



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL CÓDIGO RAPTOR EN WBAN

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniera en Telecomunicaciones

AUTORES: JHONY ALEXANDER VILLACÍS CHANGOLUISA

MILENA KATHERINE TUPIZA TACO

TUTOR: MILTON NAPOLEON TIPAN SIMBAÑA

Quito-Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Jhony Alexander Villacís Changoluisa con documento de identificación N° 1726821646 y Milena Katherine Tupiza Taco con documento de identificación N° 1753273802; manifestamos que:

Somos las 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, 03 de agosto del año 2023

Atentamente,



Jhony Alexander Villacís Changoluisa
1726821646



Milena Katherine Tupiza Taco
1753273802

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

Nosotros Jhony Alexander Villacís Changoluisa con documento de identificación No. 1726821646 y Milena Katherine Tupiza Taco con documento de identificación No. 1753273802, 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 autoras del artículo académico: “Evaluación del desempeño del código Raptor en WBAN”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera en Telecomunicaciones, 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, 03 de agosto del año 2023

Atentamente,



Jhony Alexander Villacís Changoluisa

1726821646



Milena Katherine Tupiza Taco

1753273802

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Milton Napoleón Tipán Simbaña con documento de identificación N° 1713583126, docente de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL CÓDIGO RAPTOR EN WBAN, realizado por Jhony Alexander Villacís Changoluisa con documento de identificación N° 1726821646 y por Milena Katherine Tupiza Taco con documento de identificación No. 1753273802, 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, 03 de agosto del año 2023

Atentamente,



Ing. Milton Napoleón Tipán Simbaña, MSc.
1713583126

DEDICATORIA

El presente artículo académico se la dedico con mucho cariño a mis padres Manuel Villacís y Paula Changoluisa sin su apoyo incondicional, este logro no habría sido posible, a mi padre por ser mi ejemplo de trabajo duro y dedicación, a mi madre por ser mi mayor pilar y mi fuente inagotable de amor y aliento. Ambos me han brindado el regalo más valioso: la confianza, vuestra fe en mí, ha sido mi motor para seguir adelante y nunca rendirme, incluso en los momentos más complicados.

Por último, a mi novia por ser mi compañera en las largas noches de estudio y en todos los aspectos de mi vida.

Jhony Alexander Villacís Changoluisa

El presente artículo académico se lo dedico mi amada madre Janet Taco pues ella ha sido mi mayor apoyo y fuente de inspiración. Has sido mi confidente, mi maestra y mi amiga en cada paso del camino, me enseñaste a nunca rendirme y a luchar por lo que quiero en la vida.

A mi hermano Danilo Tupiza por siempre apoyarme incondicionalmente y estar alegrando cada uno de mis días.

A mis abuelitos Imelda Catagña y Vicente Taco, porque ustedes han sido una fuente constante de amor, sabiduría y apoyo en mi crecimiento personal y académico.

Milena Katherine Tupiza Taco

AGRADECIMIENTO

Nuestro profundo agradecimiento a Dios por bendecirnos, guiarnos y darnos la fortaleza para seguir adelante en cada aspecto e instante a lo largo de nuestra carrera profesional y vida personal.

A nuestros padres por su apoyo y su amor incondicional que contribuyeron para que lo difícil sea más fácil para culminar con éxito esta etapa tan importante de nuestra vida.

A nuestro tutor Milton Tipan por brindarnos su ayuda incondicional como guía, orientación y tiempo durante la realización de este proyecto de investigación. Es un honor haber tenido la oportunidad de trabajar bajo su tutela y estamos seguros de que los conocimientos adquiridos en esta experiencia nos serán de gran utilidad en nuestro futuro profesional.

A cada uno de los docentes de la carrera de Telecomunicaciones que fueron partícipes de este proceso y sea de manera directa o indirecta, por haber contribuido en nuestra formación profesional compartiéndonos sus amplios y sabios conocimientos.

Jhony Alexander Villacís Changoluisa

Milena Katherine Tupiza Taco

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL CÓDIGO RAPTOR EN WBAN

RAPTOR CODE PERFORMANCE EVALUATION ON WBAN

Jhony A. Villacís ¹, Milena K. Tupiza ², Milton N. Tipán ³

Resumen

Este artículo evalúa el desempeño del código Raptor formado por el precodificador Gray y un código LT en una red de área corporal a una frecuencia de $2.4GHz$ en un canal de pérdida de trayectoria. Los resultados muestran una mejora de menos de 1dB cuando se aplica el código Raptor a distancias menores de 1m.

