

Transmisión de audio y análisis de ecualizadores lineales en una sola portadora a través de canales multitrayectoria

Audio transmission and analysis of linear equalizers on a single carrier through multipath channels

Ángel Steven Asanza Briones¹ (angel.asanzab@ug.edu.ec) (<http://orcid.org/0000-0002-3640-0247>)

Ingrid Kathyuska Giraldo Martínez² (ingrid.giraldom@ug.edu.ec) (<http://orcid.org/0000-0001-9659-3418>)

Mauricio Daniel Montenegro Patrel³ (mauricio.montenegrop@ug.edu.ec) (<http://orcid.org/0000-0003-1655-5839>)

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo realizar un análisis comparativo entre distintos ecualizadores lineales en canales multitrayectoria, variando en el modelo de comunicación parámetros como: modulación y secuencia de entrenamiento, ambos a ser desarrollados en un sistema inalámbrico, considerando factores adversos que influyen en la transmisión de audio mediante una sola portadora en un sistema digital utilizando el software LABVIEW y el hardware NI USRP-2920.

Palabras claves: Ber, ecualizadores, multitrayectoria, SNR.

Abstract

The present study aims to make a comparative analysis between different linear equalizers in multipath channels, varying in the communication model parameters such as: modulation and training sequence, both to be developed in a wireless system, considering adverse factors that influence the transmission of audio by a single carrier in a digital system using LABVIEW software and hardware NI USRP-2920.

Key words: Ber, equalizers, multipath, SNR.

Los sistemas digitales para la transmisión de datos inalámbricos, han dado origen a que se establezca una manera diferente de este tipo de comunicación, mediante el envío de ondas electromagnéticas cuyo medio es el espacio libre donde el equipo transmisor y receptor envía de forma analógica o digital lo que desea transmitir: texto, imagen, audio y video. Los sistemas digitales tienen una mayor ventaja que los sistemas analógicos, entre estas: menor presencia de ruido con respecto a la

¹ Magíster en Telecomunicaciones. Ingeniero en Telecomunicaciones. Doctorando en Tecnologías Información y Comunicación Tic's. Docente de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas de la Universidad Guayaquil, Ecuador.

² Máster en Ingeniería en Análisis de Datos, Mejora de Procesos y Toma de Decisiones. Ingeniera en Sistemas con mención en Informática para la Gestión. Docente de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas de la Universidad de Guayaquil. Ecuador.

³ Magister en Administración de Empresas con mención en Marketing y Recursos Humanos. Ingeniero Comercial. Tecnólogo Eléctrico. Docente de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas de la Universidad Guayaquil, Ecuador.

señal análoga, mayor robustez en la señal, procesamiento multicanal con mayor número de señales digitales, fácil regeneración, medición y evaluación de la señal digital.

A pesar de las bondades antes anotadas en los sistemas de comunicaciones inalámbricos digitales, uno de los efectos no deseados en los sistemas de comunicación digital es la presencia del ruido y del ISI, lo que conlleva a implementar necesariamente filtros llamados ecualizadores para que las muestras obtenidas en el receptor se desvíen hasta los niveles ideales de la señal original.

Para señales de audio, la distorsión resultante tiene como consecuencia la pérdida del timbre de la voz original y, eventualmente el mensaje no es comprensible, lo que obliga a emplear técnicas para corregir esta situación y hacer que la atenuación sea la misma en todas las frecuencias de la banda. Una de las técnicas frecuentes utilizadas es la ecualización cuya función es predistorsionar la señal de modo que se compense la característica de atenuación del sistema.

Para el desarrollo de este estudio, se tomaron como base, las prácticas realizadas en el equipo USRP (Universal Software Radio Peripheral) a través del software Labview, haciendo uso del manual Digital Wireless Communication Physical Layer Exploration Lab Using the NI USRP y EE49 Laboratory 1 SourceCoding, lo que a continuación se explica (Heath y Salvekar, 2004).

Sistema de comunicación digital inalámbrica

Los sistemas de comunicación inalámbricos, son sistemas no confinados donde el transmisor y el receptor no se conectan mediante un medio físico guiado haciendo uso de cables, sino que la transmisión de las ondas electromagnéticas se manifiesta mediante la modulación en sus extremos a través del aire.

La señal es enviada mediante un sistema de comunicación digital, esta se propaga por un medio no guiado y será recibida por un equipo receptor. La información transmitida se puede obtener de fuentes analógicas o digitales, en el artículo se hablará de la transmisión de audio pregrabado como fuente de información.

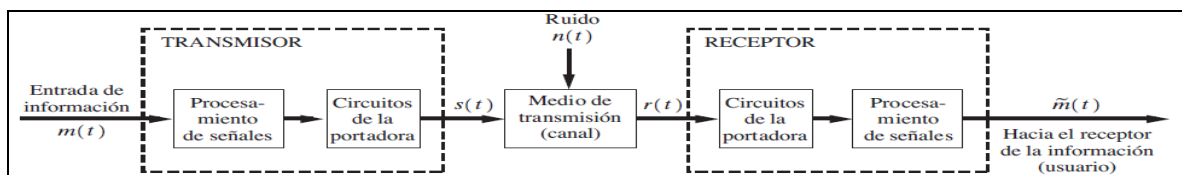


Fig. 1. Sistema de comunicación digital

Transmisión de audio

La transmisión de audio se inicia mediante la entrada de información (voz), la señal es preparada muestreándola, codificándola; haciendo uso de una cantidad mínima de bits los cuales se obtienen a través de los algoritmos Huffman o la transformada, coseno discreta (DCT), proceso que consiste en asignar códigos binarios lo más cortos posibles a aquellos símbolos que ocurren con mayor frecuencia en los datos, posterior se multiplexa la señal y se procede a enviarla por el transmisor. En el receptor se realizan todos los procesos aplicados en el transmisor, pero de forma

inversa, hasta llegar a reconstruir la señal inicial basándose en estimaciones, producto del muestreo aplicado.

