

# 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

**Resumen**—El presente informe consta del procesamiento de datos, concretamente de una prueba de ecostress, donde el principal objetivo es el acondicionamiento de la señal para ser transmitida por medio de un canal AWGN para lo cual se le aplica una transformación de analógico a digital, además de una adición extra de bits para implementar una codificación tipo Hamming en la versión 7, 4 y 15, 11. Una vez realizada la transmisión de datos el receptor es capaz de detectar y corregir errores en la secuencia de bits afectados por el ruido, en los casos en los que el SNR no supera los 10 dB. Finalmente los resultados del proceso son analizados y visualizados para determinar el nivel de confianza del sistema, obteniendo un error cuadrático medio de 1.811 latidos y un Pbias con un sesgo de 0.2667 %.

**Palabras Clave**—AWGN, BER, GFSK, Hamming, MIFA antena, SNR.

## 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, el análisis y preprocesamiento para eliminación de ruido se vuelve de suma importancia, al igual la correcta codificación y modulación con la tecnología proporcionada (BLE) para transmitir correctamente la información a través de la antena diseñada. No obstante, la señal se vuelve a distorsionar por efectos del canal, considerando ruido blanco, gaussiano y aditivo. Tras la recepción de la señal es necesaria demodularla, decodificarla y corregir errores provocados por el canal de transmisión con el fin de recuperar el mensaje o la información.

El Bluetooth ha seguido un largo camino de mejoras, versiones y estándares, donde su desarrollo y aplicación ha incrementado desde entonces hasta a la versión 4.0 conocida como BLE, la cual corrige errores de seguridad y está enfocada en aplicaciones de bajo consumo y de baja transmisión de

datos, siendo un punto importante para los dispositivos enfocados a la biomedicina, deporte, seguridad y hasta doméstica. [3] Debido a la importancia de este proceso de comunicación, en el presente trabajo se modela cada una de las etapas necesarias para la transmisión y recepción de datos sensibles como lo son los datos médicos de una prueba de ecostress. Dichas etapas corresponden a un análisis y preprocesamiento de los datos, un proceso de codificación del mensaje, una modulación como la utilizada en la tecnología BLE, una antena y canal para enviar los datos, un demodulador y decodificador que procese la señal recibida, para finalmente realizar una visualización de los resultados obtenidos y determinar la fiabilidad del proceso. Con buenos resultados este proceso se puede direccionar a un sistema empotrado de un sistema RF que haga un enlace de punto a punto que proporcione un diagnóstico adecuado.

## II. METODOLOGÍA

Se procesa y prepara una muestra de datos provenientes de una prueba de ecostress para su transmisión mediante una antena diseñada. Además, del desarrollo de la etapa de recepción de los datos.

### II-A. Análisis de Datos

El análisis de datos consiste en utilizar la estadística para determinar el promedio, desviación estándar, máximo, mínimo y la cantidad de muestras de forma que se pueda interpretar y validar los datos recopilados. Además, se realiza un test de Anderson Darling, para medir qué tan bien siguen los datos una distribución específica [4]. Para ello, se establecen 2 hipótesis:

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

Tras determinar la distribución de los datos, la aplicación de un test de Grubbs es necesario con el fin de identificar valores atípicos en el conjunto de datos, los cuales pueden conducir a interpretaciones engañosas. En adición, se realiza un diagrama de caja para visualizar de mejor forma si existen dichos valores atípicos.

## II-B. Preprocesamiento

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 [5].

## II-C. Codificación — Hamming

La información debe ser convertida para lograr una transmisión por medio del aire, para lo cual se convierte cada dato de pulso del corazón a su representación binaria, utilizando únicamente su parte entera. Una vez hecho esto, se realiza una codificación tipo Hamming para la posterior detección y corrección de errores, este método se basa en adicionar una secuencia de bits generados por la suma en modulo 2 de los bits correspondientes, tal como se muestra en la Fig. 1.

