

ARTÍCULO ORIGINAL

Red de sensores inalámbricos para el monitoreo de bioseñales

Wireless Sensor Network for Biosignal Monitoring

Adalberto Ortega Eguino

aoeguino@gmail.com

Yanosky González Tristán

yanosky.gonzalez@etecsa.cu

Miguel Arturo Mendoza Reyes

mmendoza@uclv.edu.cu • <https://orcid.org/0000-0003-2454-8700>

EMPRESA DE SERVICIOS DE TELECOMUNICACIONES DE CUBA, S.A.

Recibido: 2022-01-06 • Aceptado: 2022-01-20

RESUMEN

El desarrollo de módulos electrónicos de bajo costo y características variadas, la disponibilidad de computadoras monoplaca, SBC, junto con el libre acceso a sus herramientas de programación, han permitido la generalización de los sistemas de monitoreo y control de variables remotas. Entre estos últimos, las redes de sensores inalámbricos, WSN, representan un papel importante en la Internet de las Cosas (IoT) debido, entre otras razones, a la facilidad de implementación y la flexibilidad que pueden ofrecer. El diseño de una red de este tipo dedicada al registro remoto de variables fisiológicas y su procesamiento debe cumplir requisitos que dependen, entre otros factores, de las características de la variable a medir y de las condiciones en las que se adquiere. La operación en tiempo real, una necesidad común en los sistemas de medición de bioseñales, es un desafío desde el punto de vista de la programación de los dispositivos, el diseño de circuitos asociados, la configuración de la red inalámbrica y otros factores que pueden modificarse y deben evaluarse en la práctica. Este trabajo presenta la evaluación del desempeño de una red WSN para la medición y procesamiento de bioseñales, y su dependencia de las posibles configuraciones de red, tipos de señales, algoritmos de procesamiento; se analiza además la posibilidad de extender su alcance a entornos IoT. Los resultados indican la viabilidad de la propuesta y su flexibilidad para adaptarse a diferentes entornos.

PALABRAS CLAVE: Procesamiento de Bioseñales; Redes de Sensores Inalámbricos; Telemedicina.

ABSTRACT

The development of low-cost electronic modules with varied characteristics, the availability of single-board computers, SBC, along with the free access to their programming tools, have supported the generalization of remote variable monitoring and control systems. Among the later, wireless sensor networks, WSN, play an important role in the implementation of the Internet of Things (IoT) due, amid other reasons, to the ease of implementation and the flexibility they can provide. The design of a network of this type, dedicated to the remote recording of physiological variables and their processing, must meet certain requirements that depend on the characteristics of the variable to be measured and the conditions in which it is acquired. Real-time operation, a common need in biosignal measurement systems, is challenging from the point of view of device programming, associated circuit design, wireless network configuration, and other factors that can be modified and must be evaluated in practice. This work presents the evaluation of the performance of a WSN network for the measurement and processing of biosignals, and its dependence on the possible network configurations, types of signals, processing algorithms; the possibility of extending its scope to IoT environments is also analyzed. The results indicate the feasibility of the proposal and its flexibility to be adapted to different environments.

KEYWORDS: *Biosignal Processing; Wireless Sensor Network; Telemedicine.*

INTRODUCCIÓN

La atención médica ubicua es un paradigma que surge para aumentar la eficiencia, precisión y disponibilidad de los tratamientos médicos. La implementación práctica de este modelo es posible gracias a los recientes avances en las comunicaciones inalámbricas y en la electrónica. Lo anterior es sustentado por la existencia de las redes inalámbricas de sensores (WSN, *Wireless Sensor Network*) en constante evolución y por el desarrollo de dispositivos electrónicos embebidos cada vez más pequeños y con menor consumo de potencia. Gracias a esta última tendencia se ofertan en el mercado sensores inteligentes que pueden utilizarse en el cuerpo humano y dispositivos potentes y multifuncionales para el procesamiento de los datos, como son las computadoras compactas (SBC, *Single Board Computer*) (Negra *et al.*, 2016).

Aún con las demostradas ventajas del uso de las WSN en entornos biomédicos, entre las que se encuentran la posibilidad de la monitorización de signos vitales de forma remota, cómoda y a largo plazo, deben afrontarse otros retos (Elayan *et al.*, 2017). Los desafíos técnicos del despliegue de una WSN para aplicaciones médicas se extienden más allá de los que normalmente se asocian a redes de este tipo, como son la capacidad de la red, las limitaciones de procesamiento y memoria y el manejo eficiente de las reservas de energía. En este ámbito, debido a la naturaleza de los datos transmitidos, se establecen además otros requisitos de fiabilidad, privacidad, calidad y seguridad en las comunicaciones (Ko *et al.*, 2010).

