comb type cada 8 subportadoras, comb type cada 4 subportadoras y block type. En cada figura se compara para una misma distribución de pilotos los algoritmos de estimación de canal LS y MMSE. En las figuras se trazó en color azul con línea continua la estimación perfecta de canal, la cual se obtiene usando los coeficientes del canal Rayleigh para la equalización (en este caso se supone un canal inalámbrico conocido).



1) Sin codificación tipo FEC ni entrelazado de bits: Se presentan curvas de la BER vs. Eb/No utilizando modulación QPSK para las estructuras de pilotos: comb type cada 8 subportadoras (ver Fig. 12), comb type cada 4 subportadoras (ver Fig. 13) y block type (ver Fig. 14). En las figuras antes mencionadas se observa que se tiene una mejor estimación de canal al usar el algoritmo MMSE respecto al algoritmo LS, ya que se tiene una menor BER. Si se compara el mismo algoritmo de estimación de canal (LS o MMSE), usando diferentes estructuras de pilotos, se observa que en orden de mejor a peor BER se tiene: la estructura de pilotos block type (ver Fig. 14), seguido por la estructura de pilotos comb type cada 4 subportadoras (ver Fig. 13) y finalmente la estructura de pilotos comb type cada 8 subportadoras (ver Fig. 12). Como consecuencia de lo anterior la mejor BER se obtiene al usar una estructura de pilotos block type en conjunto con el algoritmo MMSE como se observa en la Fig. 14.

Con respecto a los tipos de interpolación utilizados (lineal, spline). En la Fig. 12, en la cual se usa una estructura de pilotos comb type cada 8 subportadoras se observa una mejor BER usando la interpolación lineal, en cambio en la Fig. 13 en la cual se usa una estructura de pilotos comb type cada 4 subportadoras se observa una mejor BER para Eb/No superiores a 10 dB cuando se usa la interpolación spline, esto se debe a que la interpolación tipo spline funciona mejor que la lineal al usarse un mayor número de pilotos (comb type cada 8 vs comb type cada 4), ya que con más datos esta interpolación logra ajustarse de mejor manera a las variaciones del canal.

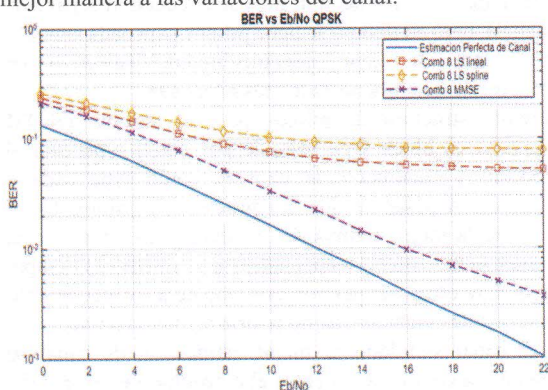


Fig. 12 BER vs. Eb/No, distribución de pilotos comb 8.

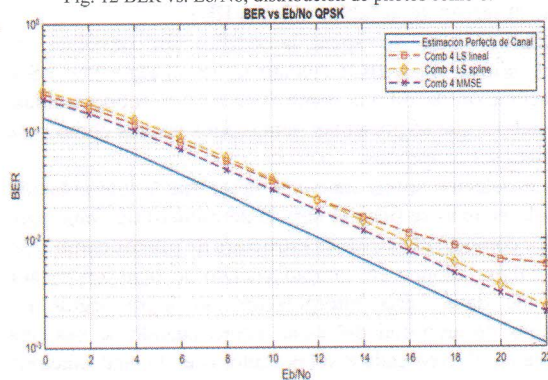


Fig. 13 BER vs. Eb/No, distribución de pilotos comb 4.

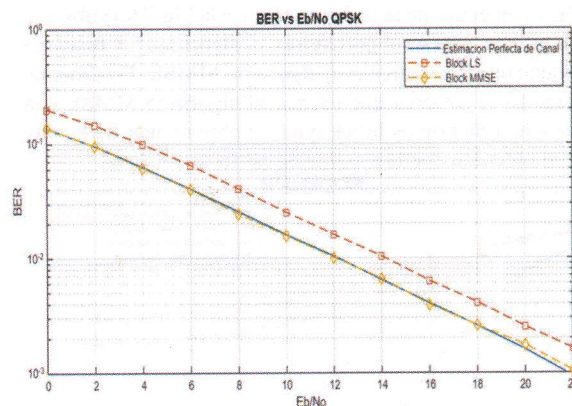


Fig. 14 BER vs. Eb/No, distribución de pilotos block type.