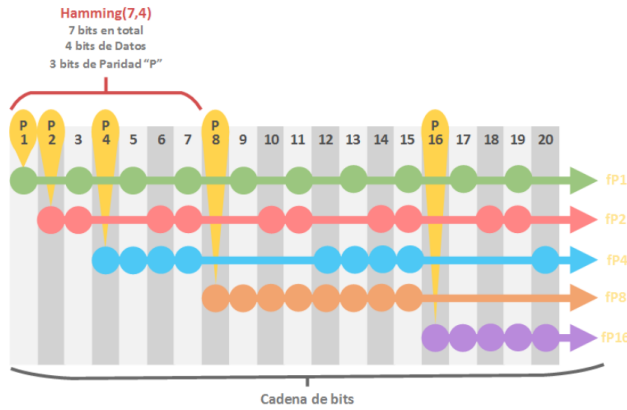


Figura 1. Codificación Hamming. Fuente [10]

## II-D. Modulación

Se realiza un bloque de modulación para la transmisión de los datos, el cual comprende una modulación GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) aplicada a la tecnología BLE. Como se observa en la Fig.2 la señal pasa primero por un filtro gaussiano el cual suaviza los bordes de la señal esto para evitar cambios bruscos en frecuencia de la señal de salida y reduce el ancho de banda necesario para la transmisión de los datos [7]. Seguidamente se aplica un modulador FSK el cual genera una señal con frecuencia  $f_0$  cuando la señal equivale a cero y una frecuencia  $f_1$  cuando la señal equivale a 1.

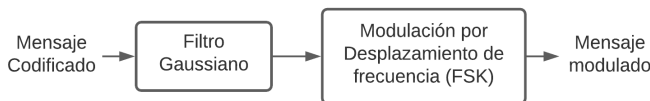


Figura 2. Modulación GFSK del mensaje.

## II-E. Antena

El diseño de la antena 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 [8], donde dicho diseño se muestra en la Fig. 3.

La antena trabaja en la banda de 2.4 GHz con un ancho de banda de aproximadamente 2.4 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  $50 \omega$ , 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. [8]

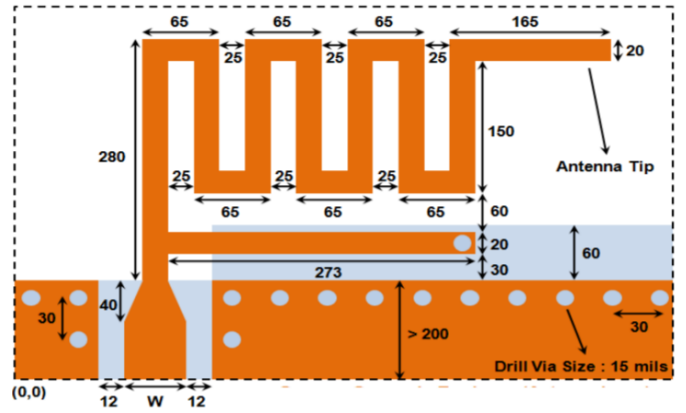


Figura 3. Diseño de la antena transmisora. Fuente: [8].

## II-F. Canal

La simulación de un canal AWGN se realiza tomando como referencia los bits transmitidos por el bloque de codificación, siendo estos 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 un ruido llamado Additive White Gaussian Noise (AWGN) el cual tiene la particularidad de tener una probabilidad de eventos con una distribución gaussiana y un promedio de valores de 0, con la misma potencia en todo el espectro de frecuencias; 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.

## II-G. Demodulación

Este bloque es el encargado de tomar la señal y demodularla para obtener la información recibida como se ve en la Fig.4. Para lograr esto se toman tramos de la señal que se multiplican por portadoras con las correspondientes frecuencias  $f_0$  y  $f_1$ , estas señales pasan por un bloque integrador encargado de

comparar la frecuencia de la señal con la portadora, lo que se reduce a un valor que es comparado con un umbral de la amplitud de la señal para determinar el bit de información.

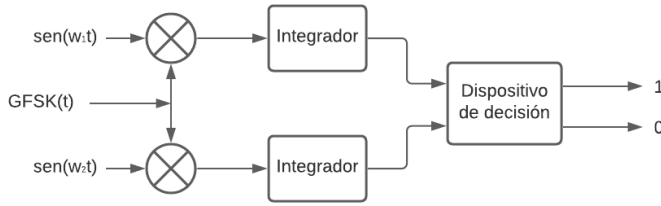


Figura 4. Diagrama de demodulación GFSK.

