

Avance 1 Modelado de un sistema RF con corrección y detección de errores para una aplicación médica mediante un SoC nRF52832 Nordic Semiconductor

Escuela de Ingeniería en Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica

,
Jeremy Córdoba , jeremycw36@estudiantec.cr

,
Ivannia Fernández, ivanniaf6@estudiantec.cr

,
Marco Alfaro Bolaños, marcoil@estudiantec.cr

,
Sharon Valverde Jiménez, sharonvalverde@estudiantec.cr

Resumen—En el presente artículo se presentan los avances del proyecto del sistema RF para aplicación médica usando el SoC nRF52832, se desarrolló al 100 % el apartado del transmisor, el 50 % del modelado del canal y el 25 % del receptor, los avances se desarrollaron usando distintas herramientas como python, eagle y octave/matlab.

Index Terms—SoC, Modulación, Demodulación, Codificación, Decodificación, Canal, Filtro, WMA, DSP, Hamming, BLE.

I. INTRODUCCIÓN

En este proyecto pionero, se exploran algoritmos de vanguardia para la detección y corrección de errores, así como técnicas de modulación y de demodulación, y codificación y decodificación. Todo esto se integra utilizando hardware de última generación y e ingeniería de software.

El objetivo primordial es el desarrollo de un sistema de monitoreo cardíaco altamente preciso. En un escenario donde la exactitud es crucial para la salud y el bienestar del paciente. Por lo tanto, se requieren habilidades en programación y diseño de hardware para lograr un sistema que cumpla con los estándares más exigentes de precisión y confiabilidad.

A través de este proyecto, se presenta una síntesis entre la tecnología y los datos analógicos. Los avances alcanzados representan el aumento de la capacidad del sistema en desarrollo de monitorear la salud cardíaca de manera efectiva y precisa. Estos logros se presentarán detalladamente en las secciones siguientes, destacando los resultados obtenidos.

II. AVANCES

II-A. Requerimientos para el módulo transmisor (TX)

En este apartado se resume el desarrollo del transmisor, el cual tiene la capacidad de capturar la información de latidos

por minuto (bpm) que provienen de un monitor de ritmo cardíaco, los datos son tomados mediante un protocolo de comunicación UART.

II-A1. Bloque latidos por minuto/Prueba Ecostress: Se realiza una prueba de normalidad de Anderson-Darling para obtener los valores p, la desviación estándar de los datos y el promedio [1], la prueba hipótesis planteada es que los datos presentan una distribución normal, esto se debe a que los datos tomados desde la maquina y transmitidos mediante UART pueden tener un poco de ruido el cuál es aleatorio también.

Haciendo uso de python e implementando la prueba de Anderson-Darling se obtiene que los valores p son mayores que los valores de significancia por defecto de 0.15, 0.1, 0.05, 0.025 y 0.01, esto sugiere que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de que los datos de latidos por minuto no siguen una distribución normal. Los datos se pueden apreciar en el repositorio establecido para hacer seguimiento del proyecto. Además, se obtuvo una desviación estándar de 19.72 y un promedio de 129.15.

p-value :[0,559, 0,637, 0,764, 0,891, 1,06]

Luego, usando python nuevamente, se elaboro un programa para graficar un histograma de los datos, el histograma se puede apreciar en la siguiente figura.

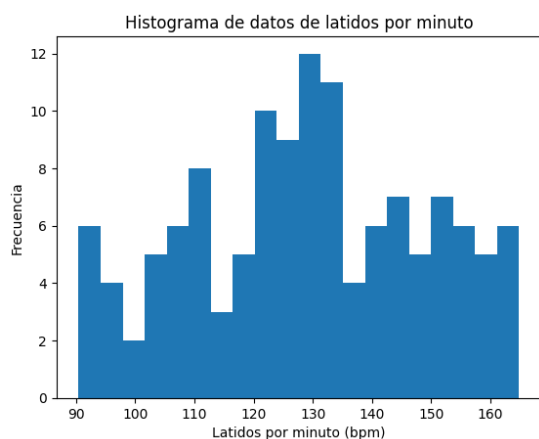


Figura 1. Histograma de los datos de latidos por minuto

Según la figura 1 se puede apreciar que los datos muestran una distribución de asimetría negativa. Y luego para determinar si existe algún dato atípico dentro del conjunto de datos se implementó un método llamado Box Plot junto con el test de Grubbs [2], afortunadamente dentro de los datos proporcionados para el proyecto no existe ningún dato atípico según los resultados del programa, los resultados se muestran a continuación.

