



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO CANINO COMUNICADO CON UN
APLICATIVO MÓVIL**

Danna Isabella García Saenz

Trabajo de grado presentado para optar al título de Bioingeniero

Modalidad de Práctica

Semestre de Industria o Práctica Empresarial

Asesor interno

Javier Hernando García Ramos, Magíster (MSc) en Ingeniería

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Bioingeniería

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	García Saenz [1]
Referencia	[1] García Saenz, “Diseño de un sistema de monitoreo canino comunicado con un aplicativo móvil Trabajo de grado profesional, Bioingeniería, Universidad de Antioquia Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.
Estilo IEEE (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: John Fredy Ochoa Gómez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a todos los estudiantes de ingeniería que, en algún momento, pensaron que no pasarían del tercer semestre. A aquellos que lucharon con álgebra, física, ecuaciones diferenciales, circuitos y programación, y aun así eligieron una ingeniería que abarca todo esto, como lo es la Bioingeniería. A quienes, semestre tras semestre, enfrentaron desafíos porque nada fue fácil ni natural, a los que tuvimos que trasnochar, pedir ayuda y esforzarnos más allá de lo común para llegar hasta aquí.

Agradecimientos

El desarrollo del presente trabajo no pudo haberse completado sin la ayuda y el acompañamiento de Sense AI S.A.S, la empresa que me abrió las puertas y me dieron una silla junto a ellos. Agradezco a Daniel Escobar, el profesor que confió en mí y me ayudó desde la pregunta que fuera más insulsa relacionada a este proyecto hasta el apoyo emocional que a veces es muy importante en todo este proceso. Agradezco a Emmanuel Ángel, el ingeniero que siempre me corrigió y hacía lo posible para entenderme aun cuando ni yo me entendía. Por último y no por eso menor importante, agradezco a mi asesor Javier García, la persona que me daba esperanza cuando yo me rendía en el desarrollo de este proyecto. También agradezco a mis hermanos y a mi papá, las personas que le dan la luz a mis logros.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
ABSTRACT	9
I. INTRODUCCIÓN	10
II. OBJETIVOS	13
A. Objetivo general	13
B. Objetivos específicos	13
III. MARCO TEÓRICO	14
1. Revisión bibliográfica de dispositivos portables en canes.....	14
1.1. FitBark – Ratreador GPS y monitor de actividad para mascotas.....	14
1.2. PetPace – Monitor de la salud de su mascota	15
1.3. Whistle – Localizador GPS y monitor de actividad para mascotas	16
1.4. Furrigo – AirTag Collar de perros	17
1.5. PawGaze FinderTag – Collar localizador para perros	17
1.6. Tractive – Localizador GPS para perros	17
2. Fisiología canina	18
2.1. Signos vitales y métodos de medición	18
3. Aspectos éticos y legales del uso de tecnologías en animales en Colombia.....	19
4. Sensores.....	19
4.1. Acelerómetros	20
5. Sistemas embebidos	20
5.1. Arduino	21
5.2. PSoc	21
5.3. ESP32.....	21

IV. METODOLOGÍA	22
1. Diseño.....	23
1.1 Acelerómetros	23
1.2. Localización efectiva de los acelerómetros	24
1.3 Prototipo para la evaluación humana.....	25
2. Software	25
2.1 Plataforma de desarrollo	25
2.2 Python	26
V. ANÁLISIS DE RESULTADOS	27
1. Procesamiento de los datos a destiempo	30
1.1. Normalización.....	32
1.2. Rectificación y Filtrado – Rolling average	32
1.3. Umbralización de las señales.....	33
2. Procesamiento de los datos a tiempo real.....	36
2.1. Rectificación	36
2.2. Normalización.....	37
2.3. Filtrado con promedio móvil o rolling average:	37
2.4. Cálculo de frecuencias	38
3. Conexión a un aplicativo móvil	41
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
REFERENCIAS	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de metodología (fuente propia).	23
Figura 2. Esquemático electrónico (fuente propia).	28
Figura 3. Mensajes en Bluetooth Serial.	29
Figura 4. Datos RAW guardados en la SD.....	30
Figura 5. Gráfica de los datos del cuello y del pecho Amplitud vs Muestras	31
Figura 6. Gráfica de los datos del cuello y del pecho Amplitud vs Tiempo	32
Figura 7. Gráfica de los datos de normalizados de cuello y del pecho Amplitud vs Tiempo	32
Figura 8. Gráfica de los datos de cuello normalizado y filtrado y del pecho normalizado y filtrado - Amplitud vs Tiempo	33
Figura 9. Gráfica de la función de find_peaks() para la señal del cuello	34
Figura 10. Gráfica de la función de find_peaks() para la señal del pecho	35
Figura 11. Calculo de la frecuencia respiratoria	35
Figura 12. Calculo de la frecuencia cardiaca	35
Figura 13. Mensajes de la creación de archivos.....	36
Figura 14. Rectificación de los datos RAW	37
Figura 15. Normalización de los datos rectificadoss	37
Figura 16. Filtrado de datos normalizados	38
Figura 17. Datos de frecuencia cardiaca en oximetro y en el dispositivo	39
Figura 18. Datos de frecuencia cardíaca y respiratoria de Berlín	40
Figura 19. Datos de frecuencia cardíaca y respiratoria de Chanel	41