## II-H. Decodificación

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 observa en la Fig. 1, ya que se realizan nuevamente los cálculos de bits de paridad para compararlos con los recibidos del canal.

## II-I. Visualización

Con el fin de evaluar el proceso realizado se visualizan los datos recopilados de la prueba de ecostress y los obtenidos tras la transmisión y recepción de la señal. Además, se obtienen las gráficas de la tasa de errores por bit (BER) para la codificación Hamming (7,4) y (15,11) con el fin de comparar el desempeño de cada una. Por su enfoque médico es imprescindible conocer las zonas de entrenamiento en las que se encuentra el paciente con el fin de conocer si el paciente tiene alteraciones cardiológicas inducidas por el esfuerzo.

Por último, para validar la fiabilidad del proceso realizado se compara entre la señal real y la obtenida, mediante métricas como el error cuadrático medio (MSE) y el Pbias se define el porcentaje de error entre ambas. Para una mayor accesibilidad y lectura se almacena los resultados en un documento PDF.

## III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta los resultados obtenidos de cada sección, así como su respectivo análisis e implicaciones en el proceso.

### 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, lo cual se puede observar en el histograma de la Fig.5.

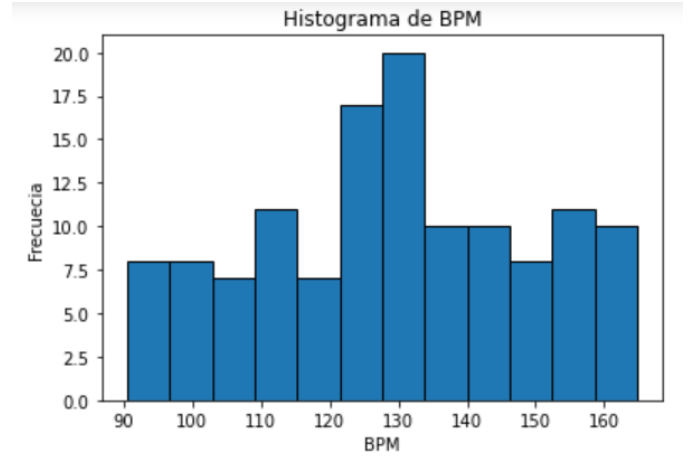


Figura 5. Histograma del conjunto de datos recopilados.

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.6, donde la señal azul corresponde a los datos originales y la señal roja corresponde a la señal filtrada. El tiempo promedio de ejecución es de 217.11 ms.

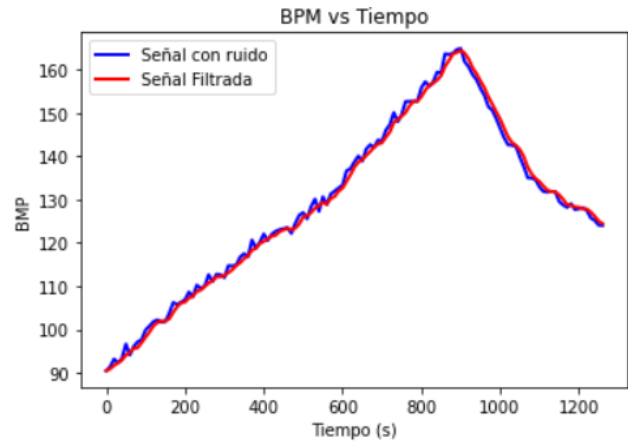


Figura 6. Señal filtrada.

### 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. 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'

### III-D. Modulación

La cadena de bits a transmitir se observa en la Fig.7 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.8. 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 [11]. 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.

