

SISTEMA DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN BIOSEÑALES CARDIACAS MEDIANTE RF

CARDIAC BIOSIGNAL TRANSMISSION AND RECEPTION SYSTEM USING RF

Ángel Humberto Corral Domínguez

Tecnológico Nacional de México / IT de Tijuana, México
angel.corral@tectijuana.edu.mx

Catherine Ramírez Ubieta

Tecnológico Nacional de México / IT de Tijuana, México
catherine.ramirez193@tectijuana.edu.mx

José Ricardo Cárdenas Valdez

Tecnológico Nacional de México / IT de Tijuana, México
jose.cardenas@tectijuana.edu.mx

Carlos Hurtado Sánchez

Tecnológico Nacional de México / IT de Tijuana, México
carlos.hurtado@tectijuana.edu.mx

Recepción: 21/noviembre/2024

Aceptación: 7/marzo/2025

Resumen

La necesidad de sistemas de monitorización y transmisión de señales de electrocardiograma (ECG) ha aumentado drásticamente en la era postpandemia. En este trabajo de investigación se desarrolla una plataforma de transmisión de señales ECG como alternativa en el monitoreo de pacientes en el área de Telemedicina, la transmisión se realiza en un transceptor de RF adaptado a una etapa de potencia mediante un amplificador de RF que opera en su región lineal. La plataforma opera en la banda de 2.5 GHz, y se evalúan diversos esquemas n-QAM, el desarrollo de sistemas de monitoreo de ECG permite que la cobertura sanitaria garantice que las personas puedan acceder a servicios de salud de calidad sin enfrentar dificultades financieras. La implementación se desarrolla bajo un esquema de modulación 128-QAM. Se desarrolla un algoritmo de digitalización, transmisión y posprocesamiento de señales en la tarjeta de desarrollo FPGA Cyclone V. La propuesta desarrollada está alineada con la agenda 2023 de la Organización de las

Naciones Unidas en materia de salud universal. Además, se implementa una evaluación espectral, la transmisión desarrollada ofrece una alternativa de clasificación de señales para análisis posteriores de clasificación y diagnóstico.

Palabras Clave: 128-QAM, ECG, FPGA, Telemedicine.

Abstract

The need for electrocardiogram (ECG) signal monitoring and transmission systems has increased dramatically in the post-pandemic era. In this research work, an ECG signal transmission platform is developed as an alternative to patient monitoring in the Telemedicine area. The transmission is carried out in an RF transceiver adapted to a power stage through an RF amplifier that operates in its linear region. The platform operates in the 2.5 GHz band, and various n-QAM schemes are evaluated. The development of ECG monitoring systems allows health coverage to ensure that people can access quality health services without facing financial difficulties. The implementation is developed under a 128-QAM modulation scheme. A signal digitization, transmission, and post-processing algorithm is developed on the Cyclone V FPGA development board. The developed proposal is aligned with the United Nations 2023 agenda on universal health. In addition, a spectral evaluation is implemented, and the developed transmission offers an alternative signal classification for subsequent classification and diagnostic analysis.

Keywords: 128-QAM, ECG, FPGA, Telemedicine.

1. Introducción

Los cuidados de salud son uno de los problemas principales en la necesidad en la era postpandemia [Verma, 2018]. La organización mundial de la salud (OMS) lo establece en un estudio como necesidad de atención primordial [Bhatia, 2017], [Harinee, 2021]. La Telemedicina consiste en medición fisiológica de condiciones de un paciente que son manejadas mediante un dispositivo móvil y que son transmitidas a proveedores del cuidado de la salud, el desarrollo de este tipo de sistemas es crucial para la atención oportuna de los pacientes [Zaghoulani, 2017]. Los avances en la tecnología del diseño y fabricación de ECG se ha acelerado con

el desarrollo de circuitos integrados al avance de ECG en aplicaciones de Telemedicina es posible debido a la introducción de tecnologías inalámbricas [Guzik, 2016]

