



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**COMPARACIÓN ENTRE LA MODULACIÓN WAVELET Y
MODULACIONES TRADICIONALES**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Electrónico

AUTOR: Wilmer Isaac Achig De La Cruz
David Alejandro Clavón Toapanta
TUTOR: Luis Germán Oñate Cadena

Quito-Ecuador
2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Wilmer Isaac Achig De La Cruz con documento de identificación N° 1719873216 y David Alejandro Clavón Toapanta con documento de identificación N° 1719009514; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 24 de junio del año 2022

Atentamente,



Wilmer Isaac Achig De La Cruz
1719873216



David Alejandro Clavón Toapanta
1719009514

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Wilmer Isaac Achig De La Cruz con documento de identificación No. 1719873216 y David Alejandro Clavón Toapanta con documento de identificación No. 1719009514, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico : “Comparación entre la modulación Wavelet y modulaciones tradicionales”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Quito, 24 de junio del año 2022

Atentamente,



Wilmer Isaac Achig De La Cruz
1719873216



David Alejandro Clavón Toapanta
1719009514

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis Germán Oñate Cadena con documento de identificación N° 1712157401, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: COMPARACIÓN ENTRE LA MODULACIÓN WAVELET Y MODULACIONES TRADICIONALES, realizado por Wilmer Isaac Achig De La Cruz con documento de identificación N° 1719873216 y por David Alejandro Clavón Toapanta con documento de identificación N° 1719009514, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 24 de junio del año 2022

Atentamente,



Ing. Luis Germán Oñate Cadena, Mgtr.
1712157401

COMPARACIÓN ENTRE LA MODULACIÓN WAVELET Y MODULACIONES TRADICIONALES

Wilmer Isaac Achig De La Cruz
Departamento de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
wachig@est.ups.edu.ec

David Alejandro Clavón Toapanta
Departamento de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
dclavon@est.ups.edu.ec

Luis Germán Oñate Cadena
Departamento de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
lonatec@ups.edu.ec

Resumen— Investigaciones actuales se enfrentan a los desafíos de la creciente demanda de mayor velocidad de datos, mejor calidad de servicio y mayor capacidad de transmisión para ello se ha puesto en marcha la técnica de modulación Wavelet, debido a su robustez ante la interferencia. En este artículo se realizará un análisis comparativo de la tasa de error binario (BER) y la relación señal a ruido (SNR) de las modulaciones Wavelet de las familias; Haar, Daubechies tipo 8 y Coiflets tipo 5 frente a técnicas de modulación tradicionales QPSK y 4-QAM, estos parámetros nos van a permitir saber cuál es la más adecuada para el sistema de comunicación digital, gracias a esto se pudo determinar que las Wavelets que tienen más de 4 momentos de compresión y eliminación de ruido, tales como las de las familias Daubechies tipo 8 y Coiflets tipo 5 presentan un menor margen de error frente a la modulación tradicional 4-QAM lo que no sucede con la modulación QPSK.

Palabras Clave— WAVELET, BER, SNR, HAAR, DAUBECHIES, COIFLETS, 4-QAM, QPSK.

Abstract— Current research is facing the challenges of the growing demand for higher data speeds, better quality of service and greater transmission capacity. For this reason, we must implement the Wavelet modulation technique due to the system's robustness against interference. In this article, a comparative analysis of the binary error rate (BER) and the noise ratio (SNR) of the Wavelet modulations of the families will be carried out; Haar, Daubechies type 8 and Coiflets type 5 compared to traditional QPSK and 4-QAM modulation techniques, these parameters will allow us to know which is the most suitable for the digital communication system, thanks to this it was possible to determine that the Wavelets that they have more than 4 moments of compression and noise elimination, such as those of the Daubechies type 8 and Coiflets type 5 families, presenting a lower margin of error compared to traditional 4-QAM modulation,

which does not happen with QPSK modulation.

