

Modelado de un sistema de radiofrecuencia para una aplicación médica utilizando tecnología BLE mediante un SoC nRF52832 Nordic Semiconductor como TX y RX

Jorge Brenes Alfaro*, Pablo Calderón Piedra*, Kimberly Carvajal Méndez* y Jason Valverde Picado*

*Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), 30101 Cartago, Costa Rica, {jorgebre2098, pablo98150012ccp, kcarvajal1998, jsvalverde98}@gmail.com

I. INTRODUCCIÓN

La comunicación se ha vuelto un elemento de vital importancia, donde la interconexión de sistemas o redes son la base de la comunicación actualmente [1]. En el área de salud el desarrollo de estos sistemas deben cumplir rigurosos estándares y funcionar de la mejor manera posible, ya que una afectación en el proceso puede resultar en un diagnóstico erróneo, es por ello que todo proceso debe ser ejecutado con la mayor precisión y eficiencia en términos de salvaguardar la integridad de cada persona [2]. Por ello, la obtención y el análisis de los datos se vuelve de importancia al igual, que el correcto preprocesamiento y la eliminación de ruido, la correcta codificación para en etapas posteriores detectar y corregir errores de transmisión y la correcta modulación con la tecnología proporcionada (BLE) para transmitir correctamente la información. Seguidamente, su transmisión a través de una antena diseñada con los requerimientos necesarios.

Por medio del canal, la señal transmitida se vuelve a distorsionar por efectos del ruido, en donde este se considera blanco, gaussiano y aditivo. Tras la recepción de la señal es necesaria demodularla con su respectivo método para así, decodificarla y corregir errores provocados por el canal de transmisión con el fin de recuperar el mensaje o la información. De esta forma, se pueda visualizar la información obtenida para evaluar que tan efectivo y que tan fiable es el proceso realizado.

II. METODOLOGÍA

Para el presente documento se toma una muestra de datos proveniente de una prueba de *ecostress* y se lleva a cabo un análisis estadístico para realizar un filtrado del ruido proveniente de la conexión alamburada, posteriormente esta se codifica, se modula, se realiza el diseño de la antena y el canal para su transmisión. Además, se desarrolla la etapa de recepción, la cual consta de la demodulación y la decodificación.

II-A. Análisis de Datos

El análisis de datos consiste en utilizar la estadística para determinar los valores de promedio, desviación estándar, máximo, mínimo y la cantidad de muestras de los datos recopilados.

Seguidamente, se realiza un test de Anderson Darling, el cual mide qué tan bien siguen los datos una distribución específica [3]. Para esto, se establece 2 hipótesis:

- H_0 : los datos siguen una distribución normal.
- H_1 : los datos no siguen una distribución normal.

Tras probar dicho test, se grafica el histograma de los datos, que se muestra en la Fig. 1 donde este ayuda de una forma visual ver la tendencia que tienen los datos, en donde los resultados obtenidos se apoyan en conjunto con lo obtenido en el test de Anderson Darling.

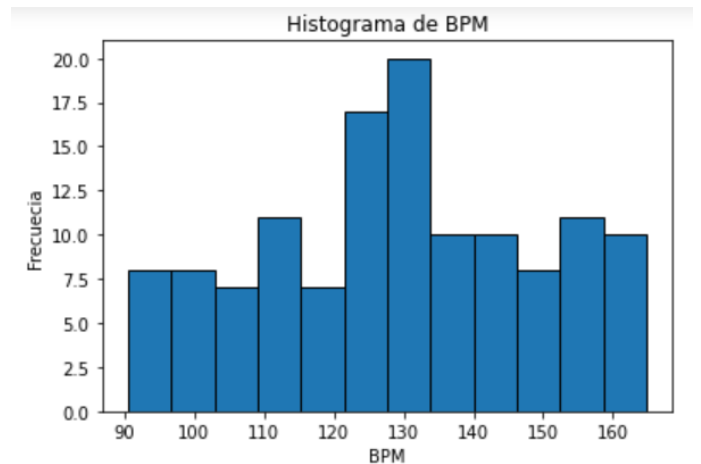


Figura 1. Histograma del conjunto de datos recopilados.