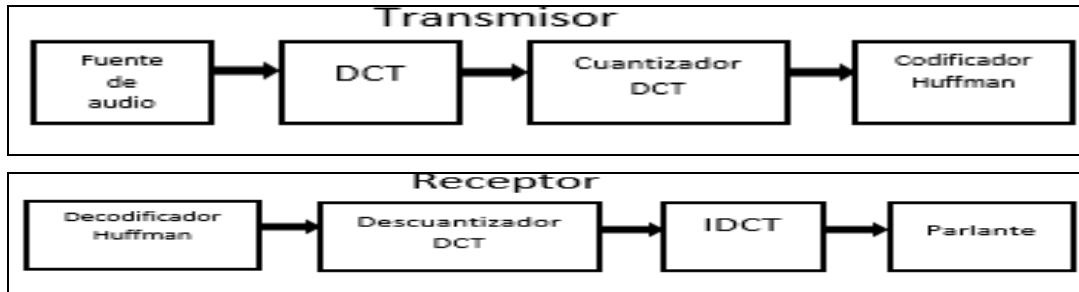


Fig. 2. Transmisor y receptor digital de una señal de audio en un sistema de comunicación.

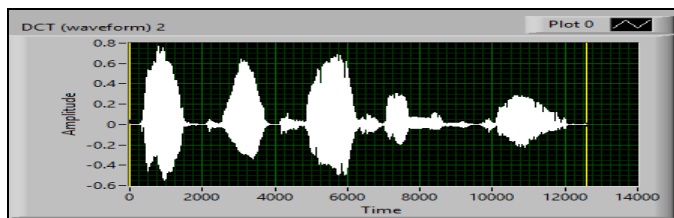


Fig. 3. Ejemplar de la señal de audio transmitida

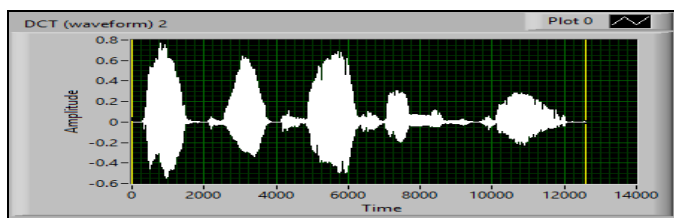


Fig. 4. Ejemplar de la señal de audio recibida

Proceso de codificación con la Transformada discreta del coseno (DCT)

La representación de la señal en el dominio de la frecuencia, es hablar de un método estándar para compresión. Usualmente, la señal de audio se sitúa en un intervalo de baja frecuencia, es decir, que la señal audio se encuentra en la parte inferior del intervalo de frecuencia, con el propósito de redondear a cero las componentes de altas frecuencias se hace uso de la transformada discreta del coseno, que permite la obtención de una señal de audio en el dominio de la frecuencia (Haykin, 2012).

La transmisión de audio analizada, conlleva a aplicar la siguiente fórmula estándar para el cálculo de la transformada discreta del coseno:

$$X_j = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_n & \text{if } j = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cos\left(\frac{\pi(n + \frac{1}{2})j}{N}\right) & \text{if } j > 0 \end{cases}$$

El proceso de la transformada discreta del coseno inverso permite recuperar de un grupo de muestras a partir de la estimación de los coeficientes DCT, no

desestimando en esta fase el tener pendientes los coeficientes DCT ignorados, por tanto, los coeficientes deben ser reemplazados por 0 y luego aplicar la DCT inversa sobre los estimados recibidos.

Proceso de modulación digital

La modulación digital (o codificación de canal) es el proceso de convertir una secuencia de entrada de bits en una forma de onda adecuada para la transmisión a través de un canal de comunicación. El paso a la modulación digital proporciona más capacidad de información, compatibilidad con los servicios de datos digitales, mayor seguridad de los datos, comunicaciones de mejor calidad y una disponibilidad del sistema más rápida (Conway, 2012).

- Modulación QPSK (QuadraturePhase-ShiftKeying)

En QPSK, el flujo de datos binarios se subdivide en pares de dos bits o dibits cada uno constituyendo un símbolo. Una de las cuatro fases igualmente espaciadas del soporte, tal como 45° , 135° , 225° y 315° , se selecciona entonces de acuerdo con el valor del símbolo.

Puesto que una señal QPSK puede ser vista como la suma de dos señales BPSK en cuadratura, su espectro de potencia es similar al de sus constituyentes BPSK. Sin embargo, para la misma velocidad de datos global, la tasa de símbolo QPSK (dibit) (Gallager, 2006), solo necesita ser la mitad de la velocidad de bits BPSK.

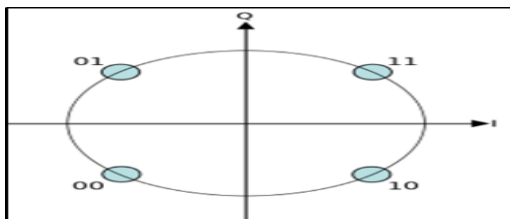


Fig. 5. Constelación de la Modulación QPSK.

- Modulación 16-QAM

Con la finalidad de obtener una mayor eficiencia espectral se utilizan para procedimiento de modulación mayor número de fases, debido que el rendimiento de la tasa de error BER frente a relación señal ruido no es apropiado continuar.