Keywords— WAVELET, BER, SNR, HAAR, DAUBECHIES, COIFLETS, 4-QAM, QPSK.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la gran demanda de usuarios en las telecomunicaciones, obliga al desarrollo de nuevas tecnologías o en su defecto a utilizar nuevas técnicas de comunicaciones digitales sobre las ya establecidas, cuando hablamos de transporte de información uno de sus principales problemas serán los tipos de interferencia que pueden ocurrir a lo largo del canal de comunicación [1], si bien hoy por hoy existen técnicas de modulación que nos permiten obtener un grado de confiabilidad aceptable, siempre existe la posibilidad de que sean contaminadas por el ruido [2].

En este artículo se realizó la simulación de la técnica de Modulación Wavelet, utilizando el algoritmo de Stéphane Mallat, debido a que esta muestra como relacionar con otros métodos de Modulación Wavelet [4], esto nos permitirá el uso de diferentes familias de Wavelets, para comparar las modulaciones tradicionales y la modulación mediante wavelet utilizando los parámetros BER y SNR. [1]

El documento tiene las siguientes secciones: Sección II Se analiza la transformada Wavelet, las características de Modulación Wavelet, y Algoritmo de Mallat. En la sección III, se simuló la Modulación Wavelet sobre un canal con ruido blanco aditivo Gaussiano, Sección IV Análisis de Resultados Donde se examina las técnicas de medición como la relación señal a ruido (SNR) y tasa de error binario (BER) y sus respectivas gráficas. En la sección V Conclusiones, se llega a determina el grado en que las técnicas de modulación nos ofrecen mejor respuesta ante el ruido del canal de comunicaciones.

II. MODULACIÓN WAVELET

La técnica de modulación digital wavelet, se representa en una forma de onda la cual se genera a partir de funciones wavelet. Siendo un poco más específicos, la señal a transmitir es una superposición de funciones wavelet desplazadas en función del tiempo, a uno o varios niveles de resolución [5].

La forma de onda estará constituida por varias wavelets en un mismo nivel de resolución, en este caso se obtendrá la modulación wavelet a escala única [6]. Por otro lado, cuando en la forma de onda se encuentran wavelets en diferentes niveles de resolución esta toma el nombre de modulación wavelet multi-escala. [7].

El algoritmo de Mallat o más conocido como la Transformada rápida de wavelet (FWT) es un algoritmo matemático basado en la Transformada Discreta de Wavelet (DWT) y la Transformada Discreta de Wavelet Inversa (IDWT) [4], cuya función es convertir una forma de onda en el dominio del tiempo en una sucesión de coeficientes basados en una base ortogonal de pequeñas ondículas finitas conocidas como wavelets [5]. Esta transformación de ondas puede ser usada ampliamente en señales multi-resolución o multi-escala con uso más frecuente en procesamiento de imágenes [8], donde el dominio del tiempo se reemplaza con el dominio del espacio, sin embargo, esta vez será implementado con un archivo de audio para su posterior análisis. El diseño de este algoritmo fue introducido en el año de 1989 por Stéphane Mallat. [1].

Para el diseño del algoritmo se tomarán en cuenta parámetros como la selección de una escala de muestreo J con tasa de muestreo de $2J$ por unidad de intervalo, y esta proyectara una señal dada por $f(t)$ en él, en teoría se calcula el producto de escalares [9] como se muestra en la ecuación 1.

$$s_n^{(J)} := 2^J \langle f(t), \phi(2^J t - n) \rangle \quad (1)$$

ϕ Representa la función de escala de la transformada de wavelet, la cual es la aproximación de la señal original ecuación 2 [9].

$$P_J[f](x) := \sum_{n \in \mathbb{Z}} s_n^{(J)} \phi(2^J x - n) \quad (2)$$

El análisis multi-resolución (MRA) se representa en forma de secuencia escalada o como su equivalente en Transformada Z esta, se muestra en la ecuación 3 y 4 [4].

$$a = (a_{-N}, \dots, a_0, \dots, a_N) \text{ o } a(z) = \sum_{n=-N}^N a_n z^{-n} \quad (3)$$

$$b = (b_{-N}, \dots, b_0, \dots, b_N) \text{ o } b(z) = \sum_{n=-N}^N b_n z^{-n} \quad (4)$$