Por último en esta subsección, se determina si existen valores atípicos dentro del conjunto de datos, para lo cual se aplica un test de Grubbs y en adición un diagrama de caja para visualizar de mejor forma si hay dichos valores atípicos.

II-B. Preprocesamiento

Seguidamente, se realiza un preprocesamiento de los datos mediante el método de filtrado *Moving Average* con una topología *Simple Moving Average* y utilizando una magnitud de *window* de 3. Además, es importante destacar que la

elección del filtro es debido a la simplicidad del mismo y la característica de reducir ruido aleatorio que se pueda presentar [4]. El tiempo promedio de ejecución es de 217.11 ms.

II-C. Codificación — Hamming

Con el fin de contar con información apta para la transmisión por medio de un canal como lo es el aire, se procede a convertir los datos en una serie de bits, los cuales son la representación en binario de cada valor de BPM sin su parte fraccionaria. Una vez hecho esto, se realiza una codificación tipo *Hamming* para la posterior detección de errores una vez que el mensaje haya sido transmitido y recibido por el receptor. En el cuadro I se tiene un ejemplo del funcionamiento del bloque. El tiempo promedio de ejecución de este bloque es de 128.04 ms.

Cuadro I
EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DEL BLOQUE DE CODIFICACIÓN.

Decimal	Binario	Hamming (7,4)	Hamming (15,11)
90.4358	01011010	0101'10'1' 1010'01'0'	01011011'0011'01'0'

II-D. Modulación

Una vez realizada la codificación de los datos estos pasan a través de un bloque de modulación que permitirá la transmisión de los datos, donde se toma el proceso de modulación aplicado a la tecnología BLE el cual corresponde a una modulación de tipo GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*) [5] cuyo proceso se representa en la Fig.2. Dicha modulación se realiza mediante un script de Matlab.

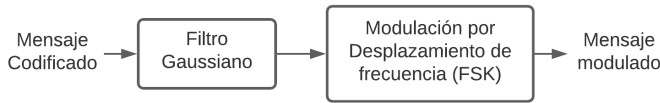


Figura 2. Modulación GFSK del mensaje.

II-E. Antena

En dicha sección se lleva a cabo el diseño de la antena, la cual debe cumplir con las especificaciones técnicas de la banda de transmisión de tecnología BLE. Esta se lleva a cabo utilizando la topología *Meandered Inverted-F Antenna (MIFA)*, cuyas características son aptas para el funcionamiento requerido. La antena tiene la característica de que es compacta, midiendo 7.2 mm x 11.1 en su totalidad [6], donde dicho diseño se muestra en la Fig. 3.

La antena posee un excelente rendimiento y las especificaciones requeridas para la transmisión. La antena trabaja en la banda de 2.4 GHz con un ancho de banda de aproximadamente 2.4 GHz a 2.48 GHz. En cuanto a las pérdidas, posee un valor mayor o igual a los 10 dB, significando esto que el 90 % de la potencia incidente se irradia, siendo bastante efectiva en su transmisión. Además, tiene una impedancia de 50ω , la cual es

importante considerar para garantizar la máxima transferencia de potencia y reducir la pérdida debido a reflexiones, posee una polarización vertical y es una antena directiva. [6]

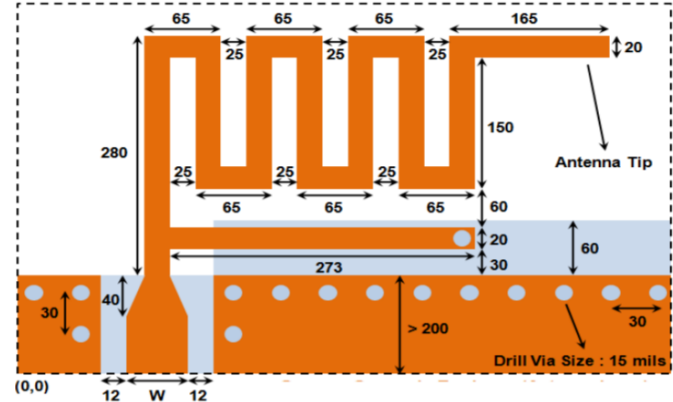


Figura 3. Diseño de la antena transmisora. Fuente: [6].