En la Tabla VII se detalla los valores de la Eb/No para una BER de 10<sup>-1</sup>. Utilizando una distribución de pilotos comb type cada 8 subportadoras se observa una mejora en la Eb/No de: 3 dB entre el algoritmo LS spline y LS lineal, siendo este último el mejor; 5 dB entre el algoritmo LS spline y MMSE, siendo el último mencionado el mejor. Utilizando una distribución de pilotos comb type cada 4 subportadoras se observa una mejora en la Eb/No de: 1 dB entre el algoritmo LS spline y LS lineal, siendo este último el mejor; 1,5 dB entre el algoritmo LS spline y MMSE, siendo el último mencionado el mejor. Finalmente, utilizando una distribución de pilotos block type se observa una mejora en la Eb/No de 2 dB entre el algoritmo LS y MMSE, siendo este último el mejor.

TABLA VII. VALORES DE LA RELACIÓN Eb/No PARA UNA BER DE 10<sup>-1</sup>.

		Comb 8	Comb 4	Block
LS	Sin interpolación	-----	-----	4 dB
	Interpolación lineal	7 dB	4,5 dB	-----
	Interpolación spline	10 dB	5,5 dB	-----
MMSE		5 dB	4 dB	2 dB

2) Con codificación tipo FEC y entrelazado de bits: En las siguientes figuras se observan las curvas de la BER vs. Eb/No para una modulación QPSK con codificación convolucional con tasa 1/2 y entrelazado de bits tipo bloque. En las curvas se usará las estructuras: comb type cada 8 subportadoras (ver Fig. 15), comb type cada 4 subportadoras (ver Fig. 16) y block type (ver Fig. 17).

En la Fig. 15 se observa que la BER con estimación perfecta de canal es mejor comparada con la Fig. 12 donde no se utiliza codificación FEC. Además, se nota en la Fig. 15 que la BER con estimación tipo LS es mala a pesar de usar codificación FEC. Este resultado se obtiene porque la separación de los pilotos cada 8 subportadoras es excesiva, generando errores que no pueden ser corregidos con la codificación FEC. En el caso de la estimación usando el algoritmo MMSE, se observa que la BER si mejora.

Con respecto a las Fig. 16 y Fig. 17 si se las compara con las Fig. 13 y Fig. 14 respectivamente, se nota una mejora sustancial



en la BER con el uso de la codificación. En la Fig. 16 se observa que con pilotos cada 4 subportadoras, el algoritmo LS funciona y se obtiene una BER cercana al algoritmo MMSE. Finalmente, en la Fig. 17 se observa que usando el algoritmo MMSE con una estructura de pilotos block type, se obtiene una BER muy similar al obtenido con la estimación perfecta del canal.

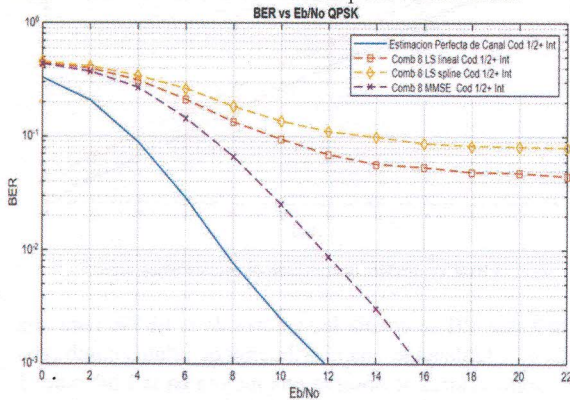


Fig. 15 BER vs. Eb/No, distribución de pilotos comb 8 (codificación tasa 1/2 e interleaving).