La plataforma elegida para la realización del procesamiento remoto de las señales biomédicas depende de diversos factores, como son el tipo de tecnología inalámbrica a utilizar, protocolos, aplicación, algoritmos a implementar, etc. que deben seleccionarse de forma que se satisfagan los requisitos establecidos y que respondan a la disponibilidad de los recursos para su implementación y utilización eficientes. Existe una tendencia establecida al desarrollo de sistemas y procesos para la telemedicina apoyados en el uso de herramientas digitales que se caractericen por la orientación hacia el incremento en la calidad de vida de los pacientes y la garantía de la comodidad, la operación en tiempo real, la economía, portabilidad, capacidad de almacenamiento y precisión en el procesamiento de las señales de interés (Abib & Anacleto, 2014) (Wang, 2008). En el país hay antecedentes de estudios relacionados con el uso de medios inalámbricos para la transmisión de datos captados por sensores vinculados al monitoreo de variables fisiológicas (Díaz *et al.*, 2017) (Valdés, 2010).

En este trabajo se tienen en cuenta los principales requisitos de las redes inalámbricas de sensores utilizados en aplicaciones biomédicas para proponer alternativas tecnológicas de implementación de una plataforma viable y flexible para el procesamiento remoto de señales biomédicas. Se evalúa la propuesta mediante el uso de señales sintéticas.

SEÑALES BIOMÉDICAS

Las señales biomédicas o bioseñales son registros espaciales, temporales o espacio-temporales de la actividad eléctrica, química o mecánica que ocurre durante eventos biológicos. La información que contienen estas señales se utiliza para explicar los mecanismos fisiológicos subyacentes. Al utilizar las bioseñales para el diagnóstico del estado de determinado subsistema biológico es esencial realizar correctamente la adquisición, el procesamiento y la presentación de las señales; de esta manera el personal médico puede obtener información fiable y útil sobre el estado de salud del paciente y actuar de manera apropiada en beneficio de esta última. Algunas señales biomédicas tienen un uso más frecuente en el procesamiento a distancia, entre ellas están la electrocardiográfica (ECG), electroencefalográfica (EEG), electromiográfica (EMG) y la presión arterial (TA).

La señal ECG

La señal electrocardiográfica proporciona, de forma no invasiva, información de la actividad eléctrica del corazón que permite el diagnóstico de las principales enfermedades cardíacas.

Cada ciclo cardíaco se manifiesta como una secuencia ordenada de ondas (P, Q, R, S y T) relacionadas con las diferentes etapas de polarización/despolarización del corazón. Las características de estas ondas pueden modificarse en función de la existencia de determinadas patologías (Sörnmo & Laguna, 2005).

La amplitud de la señal ECG depende de la forma en que se apliquen los electrodos a la superficie del cuerpo y de la proximidad de los mismos al corazón, su valor oscila entre 0.5 mV y 4 mV. El ancho de banda útil de la señal depende del estudio a realizar y de la región de interés. En estudios clínicos del ECG estándar de doce derivaciones es de 0.05 Hz a 100 Hz. Para aplicaciones de monitorización de pacientes en cuidados intensivos y pacientes ambulatorios, el ancho de banda útil se restringe a 0.5 Hz hasta 50 Hz. En registros de ECG de alta resolución se extiende hasta los 300 Hz, para permitir la detección de los potenciales tardíos ventriculares, señales de baja amplitud y alta frecuencia (Prutchi & Norris, 2005).

La detección de la posición de los latidos cardiacos es un paso común en los sistemas para el procesamiento y análisis de la señal ECG. La información resultante, obtenida a partir de la detección de la onda R, permite calcular otros parámetros relevantes como la frecuencia cardíaca (FC) y su variabilidad en el tiempo (variabilidad del ritmo cardíaco, VRC). La comparación, el análisis del comportamiento de la morfología de las ondas componentes parte también del conocimiento de la posición de los latidos (*Electrophysiology*, 1996).

Para la adquisición de la señal ECG se recomienda una frecuencia de muestreo mínima de 500 Hz para estudios en pacientes adultos. Para pacientes pediátricos se indica una tasa de muestreo como mínimo de 750 Hz. Por otra parte, para el análisis de la variabilidad del ritmo cardíaco se requiere una frecuencia de muestreo mínima de 1 kHz y para análisis de potenciales tardíos se necesita un mínimo de 4 kHz. El número de bits necesario para digitalizar una señal electrocardiográfica puede variar en dependencia de diversos factores; se recomienda utilizar 12 o 16 bits para obtener una buena resolución.

La señal EEG

La señal electroencefalográfica depende de las corrientes que fluyen durante las excitaciones sinápticas de las neuronas en la corteza cerebral y se mide por medio de electrodos de superficie repartidos por el cuero cabelludo. El análisis de la EEG permite la detección de ciertas patologías asociadas al funcionamiento del sistema nervioso así como de características psicofisiológicas del individuo (Sanei & Chambers, 2013).

El análisis de la actividad de las ondas EEG se realiza fundamentalmente en el dominio de la frecuencia en cinco bandas de frecuencias correspondientes a la actividad de las denominadas ondas delta, theta, alfa, beta y gamma que se extienden hasta los 50 Hz. El ancho de banda efectivo de la señal EEG para estudios de respuestas a estímulos puede llegar hasta los 100 Hz por tanto para muchas aplicaciones una frecuencia de muestreo de 200 Hz resulta suficiente. El número de bits utilizados para digitalizar la señal EEG es 16 en la mayoría de los casos, aunque en algunos estudios se reporta el uso de 8 bits con resultados apropiados.