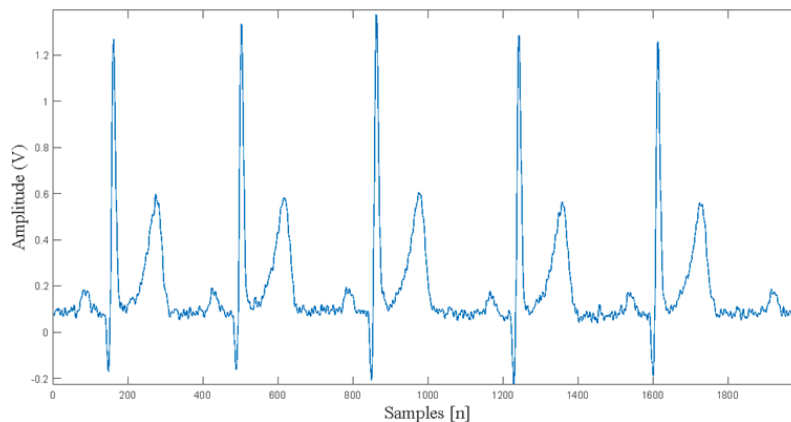
Existen diversos esfuerzos importantes en el área de la Telemedicina que aportan al problema global de monitoreo y cuidado de la salud, especialmente la cardíaca. En los trabajos [Xu, 2020], [Neyja, 2017] se desarrolla un sistema basado en internet de las cosas (IoT) basado en el banco de datos de PhysioNet para monitoreo en tiempo real. El ahorro de energía en dispositivos de medición ECG es importante para el proceso de escalabilidad [Wang, 2019]. En [Wang, 2019] se presenta un ECG de bajo consumo de energía usable en prenda que puede medir simultáneamente las derivaciones de I, II y V1. En [Penmatsa, 2016] se desarrolla un sistema de detección y transmisión de anomalías en la señal ECG mediante tecnología BlueTooth que opera en la banda de los 2 GHz como alternativa inalámbrica. La transmisión inalámbrica mediante RF se presentan diversos esfuerzos para análisis de variaciones de señales ECG aplicados a pacientes como monitoreo [Wang, 2019], adicionalmente se presenta un trabajo bajo prendas usables para diagnóstico mediante transistores utilizando en teléfonos inteligentes [Zulqarnain, 2020], así como aplicaciones mediante RFID en intervalos entre latidos [Wang, 2018].

En este trabajo se desarrollan dos implementaciones basadas en 64-modulación de amplitud en cuadratura (QAM) y 128-QAM con un amplificador de mediana potencia que opera en la banda de los 2 GHz como alternativa de Telemedicina y monitoreo en tiempo real, dado que la implementación se desarrolla en un sistema embebido FPGA Cyclone V y un transceptor AD9361 no requiere de conexión a internet y se adecúa para aplicaciones en zonas rurales remotas en la era pospandemia, importante en atención a distancia [Brunetti, 2020].

2. Métodos

El presente trabajo consiste en la transmisión inalámbrica de una señal ECG, modulada en orden QAM a través de procesamiento en software. Los pasos a seguir para lograr los objetivos del proyecto fueron:

- Paso 1: Obtener la señal ECG de la base de datos de PhysioBank, una fuente confiable para señales biológicas debido a su exhaustiva recopilación de registros clínicos y controles sanos [Wagner, 2022]. Se seleccionó específicamente una señal ECG, es decir, una señal con ondas P precediendo cada complejo QRS y una frecuencia cardíaca en el rango de 60 a 100 latidos por minuto; amplitudes y duraciones de las ondas, como la onda P ($0.2 - 0.3 \text{ mV}$, $0.06 - 0.12 \text{ s}$) y el complejo QRS ($< 0.12 \text{ s}$) dentro de parámetros específicos que indican una función cardíaca normal y con comportamiento periódico, donde morfología de las ondas permitirá verificar la integridad de las vías de conducción del corazón. Utilizando las herramientas de descarga disponibles en la plataforma, los datos de la señal se extrajeron en formato de archivo.csv. La Figura 1 muestra la señal ECG seleccionada.