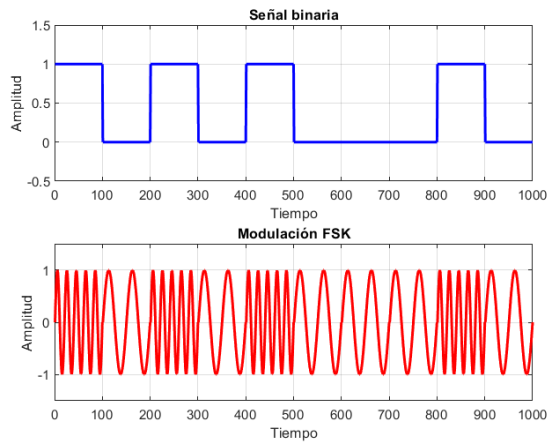


Figura 7. Datos de entrada y modulación con FSK.

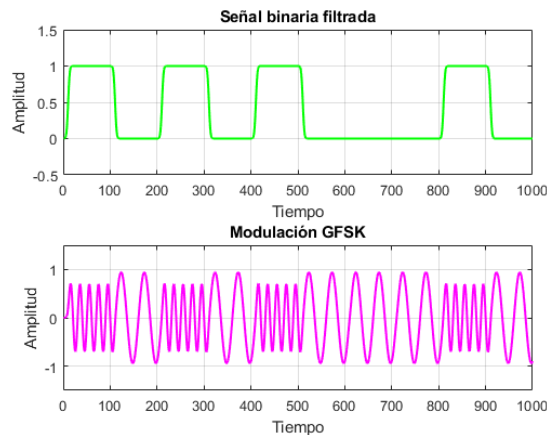


Figura 8. Modulación con GFSK.

### III-E. Antena

El diseño conlleva a incrementar las medidas de la PCB en 2.69 mm lo que provoca costos en la producción. No obstante, las características que proporciona dicha antena resultan adecuadas para el objetivo requerido, por lo que su diseño se procede a realizar en la PCB, tal y como se muestra en la Fig.9.

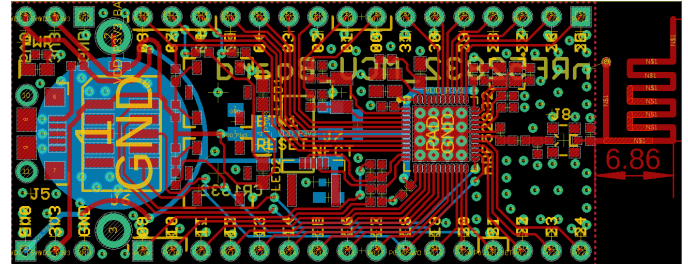
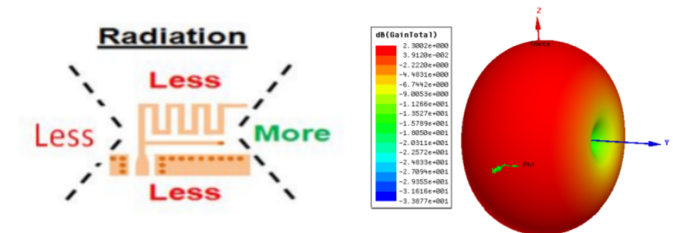


Figura 9. Antena MIFA diseñada en el PCB.

En la Fig. 10 se puede observar como irradia 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.



(a) Radiación de la antena.

(b) Patrón de radiación en 3D.

Figura 10. Radiación de la antena MIFA diseñada. Fuente: [8] [12].

En la Fig. 11 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 minimiza pérdidas 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 correspondiente para su aplicación.

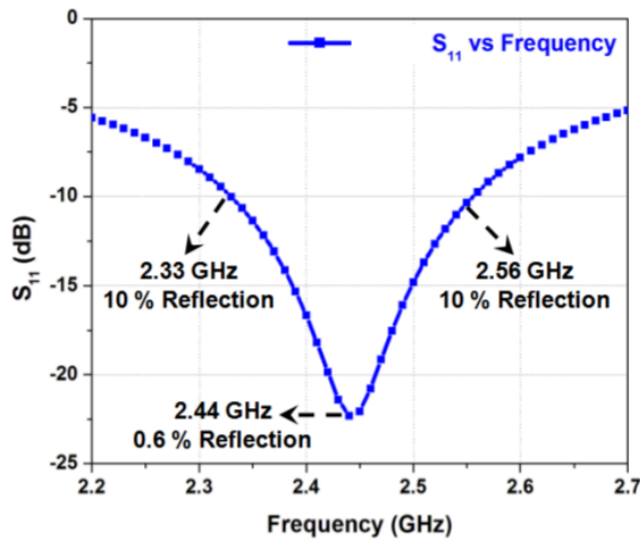


Figura 11. Parámetro  $S_{11}$  de la antena MIFA diseñada. Fuente: [8].