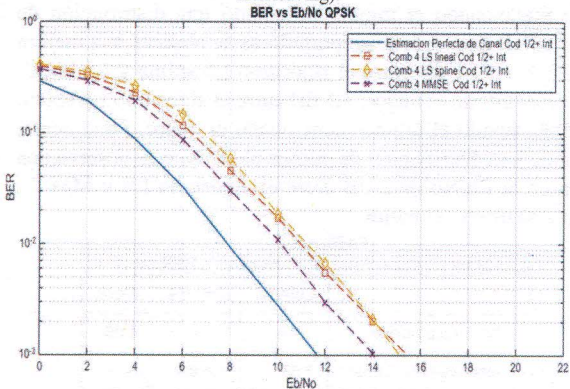


Fig. 16 BER vs. Eb/No, distribución de pilotos comb 4 (codificación tasa 1/2 e interleaving).

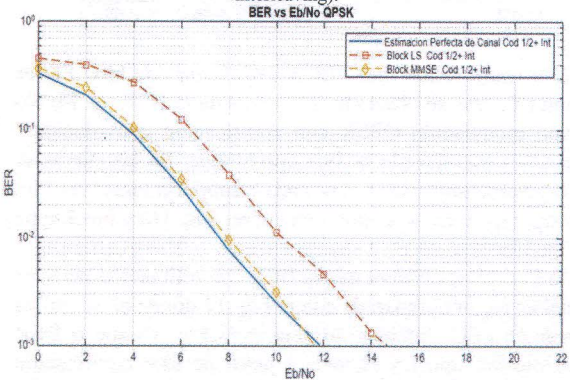


Fig. 17 BER vs. Eb/No, distribución de pilotos block (codificación tasa 1/2 e interleaving).

En la Tabla VIII se detalla los valores de la Eb/No para una BER de  $10^{-1}$ . Utilizando una distribución de pilotos comb type cada 8 subportadoras se observa una mejora en la Eb/No de: 4 dB entre el algoritmo LS spline y LS lineal, siendo este último el mejor; 7 dB entre el algoritmo LS spline y MMSE, siendo el

último mencionado el mejor. Utilizando una distribución de pilotos comb type cada 4 subportadoras se observa una mejora en la Eb/No de: 0,5 dB entre el algoritmo LS spline y LS lineal, siendo este último el mejor; 1,5 dB entre el algoritmo LS spline y MMSE, siendo el último mencionado el mejor. Finalmente, utilizando una distribución de pilotos block type se observa una mejora en la Eb/No de 2,5 dB entre el algoritmo LS y MMSE, siendo este último el mejor.

TABLA VIII.  
VALORES DE LA RELACIÓN Eb/No PARA UNA BER DE  $10^{-1}$

		Comb 8	Comb 4	Block
LS	Sin interpolación	-----	-----	6,5 dB
	Interpolación lineal	10 dB	6,5 dB	-----
	Interpolación spline	14 dB	7 dB	-----
MMSE		7 dB	5,5 dB	4 dB

### VII. CONCLUSIONES

La estructura de pilotos block type es útil para canales con desvanecimiento en frecuencia o con desvanecimiento lento en tiempo, en el cual el canal no varía demasiado en tiempo entre dos muestras consecutivas, cuando el canal presenta variaciones en tiempo grandes esta estructura no es la adecuada, ya que no se tiene pilotos en todos los símbolos OFDM.

La estructura de pilotos comb type es efectiva en canales con desvanecimiento plano en frecuencia o con desvanecimiento rápido en tiempo, ya que las muestras se encuentran separadas en frecuencia, pero en tiempo se tiene pilotos para cada símbolo OFDM, cuando se tiene desvanecimiento selectivo en frecuencia esta estructura no es la más adecuada.

La mejor estructura de pilotos para el sistema OFDM implementado es block type seguida por comb type cada 4 subportadoras y finalmente la peor es comb type cada 8 subportadoras. A pesar de que la estructura de pilotos block type presenta la mejor estimación, se debe considerar que el canal implementado no presenta un desvanecimiento en tiempo, por lo cual para otros canales con este tipo de desvanecimiento la estructura antes mencionada no podría ser tan efectiva.