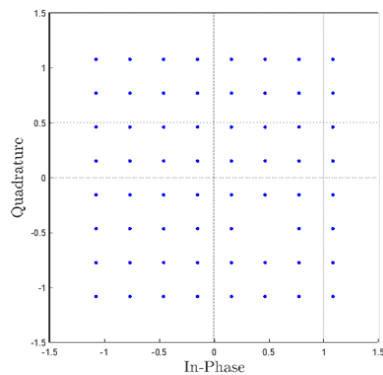
Fuente: elaboración propia

Figura 1 Señal ECG del banco de datos fisiológico.

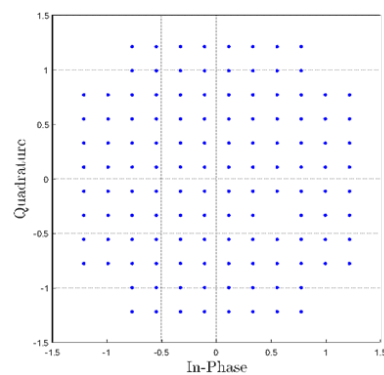
- Paso 2: La señal extraída de la base de datos de PhysioBank, requería procesamiento adicional para ser modulada en orden n-QAM y posteriormente transmitida. Por consiguiente, la señal ECG fue sometida a un preprocesamiento que incluyó normalización y discretización. Para la normalización de la señal, se calculó el valor absoluto máximo de la señal ECG (1.2 V). Posteriormente, se dividió la señal original por el valor absoluto máximo obtenido. Finalmente, se ajustó el rango de los valores para

estandarizar los datos dentro del intervalo $[0, 1]$. Esta normalización permitió la configuración adecuada de los parámetros necesarios para la modulación n-QAM subsiguiente.

- Paso 3: Modular la señal ECG unidimensional a orden n-QAM. Primero esta se descompone en parte real e imaginaria, correspondientes a las componentes de fase y amplitud. Estas componentes posteriormente se combinan en un vector y se traducen en un punto específico del plano complejo de la constelación n-QAM. Este proceso permite una representación eficiente de los datos en el plano complejo, optimizando el uso del ancho de banda disponible. En la Figura 2 se ilustra la constelación ideal para una modulación de 64 símbolos y 128 símbolos. El uso de QAM es fundamental en comunicaciones modernas, particularmente en sistemas 5G y fotónicos, debido a su capacidad para mejorar la eficiencia espectral y la robustez de la transmisión de datos en entornos de alta densidad [Wei, 2021], [Adiono,2023].



a) Diagrama de constelación 64-QAM.



b) Diagrama de constelación 128-QAM.

Fuente: elaboración propia

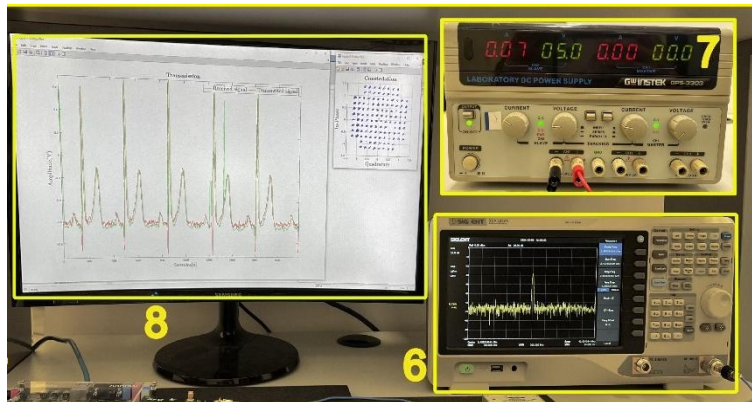
Figura 2 Diagramas de constelación ideales.