Mientras que para la Transformada discreta de Wavelet (DWT), esta comenzará con una secuencia de coeficientes representados S^J , su nueva aproximación viene dada por la ecuación 5 [4].

$$P_J[f](x) = P_k[f](x) + D_k[f](x) + \dots + D_{J-1}[f](x) \quad (5)$$

La ecuación 6 calcula los detalles de las señales, ψ representa la Transformada discreta de Wavelet (DWT) madre. [4].

$$D_k[f](x) := \sum_{n \in \mathbb{Z}} d_n^{(k)} \psi(2^k x - n) \quad (6)$$

Por lo tanto, la Transformada discreta de Wavelet inversa (IDWT), se calcula de forma recursiva como muestra la ecuación 7 [4]

$$s_n^{(k+1)} := \sum_{k=-N}^N a_k s_{2n-k}^{(k)} + \sum_{k=-N}^N b_k d_{2n-k}^{(k)} \quad (7)$$

III. MODELADO

Para la simulación Wavelet sobre un canal con ruido blanco aditivo Gaussiano se utilizó varios bloques en Simulink estos se configuraron bajos los mismos parámetros en todas las modulaciones de esta manera podemos realizar las mediciones comparativas de tasa de error binaria (BER) y relación señal a ruido (SNR) en la salida de cada uno de los sistemas como indica la fig.1.

Empezamos con el ingreso de la señal, la cual es representado por un archivo de audio este pasa al Scrambler el cual nos permitirá codificar el vector de señal de datos entrante, cuya función principal será la de eliminar secuencias largas de 0 o 1 que aparecerán cuando el audio es digitalizado [10]. Internamente tendremos el bloque conversor de entero a bit, donde la salida resultante será M veces el vector de entrada. [11], para comparar los efectos en nuestra simulación utilizaremos un $M=8$ [12]. Los parámetros que usa el scrambler para poder codificar son tres : base de cálculo con un valor de 2 por ser codificación binaria , polinomio que define conexiones en scrambler, según el artículo de Ming-Der Shie, el polinomio generador $P(x) = x^9 + x^5 + 1$ [13] ingresado en este bloque permitirá una adecuada dispersión de energía cuando se trata de codificación de audio [14] y por último tenemos establecer la fuente para los estados iniciales del codificador este se coloca por defecto Dialog Parameter [13].

Modulador y Demodulador Wavelet para poder configurar este bloque vamos a usar el software de Matlab en el procesamiento de la señal, hablaremos estrictamente de la transformada de wavelet discreta el cual es utilizado en la modulación wavelet Multi-escala [15]. A la salida obtendremos un vector de coeficientes de aproximación cA y el vector de coeficientes de detalle cD del DWT.[11]