Esta modulación utiliza un alfabeto de 16 símbolos, por lo tanto, usa palabras de cuatro bits ($j=4$) la constelación es la siguiente:

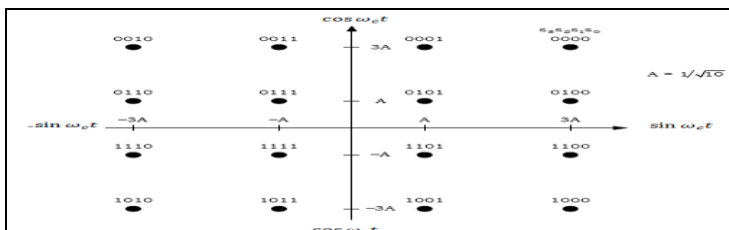


Fig. 6. Constelación de la Modulación 16-QAM.

Canales Inalámbricos

El medio para la propagación de la señal enviada por el transmisor y el receptor es el canal; uno de los factores que pueden degradar la transmisión por aire a través de éste, es el desvanecimiento selectivo, el cual en su trayectoria es impredecible lo que motiva a realizar estudios para modelar el canal de propagación de la señal (Leon y Couch, s.f.).

a) Propagación en canales multicamino

Un canal multicamino es la afectación de la señal mediante los siguientes fenómenos: difracción, reflexión y dispersión, la cual provoca que la señal llegue a su destino por dos o más caminos en diferentes tiempos.

b) Estudio de Canales Inalámbricos

Las imágenes que a continuación se presentan, reflejan las particulares estimaciones que se realizarán para emular un sistema de comunicación inalámbrica con sus respectivas características y especificaciones, como tiempo y la potencia del pulso de los retardos, ver imágenes.

tap	Canal A		Canal B	
	Delay(nSec)	Avg Power (dB)	Delay(nSec)	Avg Power (dB)
1	0	0	0	0
2	100	-13.8	100	-6.0
3			200	-11.9
4			300	-17.9

Tabla. 1 Indoor-Residenciales

tap	Canal A		Canal B	
	Delay(uSec)	Avg Power (dB)	Delay(uSec)	Avg Power (dB)
1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.2	-2.0	0.1	-4.0
3	0.4	-10.0	0.2	-8.0
4	0.6	-20.0	0.3	-12.0
5			0.4	-16.0
6			0.5	-20.0

Tabla. 2 Outdoor-Areas Rurales

Contar con información de las propiedades de propagación de una señal en un medio o canal, permite predecir la forma de comportarse los sistemas de comunicaciones, ver perfil de potencias de retardos en relación a los canales antes descritos.

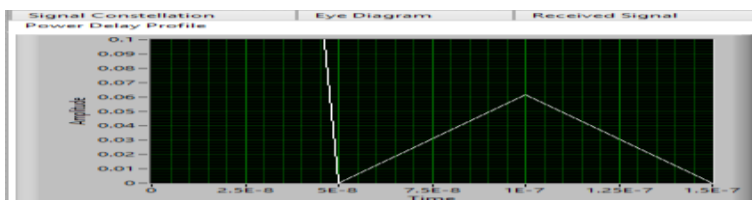


Fig. 7. Power Delay Profile (Indoor A)

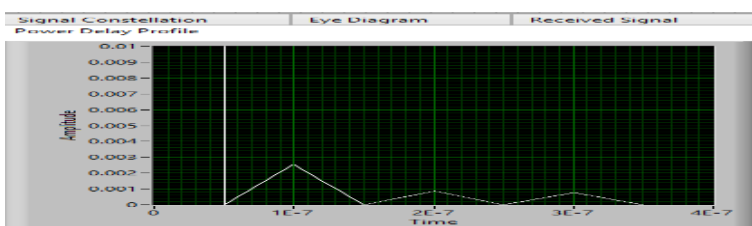


Fig. 8. Power Delay Profile (Indoor B)

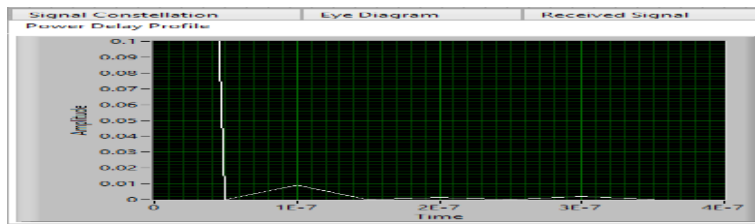


Fig. 9. Power Delay Profile (Outdoor A)

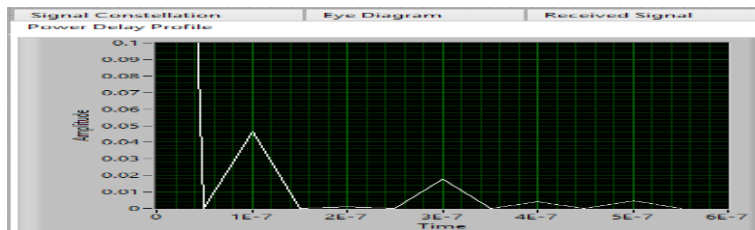


Fig. 10. Power Delay Profile (Outdoor B)

Implementación de la Secuencia de Entrenamiento Frank y Barker

Mediante una secuencia de entrenamiento se estima la respuesta impulsiva del canal y se efectúa la sincronización de trama. Estas se agregan en el transmisor y receptor. Tienen como característica la auto-correlación, periodicidad y correlación cruzada.

Implementación y análisis de la secuencia de entrenamiento

a) Código Barker

Una secuencia de Barker es una secuencia binaria de longitud finita con la autocorrelación aperiódica mínima posible. Actualmente, solo existen siete secuencias conocidas de Barker y se ha conjeturado que éstas son las únicas secuencias de Barker que existen.

Secuencias Barker (Heath y Salvekar, 2004).