- Paso 4: La puesta en marcha del sistema de transmisión por RF. Para esto se utilizó el transceptor AD9361, integrado en la tarjeta ARRADIO junto con la tarjeta de desarrollo DE10-Standard. El AD9361 fue configurado para operar con una tasa de muestreo de 600 MHz y un ancho de banda de 18 MHz . Esta configuración se eligió por su capacidad de manejar señales

de alta frecuencia y su compatibilidad con la arquitectura de la FPGA en la DE10-Standard, lo que facilita la transmisión y recepción eficiente de señales en tiempo real. La propuesta del sistema de transmisión se muestra en la Figura 3a.



a) Parte analógica.



b) Parte digital.

Fuente: elaboración propia

Figura 3 Configuración de la plataforma utilizada.

- Paso 5: La simulación de la transmisión mediante comunicación LTE. Se genera una señal LTE con una frecuencia central de 2.45 GHz , 10 cuadros por segundo, y un factor de escala de 0.45. Estas características fueron seleccionadas para replicar condiciones reales de transmisión LTE, asegurando una evaluación precisa del rendimiento del sistema. Las instrucciones de transmisión se enviaron al AD9361 a través de una conexión Ethernet, permitiendo una integración fluida entre el software de simulación y el hardware de transmisión.
- Paso 6: Se inicializaron los objetos del sistema para el transceptor utilizando su dirección IP específica para establecer la conexión de red con la computadora. El transceptor se configuró para operar con una tasa de

muestreo de 61.44 *MHz* y un ancho de banda de 18 *MHz*, ajustando además los parámetros de ganancia y frecuencia para los canales de recepción (RX) y transmisión (TX).

- Paso 7: El post-procesamiento digital de los datos capturados. Este comenzó con la extracción de los componentes reales (I) e imaginarios (Q) de la señal recibida, los cuales se combinaron para formar una representación compleja de la señal (Rx). Para asegurar la precisión en el análisis, los datos de salida y entrada fueron normalizados y convertidos a formato de doble precisión. Las señales se sincronizaron temporalmente para minimizar discrepancias debidas a desfases o retardos en la transmisión, y se generó un diagrama de constelación de la señal sincronizada. Esto permitió evaluar la integridad de la señal y la eficacia del sistema de transmisión y recepción.
- Paso 8: Con la constelación correctamente alineada, se procedió a mejorar la calidad de la señal transmitida aplicando un filtro RRC. La aplicación de este filtro durante el post-procesamiento tuvo como objetivo optimizar la claridad de la constelación visualizada, eliminando distorsiones y mejorando la resolución de los puntos en el plano complejo.
- Paso 9: Finalmente, se realizó la demodulación de la señal utilizando una función de la librería, diseñada para recuperar los datos originales y mantener la potencia promedio de la señal normalizada en 1. Este paso fue fundamental para validar la transmisión y asegurar que los datos originales fueran recuperados con alta fidelidad, completando así el ciclo de transmisión y recepción del sistema.

3. Resultados

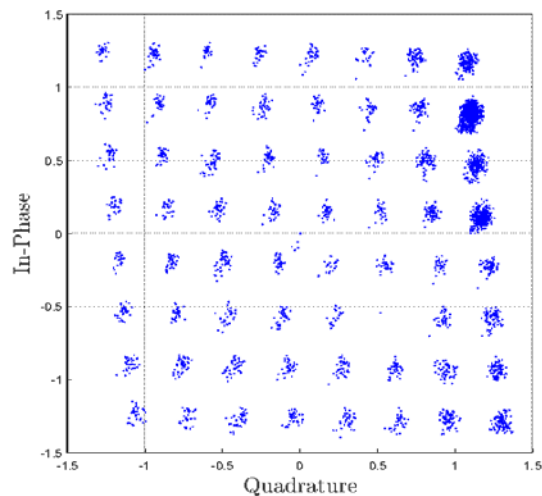
El diseño experimental para la transmisión por RF se divide en dos secciones principales: una parte analógica y una parte digital, Figura 3. La parte analógica incluye el control y la transmisión de la señal utilizando las tarjetas mencionadas en el Paso 4. Adicionalmente, se empleó un filtro pasa banda ZFBP-2400-S+ (3) con un ancho de banda de 2400 ± 100 *MHz* y una pérdida de inserción de 2 *dB*, un amplificador de potencia ZV60-V63+ (4) con una ganancia de 20 *dB*, operando a