II-F. Canal

La simulación del canal se realiza tomando como referencia los bits transmitidos por el bloque de codificación, los cuales son los bits del mensaje junto a los bits de paridad del código Hamming. Una vez introducidos los bits al canal se tiene la opción de definir una relación de potencia de la señal y potencia de ruido (SNR) específica para simular un entorno lo más parecido a la realidad, con ruido e interferencias; como resultado a la adición de ruido se tiene una detección errónea de los datos al momento de hacerlos pasar por un bloque de *Hard Decision* con un umbral de 0.5.

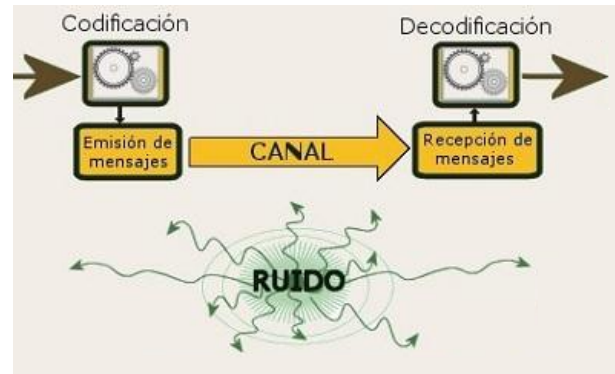


Figura 4. Diagrama de canal. Fuente: [7].

II-G. Demodulación

Este bloque es el encargado de obtener la señal que es transmitida por el canal y extraer la información mediante una demodulación GFSK correspondiente al tipo de señal transmitida por el bloque de modulación. Para comprender el comportamiento de modulación y demodulación se toma la señal resultante en el bloque de modulación y mediante un *script* de Matlab se realiza el proceso representado en la Fig.5 para obtener la información dada en dicho bloque.

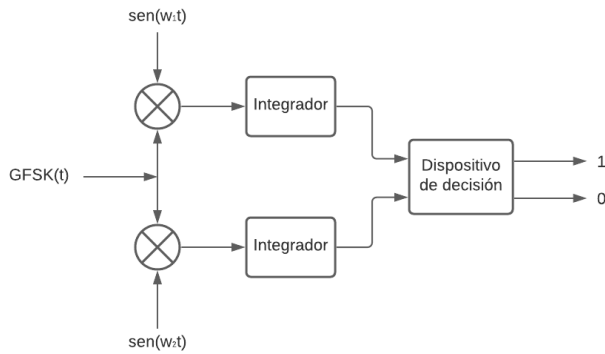


Figura 5. Diagrama de demodulación GFSK.

II-H. Decodificación

El bloque decodificador se encarga de realizar una detección y corrección de errores, por medio de una decodificación *Hamming* 7-4 y 15-11. El desarrollo de este bloque se da mediante la adquisición de datos del canal para aplicarle un análisis de los errores del mensaje transmitido, con el fin de aplicar una decodificación y corrección de errores mediante un código en Python, con la posibilidad de utilizar *Hamming* 7-4 y 15-11 según la codificación que se haya empleado antes de realizar la transmisión del mensaje. Un ejemplo de la lógica empleada para extraer y comparar los bits de información y paridad se puede observar en la Fig. 6. El tiempo promedio de ejecución de este bloque es de 350.32 ms.