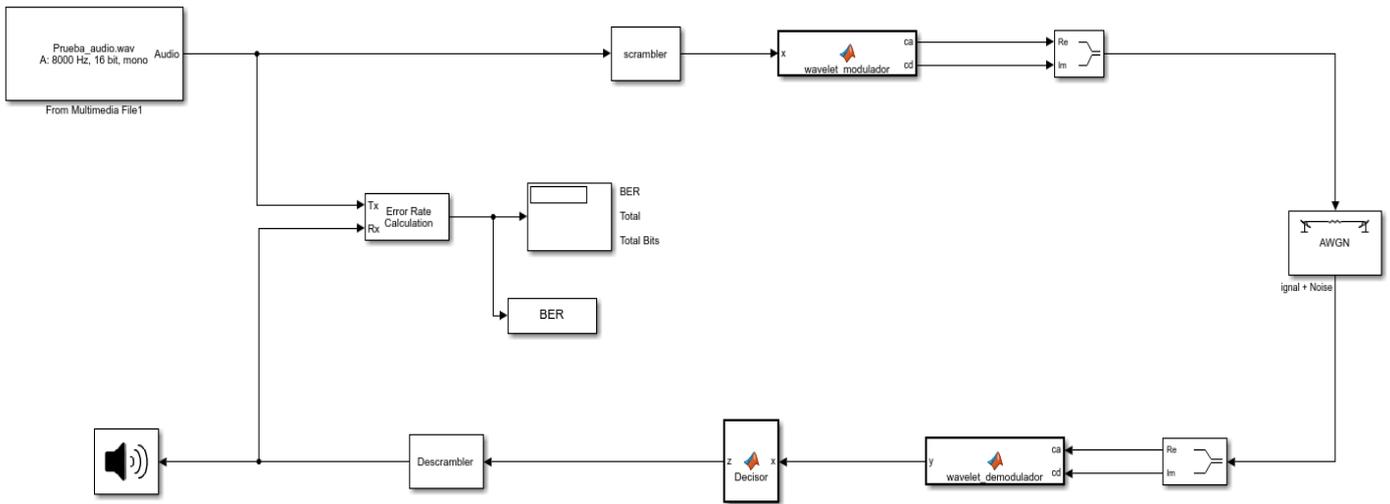


Fig.1 Diseño del modulador de varios tipos de wavelet en Simulink

En nuestro caso usaremos tres tipos diferentes la Haar, Daubechies y Coiflets mientras que el demodulador ocupa la Transformada discreta de Wavelet inversa para el proceso contrario [16].

El canal con ruido blanco aditivo Gaussiano (AWGN), es usado en diferentes sistemas de telecomunicación [1], ya que este se asemeja a los diferentes factores de interferencia que se encuentran en la naturaleza [17], este bloque nos permite configurar diferentes valores de ruido gaussiano blanco, lo cual permite realizar un análisis de mediciones respecto al BER y SNR [18], en cada uno de los diferentes sistemas de comunicación Digital.

El bloque Decisor puede programar una función de acuerdo a las necesidades requeridas, para nuestra simulación lo que haremos es establecer una condición para el vector de datos entrante en donde se establece que si un valor es mayor o igual a 0,5 este tomará el valor de 1 mientras que si es menor a 0.5 se tomará el valor de 0.[2].

Descrambler el bloque se utiliza si en el sistema de transmisión se usó el Scrambler, ya que este nos permite decodificar el vector de la señal de datos en el lado receptor [19]. Por último, podemos comparar los datos de entrada al modulador wavelet con los datos de salida del demodulador wavelet, calculando la tasa de error usando estadística continua, dividiendo el número total de pares desiguales de elementos de datos por el número total de elementos de datos de entrada de una fuente.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los cálculos de BER como de SNR vienen dada por las siguientes ecuaciones [15].

$$BER = \frac{\text{Numero de Errores}}{\text{Numero de Bits transmitidos}} \quad (8)$$

Mientras que la de SNR

$$SNR(dB) = 20 \log \frac{\text{Potencia de la señal}}{\text{Potencia de ruido}} \quad (9)$$

Y bajo estos parámetros podremos comparar cuál de las técnicas de modulación nos ofrece un mejor grado de confiabilidad de transmisión de información. Los diagramas de rendimiento obtenidos para cada variación del esquema de modulación propuesto se muestran a continuación.

Las curvas muestran la relación de bits erróneos (BER) a la relación señal/ruido (SNR). Cada curva parte de 6 puntos críticos variando el parámetro SNR del canal AWGN, según el artículo de Suyi li [15], el valor máximo de ruido es de 3 dB y el mínimo de 8 dB como indica la figura 2