Palabras clave: Gray, LT, Raptor, WBAN.

Abstract

This article evaluates the performance of the code Raptor formed by precoder Gray and a code LT in a body area network at a frequency of $2.4GHz$ on a path loss channel. The results show an improvement of less than 1dB when the Raptor code is applied at distances less than 1m.

Keywords: Gray, LT, Raptor, WBAN.

¹Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: jvillacisc3@est.ups.edu.ec

²Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: mtupizat@est.ups.edu.ec

³Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: mtipans@ups.edu.ec

1. Introducción

Para el caso de aplicaciones médicas se deben monitorear señales y transmitir datos en tiempo real, es importante que los datos se entreguen de manera correcta y confiable [1]. En un contexto médico, las redes inalámbricas de área corporal (Wireless Body Area Network, WBAN) transmiten datos confidenciales de los pacientes, por lo tanto, deben tener buena calidad de servicios (Quality of Service, QoS) y seguridad [2].

Las WBAN operan con el estándar del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 802.15.6 [3], están enfocados en comunicaciones inalámbricas de corto alcance, baja potencia, bajo consumo de energía y el requisito fundamental es la confiabilidad. La transmisión de datos se ve afectada por el ruido y los fenómenos de interferencia, producidos por otras tecnologías como, Wifi, Bluetooth, Zigbee ya que trabajan en el mismo rango de frecuencias [4]. Por otra parte, los códigos fuente para control y detección de errores como códigos turbos y códigos de comprobación de paridad de baja densidad (Low-Density Parity-Check, LDPC) son eficientes en algunas aplicaciones para las redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Networks, WSN). Sin embargo, estos códigos no son factibles de usarse en WBAN, ya que consumen mucha energía [5]. Recientes investigaciones han demostrado que los códigos Fountain muestran un mejor desempeño en las WBAN, en [6] se estudió el rendimiento de los códigos Fountain en específico el código de transformación de Luby (Luby Transform, LT) en comparación con el código de solicitud de repetición automática (Automatic Repeat Request, ARQ) en una WBAN, donde se verificó que Luby Transform es una solución efectiva en la transmisión de datos con bajo consumo de energía y alta confiabilidad en la transmisión de datos.

Otra investigación evalúa el rendimiento del código Raptor usando un precodificador LDPC, comparándolo con el código (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem, BHC) en canales de desvanecimiento selectivo en frecuencia como Nakagami-m, Rayleigh y Rician, mediante simulación con modulación por desplazamiento de frecuencia binaria (Binary Frequency Shift Keying, BFSK) demostraron que la transmisión de datos de red de área corporal inalámbrica es eficiente para dispositivos WBAN para una distancia de transmisión entre 10 y 100 metros [7]. Mientras que en [8] se compararon los mismos códigos y los mismos canales que la anterior, pero con la diferencia que este se desarrolló con modulación por desplazamiento de frecuencia FSK (Shift Keying, FSK) en el cual se demostró que los códigos Raptor tienen mejor eficiencia y consume menos energía mientras la distancia de transmisión sea mayor a 10 metros. En [9] se analizó el rendimiento del código Raptor, código LT, código BHC y ARQ en canales de desvanecimiento Rayleigh, Rician, Nakagami-m para

el control de errores en WBAN, mediante simulaciones se demostró que el código Raptor aumenta la eficiencia energética comparada con los demás códigos.

Esta investigación, evalúa el desempeño del código Raptor en una red WBAN sobre un canal de propagación con modelado de pérdidas en trayectoria en una red de área local inalámbrica (Wireless Local Area Network, WLAN).

El artículo se ha organizado de la siguiente manera. En la sección 2, se muestra la codificación Gray, transformada de Luby, código Raptor y el sistema WBAN. En la sección 3, se detallan los resultados obtenidos del canal WLAN y el canal WBAN, los dos con el código Raptor y sin código Raptor. Finalmente, en la sección 4 se determina la conclusión.

2. Materiales y Métodos

2.1. Código Gray

El código Gray es un método de codificación numérica empleado en sistemas digitales para representar números de manera secuencial, tiene la ventaja de garantizar que solo un bit cambie a la vez al pasar de un número al siguiente, reduciendo significativamente la probabilidad de errores de transmisión y minimiza la interferencia entre los números vecinos [10].