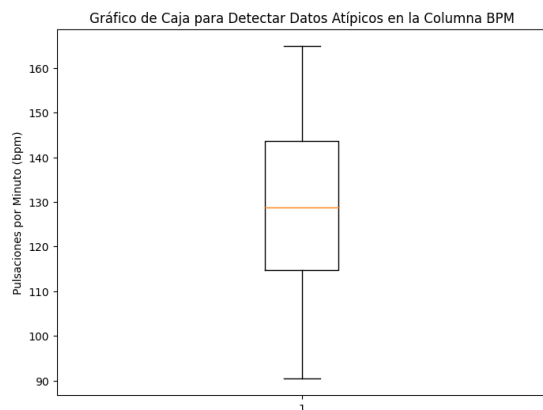


Figura 2. Gráfico de caja para determinar datos atípicos

Un dato atípico puede mover de manera muy significativa la media de los datos, sin embargo, en la figura 3 se puede apreciar que la media se mantiene en el centro, por lo que se puede concluir que no hay ningún dato atípico dentro del conjunto de datos.

II-A2. Bloque procesamiento: En el siguiente apartado se procede a investigar técnicas que permitan procesar la señal mediante algún tipo de filtro, en este caso se decidió usar el tipo de filtro simple moving average (SMA), específicamente el tipo de weighted moving average (WMA) [3], de igual forma se analizó el filtro Kalman para un posible uso dentro de la aplicación pero se descartó debido a que el primer filtro es de implementación más sencilla [4]. A continuación, se muestra una tabla tipo trade-off que hace comparación de ambos filtros.

Criterio Técnico	Media Móvil Simple (SMA)	Filtro de Kalman
Facilidad de Implementación	Alta	Baja
Efectividad en la Filtración	Media	Alta
Requerimientos de Recursos	Bajos	Altos
Adaptabilidad a Cambios	Baja	Alta
Complejidad de Entendimiento	Baja	Alta

Tabla I

COMPARACIÓN ENTRE MEDIA MÓVIL SIMPLE Y FILTRO DE KALMAN.

Luego de la implementación del filtro se graficaron los datos resultantes y se compararon con los datos sin filtro para poder observar su funcionamiento, el gráfico se muestra a continuación.

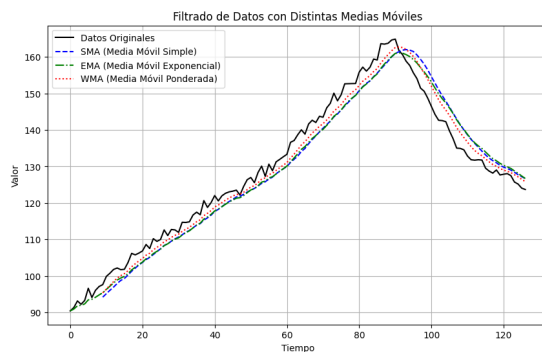


Figura 3. Comparación de datos filtrados y sin filtrar usando SMA

Luego, se analizó el promedio de tiempo de ejecución del programa ejecutado 200 veces para poder medir el tiempo de respuesta del sistema y determinar si la implementación es lo suficientemente rápida, los resultados fueron que el filtro WMA tuvo un tiempo de ejecución de $678,75\mu s$.

Ahora es necesario establecer una estrategia para poder implementar el código desarrollado hasta ahora en c++ porque es el lenguaje de programación en el cual funciona el SoC usado en la aplicación, la estrategia elaborada es la siguiente.

- Comprender el código de python.
- Revisar y adaptar las bibliotecas .
- Transcribir el código C++.
- Optimizar el código.
- Pruebas y depuración.
- Integración con el proyecto SoC nRF52832.

Además, el SDK (software developer kit) proporcionado por Nordic semiconductor provee un ambiente de desarrollo con ejemplos, bibliotecas, protocolos, compilers y todo lo necesario para poder adaptar el código python al microcontrolador objetivo [5].