CodeLengt	BarkerSequence
2	[- +. - -]
3	[- - - +]
4	[- + - -, - + + +]
5	[- - - + -]
7	[- - - + + - +]
11	[- - - + + + - + + - +]
13	[- - - - - + + - - + + - + -]

En el siguiente diagrama se muestra los bloques de LabView correspondiente a la secuencia de entrenamiento Barker.

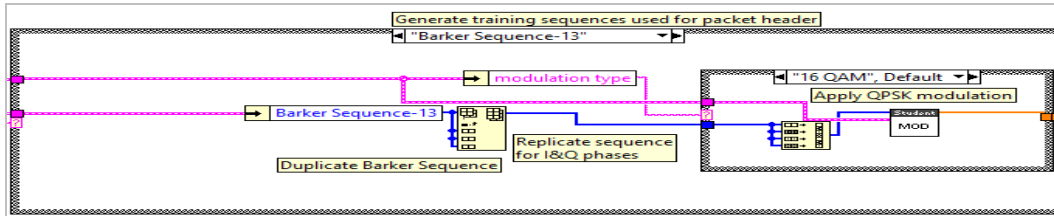


Fig. 11. Bloque de LabView del código Barker

b) Códigos Frank

Gray se refiere al código como un código binario de n-dígitos porque los grupos pueden ser bits de 4, 5, 7 o cualquier número n. Con diferentes números de bits en un grupo y permutaciones de los bits, el código podría producir varias implementaciones. A continuación, se muestra la secuencia Frank (Puig, s.f.).

$$F = \{b^{(1)}, \dots, b^{(r)}, \dots, b^{(q-1)}\}$$

La secuencia Frank es una secuencia polifásico de longitud $N = q^2$

$$b_n^{(r)} = b_{jq+k}^{(r)} = e^{\frac{i2\pi r k j}{q}}, 0 \leq k, j < q$$

En el siguiente diagrama se muestra los bloques de LabView correspondiente a la secuencia de entrenamiento Frank.

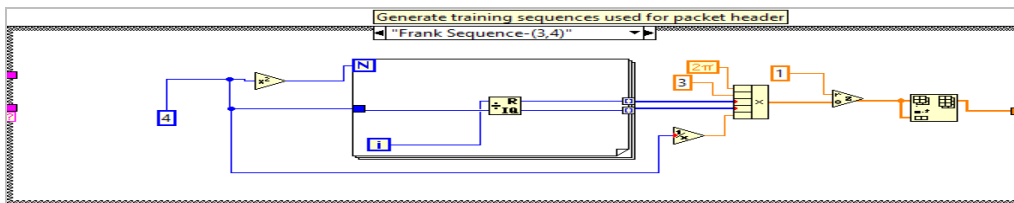


Fig. 12. Bloque de LabView del código Frank

Ecualización

En el sistema de comunicación, el transmisor envía información a través de un canal de RF que distorsiona la señal de transmisión antes de que llegue al receptor. La ecualización es el proceso de recuperación de la secuencia de datos de las muestras de canal dañadas (Martin, s.f.).

Un ecualizador es como un filtro que proporciona una compensación de la distorsión producida por el canal, que permite modificar la curva de respuesta de frecuencia de un sistema de audio.

La ecualización reduce la Interferencia entre Símbolos (ISI) tanto como sea posible para maximizar la probabilidad de decisiones correctas. La distorsión del canal surge en muchos sistemas de comunicación, esta aumenta en referencia a la compresión de la velocidad de datos en el tiempo o en el espacio dentro de un canal de ancho de banda fijo. Este fenómeno se denomina interferencia intersimbólica (ISI).

Las técnicas de ecualización son utilizadas para mitigar la interferencia intersimbólica (ISI), mismas que se derivan de lo siguiente: ecualizadores lineales y ecualizadores no lineales. Ecualizadores lineales: utilizados cuando existe una cantidad minoritaria de ocurrencias de ISI, cuentan con un buen desempeño y son más fáciles de aplicar que los ecualizadores no lineales.

Para el desarrollo del artículo se van a implementar los siguientes ecualizadores lineales.

Filtro de ecualización directo: el que se obtiene su diseño a través de un aproximado de la secuencia recibida, sin dudar es más eficiente que hacer uso de técnicas como son las de estimación y ecualización, en tanto para resolver los problemas de estimación de mínimos cuadrados solo requiere que esta sea resuelta.

Después de la ecualización lineal se debe considerar que la señal recibida tiene un retardo n_d como se muestra en la siguiente ilustración.

$$\hat{s}[n - n_d] = \sum_{l=0}^{L_f} f_{n_d}[l] y[n - l]$$

En la siguiente suposición se prevé que $s[n] = t[n]$ para $n = 0, 1, \dots, N_t$ es la secuencia de entrenamiento comprendida. De tal manera $\hat{s}[n - n_d] = t[n - n_d]$ para $n = n_d, n_d + 1, \dots, n_d + N_t$. Reformando la ecuación con la secuencia de entrenamiento conocida, se ilustra a continuación (Yellepeddi, 2010):

$$t[n] = \sum_{l=0}^{L_f} f_{n_d}[l] y[n + n_d - l]$$

Estructurando las ecuaciones lineales para $n = 0, 1, \dots, N_t$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} t[0] \\ t[1] \\ \vdots \\ t[N_t - 1] \end{bmatrix}}_t = \underbrace{\begin{bmatrix} Y[n_d] & \dots & Y[n_d - L_f] \\ Y[n_d + 1] & \dots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y[n_d + N_t - 1] & \dots & Y[n_d + N_t - L_f] \end{bmatrix}}_{Y_{n_d}} \underbrace{\begin{bmatrix} f_n[0] \\ f_n[1] \\ \vdots \\ f_n[L_f] \end{bmatrix}}_{f_{n_d}}$$

Como resultado supongamos que Y es de rango completo en presencia del ruido. La solución de los mínimos cuadrados es.

$$\hat{f}_{n_d} = (Y_{n_d}^* Y_{n_d})^{-1} Y_{n_d}^* t$$

El error cuadrático puede ser evaluado como:

$$J_f[n_d] = \|t - \hat{Y}_{n_d} \hat{f}_{n_d}\|^2$$

Con el objetivo que el error cuadrático medio disminuya la secuencia de entrenamiento debe ser mayor su longitud. El ecualizador directo toma como referencia los valores de la secuencia de entrenamiento para poder estimar el error.