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MSc	Magister Scientiae
UdeA	Universidad de Antioquia
FC	Frecuencia cardiaca
FR	Frecuencia respiratoria
LPM	Latidos por minuto
RPM	Respiraciones por minuto

RESUMEN

En respuesta a la creciente preocupación por el bienestar animal y la necesidad de una supervisión constante de las mascotas, este proyecto propone el diseño de un sistema de monitoreo para perros. La iniciativa busca proporcionar a los cuidadores una herramienta efectiva para evaluar y garantizar el bienestar de sus mascotas, centrándose en la medición precisa de la frecuencia cardíaca y la frecuencia respiratoria mediante el uso de acelerómetros.

El proyecto se enmarca en un contexto donde la tecnología de monitoreo remoto de mascotas está ganando importancia, pero enfrenta desafíos relacionados con la precisión de los datos y la comodidad de las mascotas. La metodología propuesta se compone de un circuito con sensores MPU6050 y un microcontrolador Beetle ESP32 para la comunicación serial con una aplicación móvil, seleccionando y ubicando los sensores en el chaleco del perro para captar el pulso cardíaco y la respiración, y utilizando conexiones I2C para evitar errores de datos. En el software, se usó Platformio, C++ y Python para un correcto procesamiento de los datos y de esta manera identificar frecuencias cardíacas y respiratorias.

***Palabras clave* — Monitorización canina, medicina veterinaria, frecuencia cardíaca, frecuencia respiratoria, procesamiento de señales biológicas, acelerómetros, dispositivos móviles.**

ABSTRACT

In response to the growing concern for animal welfare and the need for constant monitoring of pets, this project proposes the design of a monitoring system for dogs. The initiative seeks to provide owners with an effective tool to assess and ensure the welfare of their pets, focusing on the accurate measurement of heart rate and respiratory rate through the use of accelerometers.

The project is framed in a context where remote pet monitoring technology is gaining importance, but faces challenges related to data accuracy and pet comfort. The proposed methodology consists of a circuit with MPU6050 sensors and a Beetle ESP32 microcontroller for serial communication with a mobile application, selecting and placing the sensors on the dog's vest to capture heart rate and respiration, and using I2C connections to avoid data errors. In the software, Platformio, C++ and Python were used to correctly process the data and thus identify heart and respiratory rates.

***Keywords* — Canine monitoring, veterinary medicine, heart rate, respiratory rate, biological signal processing, accelerometers, mobile devices.**

I. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la calidad de vida es un tema de creciente interés para muchas personas, ya que permite medir las condiciones en las que se encuentran y determinar si disfrutan de una vida agradable, digna y valiosa. Este concepto no solo se aplica a los seres humanos, sino que también puede extenderse a todos los seres vivos del planeta. En este contexto, y dado el estrecho vínculo que las personas han desarrollado con sus mascotas, el bienestar animal se ha convertido en una prioridad, en donde monitorear de forma constante las variables fisiológicas de las mascotas es crucial para asegurar su salud de manera preventiva, su estado de ánimo y su calidad de vida.

De igual manera, el interés de monitorear variables fisiológicas en los animales, específicamente en perros que están siendo entrenados para cumplir servicios específicos en la comunidad ha ido creciendo en la actualidad, en donde se tiene presente que la correlación entre la medición de las variables fisiológicas como la frecuencia cardiaca, la cual sirve como indicadores de emociones y bienestar, en donde ayudaría a identificar factores desencadenados del estrés o excitación, anomalías en la contracción y relajación ventricular, irregularidades en el ritmo cardiaco las cuales pueden ser un indicador clave para la identificación de diversas enfermedades que podrían estar relacionadas a infecciones, diabetes, hipertiroidismo sepsis y la deshidratación. Por otro lado, el parámetro fisiológico de la frecuencia respiratoria también está relacionado a condiciones de dolor, estrés, enfermedad de la válvula mitral, en donde el edema pulmonar es la consecuencia directa de dicha enfermedad [1][2].