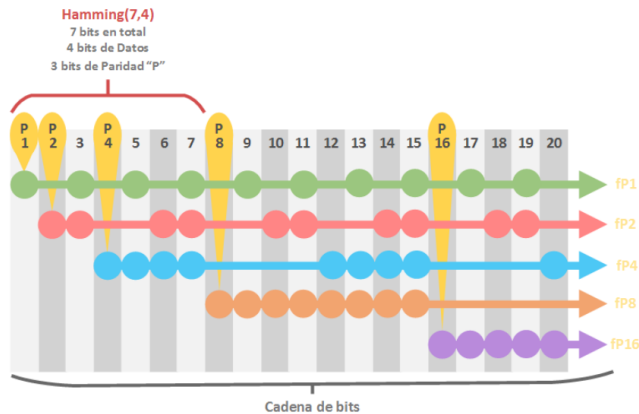


Figura 6. Codificación Hamming. Fuente [8]

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

III-A. Análisis de Datos

Tras realizar el test de Anderson Darling da un valor de p de 0.5780 a un valor de significancia del 5 %. De ello se infiere que se cumple la hipótesis nula, por lo que los datos

siguen una distribución normal. También se puede observar en la Fig. 1 que los datos persiguen dicha distribución.

En cuanto, al test de Grubbs realizado se obtiene que no existen valores atípicos en el conjunto de datos recopilados. Donde la respuesta se apoya en conjunto con el diagrama de caja.

III-B. Preprocesamiento

Al aplicar el filtro *Moving Average* se tiene como resultado los datos de la señal filtrada, la cual se puede observar en la Fig.7, donde la señal azul corresponde a los datos originales y la señal roja corresponde a la señal filtrada.

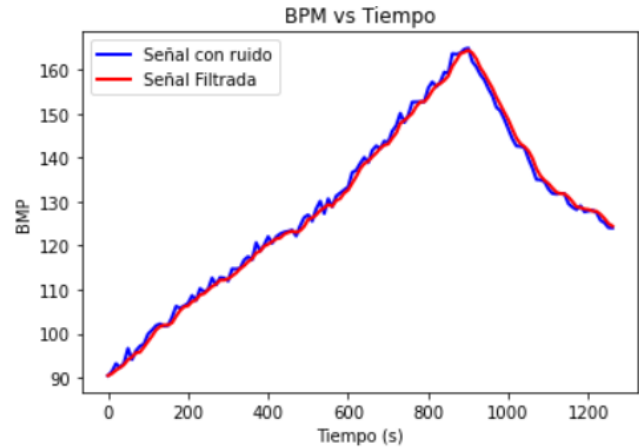


Figura 7. Señal filtrada.

III-C. Codificación — Hamming

Al analizar el cuadro I se observa que el dato de 90.4358 es convertido de decimal a binario con el resultado de 01011010 lo que equivale a únicamente la conversión del 90, una vez obtenido este resultado se utiliza la codificación Hamming en sus versiones (7,4) y (15,11), lo cual hace que el dato sea dividido en dos partes para el (7,4) o por el contrario incluya tres bits del siguiente dato para completar los once bits de información del (15,11). Los bits de paridad se representan en el cuadro con un apóstrofe, estos son los encargados de detectar y por consiguiente corregir, errores en la cadena de bits recibidos.

III-D. Modulación

La cadena de bits a transmitir se observa en la Fig.8 de color azul, la cuál se le aplica un filtro Gaussiano para premodular que suaviza las curvas del mismo como en la señal verde de la Fig.9. La señal obtenida de este filtro se aplica a un modulador digital FSK con lo que se obtiene la señal magenta que minimiza la variación instantánea de frecuencias de una modulación FSK sin filtro Gaussiano [9]. Si no se aplicara el filtro Gaussiano la modulación FSK se vería como la señal roja. Finalmente el tiempo promedio que toma el *script* para generar esta modulación es de 595.5 ms.