En el siguiente diagrama se muestra los bloques de LabView correspondiente al ecualizador Directo.

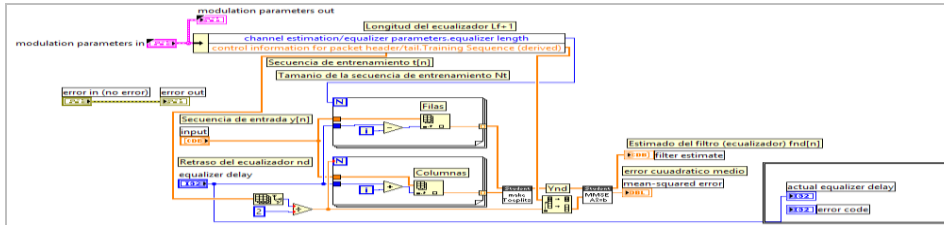


Fig. 13. Bloque de LabView del Ecualizador Directo

a) Filtro de ecualización de Wiener

Los inconvenientes presentados en la estimación de la señal son solucionados a través de un proceso aleatorio de filtrado de señales estacionarias. La estimación del error se la realiza a través de las propiedades de autocorrelación y correlación cruzadas aplicadas a dos señales; señal observada y señal deseada (Virendra Singh Chaudhary, 2013).

El igualador o filtro Wiener es un ecualizador lineal preestablecido, tiene como objetivo solucionar el inconveniente de estimación de la señal a través de un proceso estadístico.

Para estimar la señal enviada en el transmisor se tiene como datos a evaluar la secuencia de entrenamiento como señal observada (Y_k) y la señal estimada (S_k), sus funciones de covarianzas conocidas $R_s(k)$, $R_y(k)$ y $R_{sy}(k)$. [9] Para evaluar S_k en función de Y_k se debe encontrar el MMSE lineal.

La siguiente imagen se considera un filtro Wiener de longitud $N+1$:

$$\hat{S}_k = \sum_{m=k-N}^k h_m Y_m = \sum_{i=0}^N h_i Y_{k-i}$$

Nosotros necesitamos encontrar los coeficientes h_i que minimicen el error cuadrático (MSE), para hacer esto se debe aplicar el principio de ortogonalidad.

$$E[(S_k - \hat{S}_k)Y_{k-j}] = 0; j = 0, 1, \dots, N$$

Como resultado obtenemos:

$$\sum_{i=0}^N h_i E[Y_{k-i}Y_{k-j}] = E(S_k Y_{k-j})$$

$$\sum_{i=0}^N h_i R_y(i-j) = R_{sy}(j)$$

Construyendo las ecuaciones lineales nos queda una matriz de tipo Toeplitz.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} R_y(0) & R_y(1) & \dots & R_y(N) \\ R_y(1) & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & R_y(1) \\ R_y(N) & \dots & R_y(1) & R_y(0) \end{bmatrix}}_{R_y} \underbrace{\begin{bmatrix} h_0 \\ \vdots \\ h_N \end{bmatrix}}_h = \underbrace{\begin{bmatrix} R_{sy}(0) \\ \vdots \\ R_{sy}(N) \end{bmatrix}}_{r_{sy}}$$

$$R_y h = r_{sy} \rightarrow h = R_y^{-1} R_{sy}$$

El sistema de ecuaciones son tipo Yule-Walker, donde $R_y \geq 0$. Ahora el mínimo error cuadrático medio puede ser más fácil calcular.

$$E[(S_k - \hat{S}_k)^2] = E[(S_k - \hat{S}_k)(-S_k)]$$

$$E[(S_k - \hat{S}_k)^2] = R_y(0) - E[(S_k \hat{S}_k)]$$

$$E[(S_k - \hat{S}_k)^2] = R_y(0) - h^T R_{sy}$$

En el siguiente diagrama se muestra los bloques de LabView correspondiente al ecualizador Wiener.

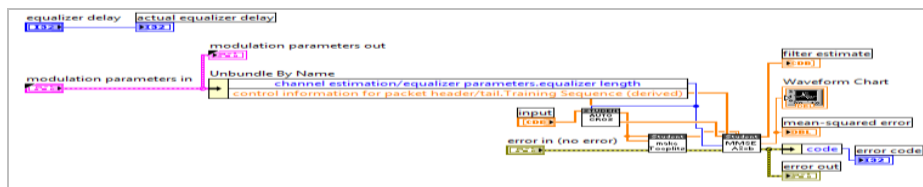


Fig. 14. Bloque de LabView del Ecualizador Wiener

Análisis y resultados

Luego de implementar el sistema de comunicación digital se procedió a realizar unas pruebas de transmisión de audio pregrabado, con el fin, de poder observar cuáles son sus valores de SNR y BER en diferentes escenarios que se asemejen a los valores ideales de operatividad del sistema. Este tipo de recorrido de pruebas es una buena práctica para poder estimar el sistema con menor señal ruido e interferencia intersimbólica.