Históricamente, las evaluaciones realizadas en ensayos clínicos veterinarios para el tratamiento de enfermedades en animales o para su monitorización han utilizado equipos que podrían tener un impacto negativo en la calidad de vida de los animales, generando niveles elevados de estrés. Actualmente, uno de los objetivos que se ha intentado cuantificar es la medición de la actividad en el entorno doméstico, utilizada para evaluar el comportamiento en casa de las mascotas y estimar su actividad física mediante acelerómetros. La mayoría de los estudios realizados para validar estos dispositivos los han comparado con medidas de gasto energético, como la oximetría o la calorimetría [2].

Los acelerómetros, también utilizados como dispositivos para monitorear la actividad física, se han vuelto cada vez más populares para monitorear la actividad de los humanos. Muchos de estos dispositivos anuncian que tienen la capacidad de calcular el gasto energético estimado, o la calorimetría, como se mencionó anteriormente [4]. De manera similar, los cuidadores de mascotas en el mercado veterinario están adoptando cada vez más los acelerómetros, gracias a los nuevos modelos de estos disponibles comercialmente como FitBark, PetPace y Whistle.

En el caso de los dispositivos FitBark, el término "quema de calorías" se refiere a un acelerómetro triaxial conectado a un teléfono inteligente que registra los datos de movimiento de una mascota a través del seguimiento GPS y mediciones de aceleración, entre otras cosas [4]. Los cuidadores y los veterinarios de mascotas podrían utilizar estos datos entregados para diagnosticar y controlar una variedad de afecciones.

En el contexto de este proyecto, se planeó la implementación de un chaleco que permita el monitoreo no invasivo mediante el uso de acelerómetros para mascotas como una alternativa para evaluar el bienestar animal, midiendo parámetros vitales claves como la frecuencia cardíaca y respiratoria de los canes que lo utilice, en donde los datos recopilados de estos parámetros se transmitirán a través de comunicación Bluetooth a la aplicación de la empresa In-Ova, denominada Colectiva.

Mediante Colectiva, los usuarios podrán supervisar el estado de su mascota, recibir notificaciones pertinentes y mantener una comunicación directa a través de un chatbox, en donde se tiene la posibilidad de que en caso de que el dispositivo de monitoreo detecte alguna anomalía, la aplicación facilitará la conexión con un veterinario de confianza para una evaluación más detallada y orientación adecuada.

El diseño del sistema canino se estructura en dos componentes fundamentales: hardware y procesamiento de señales mediante software. Primero, se realizó un montaje preciso del circuito que integra sensores y un microcontrolador Beetle ESP32, facilitando la comunicación serial necesaria para la aplicación móvil. Fue crucial seleccionar adecuadamente los sensores, determinar su número óptimo y ubicarlos en el chaleco para identificar correctamente las señales de movimiento cardíaco y respiratorio.

En la segunda parte del proyecto, se enfocó en el procesamiento de las señales captadas, almacenando inicialmente los datos para identificar la frecuencia cardíaca y respiratoria y luego implementarlas en tiempo real. Se realizaron procesos de filtrado, rectificación y normalización de

las señales. Los acelerómetros seleccionados, dos MPU6050, fueron esenciales para captar datos precisos del movimiento del canino. La comunicación serial se estableció mediante conexiones I2C, ajustando las direcciones I2C de los acelerómetros para evitar errores de datos.

En cuanto al software, se utilizó Platformio y el lenguaje C++ para inicializar la toma de datos, con mensajes Bluetooth para asegurar la correcta inicialización de los sensores y la tarjeta SD. Los datos capturados se procesaron en Python, utilizando la transformada de Fourier y técnicas de procesamiento de señales para identificar frecuencias cardíacas y respiratorias.

Los resultados principales de este estudio demostraron que el sistema desarrollado es capaz de medir con precisión las frecuencias cardíaca y respiratoria en perros, con una correlación significativa entre las mediciones del dispositivo y los métodos tradicionales de monitoreo. La conclusión más importante es que este sistema no invasivo ofrece una alternativa viable y cómoda para el monitoreo continuo de la salud canina, con el potencial de mejorar significativamente la detección temprana de problemas cardiorrespiratorios. Esto es particularmente relevante dado el aumento de enfermedades cardíacas y respiratorias en mascotas en los últimos años. Según estudios recientes, se ha observado un incremento del 30 % en casos de insuficiencia cardíaca congestiva en perros durante la última década, y aproximadamente un 20 % de las muertes prematuras en mascotas se atribuyen a enfermedades cardiopulmonares no detectadas a tiempo [5]. Estos datos subrayan la importancia crítica de desarrollar sistemas de monitoreo continuo y no invasivo como el propuesto en este proyecto, que podrían revolucionar el cuidado preventivo de las mascotas y potencialmente salvar numerosas vidas caninas.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Diseñar un sistema de monitorización de frecuencia cardíaca y la frecuencia respiratoria mediante el uso de acelerómetros con el fin de proporcionar información para la toma de decisiones informadas sobre el cuidado de las mascotas.