En el contexto de la transferencia de información, el convertidor de código Gray resulta altamente útil, esto se debe a que su implementación permite detectar de manera efectiva posibles errores durante dicho proceso, gracias a esta capacidad de detección de errores, se logra una mayor fiabilidad en la transmisión de datos como se observa en la Tabla 1 [11].

Tabla 1. Tabla de verdad del convertidor de código binario a Gray de 4 bits.

Binario				Gray			
A3	A2	A1	A0	D3	D2	D1	D0
0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	1	1	0	0	1	1
0	0	1	0	0	0	1	0
0	1	0	1	0	1	1	0
0	1	0	0	0	1	1	1
0	1	1	1	0	1	0	1
0	1	1	0	0	1	0	0
1	0	0	1	1	1	0	0
1	0	0	0	1	1	0	1
1	0	1	1	1	1	1	1
1	0	1	0	1	1	1	0
1	1	0	1	1	0	1	0
1	1	0	0	1	0	1	1
1	1	1	1	1	0	0	1
1	1	1	0	1	0	0	0

Para obtener las ecuaciones de conversión Ecuación 1, se pueden utilizar mapas de Karnaugh (k-maps) con la finalidad de simplificar el circuito lógico.

$$\begin{aligned} D_3 &= A_3 \\ D_2 &= A_3 \oplus A_2 \\ D_1 &= A_2 \oplus A_1 \\ D_0 &= A_1 \oplus A_0 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde: \oplus representa la operación de una compuerta XOR. El convertidor Gray a binario realiza la operación inversa, como se muestra en la Ecuación 2 [12].

$$\begin{aligned} A_3 &= D_3 \\ A_2 &= D_3 \oplus D_2 \\ A_1 &= D_2 \oplus D_1 \\ A_0 &= D_2 \oplus D_1 \oplus D_0 \end{aligned} \quad (2)$$

2.2. Transformada de Luby

Luby propuso la primera implementación de códigos fuente, donde el decodificador recupera los símbolos originales de un conjunto de símbolos de salida de cualquier tamaño cercano al valor óptimo.

Los códigos Transformada de Luby utilizan la codificación de un número limitado de símbolos de mensaje para generar un número ilimitado de símbolos de salida [13].

2.2.1. Codificador LT

Un procedimiento paso a paso para generar un número infinito de símbolos de salida a partir de k símbolos de entrada T_1, T_2, \dots, T_k es el siguiente:

Paso 1. Piense un grado de salida aleatorio b de la distribución de grados $p(b)$.

Paso 2: Aleatorizar uniformemente los símbolos de entrada b de T_1, T_2, \dots, T_k .

Paso 3: Ejecute XOR de b , para obtener los símbolos de salida D , como en la Ecuación. 3.

$$D_i = T_{i,1} \oplus T_{i,2} \dots \dots T_{i,b} \quad (3)$$

La matriz G se puede expresar con la Ecuación. 4.

$$D = x \cdot G \quad (4)$$

Donde x representa el vector de entrada y la suma módulo-2 se utiliza durante la multiplicación de matrices [13].

2.2.2. Decodificador LT con Hard Decision

La recuperación inmediata es posible, si al menos un símbolo codificado tiene exactamente un vecino, el valor del símbolo de entrada recuperado se convierte mediante la operación XOR en cualquier símbolo de

codificación restante que también tenga ese símbolo de entrada como vecino, los símbolos codificados se eliminan y cada grado de codificación de carácter se reduce en uno para reflejar esta supresión, con base a esta regla en un proceso de decodificación es de la siguiente manera:

Paso 1. El símbolo de salida y_i debe estar asociado con un símbolo de entrada m_j , así como se observa en la Figura 1, en donde se muestra como debe ir asociado los nodos de entrada y de salida.

Paso 2: Establecer $m_j = y_i$.

Paso 3: Aplicar XOR m_j a todos los símbolos de salida conectados a m_j .

Paso 4: Elimina los bordes asociados a m_j .

Paso 5: Se debe repetir los pasos del 1 al 4 hasta que los símbolos de salida sean iguales a los símbolos de entrada [13].