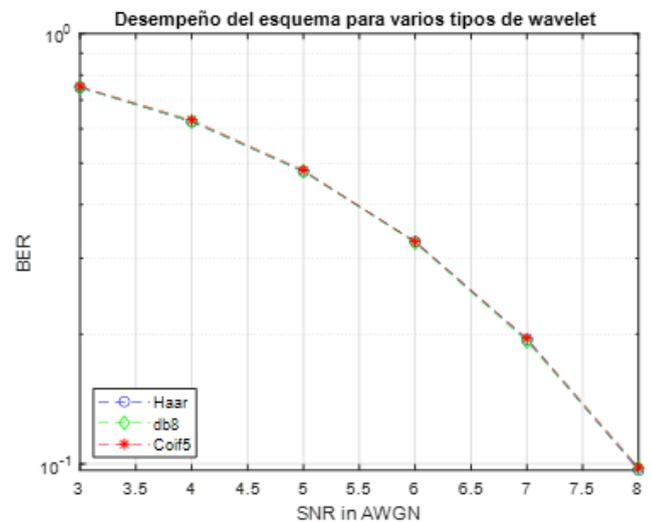


Fig.2 Desempeño del esquema frente a varios tipos de wavelet

Dado que los diferentes tipos de wavelet utilizados se comportan de manera similar, a partir de ahora solo se mostrarán las wavelets más representativas para no saturar los gráficos y hacerlos más informativos.

El criterio de selección para este tipo de wavelet es el número de momentos de compresión y eliminación de ruido el cual se define como el valor máximo de N . Este parámetro está relacionado con la tasa de decaimiento del espectro wavelet hacia la frecuencia 0 y hacia el infinito, lo que da una idea del nivel de los lóbulos laterales con respecto a la frecuencia dominante, ya que se considera que es el parámetro exacto que determina el rendimiento de una clase de wavelet determinada.

Para este trabajo se va a evaluar las wavelets Haar, Daubechies $N=8$ (db8), Coiflet $N=5$ (coif5) con QPSK como muestra la figura 3, se puede observar que a medida que disminuye el valor en el canal AWGN, todas las señales a comparar disminuyen el nivel de BER, al utilizar la modulación wavelet tipo Haar esta presenta un comportamiento muy similar al esquema de QPSK en el rango de 3dB a 5dB teniendo un error 0.86%, 0.18% y 0.12%, pero en el punto de 6dB es superada por la modulación wavelet db8 con un error de 0.31 % con lo cual la modulación wavelet es más eficiente que las demás en este punto, para el último tramo que es de 7dB a 8dB la modulación wavelet coif5 presenta una mejor similitud al esquema referente con un error de 0.19% y 0.61%.

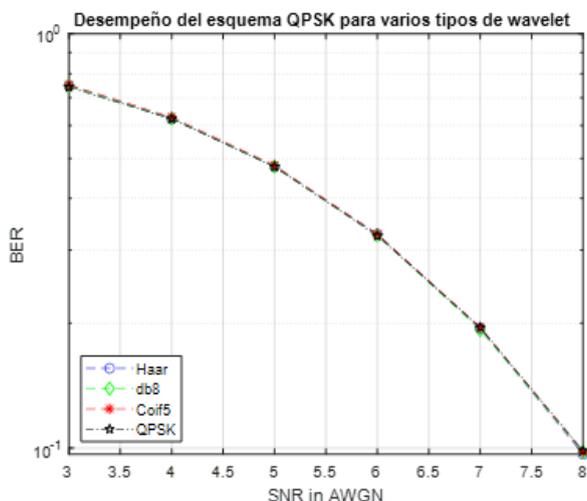


Fig.3 Desempeño del esquema QPSK frente a varios tipos de wavelet

En la figura 4 se va a evaluar las modulaciones wavelet anterior pero el esquema a comparar es ahora la modulación 4-QAM, en este caso se observa que en el rango de 3dB a 6dB la modulación wavelet Coiflet $N=5$ (coif5) presenta una mejor similitud al esquema tradicional con un margen de error del 0.12%, 0.28%, 0.66% y 0.0054% frente a las otras familias wavelet, en el punto de los 7dB la wavelet Daubechies $N=8$ (db8), la que presenta un mejor desempeño con un error de 0.29% frente al esquema tradicional 4-QAM, para el último punto a evaluar que es 8dB la modulación

wavelet Haar presenta el mismo desempeño que la modulación 4-QAM con un error de 0% frente a las otras familias wavelet comparadas.