B. Objetivos específicos

- Caracterizar los acelerómetros adecuados según sus especificaciones para la toma de frecuencia cardíaca y la frecuencia respiratoria a través de la búsqueda bibliográfica.
- Desarrollar el diseño del sistema de monitoreo canino y la ubicación óptima de los acelerómetros mediante un análisis exhaustivo de la literatura científica.
- Validar la precisión y confiabilidad de la información registrada, así como de los datos recopilados y la funcionalidad de la aplicación implementada.
- Evaluar el diseño para la monitorización por medio de la implementación de algoritmos de procesamiento de señales capaces de detectar patrones relacionados con las señales halladas por los acelerómetros.
- Implementar la conexión entre el sistema de monitoreo canino y el aplicativo móvil de la empresa In-Ova, garantizando una transmisión fluida y segura de los datos de frecuencia cardíaca y respiratoria.

III. MARCO TEÓRICO

El presente proyecto se basa en el análisis de la tecnología de monitoreo remoto existente para mascotas, enfocándose en dispositivos y sistemas previamente desarrollados que han servido como referencia. Seguidamente, se profundiza en la fisiología canina y los parámetros relevantes que permiten comprender el estado de salud de los perros, tales como la frecuencia cardíaca y la frecuencia respiratoria. Además, se examinan las aplicaciones de procesamiento de señales con el fin de extraer información significativa de los datos obtenidos. Por último, se examinan cuestiones éticas y normativas relacionadas con la implementación de tecnología en el ámbito animal.

1. Revisión bibliográfica de dispositivos portables en canes.

En el mercado existen diferentes tipos de dispositivos portables de monitoreo de actividad para mascotas, como FitBark, PetPace y Whistle, los cuales se distinguen por su capacidad para registrar una amplia gama de actividades físicas, como caminar, correr, jugar y descansar, utilizando tecnologías avanzadas como acelerómetros y sensores acústicos. Estos dispositivos permiten a los cuidadores monitorear la actividad y el bienestar de sus mascotas a través de aplicaciones móviles con interfaces intuitivas y amigables. Actualmente en el mercado los collares inteligentes que están destacando por sus innovadoras funciones son el collar inteligente de Furrigo, el collar rastreador de perros PawGaze y el collar de Tractive, siendo estos dispositivos muy innovadores encargados en monitorear la salud y localizar en tiempo real a la mascota, monitoreando a su vez la actividad diaria del mismo.

1.1. FitBark – Rastreador GPS y monitor de actividad para mascotas.

FitBark se destaca por su capacidad para registrar una amplia gama de movimientos gracias a su acelerómetro de tres ejes ubicado en el collar de los perros, capturando actividades como caminar, correr, jugar y descansar, entre otros. Estos datos son almacenados en el dispositivo para su posterior sincronización con una aplicación móvil, donde los cuidadores pueden acceder a una visualización detallada de la actividad de sus mascotas. El FitBark se distingue además por su accesibilidad y facilidad de uso, con una interfaz intuitiva que permite una comprensión clara de los datos recopilados. Su diseño compacto y liviano garantiza comodidad para las mascotas al llevarlo en sus collares sin causar molestias significativas. Además, su duración de batería

extendida, aproximadamente de 6 meses, lo convierte en una opción conveniente para los cuidadores que desean un dispositivo de monitoreo que no requiera una carga frecuente. En términos de costo, el FitBark es ampliamente considerado como asequible y ofrece una excelente relación calidad-precio en comparación con otros dispositivos similares en el mercado. Estas características hacen del FitBark una opción popular y confiable para aquellos que buscan monitorear la actividad y el bienestar de sus mascotas de manera efectiva [4]. FitBark se destaca por su capacidad para registrar una amplia gama de movimientos gracias a su acelerómetro de tres ejes ubicado en el collar de los perros, capturando actividades como caminar, correr, jugar y descansar, entre otros. Estos datos son almacenados en el dispositivo para su posterior sincronización con una aplicación móvil, donde los cuidadores pueden acceder a una visualización detallada de la actividad de sus mascotas. El FitBark se distingue además por su accesibilidad y facilidad de uso, con una interfaz intuitiva que permite una comprensión clara de los datos recopilados. Su diseño compacto y liviano garantiza comodidad para las mascotas al llevarlo en sus collares sin causar molestias significativas. Además, su duración de batería extendida, aproximadamente de 6 meses, lo convierte en una opción conveniente para los cuidadores que desean un dispositivo de monitoreo que no requiera una carga frecuente. En términos de costo, el FitBark es ampliamente considerado como asequible y ofrece una excelente relación calidad-precio en comparación con otros dispositivos similares en el mercado. Estas características hacen del FitBark una opción popular y confiable para aquellos que buscan monitorear la actividad y el bienestar de sus mascotas de manera efectiva [4]