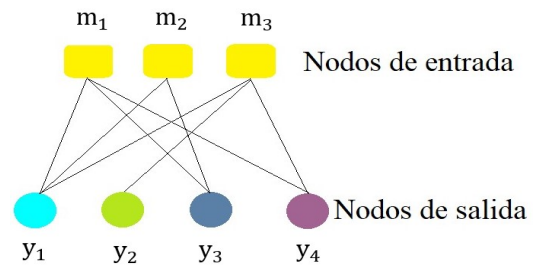


Figura 1. Gráfico de Tanner del código LT.

2.3. Codificador Raptor

Los códigos Raptor son una variante de código fuente que permite generar una cantidad infinita de símbolos codificados de manera dinámica a partir de un bloque fuente predefinido. Estos códigos tienen la capacidad de generar símbolos codificados sin importar qué símbolos específicos se reciban, siempre y cuando se reciba una cantidad adecuada de símbolos. [14].

Se consideran una extensión de LT porque el mensaje original está pre codificado, lo que da como resultado nodos intermedios, como en la Figura 2 en donde muestra que son los nodos los que se usan en la codificación LT, es decir los códigos Raptor están compuestos por un pre código y código LT [13].

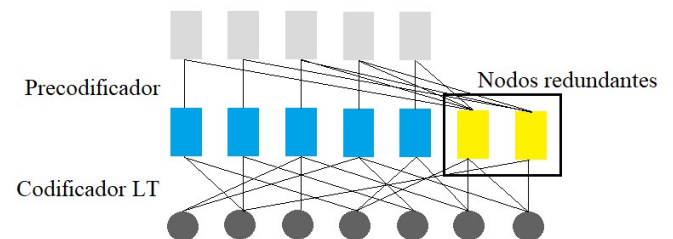


Figura 2. Gráfico de Tanner del código Raptor.

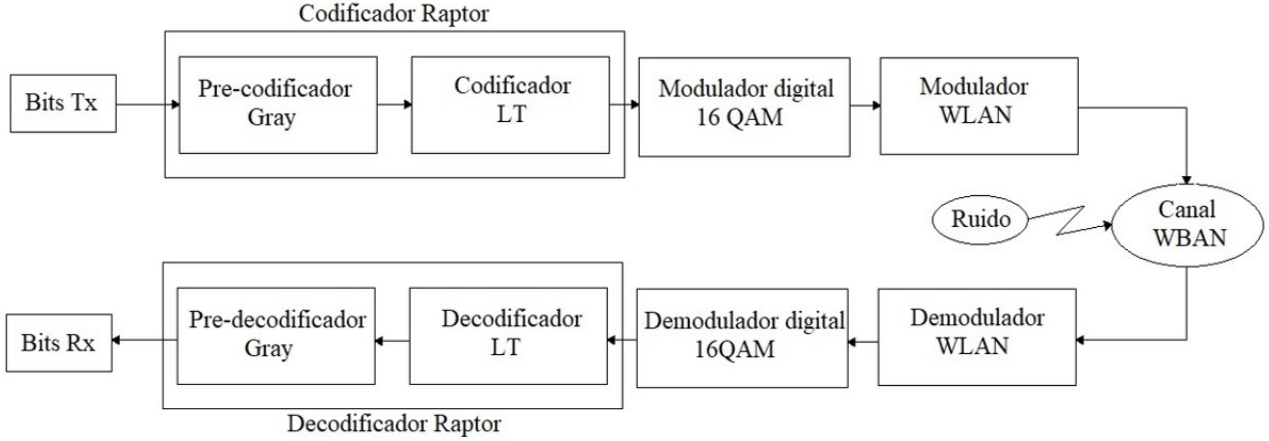


Figura 3. Diagrama de bloques WBAN.

2.4. Sistema WBAN

El sistema WBAN fue implementado mediante simulación numérica en Matlab 2020b. El transmisor está formado por un generador aleatorio de 18764 bits. Estos son codificados por un codificador Raptor el cual es la combinación de un precodificador Gray y un codificador LT. Además, tiene un modulador digital 16-QAM y un modulador WLAN 802.11.ac trabajando a una frecuencia de $2.4GHz$ y con un ancho de banda de $18MHz$ en banda pasante.