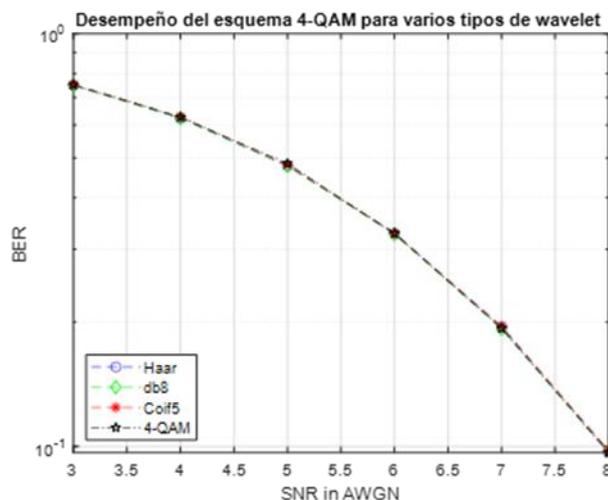


Fig.4. Desempeño del esquema 4-QAM frente a varios tipos de wavelet

Ahora se va a comparar lo que es el PSNR que no es más que la medida de calidad objetiva más simple y se puede aplicar a cualquier tipo de señal, no solo a la de video. Se define como la relación entre la energía máxima que puede alcanzar una señal y el ruido que contiene, su unidad de medida es el dB, a continuación, se muestran los valores obtenidos aplicadas al sistema con un valor en el canal de ruido AWGN de 8 dB.

Como se puede apreciar en la tabla 1 al aplicar la métrica del PSNR a las distintas modulaciones wavelet, se puede observar que la modulación wavelet de la familia Coiflet de orden 5 tiene un mejor desempeño que las otras familias, además que en este punto al ser comparadas con las modulaciones tradicionales esta familia es un 3.19% mayor que la modulación 4-QAM y un 5.98% mayor que la modulación QPSK por la tanto se puede decir que para este punto la modulación coif5 posee un mejor desempeño debido a la definición de PSNR que afirma que para la medición de la calidad de la decodificación, cuanto mayor sea el PSNR, mejor será su desempeño.

| Modulación | PSNR [dB] |
|---------------|-----------|
| Wavelet Haar | 23.55 |
| Wavelet db8 | 22.58 |
| Wavelet coif5 | 23.89 |
| 4-QAM | 23.15 |
| QPSK | 22.54 |

Tabla1. Medidas de PSNR con un valor en el canal de ruido AWGN de 8 dB aplicadas a los sistemas de modulaciones tradicionales y wavelets

V. CONCLUSIONES

Por los diagramas de rendimiento obtenidos para cada variación del esquema de modulación se nota que las wavelets a comparar en los rangos de 3dB a 8 dB, la que mejor desempeño posee es la wavelet Coiflet N=5 (coif5), la cual presenta una mejor eficiencia espectral en comparación de las otras familias wavelet con un margen de error del 0.1% que depende del punto a comparar pero al compararlas con la modulación tradicional, se puede ver claramente que el tipo de Wavelets mejora el rendimiento del sistema de comunicación digital porque las Wavelets que tienen 5 o más momentos de compresión y eliminación de ruido como son las familias Daubechies N=8 (dB8), Coiflet N=5 (coif5) presentan un menor margen de error frente a la modulación tradicional 4-QAM el cual se encuentra en 0.11% por lo cual se puede afirmar que presentan un buen comportamiento casi parecido al de la modulación tradicional, caso contrario que sucede al ser comparadas con la modulación QPSK que debido a sus momentos de desvanecimiento presentan mayor margen de error del 0.19% el cual va a variar dependiendo del punto en donde sea comparado, para este caso presento un mejor desempeño la modulación wavelet Haar presentando un margen de error del 0.11% demostrando así que esta modulación es más parecida al sistema tradicional QPSK.