Visualización de las gráficas: con el objetivo de poder determinar con claridad los diferentes escenarios de prueba, se procedió a nombrar los parámetros del sistema con la primera letra de una manera resumida, por ejemplo: ecualizador Directo ED, ecualizador Wiener EW, simulado S, real R, Frank F, Barker B, Indoor a IA, Outdoor a OA.

a) Análisis de los ecualizadores a diferentes tipos de canales

Para desarrollar las simulaciones de los canales multitrayectoria correspondiente a los canales Indoor Residenciales y Outdoor Áreas Rurales se tomó como referencia los valores descritos en las tablas 1 y 2, sección 4.2 de este trabajo.

La primera imagen demuestra mediante una gráfica logarítmica el comportamiento de los ecualizadores lineales por medio de la modulación QPSK. En la Figura 15 se desarrollará la implementación del sistema variando el canal y los mismos parámetros de secuencia de entrenamiento Barker 11, tasa de transmisión y recepción.

Nota: En todas las gráficas se evaluará el BER con respecto al SNR, se analizará la conducta de los gráficos, su tendencia, con los respectivos parámetros de la simulación.

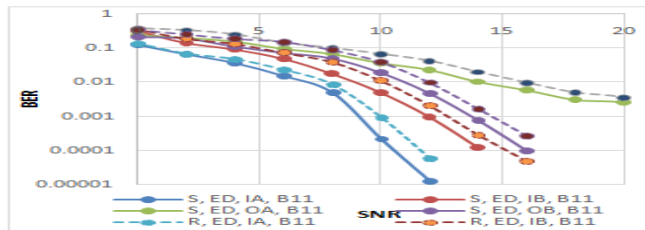


Fig. 15. Ecualizador Directa: Real versus Simulado

Como se muestra en las Figuras 15 y 16, los ecualizadores Directo y Wiener tienen un buen desempeño en los canales Indoor Residenciales, no obstante, se observa que tenemos una desviación de los valores ideales en los canales Outdoor.

En la Figura 15 se puede destacar que el ecualizador Directo tiene un mejor desempeño en la ecualización QPSK y 16 QAM en los canales simulados Indoor y Outdoor.

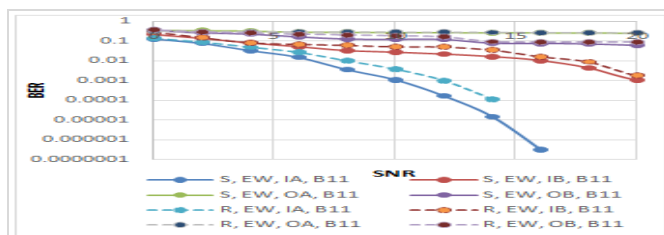


Fig. 16. Ecualización Wiener: Real versus Simulado

Al realizar un comparativo entre las figuras 16 y 17, se puede apreciar el desempeño de ambas, determinándose que el filtro Wiener correspondiente a la figura 16 es el deseado; sin embargo, la ecualización Directa representada por la figura 18 posee una mejor estimación del canal en el receptor, cómo se puede evidenciar en el comportamiento de la curva.

La figura 18 del ecualizador Wiener representa el buen desempeño de los canales Indoor A y B en la curva, versus los canales del Outdoor A y B los cuales no lo disponen por la gran cantidad de saltos multicamino que se reflejan.

A. Desempeño de los ecualizadores aplicando diferentes tipos de modulaciones

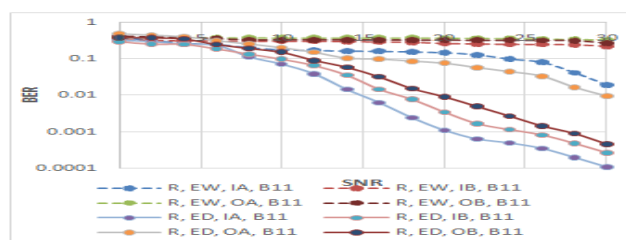


Fig. 17. Ecualizador: Directo versus Wiener con modulación 16 QAM

La figura 17, contiene los parámetros del sistema de comunicación, tales como

Barker 11, Canal Multitrayectoria, Ecualización Directo y Wiener. La teoría de la modulación digitales 16 QAM, muestra mayor probabilidad ante el BER, situación que se origina porque su constelación cuenta con un amplio número de símbolos, siendo más susceptible al ruido y al ISI, ver figuras 17 y 18 que evidencian el mejor desempeño contenido en la modulación QPSK, en razón de que sus curvas son las primeras en descender.

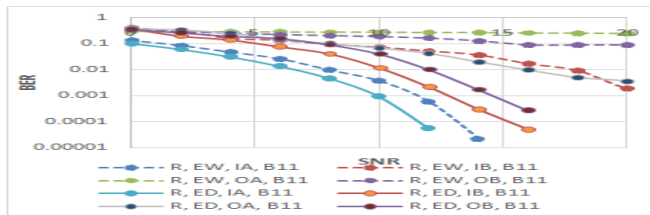


Fig. 18. Ecualizador: Directo versus Wiener con modulación QPSK

En la figura 18, se visualiza una buena estimación de los canales Indoor A y B, implementados con la modulación QPSK.

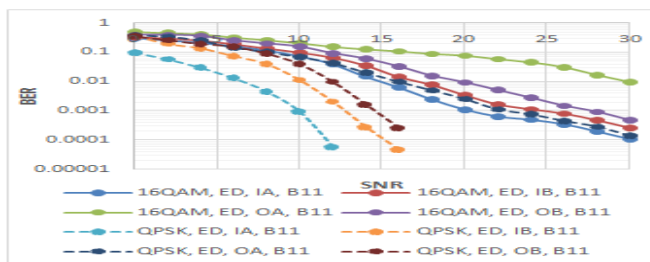


Fig. 19. Ecualizador Directo real con modulación QPSK y 16 QAM

El canal Outdoor A, presenta mayores tiempos de retardo y saltos en sus parámetros de implementación; la figura 19 demuestra lo expuesto.