1.2. PetPace – Monitor de la salud de su mascota

El otro dispositivo que se encuentra en el mercado se conoce como PetPace, un monitor de actividad para mascotas, el cual utiliza sensores acústicos alojados en múltiples proyecciones dentro de los contornos de un collar colocados alrededor del cuello del perro para capturar la frecuencia cardíaca y la frecuencia respiratoria. Los sensores acústicos utilizados logran detectar, siempre y cuando el collar se encuentre ajustado de manera adecuada el cuello del can, las ondas de pulso y son capaces de medir la frecuencia cardíaca y la frecuencia respiratoria cuando el perro está en reposo, es decir, cuando no está realizando actividades de alto nivel y no está ladrando. Además de medir la frecuencia cardíaca y la saturación de oxígeno, el PetPace también recopila datos sobre la actividad física del perro, como el nivel de ejercicio, los patrones de sueño y otros

parámetros relacionados con la salud. Estos datos se pueden visualizar en tiempo real a través de una interfaz amigable para los cuidadores de mascotas, lo que les permite monitorear la actividad y el bienestar de sus perros de manera efectiva [7]

El PetPace se destaca por su capacidad de proporcionar datos en tiempo real, su interfaz amigable para los cuidadores de mascotas y su costo atractivo en comparación con otros dispositivos de monitoreo de actividad en perros. A diferencia de algunos dispositivos que requieren la descarga de datos a través de lectores especializados o software, el PetPace ofrece resúmenes de datos fáciles de usar que se cargan automáticamente a través de WiFi. Este dispositivo ha demostrado tener una correlación moderada con monitores de actividad validados en medicina veterinaria, lo que lo convierte en una herramienta atractiva para monitorear la actividad en perros. Aunque se necesitan más estudios para evaluar su rendimiento, validez y utilidad clínica, el PetPace se presenta como una opción prometedora para el monitoreo de la salud canina [7]

1.3. Whistle – Localizador GPS y monitor de actividad para mascotas

El siguiente dispositivo a destacar para el monitoreo canino es el Whistle, una marca especializada en monitores de actividad para perros. En este proyecto, nos enfocaremos principalmente en el monitor de actividad para perros Whistle FIT. Al igual que otros dispositivos de la misma marca mencionados en el estudio, este dispositivo utiliza un acelerómetro para recopilar datos de movimiento de los perros. Registran información sobre las actividades diarias de los perros, como caminar, correr, descansar, beber, comer, rascarse, entre otras. Los datos de los acelerómetros recopilados se suben a servidores en la nube para su posterior análisis y clasificación del comportamiento canino [8]. El sensor se ubicó en el collar de los perros porque los monitores de actividad, como el Whistle FIT, están diseñados para ser dispositivos portátiles y no invasivos que los perros pueden llevar cómodamente durante todo el día. Colocar el sensor en el collar permite que el dispositivo registre con precisión los movimientos y comportamientos de los perros sin interferir significativamente en su libertad de movimiento o en su comodidad. Además, la ubicación en el collar proporciona una posición estable y consistente para el sensor, lo que es crucial para garantizar mediciones precisas y consistentes de la actividad canina. A pesar de que el dispositivo puede rotar alrededor del cuello del perro, el estudio demostró que la posición

del dispositivo en el collar no tuvo un impacto medible en su rendimiento, lo que sugiere que la ubicación en el collar es adecuada para la detección precisa de comportamientos [8].

1.4. Furrigo – AirTag Collar de perros

Los collares Furrigo utilizan collares con AirTags implementados, el AirTag es un dispositivo de rastreo Bluetooth fabricado por Apple que se utiliza para localizar objetos perdidos, los cuales se pueden implementar a artículos como llaves, carteras, mochilas, collares (perros), entre otros, para poder rastrear su ubicación a través de la aplicación Find My de Apple en un dispositivo iOS. El AirTag utiliza tecnología de chip U1 de Apple para una localización precisa y ofrece funciones como notificaciones audibles y visuales para ayudar a los usuarios a encontrar sus objetos perdidos de manera más eficiente [9].