VI. REFERENCIAS

- [1] M. N. Rajesh, B. K. Shrishya, N. Rao, and H. V. Kumaraswamy, "An analysis of BER comparison of various digital modulation schemes used for adaptive modulation," 2016 IEEE Int. Conf. Recent Trends Electron. Inf. Commun. Technol. RTEICT 2016 - Proc., pp. 241–245, 2017.
- [2] J. P. Hoyos-sánchez and P. E. Jojoa-gómez, "Evaluación de la multiplexación por división de paquetes wavelet 1 Performance of Wavelet Packet Division Multiplexing 2," vol. 18, no. 1, pp. 77–89, 2013.
- [3] F. DE Mecánica, P. por, and J. Diego Cruz Freire Darwin Vinicio Chimbo Chimbo, "Escuela Superior Politécnica De Chimborazo," 2015.
- [4] G. Yu, E. Bacry, and S. Mallat, "Audio signal denoising with complex wavelets and adaptive block attenuation," ICASSP, IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. - Proc., vol. 3, no. x, pp. 869–872, 2007.
- [5] C. Y. Guo and J. P. Li, "Development and future of wavelet analysis," 2013 10th Int. Comput. Conf. Wavelet Act. Media Technol. Inf. Process. ICCWAMTIP 2013, pp. 335–338, 2013.
- [6] J. R. A. Montoya, "La transformada wavelet," Rev. la Univ. Mendoza, 2001.
- [7] H. Armando, R. Romero, M. Sc, J. Mauricio, R. Viáfara, and U. Cauca, "Desempeño de la modulación wavelet multi-escala sobre un canal con ruido gaussiano," Av. en Sist. e Informática, vol. 7, no. 1, pp. 109–118, 2010.
- [8] "A LIFTING-BASED DWT AND IDWT PROCESSOR WITH MULTI-CONTEXT Andre Guntoro and Manfred Glesner Institute of Microelectronic Systems Department of Electrical Engineering and Information Technology Technische Universit .. at Darmstadt," Fpl, pp. 479–482, 2008.
- [9] C. P. Rosiene, "Tensor-product wavelet vs. Mallat decomposition: a comparative analysis," pp. 0–3.
- [10] C. Armando, B. Castañón, and U. S. P. S. Carlos, "Recuperação de imagens por conteúdo através de análise multiresolução por Wavelets Recuperação de imagens por conteúdo através de análise multiresolução por Wavelets," Clinics, 2003.
- [11] F. Use, "Modeling Simulation Implementation User's Guide For Use with Simulink ® DSP Blockset," 1995.
- [12] M. Omachi and S. Omachi, "POLYNOMIAL," vol. 1, no. c, pp. 2–4, 2007.
- [13] M. Shieh, C. Wu, H. Chou, M. Chen, and C. Liu, "/I," pp. 74–75, 1999.
- [14] P. A. M. R. pablo Gabriel Campoverde Rosero, "Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito," Tesis, pp. 1–100, 2021.
- [15] S. Li, G. Liu, and Z. Lin, "Comparisons of wavelet packet, lifting wavelet and stationary wavelet transform for de-noising ECG," Proc. - 2009 2nd IEEE Int. Conf. Comput. Sci. Inf. Technol. ICCSIT 2009, no. d, pp. 491–494, 2009.
- [16] M. Nagabushanam, C. P. P. Raj, and S. Ramachandran, "Design and FPGA implementation of modified Distributive Arithmetic based DWT-IDWT processor for image compression," ICCSP 2011 - 2011 Int. Conf. Commun. Signal Process., pp. 1–4, 2011.
- [17] L. Gopal and M. L. Sim, "Performance analysis of signal-to-noise ratio estimators in AWGN and fading channels," Proc. IEEE 2008 6th Natl. Conf. Telecommun. Technol. IEEE 2008 2nd Malaysia Conf. Photonics, NCTT-MCP 2008, no. August, pp. 300–304, 2008.
- [18] R. E. Izzaty, B. Astuti, and N. Cholimah, "濟無 No Title No Title No Title," Angew. Chemie Int. Ed. 6(11), 951–952., pp. 5–24, 1967.
- [19] J. C. Zemanate Zuñiga, J. A. Muñoz Hidalgo, and V. M. Quintero Flórez, "Análisis Del Desempeño

De Un Sistema De Comunicaciones Con Modulación 16/64 Qam Basado En Hardware Reconfigurable,” Rev. Investig. Univ. del Quindío, vol. 25, no. 1, pp. 99–112, 2014.