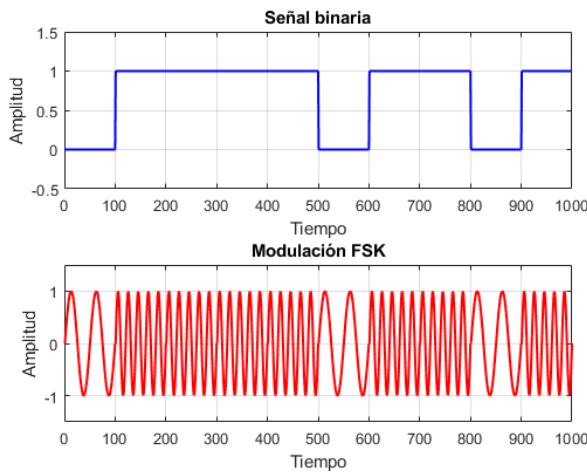


Figura 8. Datos de entrada y modulación con FSK.

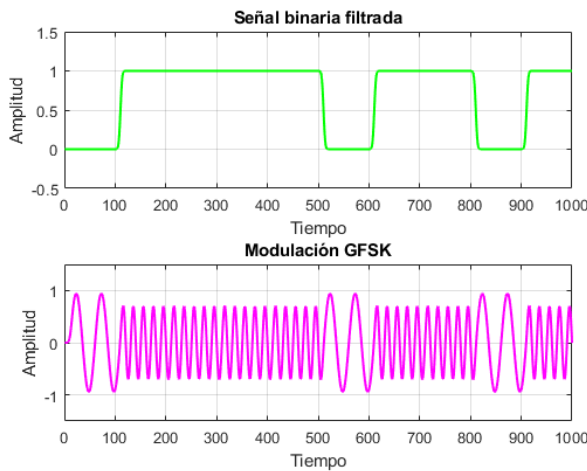


Figura 9. Modulación con GFSK.

III-E. Antena

La antena se diseña de forma correcta, como se observa en la Fig. 10. No obstante, el diseño de esta conlleva a incrementar las medidas de la PCB en 2.69 mm lo que provoca costos en la producción. Aún así, el incremento es relativamente pequeño, por lo que se considera este diseño como óptimo para la aplicación, además de las características que proporciona dicha antena resultan adecuadas para el objetivo requerido.

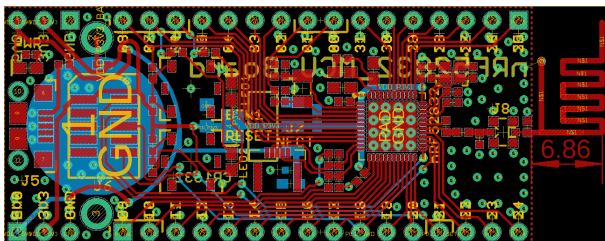


Figura 10. Antena MIFA diseñada en el PCB.

En la Fig. 11 se puede observar como irradian la antena diseñada, en donde se puede confirmar que la antena es direccional, permitiendo que la recepción de los datos se facilite. Dicha simulación se puede llevar a cabo con el software Ansys HFSS

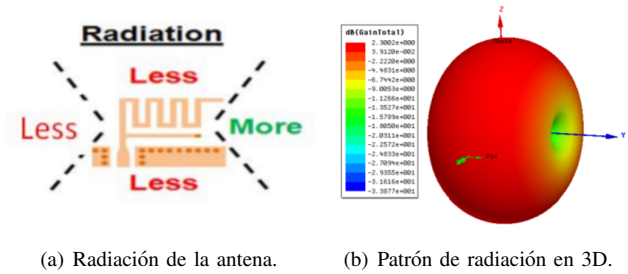


Figura 11. Radiación de la antena MIFA diseñada. Fuente: [6] [10].

En la Fig. 12 se obtiene la medición del parámetro S_{11} de la antena diseñada, donde se puede observar que operan en la banda funcional del *Bluetooth*. También posee un ancho de banda de aproximadamente 200 MHz y bajas perdidas por reflexiones, lo cual se puede apreciar que en la frecuencia central de 2.44 GHz con una pérdida de 0.6 % y en sus frecuencias de corte una pérdida del 10 %. En cuanto a la ganancia es necesario la realización de una simulación, de tal forma que se pueda adecuar a la realidad, para de esta forma obtener el ROE y la relación F/B.