El canal de transmisión fue simulado para el caso de WLAN como un canal Rayleigh y para WBAN se basó en el modelo de canal pérdidas de trayectoria usando en [15]. En este, se obtiene una aproximación del modelo real mediante mediciones experimentales de transmisiones en un entorno típico de cuarto de hospital en la banda de $2.4GHz$. La Ecuación 5 representa el modelo matemático de la misma.

$$L(d) = x \cdot \log_{10}(d) + k + B \text{ [dB]} \quad (5)$$

Donde $L(d)$ representa las pérdidas de trayectoria a una distancia d en mm , para una frecuencia de $2.4GHz$ B representa una distribución log-normal con media 0 y desviación estándar de $\sigma = 2$, x y k son parámetros derivados de la regresión lineal por mínimos cuadrados donde $x = -8.6$ y $k = -20.3$. En el receptor se implementó un demodulador WLAN 802.11.ac del cual se obtuvo la señal en banda base y los símbolos 16-QAM, los mismos que se demodularon para obtener las palabras codificadas con el código Raptor, pasando primero por el decodificador LT y luego por el pre-decodificador Gray obteniendo los bits recibidos del sistema como se muestran en la Figura 3. Finalmente, se evaluó la tasa de error de bits (Bit Error Rate, BER) vs la relación señal a ruido (Signal to Noise, SNR) mediante la variación del mismo para evaluar el desempeño del sistema sin código Raptor y con código Raptor.

3. Resultados y Discusión

Nosotros comparamos la transmisión de un canal WLAN y WBAN en un entorno de cuarto de hospital típico simulando un paciente en reposo. Suponiendo que nuestro transmisor (sensor) colocado sobre el cuerpo del paciente y nuestro receptor (concentrador) colocado en la cintura del paciente asume una distancia de $1m$. Para evaluar el código Raptor, se procedió a simular una transmisión WLAN con canal Rayleigh y WBAN con el modelo de canal pérdidas de trayectoria las dos sin código Raptor, los resultados se muestran en la Figura 4, se observa que para el límite de corrección de Errores hacia adelante (Forward Error Correction, FEC) correspondiente a $BER = 10^{-3}$, WLAN supera en aproximada 20dB a WBAN, debido a que la señal se ve atenuada al atravesar el cuerpo humano por las diferencias dieléctricas en los tejidos, provocando que la señal sufra pérdidas de absorción, reflexión y difracción entre las diversas capas de los tejidos [16].

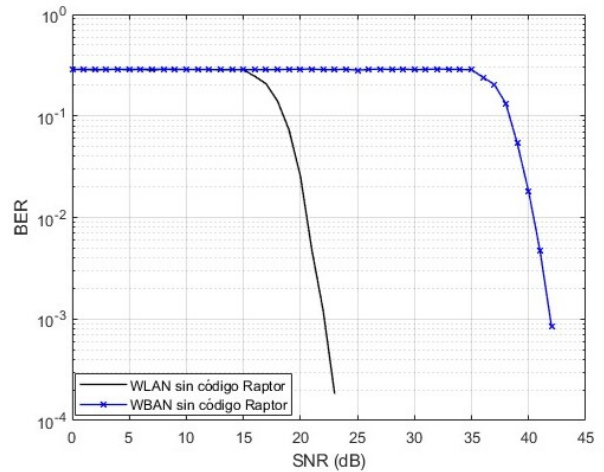


Figura 4. Rendimiento en términos de BER frente a SNR para el canal WLAN y WBAN.

Lo anterior, se corrobora mediante el espectro de las mismas, lo que se observa en la Figura 5, esto indica un comportamiento adecuado del modelo.

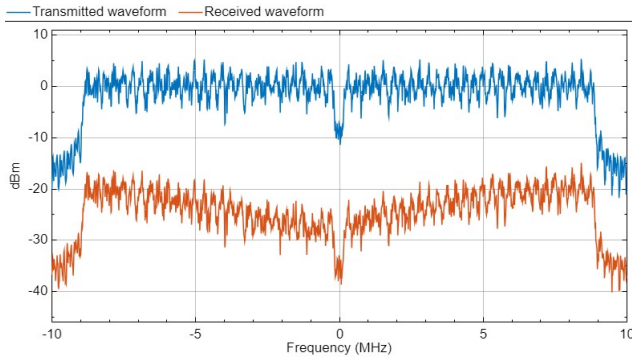


Figura 5. Espectro de la señal transmitida y recibida en un canal WBAN sin código Raptor referido a 2.4GHz.

Luego, evaluamos WBAN con y sin código Raptor, los resultados muestran que WBAN sin código Raptor tiene mejor desempeño para valores de $SNR \leq 42dB$. Sin embargo, en un valor de $SNR = 42dB$ ambos tienen el mismo comportamiento y para valores de $SNR \geq 42dB$ WBAN con código Raptor tiene mejor desempeño como se observa en la Figura 6, aunque la ganancia de codificación es menor a $1dB$.