una frecuencia de 2.45 GHz , y un acoplador direccional ZHDC-16-63-S+ (5) que proporciona una alta directividad típica de 32 dB . Estos componentes aseguran una transmisión eficiente y minimizan la pérdida de señal en el trayecto de RF, garantizando que la señal transmitida sea lo más limpia y potente posible.

La parte digital del sistema está enfocada en el análisis de la señal transmitida. Se utilizó un analizador de espectros (6) para monitorear la frecuencia central de transmisión (2.45 GHz) y verificar la correcta modulación de la señal en el dominio de la frecuencia. Además, se empleó una fuente de poder de 5 V para alimentar los componentes de control, asegurando un suministro de energía estable y continuo. Finalmente, los resultados de la señal recibida se visualizaron en tiempo real, lo que permitió un análisis detallado de la calidad y la integridad de la señal recibida.

Los resultados obtenidos se dividen en dos partes:

- **Demodulación de la señal ECG utilizando modulación 64-QAM:** El diagrama de constelación correspondiente, mostrado en la Figura 4, revela los 64 puntos que representan los símbolos QAM decodificados, distribuidos uniformemente en un espacio bidimensional.

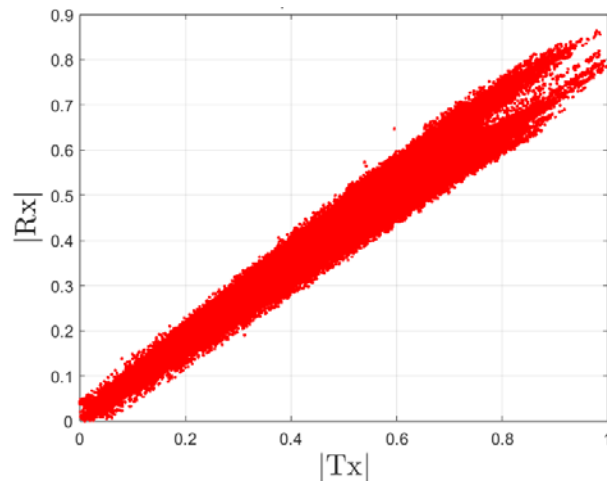


Fuente: elaboración propia

Figura 4 Diagrama de constelación de señal ECG recibida a 64-QAM.

Los puntos de la constelación presentan una separación media de 0.2 en el plano complejo, lo que es indicativo de una decodificación precisa y robusta

de la señal. Además, la relación de potencia entre la señal transmitida y recibida con modulación 64-QAM, mostrada en la Figura 5, exhibe una linealidad con una pendiente de 1.05 y un coeficiente de correlación de 0.98. Estos valores sugieren un buen comportamiento del sistema en términos de linealidad, aunque se detecta una dispersión en el extremo superior del rango de amplitudes que podría indicar una posible distorsión del sistema y una pérdida de información en este rango.

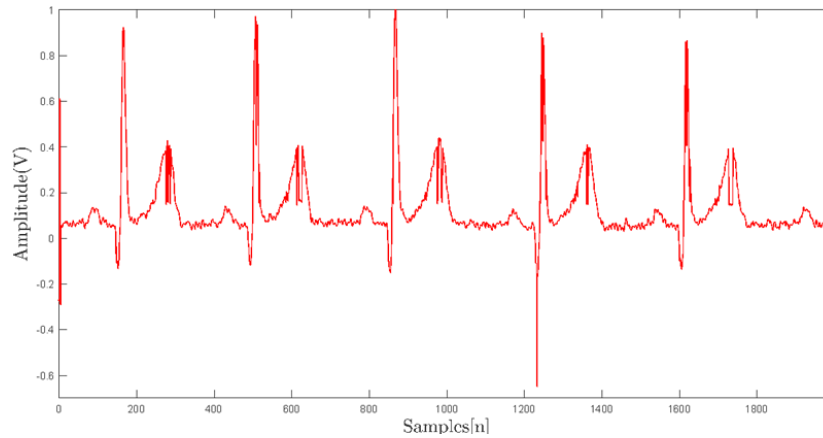


Fuente: elaboración propia

Figura 5 Magnitud de potencia entre la señal transmitida y recibida.