De acuerdo con la figura en mención se evidencia que el ecualizador Directo no tiene un buen desempeño aplicando la modulación 16 QAM.

En relación a las figuras antes expuestas, se puede definir que el ecualizador Directo tiene un rendimiento óptimo aplicando la modulación QPSK especialmente en los canales Indoor A, exceptuando su deficiencia al modular con 16 QAM en los canales Outdoor A y B, donde existe aumento del tiempo de retardo y mayor interferencia intersimbólica.

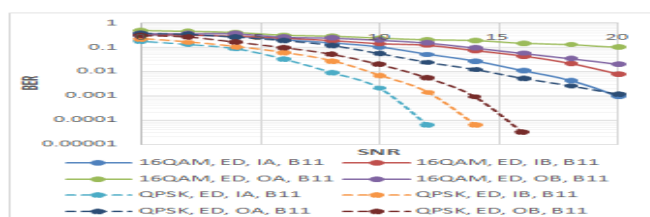


Fig. 20. Ecualizador Directo simulado con modulación QPSK y 16 QAM

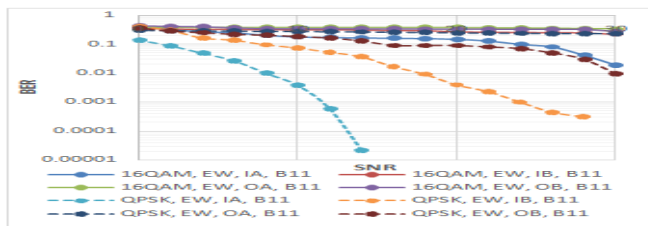


Fig. 21. Ecualizador Wiener real con modulación QPSK y 16 QAM

Teniendo como referencia las figuras 21 y 22, tanto el ecualizador Directo como el ecualizador Wiener, ambos permiten trabajar en un escenario simulado y real, presentando una buena interacción en la modulación QPSK, lo que no es factible en canales Outdoor modulando el sistema con 16 QAM. Por lo tanto, se puede concluir que el ecualizador Wiener tiene una mejor respuesta para canales Indoor A con modulación QPSK, mientras que en 16 QAM no existe un buen desempeño.

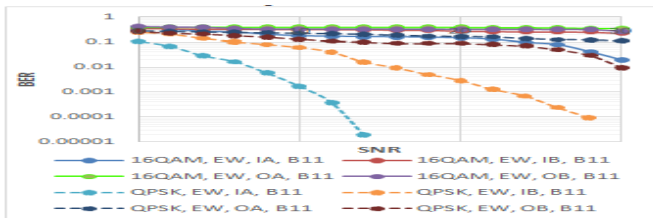


Fig. 22. Ecualizador Wiener simulado con modulación QPSK y 16 QAM

La figura 22, describe que la modulación 16 QAM presenta una buena estimación en el canal Indoor A, con menor interferencia intersimbólica.

b) Desempeño de los ecualizadores aplicando diferentes secuencias de entrenamiento.

Para un correcto funcionamiento de un sistema de comunicaciones digitales se debe tomar como referencia la secuencia de entrenamiento, su implementación ayuda en la estimación del ecualizador y la sincronización de la trama. Como tema de estudio y análisis, se realizará las pruebas implementando los ecualizadores con diferentes secuencias de entrenamiento.

Posteriormente se observará el comportamiento del ecualizador, variando las secuencias de entrenamiento, lo que permitirá una mejor obtención de sus coeficientes.

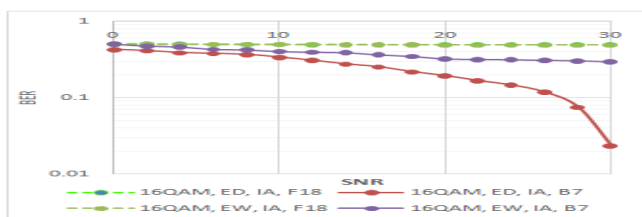


Fig. 23. Secuencia de Entrenamiento Frank 18 versus Barker 7 con modulación 16 QAM

En la figura 23 se ilustra la secuencia de entrenamiento Barker 7 con una buena estimación del ecualizador Directo, mientras que en el ecualizador Wiener no se presenta los mismos resultados, debido a su baja estimación.

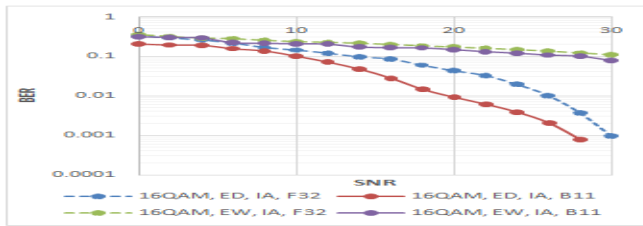


Fig. 24. Secuencia de Entrenamiento Frank 32 versus Barker 11 con modulación 16 QAM

Nótese que en la figura 25, Frank 18 no realiza una buena correlación de los datos, mientras que Frank 32 la supera en la respuesta del canal, al tener un mayor número en la secuencia de entrenamiento.

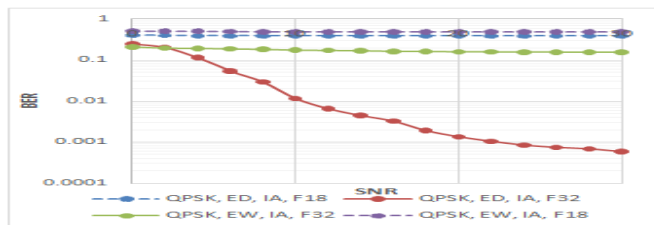


Fig. 25. Secuencia de entrenamiento Frank 18 y Frank 32 con modulación QPSK

En la figura 25 se puede apreciar la mejora en la tendencia de respuesta del ecualizador Directo al aumentar la secuencia de entrenamiento mientras que en el proceso de ecualización Wiener no presenta un buen desempeño en las curvas.