La señal EMG

La señal electromiográfica registra la actividad eléctrica generada por los músculos estriados durante su contracción y se adquiere mediante electrodos superficiales o intramusculares. La información derivada del análisis de la señal EMG se utiliza para el diagnóstico de patologías que afectan al Sistema Nervioso Periférico, alteraciones funcionales de las raíces nerviosas así como de patologías del músculo y de la unión neuromuscular. También la EMG tiene aplicaciones tales como el control de prótesis mioeléctricas, estimaciones ergonómicas y los sistemas de realimentación (*Biofeedback*). Las componentes de principal interés de las señales EMG se encuentran entre 50 Hz y 150 Hz, pero posee componentes armónicos hasta los 500 Hz. Existen también algunas componentes con frecuencias superiores a los 10 kHz, por lo que la frecuencia de muestreo debe ser ajustada en función de las características de la señal a analizar. La mayoría de los equipos modernos cuenta con convertidores de 16 o 12 bits para digitalizar la señal EMG (Merletti & Parker, 2004; Northrop, 2001).

La señal fotopletoislográfica

La presión sanguínea arterial se debe a la fuerza ejercida por la sangre contra las paredes arteriales y/o vasculares como resultado del flujo sanguíneo desde el corazón. El valor de la presión arterial es un indicador esencial de las condiciones fisiológicas de un paciente y una de las variables que más comúnmente se mide en estudios clínicos, utilizando métodos invasivos o no invasivos. Uno de estos últimos, basado en el empleo de técnicas ópticas para medir variaciones del volumen sanguíneo en el tejido vascular, da lugar a la señal fotopletoislográfica (FPG). Mediante la adquisición y procesamiento de la señal FPG pueden estimarse valores tales como la presión arterial sistólica, la presión arterial diastólica, la presión arterial media, la ocurrencia temporal de la incisura dicota y la presión arterial pulsátil que proporcionan información relevante. La señal FPG tiene componentes fundamentales de frecuencia entre el nivel de corriente directa y los 50 Hz (Beevers *et al.*, 2001; Marchiando & Elston, 2003).

Para el diseño de un sistema dedicado a la adquisición y procesamiento de las bioseñales deben tomarse en cuenta las principales características de las mismas, las que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características espectrales de las bioseñales y parámetros sugeridos para la digitalización.

Bioseñal	Ancho de banda (Hz)	Frecuencia muestreo (Hz)	N bits
ECG	0.05 a 100	U500	U10
EEG	0 a 100	U200	U8
EMG	50 a 150	U500	U10
FPG	0 a 50	U125	U 8

ALGORITMOS PARA EL PROCESAMIENTO DE LAS BIOSEÑALES

Para extraer información útil de las señales biomédicas digitalizadas se aplican algoritmos orientados a la reducción de ruidos, representación en otros dominios, clasificación, determi-

nación de eventos característicos, entre otros procedimientos. Entre los más utilizados para el procesamiento están los descritos a continuación:

- **Filtrado:** los más comunes son los métodos basados en las técnicas clásicas de respuesta finita al impulso, FIR (*Finite Impulse Response*), y respuesta infinita al impulso, IIR (*Infinite Impulse Response*). La implementación de filtros paso bajo, paso alto o su combinación permite la atenuación de ruidos en la bioseñal, la selección de las componentes útiles para su procesamiento, entre otras funciones.
- **Representación en el dominio de la frecuencia:** entre los diferentes métodos de transformaciones aplicadas a las señales biomédicas la Transformada Discreta de Fourier (DFT, *Discrete Fourier Transform*) es una de las más usadas (Akay, 1998).
La DFT es la herramienta primaria, básica, fundamental del procesamiento digital de señales y puede ser calculada de forma eficiente utilizando el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*). Aunque existen algoritmos rápidos para calcular digitalmente la transformada, los datos del segmento a analizar deben estar previamente almacenados en memoria.
- **Comparación:** en aplicaciones de procesamiento de bioseñales la clasificación permite, a partir del cálculo de medidas de distancia, determinar la clase a que pertenecen determinados segmentos de señal que pueden resultar útiles para el diagnóstico. Existen diversos algoritmos de clasificación y la elección del más apropiado depende de la complejidad del problema a resolver (Morales *et al.*, 2009; Sanei & Chambers, 2013). Algunas de las medidas clásicas de distancia son: Euclidiana, Chebyshev y Manhattan (Weller-Fahy *et al.*, 2014).

Un sistema de procesamiento de bioseñales flexible debe soportar la implementación de algoritmos básicos de tratamiento de señal como los mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Algoritmos implementados para el preprocesamiento de las bioseñales.

Algoritmo	Tipos	Finalidad
Filtrado	FIR, IIR	Reducción de ruidos
DFT	FFT	Determinación del contenido espectral
Distancia	Euclidiana	Comparación de patrones
	Chebyshev	
	Manhatan	

REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES

La infraestructura de una WSN está sustentada en el uso de elementos de medición, cómputo y comunicación que permiten instrumentar, observar y responder a eventos y fenómenos en un entorno específico. Pueden identificarse cuatro componentes básicos de una WSN: (1) *sensores* (2) *red de interconexión* (3) *nodo concentrador de información / coordinador* y (4) *recursos de cómputo para el procesamiento de los datos*. La información puede ser procesada localmente y transmitida a través de enlaces inalámbricos hasta un nodo central de coordinación (Sohraby *et al.*, 2007).