Finalmente para este apartado se investigó el coprocesador DSP que posee el integrado usado para la aplicación con el fin de determinar las ventajas que ofrece. La arquitectura que presenta el DSP es el siguiente.

- Pipeline profundo: permite ejecutar múltiples instrucciones al mismo tiempo lo que aumenta la velocidad de procesamiento.

- Unidades de procesamiento especializadas: diseñadas para realizar operaciones matemáticas y de procesamiento de señales de manera eficiente.
- Memoria especializada: RAM y ROM optimizadas.
- Instrucciones SIMD: operaciones en paralelo sobre múltiples datos simultáneamente.

Algunas ventajas del DSP son las siguientes.

- Eficiencia de procesamiento de señales.
- Rendimiento optimizado.
- Bajo consumo de energía.
- Integración con otros componentes del sistema.

En conclusión los DSPs ofrecen la capacidad de procesamiento y uso eficiente de potencia [6], lo cuál, es un aspecto importante que se busca en las aplicaciones médicas.

II-A3. Bloque codificación: En esta sección se realizó la codificación de la señal ya filtrada proveniente del bloque de procesamiento para esto se utilizó un código en python que utiliza codificación Hamming de dos formas distintas (7,4) y (15,11). Con esto se creó una función en Python para medir el tiempo de ejecución para ambas codificaciones.

```

Tiempo promedio de codificación de Hamming (7,4): 0.000844120979309082 segundos
Tiempo promedio de codificación de Hamming (15,11): 0.0012297892570495605 segundos
Codificación con Hamming (7,4)
BPM          BPM Codificado
0            NaN [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
1            NaN [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
2            NaN [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
3            NaN [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
4            NaN [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
...
122 128.315293 [1, 1, 1, 0, 0, 0, 0]
123 127.718945 [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
124 127.134278 [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
125 126.464762 [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
126 125.826872 [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]

[127 rows x 2 columns]
Codificación con Hamming (15,11)
BPM          BPM Codificado
0            NaN [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
1            NaN [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
2            NaN [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
3            NaN [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
4            NaN [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
...
122 128.315293 [1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
123 127.718945 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
124 127.134278 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
125 126.464762 [1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0]
126 125.826872 [0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0]

```

Figura 4. Resultados de codificación Hamming (7,4) y Hamming (15,11) con sus respectivos tiempos de ejecución.

Con los resultados mostrados en la Fig. 4 de la codificación con ambos tipos se realizó una comparación para ver las desventajas y las ventajas de cada uno esta se muestra en la Tabla II.

Seguidamente se realizó un análisis para decidir si es necesario un coprocesador DSP para acelerar el proceso de codificación, para esto se deben tomar ciertas cosas en consideración antes de tomar la decisión, estos aspectos son los siguientes:

- Rendimiento de cálculo: Los coprocesadores DSP están diseñados más específicamente para realizar operaciones matemáticas y aritméticas de una forma más eficiente, lo que puede mejorar el rendimiento al compararlo con

Hamming (7,4)	Hamming (15,11)
Agrega menos bits ya que agrega únicamente 3 a los 4 iniciales por lo que requiere un ancho de banda menor	Agrega más bits ya que a los 11 iniciales se les agrega 4 más por lo tanto necesita un ancho de banda mayor
Tiene una estructura más simple por lo que es más fácil de implementar y a su vez de entender	Tiene una estructura mucho más compleja por lo que es más difícil de implementar y de entender
Tiene una menor capacidad para detectar y corregir errores esto ya que puede hacerlo solo con un error de bit	Es capaz de detectar y corregir errores en múltiples bits ya que tiene mayor número de bits de paridad
No es tan fiable ya que solo es capaz de corregir un error en un solo bit	Es más fiable ya que es capaz de detectar y corregir más errores
Tiene un tiempo de ejecución mucho más bajo	Tiene un tiempo de ejecución más alto

Tabla II

COMPARACIÓN ENTRE CODIFICACIÓN HAMMING (7,4) Y (15,11).

la ejecución en el procesador principal. Si el proceso de codificación de Hamming involucra una gran cantidad de cálculos, como operaciones de suma, multiplicación y comparación, es probable que un coprocesador DSP pueda acelerar el proceso.