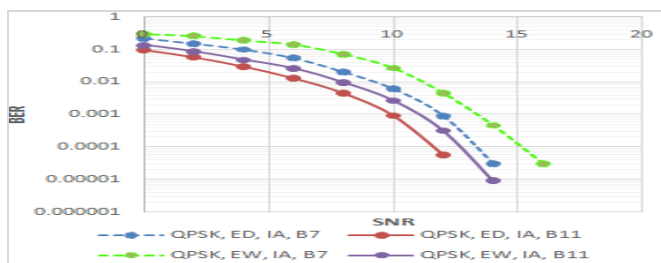


Fig. 26. Secuencia de entrenamiento Barker 7 y Barker 11 con modulación QPSK

La figura 26 describe la robustez al ruido en la secuencia de entrenamiento Barker 7 y 11, destacándose que existe una superioridad cuando se implementa Barker 11 respecto a Barker 7.

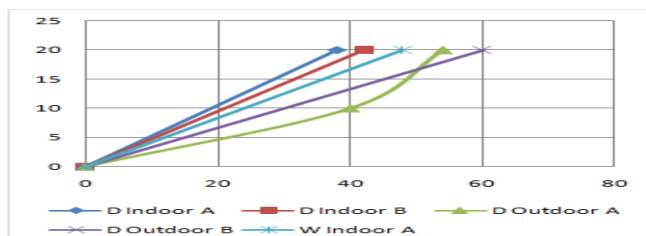


Fig. 27. Tasa de Bits vs SNR del ecualizador Directo y Wiener

La figura 27, indica que la tasa de bits aumenta en relación al crecimiento del SNR (relación señal ruido), lo que permite establecer que el mejor sistema es aquel que envía la mayor RB con un SNR menor, siendo este sistema el canal Indoor A.

Sobre la base de los resultados obtenidos en los diferentes escenarios podemos concluir lo siguiente:

En los sistemas de comunicaciones inalámbricos con canales multipaso, se puede observar que la probabilidad de error aumenta en los canales Outdoor debido a que éstos tienen una mayor cantidad de pasos o trayectorias lo que provoca una mayor interferencia.

La modulación QPSK en el sistema propuesto transmite 2 bits mientras que la modulación 16 QAM transmite 4 bits, lo que permite concluir que 16 QAM transmite una mayor tasa de bits comparado con QPSK. La modulación 16 QAM por contar con mayor número símbolos en su constelación es más propensa al efecto del ISI; por lo que, en la transmisión de audio se debe considerar el aplicar robustez en la implementación de los sistemas de transmisión inalámbrica a través QPSK, mismo que tiene menor susceptibilidad a los efectos de la interferencia intersimbólica

En el análisis efectuado se determinó que el ecualizador Directo tiene un mejor desempeño generando una menor tasa de error mientras que el ecualizador Wiener plantea un enfoque estadístico que consiste en aplicar el método de autocorrelación y correlación cruzada. El filtro Wiener requiere de dos señales, observada y la deseada para aplicar el método estadístico del error cuadrático medio, mientras que el ecualizador Directo realiza su estimación directamente de la secuencia de entrenamiento y de la señal observada.

En las combinaciones de los sistemas propuestos, se puede considerar que la secuencia de entrenamiento Barker 7 y 11, poseen mayores propiedades de correlación que la secuencia de entrenamiento de Frank para la estimación del error cuadrático medio. Se puede evidenciar que al aumentar el tamaño de la secuencia de entrenamiento mejoró la respuesta del ecualizador, no obstante, no se puede asegurar que a mayor tamaño se obtendrá un mejor resultado, puesto que si presenta mayor desplazamiento de frecuencias las propiedades de auto correlación pueden fallar.

Referencias

- Conway, A. (2012). *Improved broadband noise filter for audio signals* (tesis de maestría). University of California. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/19152697.pdf>
- Gallager, R. (2006). *Principles of Digital Communications I* (págs. 168-180). Massachusetts. Recuperado de <http://ee.sharif.edu/~wireless.comm.net/references/Gallager%20-%20Principles%20of%20Digital%20Communications.pdf>
- Haykin, S. (2012). *Comunications System 4ta edition*. Toronto. Recuperado de [https://scholar.google.com/cu/scholar?q=Haykin,+S.+\(2012\).+Communication+s+System+4ta+edition.+Toronto&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar](https://scholar.google.com/cu/scholar?q=Haykin,+S.+(2012).+Communication+s+System+4ta+edition.+Toronto&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar)
- Heath, R. W. Jr. y Salvekar, A. (2004). *Digital Communications: Physical Layer Lab using the NI USRP Platform*. National Technology and Science Press. Recuperado de <http://doi.org/10.1002/047148296X.tie040>

Leon, W. y Couch, I. (s.f.). *Sistema de Comunicación digital y analógicos*. Gainesville: Universidad de Florida.

Martin, L. T. (s.f.). Bit and Frame Synchronization. *Communication Networks Seminar*. Recuperado de <http://www4.comp.polyu.edu.hk/~comp2322/Bit%20and%20Frame%20Synchronization%20Techiques.pdf>

Puig, P. M. (s.f.). *Electrónica de comunicaciones*. España: FUOC.

Virendra Singh Chaudhary, M. S. (2013). Channel Equalization using Weiner filter. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 2.

Yellepeddi, A. (2010). Direct-Form Adaptive Eequalization for underwater Acoustic Communication. Recuperado de <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/75626>