El nodo *sensor* se encarga de tomar los datos y transmitirlos de hacia el nodo *central* o *coordinador*. En dependencia de su capacidad de cómputo puede realizar el preprocesamiento de la señal adquirida. También gestionan el acceso al canal inalámbrico y maneja los efectos de interferencias, pérdida de paquetes, etc.

En la WSN el nodo *coordinador* realiza las funciones de concentración de la información de las señales adquiridas, el control de la red, y otras funciones en dependencia de los recursos de procesamiento disponibles. Una solución muy utilizada es el empleo de computadoras compactas o *single-board computer* (SBC). A diferencia de otros sistemas de cómputo, como las laptops o las computadoras personales de escritorio, las SBC consumen menos de energía, tienen tamaño reducido y representan una solución de bajo costo y buen desempeño en aplicaciones específicas (Sohraby *et al.*, 2007).

PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN

El intercambio de información a nivel de aplicación se realiza mediante el protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). Este está diseñado para sistemas con limitaciones de memoria y de procesamiento de CPU, también para redes con un ancho de banda mínimo y alta latencia. MQTT consta de tres actores diferentes: cliente-publicador que publica mensajes a un tópico específico, servidor-bróker que recibe los mensajes publicados y los reenvía hacia los destinatarios, que son los clientes-suscriptores. El nodo coordinador de la red de la plataforma actúa como bróker y recibe los datos transmitidos por los nodos sensores. MQTT permite la transmisión de varias señales desde cada nodo sensor, para lo cual se declaran en este los tópicos en los que se publicarán los mensajes correspondientes a los valores de cada señal. El número máximo de tópicos permitido por MQTT hace que en la práctica la cantidad de tópicos que pueden ser declarados esté limitada por las características tecnológicas de los dispositivos y la aplicación en particular que se esté desarrollando.

En correspondencia con los requisitos para el monitoreo de variables fisiológicas, como parámetro de conexión se especifica el nivel 2 de calidad de servicio, QoS, en el que además de existir garantías de los mensajes distribuidos se asegura a los suscriptores que no reciban mensajes duplicados (Hunkeler *et al.*, 2008).

METODOLOGÍA

Para elegir los recursos a utilizar en el diseño de la plataforma para el procesamiento de bioseñales de forma remota se tuvieron en cuenta las tecnologías existentes y la disponibilidad para su implementación práctica. Se utilizó un entorno como el mostrado en la Figura 1.

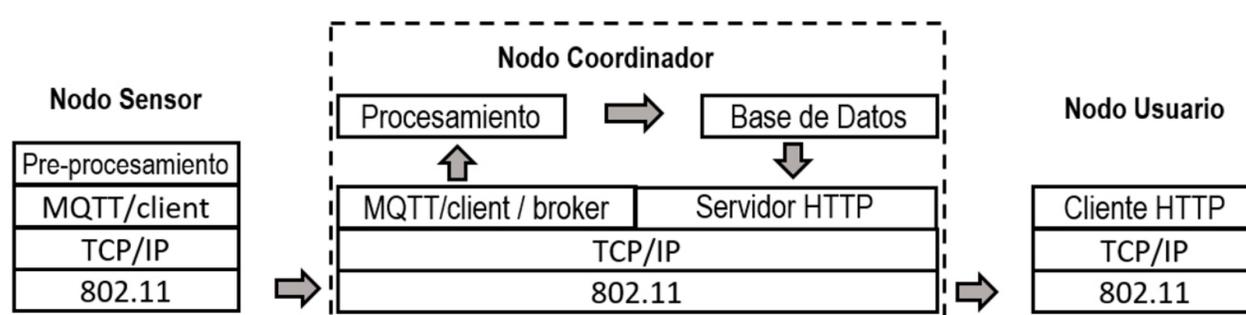


Figura 1. Entorno de despliegue de la plataforma para el procesamiento de bioseñales.

RED INALÁMBRICA DE SENSORES

La red ha sido implementada con una topología en estrella en la que el nodo coordinador cumple la función de concentrador. Se utiliza el estándar IEEE 802.11, un protocolo que aunque demanda un alto consumo de energía está implementado en prácticamente todos los dispositivos móviles y ofrece mayores opciones de integración con las tecnologías desplegadas.

Nodo sensor

Los nodos sensores se ubican en el entorno del paciente y cumplen las funciones de acondicionamiento, adquisición, digitalización, preprocesamiento y transmisión de los valores de las señales al nodo coordinador. Para la implementación de las funciones de preprocesamiento y transmisión se ha utilizado el módulo ESP8266, un sistema autónomo para soluciones WiFi de bajo consumo y bajo costo. Este posee potentes capacidades de procesamiento y almacenamiento que le permiten integrarse con sensores y dispositivos específicos de aplicación a través de puertos genéricos de entrada/salida digital, GPIO. El kit de desarrollo de *software* o SDK (*Software Development Kit*) es libre, permitiendo un desarrollo más rápido de aplicaciones para su uso (Kodali & Soratkal, 2016). Las principales características del módulo se indican en la Tabla 3.