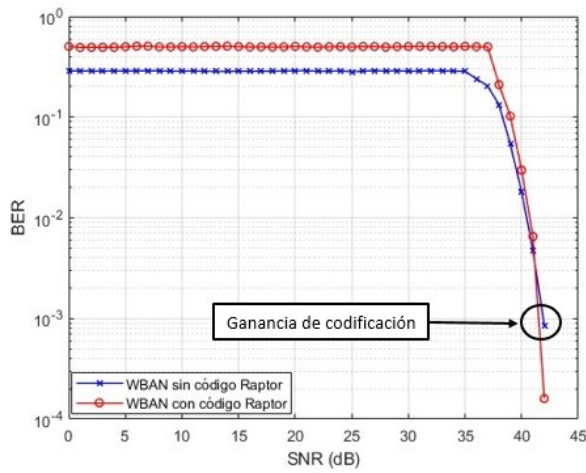
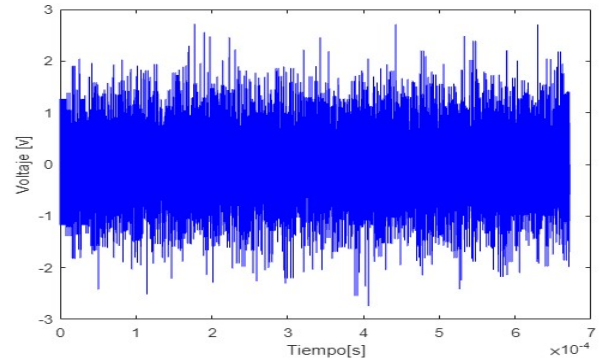
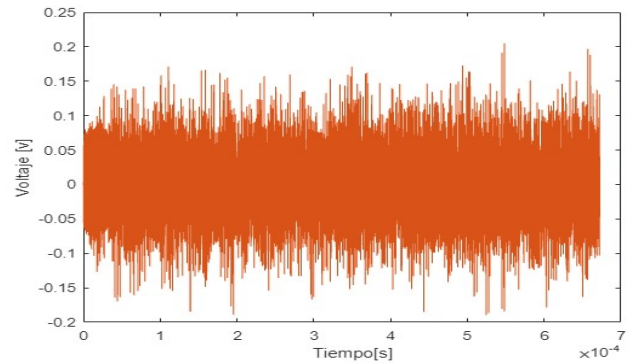


Figura 6. Rendimiento en términos de BER frente a SNR para el canal WBAN.

Esto se evidencia en la amplitud señal en tiempo para WBAN con código Raptor, ya que se tiene un valor alto de aproximadamente $BER = 1.4 \times 10^{-2}$, como se muestra en la Figura 7.



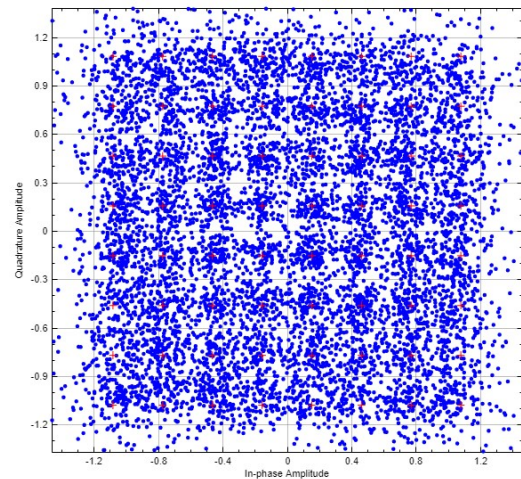
(a)



(b)

Figura 7. Señales del canal WBAN con código Raptor. (a) señal transmitida (b) señal recibida.

Además, un análisis de las constelaciones muestra una pequeña mejora de WBAN con el código Raptor sobre WBAN sin código Raptor con un $EVM = 12.40\%$ y $EVM = 12.80\%$ respectivamente, como se muestra en la Figura 8.