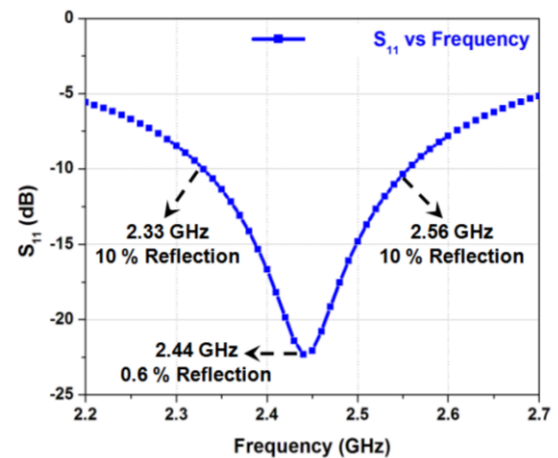


Figura 12. Parámetro S_{11} de la antena MIFA diseñada. Fuente: [6].

III-F. Canal

En Fig. 13 se observa un pequeño segmento de las afectaciones del ruido en la transmisión de bits, donde incluso para ambos casos de SNR se dan valores negativos, así como también por encima de 1 en la señal recibida por el receptor, sin embargo con el SNR de 4dB el mensaje resultante está bastante alejado de los datos reales, presentando 2 errores en tan solo un segmento de 18 bits, esto contra los 0 errores presentados en el segmento de SNR de 15dB.

Mensaje Tx	Mensaje Rx	Mensaje Tx	Mensaje Rx
0	-0.09582128284619806	0	0.4184542881880277
1	0.9903292380112165	1	0.6498734739898206
0	0.11008605550825473	0	0.3781474543893707
1	0.9497858729690585	1	1.417049848768126
1	0.8597958086759763	1	0.4182742684486527
0	0.12803289685509636	0	-0.4352071485490354
1	1.0764646976366778	1	1.3275530745234716
0	0.07066524879704855	0	0.32356543261226434
0	0.13739136015140554	0	-0.024062836591557855
0	0.03380812971661396	0	0.6351922290021934
1	0.8438046048571242	1	1.0381514518182104
1	1.0183353036390614	1	1.5783955466316606
0	0.1712344224994923	0	0.15677371339242427
0	-0.05413714424855235	0	0.17833538440434676
1	0.9483759164310177	1	0.8106483793355859
1	1.0479770207839803	1	1.2389354830377544
1	1.007366730490593	1	1.0613559733284117
0	0.11466178738625252	0	0.2421435580681593

(a) SNR=15dB.

(b) SNR=4dB.

Figura 13. Transmisión de bits con ruido.

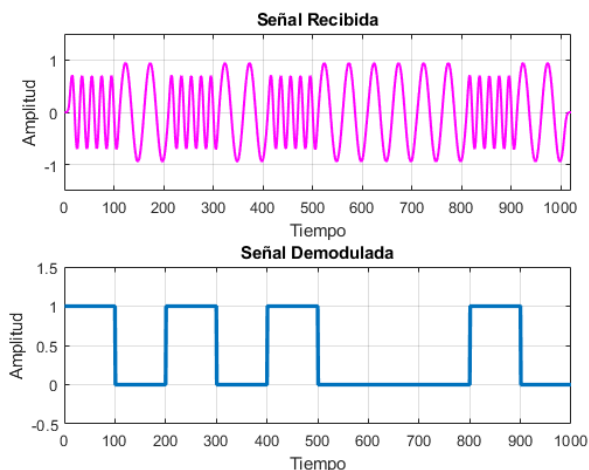


Figura 15. Proceso de demodulación GFSK.