### III-F. Canal

Al realizar un análisis del mensaje transmitido contra el mensaje recibido es evidente la diferencia entre ellos, ya que la afectación del ruido hace que la señal percibida por el receptor tenga valores distintos de 0 y 1. Con el uso de un SNR bajo, menor a 10 dB, la afectación del ruido es bastante considerable debido que la potencia de este es muy similar a la potencia con la que transmite la señal, viéndose tan afectado que para el receptor un valor real de 0 sea percibido como 1 y viceversa.

### III-G. Demodulación

En la Fig.8 se puede observar 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.12 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.12. Finalmente se denota como la señal enviada concuerda con la información obtenida en la modulación.

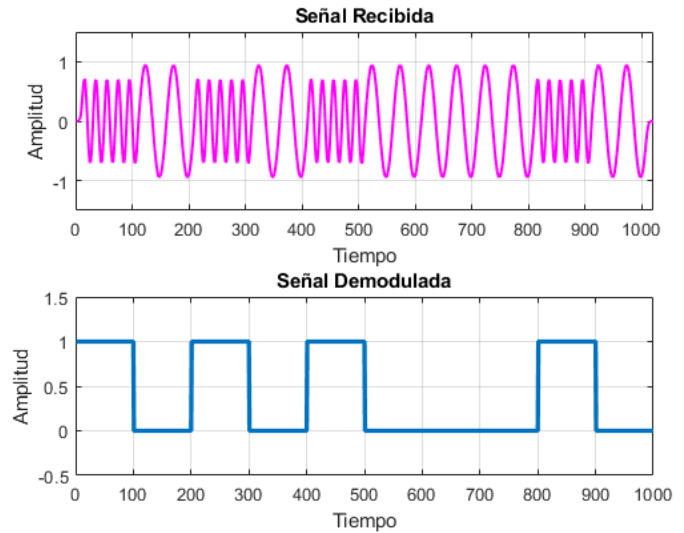


Figura 12. Proceso de demodulación GFSK.

### III-H. Decodificación

En la Fig. 13 se pueden observar las relaciones del BER con respecto al SNR al utilizar una decodificación Hamming (7,4) y (15,11), en donde se tiene que para valores de SNR inferiores a 8 dB se presenta un comportamiento similar entre los dos tipos de codificaciones Hamming. Además, para valores de SNR superiores a 10 dB se obtiene una tendencia a valores de BER menores a  $10^{-4}$  para ambos tipos de decodificación.

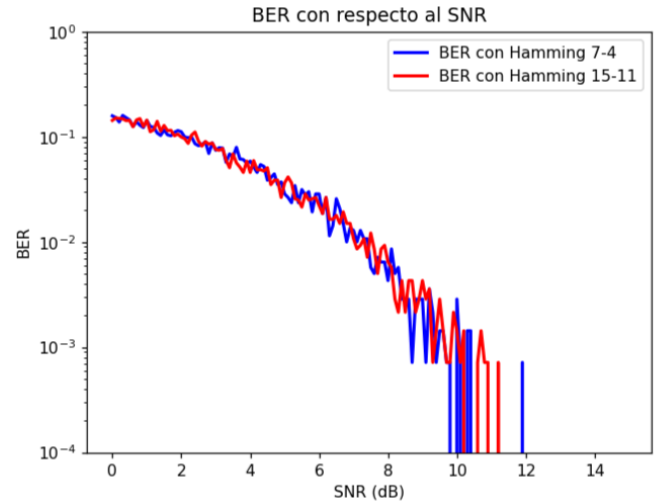


Figura 13. Gráficos del BER.

### III-I. Visualización

Tras la realizar la visualización, en la Fig.14 se realiza una comparación entre la señal original, la señal filtrada y la señal obtenida del decodificador en el receptor, donde se puede observar que el proceso es satisfactorio ya que hay gran similitud entre la señal filtrada y la decodificada.