Tabla 3. Características del módulo ESP8266.

Voltaje de Alimentación 3.3V DC	Voltaje de Entradas/Salidas: 3.3V DC
Convertidor A/D de 10 bits (0-1V entrada)	Pila de Protocolo TCP/IP integrado
Frecuencia de Reloj: 80MHz/160MHz	WiFi 802.11 b/g/n 2.4 GHz
RAM programa: 32KB	Modos WiFi STA , AP y STA+AP
RAM datos: 96KB	Seguridad WPA/WPA2, Cifrado WEP, AES, TKIP
Memoria Flash Externa: 4MB	Pines Digitales GPIO: 17
SDIO 1.1/2.0, SPI, UART	Puertos SDIO 1.1 / 2.0, SPI, UART(2)
Consumo de potencia en Standby < 1.0mW	Potencia de salida de +19.5dBm en modo 802.11b

La programación de los nodos sensores se realizó con la herramienta de desarrollo Arduino IDE 1.8.5, de acceso libre.

Nodo coordinador

Para cumplir con la función de nodo coordinador se ha elegido el *Raspberry Pi*, una SBC que puede desempeñar muchas de las funciones de una PC convencional y que tiene un amplio respaldo de *software* libre con un sistema operativo *Raspbian*, una variante del sistema operativo *Debian GNU/Linux Jessie* de 64 bits. En el diseño realizado el nodo coordinador cumple las funciones de punto de acceso WiFi, bróker para las comunicaciones mediante el protocolo MQTT, gestor de base de datos y servidor de HTTP. Los programas utilizados para cumplir las funciones citadas se indican en la Tabla 4.

El monitoreo de los parámetros clínicos almacenados en la base de datos, obtenidos del procesamiento de las señales recibidas desde los nodos sensores, se realiza mediante el acceso

Figura 4. Dimensión de restricciones de procesos de negocio.

Plataforma software	Objetivo
Mosquitto	Protocolo de comunicación entre nodos
SQLite	Gestor de base de datos
Nginx	Servidor de HTTP
Python	Recepción, almacenamiento y procesamiento de bioseñales

a la página web diseñada que se despliega por el servidor web *Nginx* del *Raspberry Pi*. Así se facilita el acceso remoto a la información desde cualquier dispositivo que tenga un navegador web y que esté conectado a la red WiFi de la que el *Raspberry Pi* es el punto de acceso.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la validación de la propuesta se desplegó un escenario como el mostrado en la Figura 2. Las pruebas fueron realizadas en instalaciones en las que la distancia máxima entre los nodos sensores y el coordinador no excedió los 10 m.