(a)

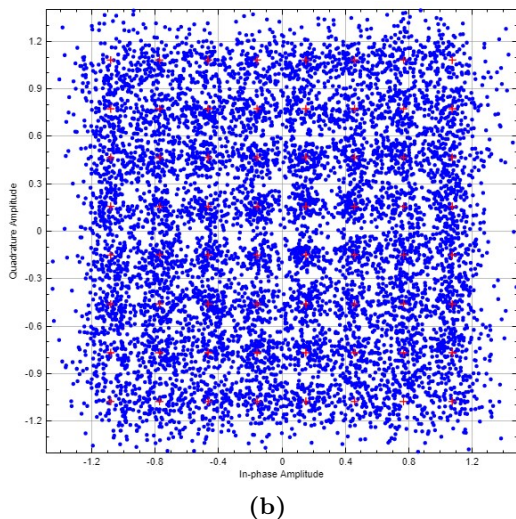


Figura 8. Diagrama de constelaciones para $SNR = 42dB$. (a) WBAN sin código Raptor (b) WBAN con código Raptor.

Finalmente, se varió la distancia desde $10cm$ hasta $1m$, encontrándose resultados similares.

4. Conclusiones

Una evaluación del desempeño de código Raptor en un sistema WBAN es realizado, no se evidencia una mejora importante del código Raptor, ya que en la Figura 6 muestra que la ganancia de codificación es menor a $1dB$ a una distancia de hasta un $1m$, esto implica que es necesario desarrollar códigos robustos para este tipo de sistemas en trabajos futuros.

Referencias

- [1] K. Hasan, K. Biswas, K. Ahmed, N. S. Nafi, and M. S. Islam, "A comprehensive review of wireless body area network," pp. 178–198, 10 2019.
- [2] S. Ayed, L. Chaari, and A. Fares, "A survey on trust management for wban: Investigations and future directions," pp. 1–32, 11 2020.
- [3] M. Hernandez, R. Kohno, T. Kobayashi, and M. Kim, "New revision of iee 802.15.6 wireless body area networks," vol. 2022-May. IEEE Computer Society, 2022.
- [4] A. Mile, G. Okeyo, and A. Kibe, "Hybrid iee 802.15.6 wireless body area networks interference mitigation model for high mobility interference scenarios," *Wireless Engineering and Technology*, vol. 09, pp. 34–48, 2018.
- [5] N. A. Alrajeh, U. Marwat, B. Shams, and S. S. H. Shah, "Error correcting codes in wireless sensor

networks: An energy perspective," *Applied Mathematics and Information Sciences*, vol. 9, pp. 809–818, 2015.

- [6] N. Samouni, A. Jilbab, and D. Aboutajdine, "Performance evaluation of lt codes for wireless body area network," vol. 520. Springer Verlag, 2017, pp. 311–320.
- [7] L. Sari and A. Aditya, "Raptor code for energy-efficient wireless body area network data transmission," *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 13, p. 277, 3 2015.
- [8] V. Praveena, P. Kaythry, and V. Praveena, "Fountain code based error control technique in wireless body area network," pp. 430–434, 2 2017. [Online]. Available: 10.1109/WiSPNET.2017.8299792
- [9] P. Kaythry, R. Kishore, and V. Praveena, "Energy efficient raptor codes for error control in wireless body area networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 103, pp. 1133–1151, 11 2018.
- [10] A. Ahmad and F. Bait-Shiginah, "A nonconventional approach to generating efficient binary gray code sequences," *IEEE Potentials*, vol. 31, pp. 16–19, 2012.
- [11] X. bin Shu, L. na Li, M. miao Ren, and B. O. Mohammed, "A new binary to gray code converter based on quantum-dot cellular automata nanotechnology," *Photonic Network Communications*, vol. 41, pp. 102–108, 2 2021.
- [12] E. G. Anagha and R. K. Jeyachitra, "Investigations on all-optical binary to gray and gray to binary code converters using 2d photonic crystals," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 57, 12 2021.
- [13] K. D. Rao, "Channel coding techniques for wireless communications," pp. 305–324, 2015.
- [14] B. Bulut, "Experimental analysis and evaluation of raptorq codes for video multicasting over wi-fi," *Wireless Personal Communications*, pp. 1431–1448, 5 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07428-6>
- [15] T. Kenichi, *Channel Models for Wireless Body Area Networks*, iee ed. IEEE Xplore, 10 2008. [Online]. Available: 10.1109/IEMBS.2008.4649465
- [16] R. García, "Análisis experimental de la propagación en redes de Área corporal para la banda de ultra wideband," pp. 25–26, 2017.