1.5. PawGaze FinderTag – Collar localizador para perros

PawGaze FinderTag es un dispositivo localizar mediante Bluetooth de baja energía (BLE), cuenta con un chip IC (circuito integrado) proporcionado por Apple el cual mediante su vinculación con el ID de Apple se logra conectar de forma privada y segura a cualquier dispositivo mediante la aplicación Find My sólo para dispositivos iOS y de esta manera realizar un seguimiento del mismo mediante la aplicación. En los casos en los que un FinderTag se encuentra fuera del alcance de Bluetooth, otros dispositivos Apple cercanos pueden transmitir anónimamente su ubicación a su propietario y de esta forma asegurar una cobertura más amplia para el seguimiento [10].

1.6. Tractive – Localizador GPS para perros

Es un collar que tiene como principal característica la ubicación precisa y en tiempo real de perros y gatos con una cobertura mundial mediante el modulo GPS, cuenta con la configuración de zonas seguras y recibe alertas en los casos en los que estas sean traspasadas. Este collar también cuenta con un acelerómetro integrado, el cual permite hacer un seguimiento del bienestar de su mascota, midiendo el tiempo de descanso, cuánto se mueve y hasta qué calorías quema en el día, en donde mediante Inteligencia Artificial se envían mensajes de alerta al correo del usuario en caso de que los minutos de actividad y las interrupciones de sueño son anormales según los datos recopilados de la mascota hasta el momento y los conocimientos basados en datos de millones de perros, incluidos los de raza, edad y tamaño similares a los de la mascota en cuestión [11].

2. *Fisiología canina*

Para poder medir y monitorear los signos vitales en los perros primero es necesario hablar acerca de la fisiología canina para poder identificar las ubicaciones óptimas para obtener lecturas correctas relacionadas a las variables fisiológicas de interés para el desarrollo del presente trabajo, es decir, frecuencia cardíaca y frecuencia respiratoria, en donde al estar enfocados en los procedimientos no invasivos se deben de considerar de igual manera los movimientos naturales, patrones de actividad y comportamientos de los canes relacionados con el aseo, la actividad física y la alimentación.

2.1. *Signos vitales y métodos de medición*

Los signos vitales son los indicadores claves que permiten identificar si una persona o en este caso en particular, un perro se encuentra en un estado de salud y funcionamiento general del cuerpo óptimo. Los signos vitales más relevantes para una atención oportuna que se miden en los perros que logran analizar y de esa manera disminuir los diagnósticos tardíos de enfermedades son la temperatura corporal, la cual informa la capacidad del organismo de generar y eliminar calor, la frecuencia cardíaca, en la cual se observa el número de latidos por minuto y la frecuencia respiratoria, en la cual se observa el número de respiraciones por minuto. Debido a las variables de interés en el presente trabajo, sólo se profundizará en la frecuencia cardíaca y la frecuencia respiratoria, aunque la medición y monitorización de la temperatura también es importante para identificar casos de infección o sepsis, golpes de calor o casos de hipotermia [12].

2.1.2. *Frecuencia cardíaca*

La frecuencia cardíaca es una variable que permite evaluar el estado general de salud del perro debido a que refleja el equilibrio entre el sistema simpático y parasimpático del sistema nervioso autónomo y de esta manera permite detectar cambios fisiológicos y patologías tempranas como estrés, dolor, fiebre o enfermedades cardiovasculares como la cardiopatía, la hipertensión, bradicardia, taquicardia, etc. [13]

2.1.3. Frecuencia respiratoria

La respiración se lleva a cabo mediante la anatomía compuesta por los músculos de la caja torácica, el diafragma y los músculos abdominales, la cual depende de la raza y tamaño de los canes [15], es por eso que, basándose en las diferentes morfologías del tórax de los perros, estos se pueden clasificar en pecho profundo, ovalado o en barril [16][17]. Cuando un perro presenta enfermedades respiratorias, suele reducir su actividad o ajustar su patrón de respiración para compensar, es por esto que muchos animales pueden ocultar su enfermedad hasta que su capacidad pulmonar se encuentra en niveles críticamente bajos [18].