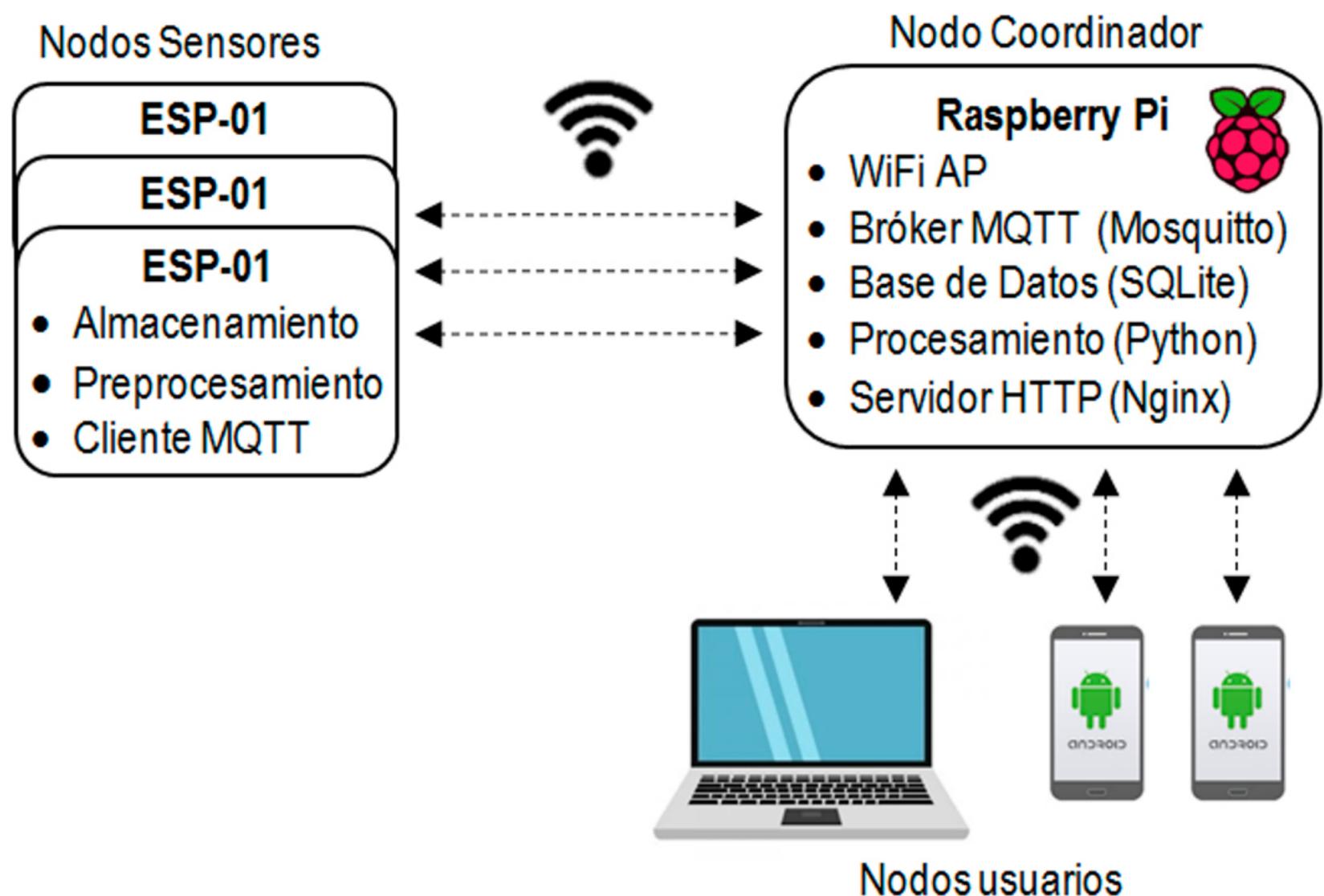


Figura 2. Escenario de prueba para la validación de la propuesta.

Señales representativas para la realización de los estudios

Para la realización de las pruebas a la plataforma se seleccionaron segmentos de las bioseñales indicadas en la Tabla 5. Los valores de las señales se representaron mediante aritmética de punto fijo de 16 bits, y se almacenaron en la memoria de los nodos sensores para su transmisión de forma continua hacia el nodo coordinador.

Tabla 5. Señales utilizadas en la validación de la propuesta.

Señal	Muestras	Duración (s)	Frecuencia de muestreo (Hz)
ECG	1000	2	500
EEG	1000	5	200
EMG	1000	0.5	2000
FPG	1000	10	120

Algoritmos para procesamiento de bioseñales

Los algoritmos utilizados en la plataforma comprenden los destinados al preprocesamiento de la bioseñal, que se implementan en los nodos sensores, y los dedicados al procesamiento definitivo que son ejecutados en el nodo coordinador. Debido al carácter libre de los sistemas utilizados y a la nutrida comunidad de desarrolladores de programas existe amplia disponibilidad de bibliotecas de algoritmos de procesamiento de señales para los nodos sensores y para el nodo coordinador. En la Tabla 6 se indican las utilizadas en las pruebas realizadas.

Tabla 6. Bibliotecas de algoritmos de procesamiento utilizados en la plataforma.

Biblioteca	Nodo	Componentes
Filters-master	Sensor	Filtros FIR, IIR.
ArduinoFFT-1.5.0	Sensor	Algoritmo para Transformada Rápida de Fourier
Scipy	Coordinador	Algoritmos de optimización, álgebra lineal, integración, interpolación, procesamiento de señales e imágenes
biosppy	Coordinador	Algoritmos para procesamiento de bioseñales
numpy	Coordinador	Operaciones con arreglos y matrices

Las pruebas realizadas estuvieron orientadas a la evaluación del comportamiento de la comunicación nodo inalámbrico/nodo coordinador y del desempeño de la plataforma en tiempo real que comprende las operaciones de almacenamiento, el procesamiento de los datos, la operación de la base de datos y la presentación de los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comunicación entre los nodos sensores y el coordinador queda establecida mediante los parámetros de configuración del ejemplo mostrado en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros de configuración para la comunicación.

Parámetro	Valor
Dirección IP del bróker	10.12.69.51
Puerto del bróker	1883
Tópico del cliente/nodo sensor	Sala01/Sensor01/ecg
ID cliente/nodo sensor	Sensor01
ID cliente/nodo coordinador	RBpi_Doctor

En el nodo sensor se tiene en cuenta la necesidad de reconexión en caso de interrumpirse la comunicación con la red o con el bróker MQTT. La Figura 3 muestra el resultado de la confirmación del establecimiento de la comunicación en un nodo sensor y en el coordinador.

La sección de procesamiento, que utiliza funciones disponibles en la biblioteca biosppy, se realiza sobre un segmento de la bioseñal recibida. Esta tiene una duración especificada por el usuario en función de la aplicación deseada. Para la evaluación se tomaron 5000 muestras de una señal ECG de la cual se extrajo la frecuencia cardiaca instantánea aplicando el método `ecg.ecg` de la referida biblioteca. Los valores de la señal son previamente almacenados en una estructura de *buffer* cíclico y con los resultados del procesamiento se actualiza la base de datos de la plataforma.

```

COM3
.....
Conectado!!!
dirección IP local: 10.12.69.52
Intentando conectar con broker MQTT: 10.12.69.51
conectado!!!
Tópico: Sala01/Sensor01/ecg

*Python 3.4.2 Shell*
File Edit Shell Debug Options Windows Help
OnConnect
La respuesta a la solicitud de conexión es: 0
Conectado como cliente: b'RBpi_Doctor'
Tópico: Sala01/Sensor01/ecg

OnSubscribe
Suscripción realizada
QoS concedida: 2
    
```

Figura 3. Resultado de la comunicación entre nodo sensor y nodo coordinador.