- Disponibilidad y capacidad del coprocesador DSP: Es importante verificar si este coprocesador es capaz de ejecutar las operaciones necesarias para la codificación de Hamming de manera eficiente. Además de la capacidad de procesamiento del coprocesador DSP y la compatibilidad con las operaciones requeridas.
- Uso de recursos y energía: Se debe tomar en cuenta también el consumo de recursos y energía con el DSP en comparación con la ejecución en el procesador principal. Esto ya que es para garantizar que no se comprometan otros aspectos del sistema.

Por lo tanto dependiendo del código Hamming que se desee utilizar es mejor o no implementar este coprocesador, en el caso de que se escoja el hamming (7,4) no sería tan necesario ya que los cálculos involucrados son bastante simples por lo que no hace tanta falta ya que se puede ejecutar bien en el procesador principal, ahora si se usa el hamming (15,11) este al ser mucho más grande y complejo si requiere operaciones matemáticas mucho más complejas por lo que para este si es necesario este coprocesador DSP ya que ayudaría en gran manera a aumentar el rendimiento, y en este caso como se discutió anteriormente al ser datos médicos se prefiere la fiabilidad del hamming (15,11) por lo tanto si es mejor implementar el coprocesador.

II-A4. Bloque modulación: Para esta sección, a diferencia de las anteriores no fue necesario desarrollar el esquema de modulación en Python debido a que el SoC nRF52832 posee un sistema de modulación establecido mediante una unidad de hardware, sin embargo se desarrolló el esquema de modulación en alto nivel mediante el software Matlab con la finalidad de comprender el funcionamiento de dicho esquema. Se desarrolló un bloque que se encargue de aplicar el proceso de modulación utilizado por la tecnología BLE (Bluetooth Low Energy) a la información proveniente del bloque de Codificación. Este tipo de modulación es utilizada para aplicaciones de bajo consumo y con una baja tasa de transferencia de datos. La modulación que utilizda para BLE

es la GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) la cual es una ligera variante con respecto a la FSK (Frequency Shift Keying), de forma que a esta ultima se le aplica un filtro gaussiano al cambio de frecuencia con la finalidad de suavizar las transiciones entre símbolos, teniendo como consecuencia un mejor aprovechamiento del ancho de banda a la vez que se mejora la resistencia a interferencias y atenuaciones del canal. A continuación se muestra el script desarrollado en Matlab que muestra la modulación GFSK para ser utilizada en BLE, para este caso se utilizó una secuencia de datos tomada de las obtenidas mediante la codificación de Hamming. En el script primeramente se definen variables necesarias como el tiempo de bit, frecuencia de muestreo, las frecuencias de las portadoras para cuando hay un 1 y para cuando hay un 0, además de un factor de roll-off para el filtro gaussiano. Además, se hace la conversión de la sucesión binaria a una señal binaria NRZ unipolar, la cual posteriormente se modulará para obtener la señal FSK, a la cual a la vez se aplica el filtro gaussiano para obtener finalmente esta señal suavizada denominada GFSK. Finalmente los resultados se pueden observar de la siguiente forma:

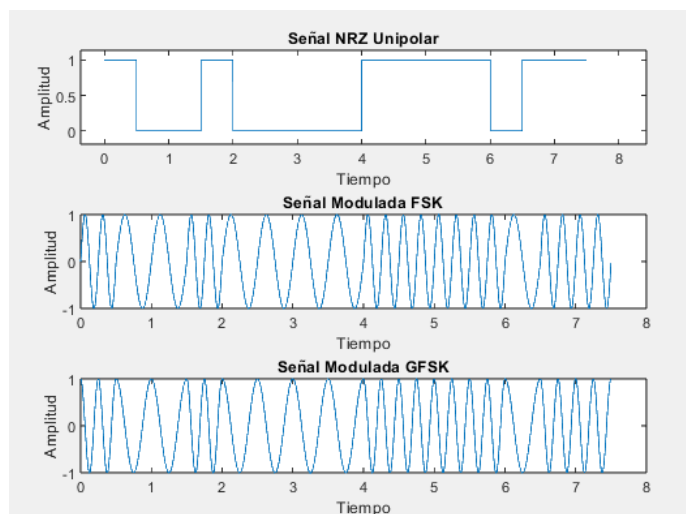


Figura 5. Resultados de la modulación para la trama de bits 100100001111011.