III-G. Demodulación

En la Fig.14 se puede apreciar de color verde la señal binaria filtrada enviada con la que se puede comparar con el resultado para verificar el funcionamiento. El modulador genera la señal GFSK de color magenta de la Fig.15 que el demodulador recibe como entrada. Dicha señal es multiplicada por las señales portadoras con la frecuencia de cada nivel 1 y 0. Seguidamente se utiliza un integrador donde si las frecuencias de la señal y la portadora en un tiempo de bit son iguales generarán una componente CD en cambio si las frecuencias son diferentes el integrador devolverá un cero. Con dicho resultado se utiliza un umbral de A/2 con amplitud de 1, donde se obtiene la información transmitida por cada tiempo de bit, para finalmente representar la cadena de bits obtenida en la gráfica de color azul de la Fig.15. Finalmente se denota como la señal enviada concuerda con la información obtenida en la modulación.

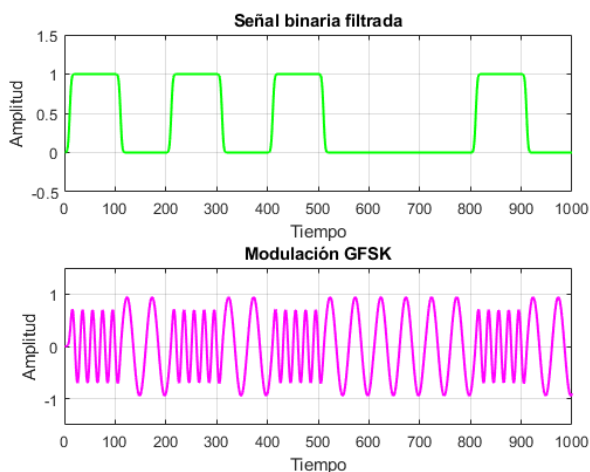


Figura 14. Proceso de modulación GFSK.

III-H. Decodificación

En el cuadro II se puede observar que al ejecutar la decodificación Hamming, se obtiene una cantidad de errores diferente dependiendo del SNR del canal, además se realiza un conteo de errores después de la corrección con el fin de poder observar el efecto de los distintos valores de SNR en la decodificación implementada.

Cuadro II
DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ERRORES.

Valor SNR (dB)	Errores encontrados	Errores después de corrección
4	70	36
8	6	0
15	0	0

REFERENCIAS

- [1] KioNetworks, "Protocolos de comunicación de redes", 2020. [Online] Disponible en: <https://www.kionetworks.com/blog/data-center/protocolos-de-comunicaci%C3%B3n-de-redes>.
- [2] S. Arriola, "Modelado de un sistema de radiofrecuencia para una aplicación médica utilizando tecnología BLE mediante un SoC nRF52832", *Instructivo Proyecto Final*, 2021.
- [3] Minitab, "El estadístico de Anderson-Darling", s.f. [Online] Disponible en: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/the-anderson-darling-statistic/>.
- [4] S. Smith, "Moving Average Filters", en *The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing, 1998, pp. 277-284.
- [5] D. Franco y F. Castillo, *Comunicaciones Inalámbricas: Bluetooth*, Pri, vol. 1, n.º 1, pp. 19-21, sep. 2009.
- [6] T. Pattanayak & G. Thanikachalam, "Antenna Design and RF Layout Guidelines", s.f. Disponible en: <https://www.cypress.com/file/136236/download>.
- [7] P. Gonzáles, "Tipos de ruido en la comunicación humana", 2018. Disponible en: <https://www.unprofesor.com/lengua-espanola/tipos-de-ruido-en-la-comunicacion-humana-2757.html>.
- [8] R. Invarato, "Código de Hamming: Detección y Corrección de Errores", 2016. [Online]. Disponible en: <https://jarroba.com/codigo-de-hamming-deteccion-y-correccion-de-errores/>.
- [9] D. Santana, "Estudio e implementación de un modem digital HFSK aplicado a comunicaciones móviles", Tesis, Instituto Tecnológico y de estudios superiores de Monterrey, México, Monterrey, 2005.
- [10] NXP Semiconductors, "BLE Antenna Design Guide", 2018. [Online] Disponible en: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10992.pdf>.