3. Aspectos éticos y legales del uso de tecnologías en animales en Colombia

Para abordar los aspectos éticos y legales relacionados con el uso de tecnología en animales, es esencial considerar varias perspectivas importantes. Lo primero que se debe tener en cuenta al estar trabajando animales es el bienestar y los derechos de los seres vivos involucrados. Esto implica garantizar que cualquier tecnología utilizada en ellos no les cause sufrimiento innecesario y que se respeten sus necesidades físicas y psicológicas. Además, es fundamental cumplir con las regulaciones y normativas pertinentes. En este sentido, la Resolución 8430 de 1993 en Colombia es un marco legal relevante que establece normativas y requisitos específicos para la investigación biomédica con animales. Esta resolución tiene como objetivo principal asegurar el bienestar y proteger los derechos de los animales utilizados en investigación. Dentro del contexto de la normativa mencionada, se establecen directrices éticas y prácticas que los investigadores deben seguir al trabajar con animales, incluyendo la necesidad de obtener el consentimiento ético y legal, cuando sea posible, para utilizar animales en investigación, así como garantizar que se minimice el sufrimiento y se maximice el bienestar de los animales en todo momento.

La Resolución 8430 de 1993 también busca garantizar la calidad y la ética en la investigación biomédica en Colombia, es decir, que no solo se deben cumplir con los requisitos legales, sino que también se debe realizar la investigación de manera responsable y con los más altos estándares éticos.

4. Sensores

Un sensor es un "dispositivo de entrada que provee una salida manipulable de la variable física medida" [19]. En otras palabras, un sensor es un dispositivo que detecta y responde a alguna entrada

de estímulo físico, químico o eléctrico, y convierte esa respuesta en una señal medible, la cual, puede llegar a ser interpretada y procesada para obtener información valiosa sobre el entorno o el objeto que está siendo monitoreado.

4.1. Acelerómetros

Los acelerómetros son sensores que miden la aceleración experimentada en diferentes direcciones por un cuerpo en movimiento, es decir, miden los cambios en la velocidad y la dirección de un cuerpo durante un periodo de tiempo, convirtiendo estas variaciones en señales eléctricas que pueden ser procesadas y analizadas [20].

4.1.1. MPU6050

El MPU6050 es un acelerómetro que cuenta con componente lineal en los ejes X, Y y Z y componente angular rotacional en los ejes X, Y y Z, detectando cambios en la orientación y la inclinación, es decir que el conjunto total de datos que se pueden obtener con este sensor son: datos de acelerómetro en 3 ejes y datos de giroscopio en 3 ejes. Este sensor integra un DMP (Procesador digital de movimiento) capaz de realizar complejos algoritmos de captura de movimiento de 3 ejes. [21]

4.1.2. ADXL345

El ADXL345 es un acelerómetro lineal diseñado para medir la aceleración de tipo dinámica y estática en los ejes X, Y y Z. Este sensor utiliza tecnología de sensor de micro-mecanizado (MEMS) para detectar cambios de movimiento en diversas direcciones. [22]

5. Sistemas embebidos

Los sistemas embebidos son aquellos sistemas independientes o como parte de un sistema más grande de computación que están diseñados para realizar funciones específicas, el cual está controlado por un computador integrado y debido a que generalmente su software está embebido (dentro del sistema general), en ROM (Read only memory) no necesita memoria secundaria como un computador. El sistema central realiza su procesamiento mediante un microcontrolador integrado con interfaces de entrada/salida y una memoria incorporada en el mismo chip, optimizando el espacio y la eficiencia del sistema [23].

5.1.Arduino

Es una plataforma de electrónica de código abierto que tiene como propósito facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios para cualquier persona. De igual manera, Arduino a su vez es un sistema de procesamiento, un microcontrolador y una placa. Hablando de la placa de Arduino en cuestión, incorpora un microcontrolador que permite la programación con un lenguaje de alto nivel. La placa de Arduino incorpora una serie de entradas analógicas y digitales permitiendo agregar nuevas funcionales sin necesidad de alterar el diseño original de la placa. [24]

5.2.PSoc

Programable System on Chip (PSoc) son microcontroladores en el que se cuenta con un sistema de adquisición y tratamiento de señales en un solo chip. Los microcontroladores PSoc tienen bloques de entradas y salidas analógicas y digitales dentro del circuito integrado [25].