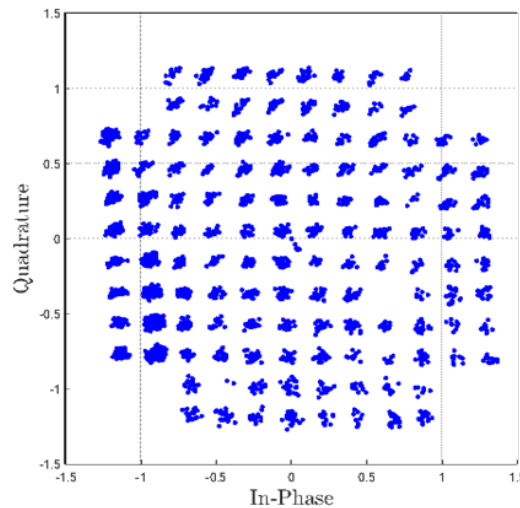
En el proceso final de reconstrucción de la señal en el dominio del tiempo, se desnormalizó y ajustó la escala de la señal modulada. La señal ECG reconstruida, presentada en la Figura 6, muestra una amplitud máxima de 1.0 V y una desviación estándar de 0.05 V en la línea de base. Este nivel de interferencia complica la interpretación detallada de componentes sutiles del ECG, como la onda P o variaciones menores en la onda T, limitando su utilidad en aplicaciones de diagnóstico.

- **Demodulación de la señal ECG utilizando modulación 128-QAM:** El diagrama de constelación correspondiente a la modulación 128-QAM, mostrado en la Figura 7, indica una dispersión máxima de 0.1 en las componentes I y Q, lo que refleja una mayor densidad de símbolos y una mayor exigencia en la precisión de la demodulación.



Fuente: elaboración propia

Figura 6 Señal ECG recibida con modulación 64-QAM.



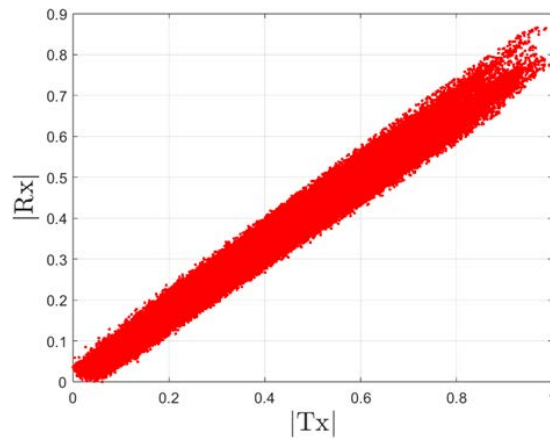
Fuente: elaboración propia

Figura 7 Diagrama de constelación de la señal ECG recibida a 128-QAM.

La relación de potencia entre la señal transmitida y recibida utilizando 128-QAM, presentada en la Figura 8, muestra una pendiente de 1.02 y un coeficiente de correlación de 0.99, lo que indica una alta fidelidad en la transmisión, con mínimas pérdidas de calidad en el proceso.