Finalmente como ultimo requisito se implementó un contador de tiempo que permitiera observar en la terminal el tiempo de ejecución del proceso de forma que se obtuvo un resultado de 0.0025 segundos

II-A5. Bloque antena: En este apartado se analizará los requerimientos correspondientes al desarrollo del bloque de la antena. Este bloque debe tener como función enviar el mensaje de información modulado hacia el receptor mediante un canal de comunicación.

La implementación del bloque Antena deberá ser basado sobre el PCB en Eagle proporcionado y la elección de una topología para la antena.

El PCB en cuestión está compuesto de dos capas (Top y Bottom), utiliza vías a través de agujero (through-hole vias) las cuales conectan las señales eléctricas entre las capas, las dimensiones de los pads, cables y demás.

Además, en el PCB hay un elemento llamado MM8130-2600 el cual es un componente diseñado para conectar dispositivos en aplicaciones de RF, operando en un rango de frecuencias de 0 Hz a 6 GHz y con una impedancia de 50 ohmios. Es comúnmente utilizado en conexiones de RF de alta frecuencia y está construido para montaje superficial. [7]

En cuanto al desarrollo de la antena en Eagle, se debe considerar las bandas de funcionamiento de la tecnología BLE. Estas operan en un espectro que va de 2400 Hz a 2483.5 MHz, dividiéndose en 40 canales de 2 MHz de separación cada uno.

Mientras que las topologías que se considerarán son: Antena Monopolo en Forma de L y Antena Microstrip Circularmente Polarizada.

La Antena Monopolo en Forma de L tiene un patrón de radiación omnidireccional y se puede ajustar su resonancia variando la longitud y el ancho del conductor. Mientras que la Antena Microstrip Circularmente Polarizada ofrece una recepción mejorada debido a su capacidad de recibir señales de cualquier polarización, lo que es útil en aplicaciones móviles donde la orientación del dispositivo es variable. [8]

Para comparar estas topologías y decidir cuál es más adecuada para la implementación, se creó una matriz de trade-off:

Tabla III
COMPARACIÓN ENTRE ANTENA MONOPOLO EN FORMA DE L Y ANTENA MICROSTRIP CIRCULARMENTE POLARIZADA [9]

Métricas de Diseño	Antena Monopolo en Forma de L	Antena Microstrip Circularmente Polarizada
Tamaño	Pequeño	Grande
Ancho de Banda	Estrecho	Amplio
Eficiencia de Radiación	Moderada	Alta
Complejidad de Diseño y Fabricación	Baja	Alta
Ganancia	Baja	Moderada a Alta
Costo	Bajo	Moderado

Por lo tanto, la ventaja de la Antena Microstrip Circularmente Polarizada es que ofrece un ancho de banda más amplio y una mejor recepción de la señal debido a su capacidad para recibir señales de múltiples polarizaciones, sin embargo, suele ocupar más espacio en el PCB y puede ser más costosa y compleja de diseñar y fabricar. Mientras que la Antena Monopolo en Forma de L es más compacta, es más relativamente fácil de diseñar e integrar en un PCB con restricciones de espacio, sin embargo, la ganancia y el ancho de banda pueden estar limitados.

Por ende, considerando todos los aspectos anteriores se escogió la Antena Monopolo en Forma de L debido a que es menos sensible a las variaciones de la proximidad de otros componentes o capas del PCB, simplificando el diseño, e implica menos parámetros de ajuste críticos para su diseño.

En la siguiente imagen se muestra una implementación inicial del bloque antena en el PCB dado.

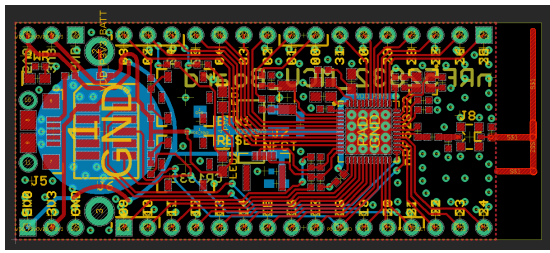


Figura 6. Antena monopolo en forma de L implementada en el PCB dado.