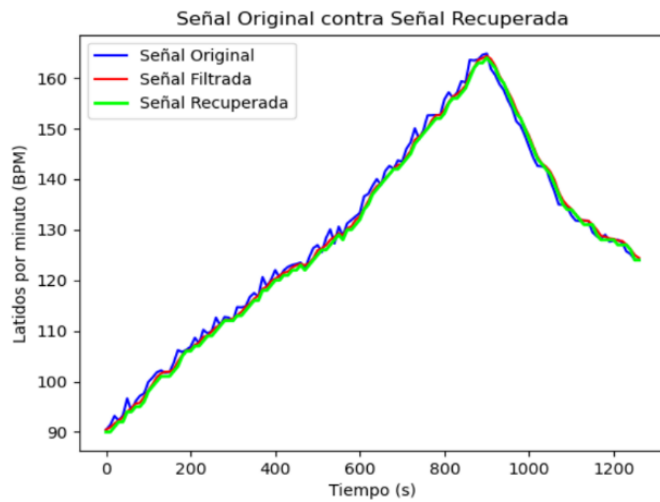


Figura 14. Señal original contra la señal obtenida.

En la Fig.15 se encuentran las zonas de entrenamiento de la prueba de Ecostress, donde se determina que el paciente se mantiene la mayor parte del tiempo en la región quema grasa y nunca llega a una condición extrema en la prueba.

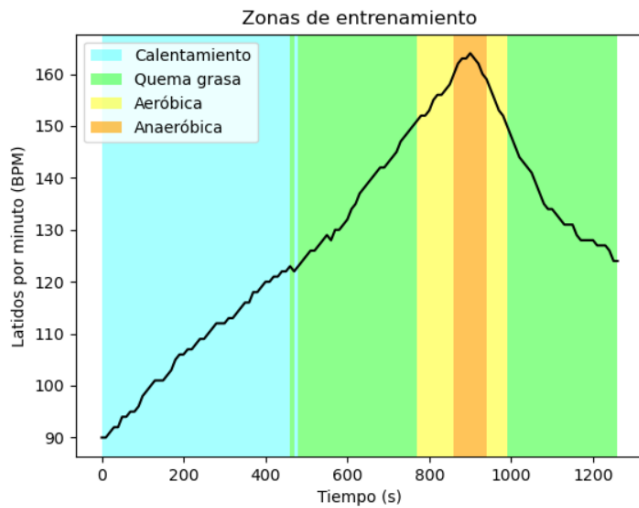


Figura 15. Zonas de Entrenamiento.

En cuanto a los resultados del BER se compara las 2 codificaciones posibles, Hamming (7,4) y (15,11), lo cual se puede observar en la Fig.13, donde la diferencia uno del otro es mínima.

Por último, para validar el proceso realizado se compara la señal decodificada con la señal real mostrado en la Fig.16, en donde como métrica de error se calcula el valor del error cuadrático medio, cuyos valor es de 1.811 latidos y el Pbias que presenta un sesgo del 0.2677 %. Dichos valores no representan una variación que implique un riesgo de un diagnóstico erróneo del paciente, ya que 2 latidos no generan

una diferencia alarmante y el pbias se encuentra cerca del óptimo que es cero [13].

Finalmente el tiempo total de ejecución de este bloque de visualización es de 1.0679 segundos.

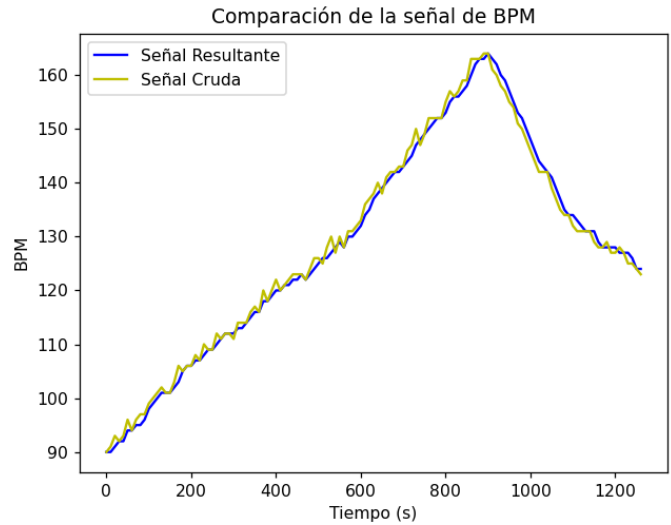


Figura 16. Comparación de la señal real con la señal decodificada.