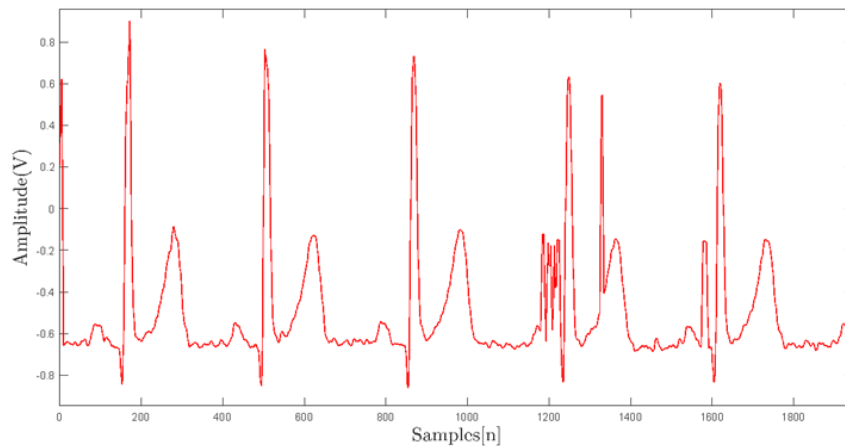
Finalmente, la reconstrucción en el dominio del tiempo de la señal ECG modulada a 128-QAM, ilustrada en la Figura 9, revela una amplitud máxima de 1.0 V, con picos de QRS uniformes de aproximadamente 0.9 V. Esta uniformidad en la amplitud de los picos a lo largo de la señal sugiere una reconstrucción consistente, lo que es crucial para el análisis de la salud

cardíaca, particularmente en la evaluación de los complejos QRS y las ondas Q-T. Aunque se observa una leve distorsión alrededor de la muestra 1200, esta no compromete significativamente la calidad general de la señal ni la utilidad del sistema para propósitos diagnósticos. De hecho, la estabilidad general de la señal y la consistencia en la representación de los picos QRS indican que el sistema es robusto y fiable.



Fuente: elaboración propia

Figura 8 Magnitud de potencia entre la señal transmitida y recibida.



Fuente: elaboración propia

Figura 9 Señal ECG recibida con modulación 128-QAM.

4. Discusión

A continuación, se describen los principales hallazgos obtenidos durante el proceso de transmisión y manejo de las señales de ECG.

- Se utiliza un amplificador de potencia de RF ZV60-V63+ para aplicaciones de anchos de banda dinámicos para aplicaciones de LTE.
- Se realiza una modulación de tipo 64-QAM y 128-QAM para procesamiento y transmisión de señales ECG.
- Se obtiene una correlación de 0.98 mostrando una alta fidelidad de datos de la señal transmitida con respecto a la original.
- La señal amplificada se realiza en la zona altamente lineal del dispositivo bajo
- Se obtiene y garantiza una baja distorsión de fase en los canales de I y Q para reducir recrecimiento espectral.
- La precisión permite una precisión de los complejos QRS y las ondas T.
- Se puede desarrollar como trabajo posterior un análisis de frecuencia para detectar patologías de alta o baja frecuencia mediante análisis de Fourier.
- La implementación realizada se adapta a sistemas n-QAM variables lo que ofrece adaptabilidad en cuanto a resolución y tren de datos a enviar a lo largo de la implementación.
- El sistema desarrollado es adaptable a diversos tipos de bioseñales mediante se garantice la normalización de la señal acorde a la resolución de 14 bits.

5. Conclusiones

En el desarrollo de este trabajo de investigación se obtuvieron las siguientes:

- Se desarrollan dos implementaciones basadas 64-QAM y 128-QAM se obtiene una mejor resolución conforme se incrementa el nivel de orden n-QAM.
- La transmisión inalámbrica de señales ECG es una parte de la Telemedicina que aporta en la era pospandemia para el monitoreo y recuperación de pacientes.
- La plataforma desarrollada de RF permite una transmisión inalámbrica con una correlación adecuada de la señal ECG.
- El sistema es adaptable a discretización y transmisión de diversas señales biomédicas bajo portadora en la banda de los 2 GHz.
- El trabajo desarrollado es una aportación en el área de la Telemedicina para la transmisión de señales de tipo ECG.