Los patrones de radiación de una antena monopolo en forma de L generalmente muestran un comportamiento omnidireccional en el plano horizontal (perpendicular al monopolo), lo que significa que la antena irradia energía de manera uniforme en todas las direcciones de ese plano. En el plano vertical (a lo largo del monopolo), el patrón tiende a ser más direccional, con menos radiación hacia arriba o hacia abajo directamente, debido a la presencia del plano de tierra. [8]

En cuanto al software de simulación para antenas, los programas mencionados como CST Studio Suite, ANSYS HFSS, y FEKO son adecuados para simular antenas monopolo. Estos programas permiten al usuario ingresar las dimensiones físicas y materiales de la antena y del entorno circundante para calcular el patrón de radiación, la impedancia de entrada y otros parámetros importantes.

Importancia del Plano a Tierra El plano a tierra es crucial en el diseño de antenas por varias razones. Primero, actúa como un reflector que ayuda a dirigir la radiación hacia adelante, mejorando así la eficiencia de la antena. También ayuda a establecer una impedancia de entrada predecible y mejora el ancho de banda de la antena. Además, el plano a tierra minimiza las interferencias y el acoplamiento entre la antena y otros componentes del circuito. En el diseño de PCBs para RF, la implementación adecuada del plano a tierra es esencial para el rendimiento óptimo del sistema de comunicación. [10]

Interpretación de las Mediciones del Parámetro S11 El parámetro S11 o coeficiente de reflexión indica cuánta de la potencia enviada a la antena es reflejada de vuelta debido a desajustes de impedancia. Un valor ideal de S11 en la frecuencia de operación de la antena sería de -10 dB o menos, lo que indica que la mayor parte de la potencia es aceptada por la antena y no reflejada. Las mediciones del S11 se realizan con un analizador vectorial de redes (VNA), y una curva típica mostraría un mínimo profundo en la frecuencia de resonancia, evidenciando una buena adaptación de impedancia. [10]

Implicaciones de Sustratos Flexibles en el Patrón de Radiación

1. Variación de la Impedancia de la Antena: El uso de sustratos flexibles puede llevar a variaciones en la impedancia de entrada de la antena debido a las deformaciones físicas. [11]
2. Desviación del Patrón de Radiación: La flexión del sustrato puede causar desviaciones en el patrón de radiación esperado. En antenas con sustratos flexibles, el patrón puede variar dependiendo del grado y la dirección de la flexión. Esto podría ser especialmente relevante en

aplicaciones donde la orientación precisa del patrón de radiación es crítica. [11]

3. Efectos sobre la Ganancia y la Direccionalidad: La ganancia y la direccionalidad de la antena también pueden verse afectadas por el uso de sustratos flexibles. La deformación del sustrato puede conducir a una distribución no uniforme de los campos electromagnéticos, lo que potencialmente reduce la ganancia y altera la direccionalidad de la antena. [11]

Por otra parte, la elección del sustrato para el desarrollo de antenas microstrip tiene un impacto significativo en sus propiedades de rendimiento, especialmente en aplicaciones de alta frecuencia como la tecnología BLE. Los sustratos más comunes son FR-4 y Rogers Materials, cada uno con sus características distintivas.

1. Constante Dieléctrica (ϵ_r): FR-4 generalmente tiene una constante dieléctrica en el rango de 4.0 a 4.5 mientras que Rogers Materials ofrece una gama de constantes dieléctricas, muchas de las cuales son más bajas que las de FR-4, permitiendo una miniaturización de la antena. [12]
2. Pérdida Dieléctrica ($\tan\delta$): FR-4 posee un factor de pérdida dieléctrica relativamente alto, lo que puede no ser ideal para aplicaciones de alta frecuencia debido a una mayor atenuación de la señal. Mientras que Rogers Materials presenta bajos factores de pérdida dieléctrica, lo que se traduce en un mejor rendimiento para señales de alta frecuencia al minimizar la atenuación. [13]
3. Estabilidad Térmica: FR-4 puede experimentar variaciones en su constante dieléctrica con cambios de temperatura, afectando la consistencia del rendimiento de la antena. Mientras que Rogers Materials ofrece una mejor estabilidad térmica, con variaciones mínimas en la constante dieléctrica y el factor de pérdida a lo largo de un amplio rango de temperaturas. **Costo: FR-4 es considerablemente más económico que los materiales especializados mientras que Rogers Materials tienden a ser más costosos.**