La presentación de los resultados se realiza mediante una página web, accesible en la dirección del nodo coordinador, que se actualiza con el resultado de la gestión de la base de datos implementada. El comportamiento de la variable mostrada puede ser en tiempo real con cada ciclo de procesamiento, la elección se realiza mediante la activación de un botón accesible en la parte superior derecha del espacio para el gráfico, Figura 4. En una misma ventana se permite la visualización de hasta 30 segundos del registro de la señal, un parámetro que puede modificarse a conveniencia del usuario.

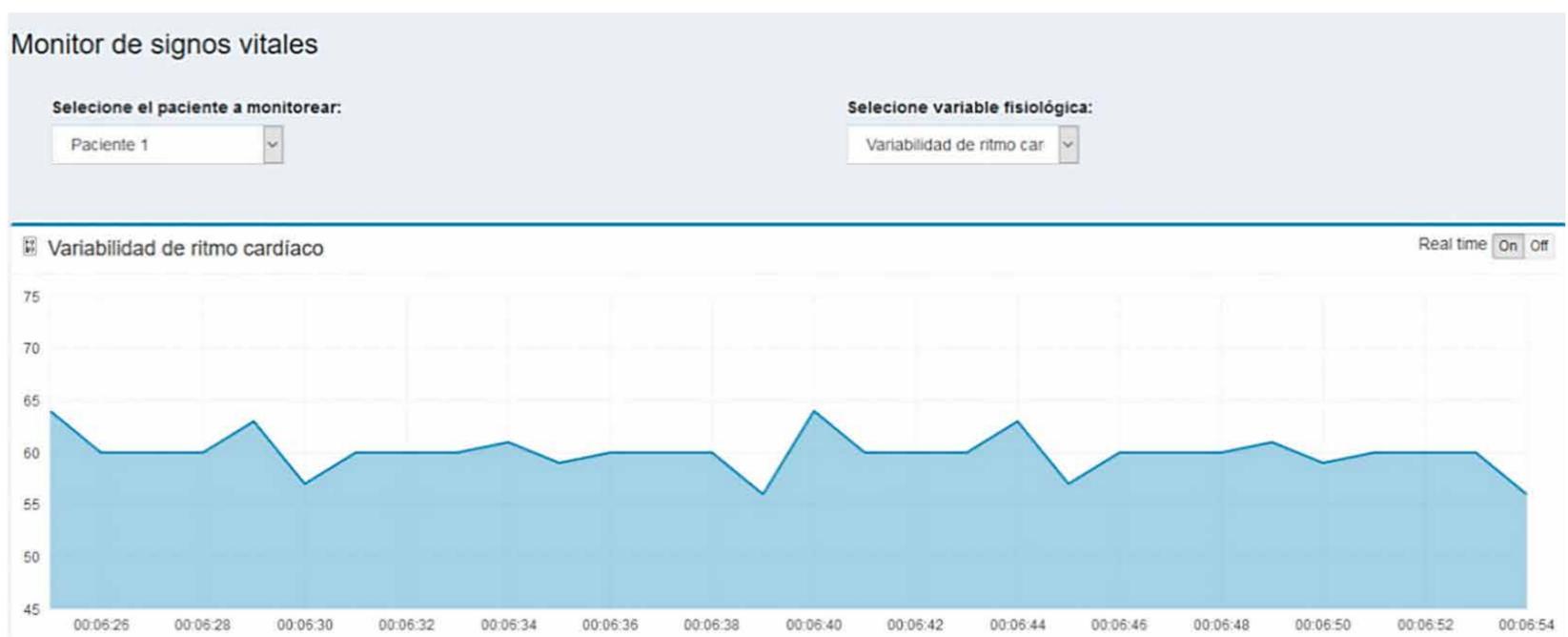


Figura 4. Registro de la variación de la frecuencia cardiaca para una de las señales de prueba.

Se realizaron pruebas para evaluar el desempeño de la plataforma en función de la cantidad de nodos activos disponibles. Estas consistieron en la transmisión continua durante una hora utilizando de uno a tres nodos activos a la vez. Los resultados, mostrados en la Tabla 8, revelan la influencia de la cantidad de nodos en el tiempo de procesamiento de cada segmento y en la dispersión de sus valores.

En todos los casos el tiempo de procesamiento estuvo por debajo de los 10 s, tiempo de duración del segmento de señal analizado. Debido a lo anterior puede afirmarse que la plataforma, en las condiciones analizadas, puede operar en tiempo real. Aunque la extrapolación de estos resultados permitiría inferir la cantidad de nodos para la cual se degrada, en condiciones análogas, el desempeño, deben ser realizadas pruebas en condiciones reales para encontrar ese límite.