#### IV. RECOMENDACIONES

- Llevar a cabo la simulación de la antena para validar el diseño realizado, al igual que estimar sus valores de relación frente-espalda, ROE, y ganancia.
- Estimar la gráfica del parámetro  $S_{11}$  de la antena para determinar las pérdidas por reflexiones.
- Siempre es importante hacer una revisión de las funciones que se encuentran habilitadas en cada software, con el fin de utilizar las más óptimas para el diseño del proyecto.
- Se debe escoger el método de codificación y decodificación que asegure la mayor corrección de errores, debido al nivel de seguridad que se debe tener cuando se implementa una aplicación médica.
- Si el consumo de energía no presenta un factor relevante en el sistema, es recomendable optar por un SNR de gran magnitud para de este modo asegurar una buena detección del mensaje o al menos corregir el 100 % de los errores.

#### V. CONCLUSIONES

Tras el desarrollo de la metodología y el respectivo análisis de cada sección se concluye que el proceso realizado es fiable, tanto para la transmisión como la recepción de datos.

Esto se determina gracias a las métricas de MSE y Pbias calculadas, las cuales demuestran que la desviación entre la señal cruda y la obtenida en el proceso tienen una ligera variación de máximo 2 latidos por segundo, valor que no implica un riesgo a la hora de diagnosticar el paciente ya que no significa un cambio abrupto en la cantidad de latidos. Por otro lado, el pbias indica que la tendencia promedio de los datos es óptima debido a que se aproxima a cero.



Gracias a los resultados obtenidos, se determina que llevar a cabo un filtrado Moving Average para eliminar ruido, una codificación Hamming, una modulación GFSK y una antena con diseño MIFA, es un proceso adecuado para la transmisión de una señal con datos sensibles. La señal enviada se recupera mediante un proceso inverso de dichos métodos, siendo ejecutado con la mayor precisión y eficiencia para salvaguardar la integridad de las personas. Llevando así, técnicas del área de comunicaciones eléctricas a un ámbito médico, más específicamente, en pruebas de esfuerzo de cardiología.

#### 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] L. Avila y C. Reyes, “Revisión estado del Arte de la tecnología Bluetooth”, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2017.
- [4] 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/>
- [5] S. Smith, “Moving Average Filters”, en *The Scientist & Engineer’s Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing, 1998, pp. 277-284.
- [6] D. Franco y F. Castillo, *Comunicaciones Inalámbricas: Bluetooth*, Pri, vol. 1, n.º 1, pp. 19-21, sep. 2009.
- [7] W. Novoa Rodríguez, “Modulador y Demodulador GFSK”, 2015. [Online] Disponible en: [https://prezi.com/xy7hjz\\_bdqrk/modulador-y-demodulador-gfsk/](https://prezi.com/xy7hjz_bdqrk/modulador-y-demodulador-gfsk/).
- [8] T. Pattnayak & G. Thanikachalam, “Antenna Design and RF Layout Guidelines”, s.f. Disponible en: <https://www.cypress.com/file/136236/download>.
- [9] 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>
- [10] 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/>.
- [11] D. Santana, “Estudio e implementación de un modem digital HFSK aplicado a comunicaciones móviles”, Tesis, Instituto Tecnológico y de estudios superiores de Monterrey, Monterrey, México, 2005.
- [12] NXP Semiconductors, “BLE Antenna Design Guide”, 2018. [Online] Disponible en: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10992.pdf>.
- [13] M. López, “Calibración del modelo para el transporte de contaminantes en los sedimentos en la cuenca Jequetepeque, Cajamarca, Perú”, Tesis, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2012.