- La plataforma opera en la banda de los 2.45 GHz y un ancho de banda variable de hasta 18 MHz para el manejo de gran cantidad de datos y multiplexación de diversos pacientes bajo análisis.
- Como trabajos futuros se pueden desarrollar aplicaciones de clasificación de señales y comparación de niveles de voltaje para detectar patologías basadas en amplitudes del complejo QRS.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Adiono, S. et al., Demonstrating a real-time QAM-16 visible light communications utilizing VLC architecture, ScienceDirect, 2023.
- [2] Bhatia, M., Sood, S. K. A comprehensive health assessment framework to facilitate IoT-assisted smart workouts: A predictive healthcare perspective. Computers in Industry, 92, 50-66, November, 2017.
- [3] Brunetti, N. D., Dell'Anno, A., Martone, A., Natale, E., Rizzon, B., Di Cillo, O., & Russo, A. Prehospital ECG transmission results in shorter door-to-wire time for STEMI patients in a remote mountainous region. The American Journal of Emergency Medicine, vol. 38, no. 2, 252-257, 2020.
- [4] Guzik, P., Malik, M. ECG by mobile technologies. Journal of electrocardiology. vol. 49, no. 6, 894-901, 2016.
- [5] Harinee, S., Mahendran, A. Secure ECG signal transmission for smart healthcare. International Journal of Performability Engineering, vol. 17, no. 8, 711, 2021.
- [6] Neyja, M., Mumtaz, S., Huq, K. M. S., Busari, S. A., Rodriguez, J., Zhou, Z. An IoT-based e-health monitoring system using ECG signal. In GLOBECOM IEEE Global Communications Conference, 1-6, 2017.
- [7] Penmatsa, P. L., Reddy, D. R. K. Smart detection and transmission of abnormalities in ECG via Bluetooth. In 2016 IEEE International Conference on Smart Cloud (SmartCloud), 41-44, 2016.
- [8] Verma, P., Sood, S. K. Cloud-centric IoT based disease diagnosis healthcare framework. Journal of Parallel and Distributed Computing, 116, 27-38, June, 2018.

- [9] Wagner, P., Strodthoff, N., Bousseljot, R., Samek, W., Schaeffter, T. PTB-XL, a large publicly available electrocardiography dataset (version 1.0.3). PhysioNet. 2022.
- [10] Wang, L. H., Zhang, W., Guan, M. H., Jiang, S. Y., Fan, M. H., Abu, P. A. R., Chen, S. L. A low-power high-data-transmission multi-lead ECG acquisition sensor system. *Sensors*, vol. 19, no. 22, 4996, 2019.
- [11] Wei, C., Zhou, X., Wang, L., Tian, P. Hanzo, L. Photonic communications with quadrature-amplitude modulated quantum coherent states in alternated and dual polarizations. *Quantum Information Processing*, vol. 20, 10197-10207, 2021.
- [12] Wang, et al. A Low-Power High-Data-Transmission Multi-Lead ECG Acquisition Sensor System. *Sensors*, vol. 19, no. 4996, 2019.
- [13] Wang, C. et al. RF-ECG: Heart Rate Variability Assessment Based on COTS RFID Tag Array, vol. 2, no. 2, 2018.
- [14] Wang, N., Zhou, J., Dai, G., Huang, J., Xie, Y. Energy-efficient intelligent ECG monitoring for wearable devices. *IEEE transactions on biomedical circuits and systems*, vol. 13, no. 5, 1112-1121, 2019.
- [15] Xu, G. IoT-assisted ECG monitoring framework with secure data transmission for health care applications. *IEEE Access*, no. 8, 74586-74594, 2020.
- [16] Zaghouani, E. K., Benzina, A., & Attia, R. (2017, June). ECG based authentication for e-healthcare systems: Towards a secured ECG features transmission. In 2017 13th international wireless communications and mobile computing conference (IWCMC). pp. 1777-1783. 2017.
- [17] Zulqarnain, M., Stanzione, S., Rathinavel, G. et al. A flexible ECG patch compatible with NFC RF communication. *npj Flex Electron*, vol. 4, no. 13, 2020.