Tabla 8. Tiempos de procesamiento de la prueba realizada.

Nodos	Máximo (s)	Mínimo (s)	Promedio (s)	Desviación (s)
1	2.5507	2.3592	2.4610	0.5280
2	2.9562	2.2808	2.4702	0.1241
3	5.4103	1.0732	2.5648	0.5655

CONCLUSIONES

La propuesta de plataforma para el procesamiento de bioseñales de forma remota satisface los requerimientos planteados en el proyecto inicial, pues permite la recepción de bioseñales transmitidas desde nodos inalámbricos hacia un nodo coordinador de la red dedicado al procesamiento, el registro y la presentación de los parámetros resultantes. Las alternativas tecnológicas elegidas para el despliegue de la plataforma junto con el uso de herramientas de software libre y de dispositivos de *hardware* de libre acceso facilitan la asimilación y la ampliación de las potencialidades del diseño desarrollado. Las soluciones de *software* y *hardware* planteadas hacen que la propuesta sea además flexible en cuanto a la implementación de otros algoritmos para el procesamiento de bioseñales. El empleo de la tecnología WiFi conjuntamente con el protocolo MQTT facilita el acceso a la red desde diversos dispositivos de usuario y lo extiende al hacerlo compatible con entornos IoT. Las bibliotecas elegidas para el procesamiento de bioseñales sustentan el uso de la plataforma para el análisis de múltiples variables fisiológicas, lo que posibilita contar con un sistema de monitoreo integral y aplicable a distintos escenarios.

REFERENCIAS

- Abib, J. C., & Anacleto, J. C. (2014). Improving Communication in Healthcare: A case study. *2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 3336–3341.
- Akay, M. (1998). *Time frequency and wavelets in biomedical signal processing*. IEEE press.
- Beevers, G., Lip, G. Y., & O'Brien, E. (2001). Blood pressure measurement. Sphygmomanometry: Factors common to all techniques. *BMJ*, 322, 981–985.
- Díaz, D. F. D., Varela, Á. D. B., Rodríguez, A. C., & Franco, Y. O. S. (2017). Diseño de un módulo para la adquisición y transmisión inalámbrica de bioseñales. *Telemática*, 16(2), 39–53.
- Elayan, H., Shubair, R. M., & Kiourti, A. (2017). Wireless sensors for medical applications: Current status and future challenges. *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2478–2482. <https://doi.org/10.23919/EuCAP.2017.7928405>
- Electrophysiology, T. F. of the E. S. of C. the N. A. S. of P. (1996). Heart rate variability: Standards

- of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*, 93(5), 1043–1065.
- Hunkeler, U., Truong, H. L., & Stanford-Clark, A. (2008). MQTT-S—A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks. *2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE'08)*, 791–798.
- Ko, J., Lu, C., Srivastava, M. B., Stankovic, J. A., Terzis, A., & Welsh, M. (2010). Wireless sensor networks for healthcare. *Proceedings of the IEEE*, 98(11), 1947–1960.
- Kodali, R. K., & Soratkal, S. (2016). MQTT based home automation system using ESP8266. *2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*, 1–5.
- Marchiando, R. J., & Elston, M. P. (2003). Automated ambulatory blood pressure monitoring: Clinical utility in the family practice setting. *American Family Physician*, 67(11), 2343–2350.
- Merletti, R., & Parker, P. J. (2004). *Electromyography: Physiology, engineering, and non-invasive applications* (Vol. 11). John Wiley & Sons.
- Morales, R. D. P., Morales, D. Á., & Grisales, V. H. (2009). Caracterización de señales electromiográficas para la discriminación de seis movimientos de la mano. *Scientia et Technica*, 2(42), Article 42.
- Negra, R., Jemili, I., & Belghith, A. (2016). Wireless body area networks: Applications and technologies. *Procedia Computer Science*, 83, 1274–1281.
- Northrop, R. B. (2001). Measurement of electrical potentials and magnetic fields from the body surface. In *Noninvasive instrumentation and measurement in medical diagnosis* (pp. 75–168). CRC Press.
- Prutchi, D., & Norris, M. (2005). *Design and development of medical electronic instrumentation: A practical perspective of the design, construction, and test of medical devices*. John Wiley & Sons.
- Sanei, S., & Chambers, J. A. (2013). *EEG signal processing*. John Wiley & Sons.
- Sohraby, K., Minoli, D., & Znati, T. (2007). *Wireless sensor networks: Technology, protocols, and applications*. John Wiley & Sons.
- Sörnmo, L., & Laguna, P. (2005). *Bioelectrical signal processing in cardiac and neurological applications* (Vol. 8). Academic Press.
- Valdés, M. J. G. (2010). Desarrollo de Monitores de Paciente en Cuba. *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones ISSN: 1815-5928*, 31(1), 42–48.
- Wang, P. (2008). The real-time monitoring system for in-patient based on zigbee. *2008 Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, 1, 587–590.
- Weller-Fahy, D. J., Borghetti, B. J., & Sodemann, A. A. (2014). A survey of distance and similarity measures used within network intrusion anomaly detection. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(1), 70–91.