Para el canal simulado la mejor estimación de canal se consigue con la combinación entre el algoritmo de estimación de canal tipo MMSE y la estructura de pilotos block type como se puede observar en las tablas VII Y VIII.

Contrario a lo que se espera, la codificación convolucional tipo FEC no mejora la BER cuando se usa el algoritmo LS y una distribución de pilotos comb type cada 8 subportadoras, esto se debe a que se presentan demasiados errores como para que puedan ser corregidos.

La interpolación spline funciona mejor que la interpolación lineal solo cuando se tiene el suficiente número de datos para interpolar como en el caso de la estructura de pilotos comb type cada 4 subportadoras, en cambio cuando se tiene un menor número de datos, esta interpolación no logra seguir las variaciones de amplitud del canal como cuando se usa una estructura comb type cada 8 subportadoras en la cual funciona mejor la interpolación lineal.



## REFERENCIAS

- [1] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, and C. G. Kang, MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB. Wiley editorial, 2010.
- [2] P. M. C. Nathan, Wireless communications. Prentice Hall of India, 2008.
- [3] B. Sklar, Digital communications : fundamentals and applications. Prentice-Hall PTR, 2001.
- [4] J. P. Gallardo Moreno, "Estudio de un sistema CDMA-OFDM," Universidad de Sevilla, 2006.
- [5] M. Sandell and O. Edfors, "A Comparative Study of Pilot Based Channel Estimators for Wireless OFDM," 1996.
- [6] Wonjong Rhee, J. C. Chuang, and L. J. Cimini, "Performance comparison of OFDM and multitone with polyphase filter bank for wireless communications," in VTC '98. 48th IEEE Vehicular Technology Conference. Pathway to Global Wireless Revolution (Cat. No.98CH36151), vol. 2, pp. 768-772.
- [7] G. Liu and G. Li, OFDM-Based Broadband Wireless Networks. Wiley- Interscience, 2005.
- [8] P. Hoeher, "TCM on Frequency-Selective Land-Mobile Fading Channels," 1991.
- [9] Wonjong Rhee, J. C. Chuang, and L. J. Cimini, "Performance comparison of OFDM and multitone with polyphase filter bank for wireless communications," in VTC '98. 48th IEEE Vehicular Technology Conference. Pathway to Global Wireless Revolution (Cat. No.98CH36151), vol. 2, pp. 768-772.
- [10] M. M. da Silva, Cable and wireless networks : theory and practice. CRC Press, 2016.
- [11] T. D. Chiueh and P. Y. Tsai, OFDM Baseband Receiver Design for Wireless Communications. Wiley editorial, 2009.
- [12] Mora Rafael, "Teoría De La Interpolación," Instituto Politécnico Universitario de Mariño, Barinas.

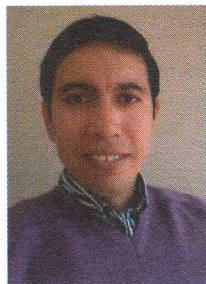
la Escuela Politécnica Nacional. Sus campos de investigación incluyen: sistemas OFDM, televisión digital, estimación de canales inalámbricos y procesamiento digital de señales.

## VIII. BIOGRAFÍAS



**Elvis Geovanny Espinosa Naranjo,** nació en Quito, Ecuador el 12 de enero de 1994. Sus estudios secundarios los realizó en la unidad educativa Hermano Miguel "La Salle" de la ciudad de Tulcán, sus estudios superiores los realiza en la Escuela Politécnica Nacional en la carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones. Desde diciembre de 2018 es Asistente

de Tecnologías de la Información y Comunicaciones en la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son las comunicaciones inalámbricas, las redes de sensores, la programación móvil.



**Diego Javier Reinoso Chisaguano,** recibió el Título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional en 2009. Realizó sus estudios de postgrado en Japón, en el Instituto de Ciencia y Tecnología de Nara (NAIST) a través de una beca del Ministerio de Educación, Cultura, Deportes, Ciencia y Tecnología de Japón (MEXT).

Recibió el Título de Máster en Ingeniería y Doctor en Ingeniería en los años 2013 y 2016, respectivamente. Desde septiembre de 2017 es Profesor Titular a Tiempo Completo en