Elección de Sustrato para Tecnología BLE Para aplicaciones BLE, que operan en la banda de 2.4 GHz, la elección entre FR-4 y Rogers dependerá de varios factores:

1. Costo vs. Rendimiento: Si el presupuesto es limitado y el rendimiento deseado está dentro de las capacidades del FR-4, este puede ser suficiente. Sin embargo, para aplicaciones de alta gama donde el rendimiento y la fiabilidad de la señal son críticos, Rogers puede ser la mejor elección. [12]
2. Tamaño de la Antena: Para diseños que requieren miniaturización o están restringidos por espacio, Rogers con su menor constante dieléctrica permite antenas más pequeñas. [13]
3. Estabilidad Ambiental: En ambientes con variaciones significativas de temperatura o para dispositivos que requieren una precisión constante, Rogers ofrece una mejor estabilidad térmica. [13]

II-B. Requerimientos del canal

Este bloque tiene como función principal modelar de una manera aproximada el canal de comunicación entre el transmisor y el receptor, esto se debe a que no se cuenta con un modelo preestablecido del canal.

II-B1. Bloque canal: El código en C que se proporciona genera muestras de ruido blanco gaussiano utilizando el método de transformación de Box-Muller. En lugar de depender de la función rand() para generar números aleatorios, este código utiliza una implementación propia para garantizar una distribución normal estándar adecuada. Además, en lugar de la función cos(), se utilizan funciones matemáticas básicas para calcular los valores necesarios. El programa también proporciona una visualización de la frecuencia de ocurrencia del ruido en diferentes intervalos, lo que permite su representación gráfica mediante un archivo de salida

Ahora, para poder modelar un canal con AWGN se usa la transformada de Box-muller, el cual es un método que se utiliza para obtener pares de números aleatorios independientes que tengan una distribución normal con media de cero y varianza de uno [14]. Luego, desarrollando el código e implementándolo en python, se graficaron los resultados, los cuales se muestran a continuación.

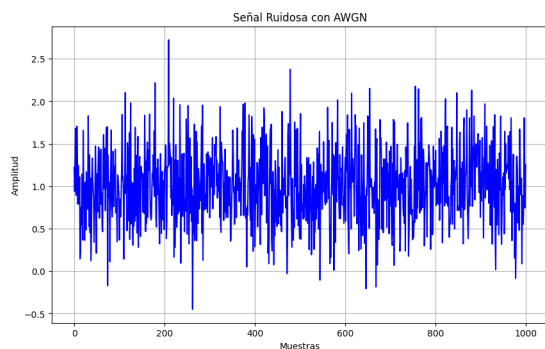


Figura 7. Canal con ruido modelando con AWGN usando box-muller

Cabe destacar, que garantizar un parametro adecuado de aleatoriedad en los datos generados por cada ejecución, se hace uso de una semilla dentro del código [15].

Un aspecto a considerar en la transmisión de datos usando tecnología BLE es el fading, donde el fading es la atenuación o variación aleatoria de la amplitud, fase, o tiempo de la señal en el momento que se esta propagando el tiempo y la distancia, esto se debe principalmente a las condiciones atmosféricas y de propagación, así como los obstáculos en el entorno de transmisión [16]. Al ser una aplicación médica es necesario que el dispositivo funcione de forma casi perfecta, por lo que hay que establecer estrategias que permitan superar los retos que presenta el proyecto.

II-C. Requerimientos para el módulo receptor (RX)

II-C1. Bloque demodulador: Para esta sección, al igual que para el bloque modulador no fue necesario desarrollar

el esquema de demodulación en Python debido a que el SoC nRF52832 también posee un sistema de demodulación establecido mediante una una unidad de hardware, de igual forma se desarrolló el esquema en alto nivel mediante el Matlab con la finalidad de comprender el funcionamiento de dicho esquema. Para la sección de la demodulación se utilizó nuevamente la sección de código utilizada en la modulación para obtener la señal modulada y a partir de ahí, realizar el proceso de demodulación de la señal GFSK en el receptor, de forma que nos permita obtener nuevamente la señal binaria NRZ unipolar, para finalmente proceder a la decodificación y obtener la trama de bits original que fue enviada por el transmisor. Tras la ejecución la cual tomó un tiempo de 0.003858 segundos se obtuvieron los siguientes resultados:

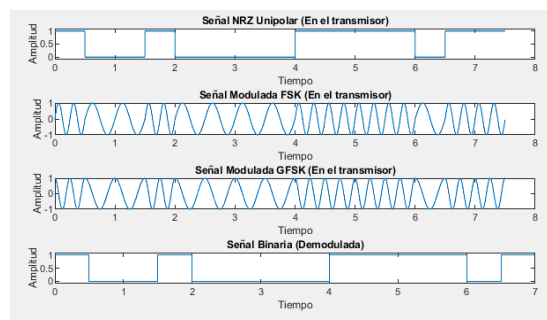


Figura 8. Resultados de la demodulación de la trama de bits 100100001111011

Se puede denotar que hay una consistencia en las señales, además se imprimió la trama de bits en el receptor para compararla con la trama de bits transmitida y se obtuvo el resultado correcto como se observa a continuación :

```
Command Window
Trama de bits obtenida en el receptor:
1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1
```

Figura 9. Trama de bits a la salida del demodulador

III. CONCLUSIONES

El diseño de un proceso de demodulación preciso y eficiente es crucial para recuperar la señal transmitida con la menor cantidad de errores posible. Mediante el uso de herramientas como Matlab, se logró implementar un proceso de demodulación basado en el esquema GFSK que permitió recuperar la señal original con alta precisión.

REFERENCIAS

- [1] Interpretar todos los estadísticos y gráficas para Prueba de normalidad - Minitab, "(C) Minitab, LLC. All Rights Reserved," <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/normality-test/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/>, 2024.
- [2] Identificar valores atípicos - Minitab, "(C) Minitab, LLC. All Rights Reserved," <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/data-concepts/identifying-outliers/>, 2024.
- [3] A. I. Moreno. (2021, diciembre 15) Moving averages with python - towards data science. Medium. [Online]. Available: <https://towardsdatascience.com/moving-averages-in-python-16170e20f6c>
- [4] A. Becker. (s. f.) Online kalman filter tutorial. Kalman Filter. [Online]. Available: https://www.kalmanfilter.net/ES/default_es.aspx

- [5] (s. f.) Nordic semiconductor infocenter. https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fstruct_nrf52%2Fstruct%2Fnrf52832.html.
- [6] L. Escobar Salguero, "Arquitecturas de dsp's familia tms320 y el tms320c50," Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, junio 2000.
- [7] M. Electronics. Conn swf rcpt str 50 ohm smd. DigiKey. [Online]. Available: <https://www.digikey.com>
- [8] A. Theory. (2011) The monopole antenna. [Online]. Available: <https://www.antenna-theory.com/antennas/monopole.php>
- [9] Y. L. Li Sun, Gang Ou and S. Tan. (2013) Axial ratio bandwidth of a circularly polarized microstrip antenna. intechopen. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/43412>
- [10] Z. Peterson. (2022, December) Do all antennas need a ground plane? | rf design. Altium. [Online]. Available: <https://resources.altium.com/>
- [11] The impact of bending on radiation characteristics of polymer-based flexible antennas for general iot applications. Applied Sciences. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/>
- [12] E. Y. H. Yigit and R. Unal, "Bandwidth improvement in bow-tie microstrip antennas: The effect of substrate type and design dimensions," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 2, p. 504, 2020.
- [13] N. Nikolova. (2020) Lecture 20: Microstrip antennas. McMaster University. [Online]. Available: https://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna_dload/current_lectures/L20_Mstrip1.pdf
- [14] Xaviercanche, "GitHub - xaviercanche/AlgoritmoBoxMuller: Simulación de variables aleatorias con distribución normal estándar (Algoritmo Box-Müller)," <https://github.com/xaviercanche/AlgoritmoBoxMuller>, s. f.
- [15] GfG. (2022, septiembre 13) random.seed() in python. GeeksforGeeks. [Online]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/random-seed-in-python/>
- [16] U. M. Qureshi, Z. Umair, and G. P. Hancke, "Evaluating the implications of varying Bluetooth Low Energy (BLE) transmission power levels on wireless indoor localization accuracy and precision," *Sensors (Basel)*, vol. 19, no. 15, p. 3282, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s19153282>