5.3. ESP32

El ESP32 es un microcontrolador SoC (System on chip) con módulos Wi-Fi y Bluetooth integrado por lo que es ampliamente utilizado en las aplicaciones IoT (Internet of things). Se puede programar utilizando el IDE de Arduino, lo que facilita el desarrollo de aplicaciones para principiantes y expertos por igual [26]

IV. METODOLOGÍA

El diseño del sistema canino, abordado en este trabajo, se estructura en dos componentes fundamentales: la parte del hardware y la del procesamiento de las señales mediante el software. En primer lugar, se diseñó un montaje preciso del circuito que integra sensores y un microcontrolador capaz de facilitar la comunicación serial necesaria para la implementación de la aplicación móvil. Para lograr este objetivo, fue esencial una selección meticulosa del tipo de microcontrolador, sensores, determinar el número óptimo requerido de sensores teniendo en cuenta la conexión entre estos y el microcontrolador y establecer una ubicación idónea en el chaleco para una correcta identificación de las señales a evaluar por parte de los sensores, el movimiento mecánico del pulso cardiaco y el movimiento torácico de la respiración.

La segunda parte del proyecto se centró en el procesamiento de las señales captadas por el hardware. Inicialmente, los datos recolectados se almacenaban para su posterior análisis, con el fin de identificar la frecuencia cardiaca y respiratoria, lo cual sería implementado más adelante en tiempo real. En esta fase, no solo se aplicó un filtrado a las señales, sino que también se llevaron a cabo otros procesos como la rectificación y normalización de los datos. Esta primera etapa fue clave para identificar con precisión las frecuencias, lo que permitió su ejecución en tiempo real durante la segunda fase del procesamiento. De manera conjunta, ambas partes del proyecto se complementan para ofrecer un sistema de monitoreo canino integral y eficiente, con el potencial de mejorar significativamente la calidad de vida de nuestras mascotas.

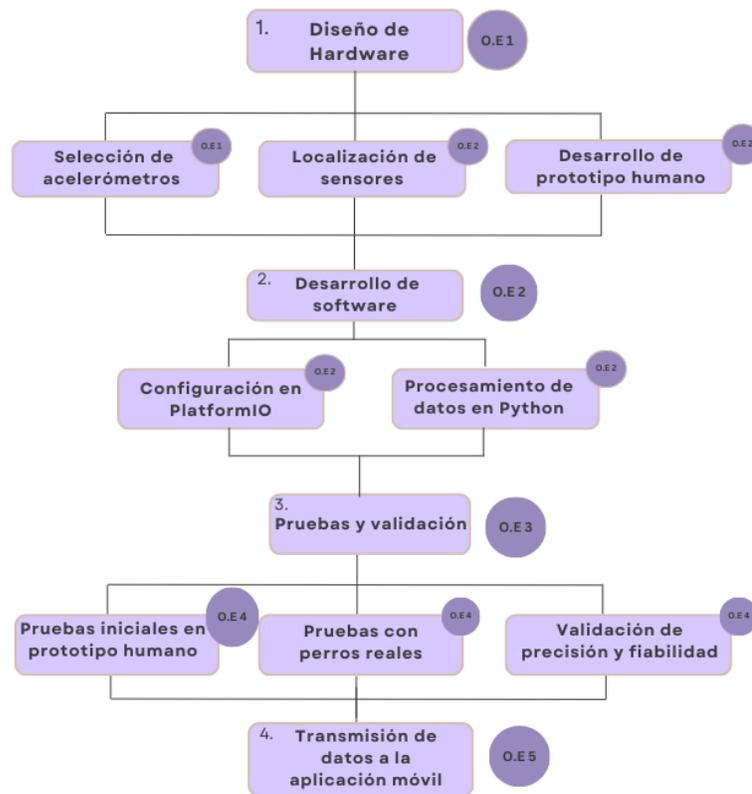


Figura 1. Diagrama de metodología (fuente propia).

1. Diseño

El estudio detallado de las características de los acelerómetros elegidos fue esencial para garantizar la precisión y la efectividad del sistema de monitoreo canino, debido a que estos dispositivos constituyen la columna vertebral del sistema permitiendo la captura precisa de datos relacionados con la actividad y el movimiento del canino en tiempo real.

1.1 Acelerómetros

Para realizar una correcta elección de los acelerómetros se debían de tener en cuenta entre los sensores presentados en el marco teórico cuál o cuáles tenían componentes relacionadas al movimiento rotacional y de oscilación para la detección de las micro vibraciones precordiales causadas por los movimientos del corazón, midiendo de esta manera los movimientos rotacionales y cambios de orientación asociados a la oscilación presentada en el movimiento del bombeo

cardíaco y al movimiento de expansión y contracción del tórax en la respiración y de esa manera estimar la frecuencia cardíaca y la frecuencia respiratoria.

La siguiente cuestión que se debía de responder era la ubicación óptima de los mismos sobre el cuerpo del canino, debido a que estas ubicaciones garantizarán mediciones precisas y cómodas, maximizando la utilidad y la aceptabilidad del sistema para tanto los animales como sus cuidadores.

1.2. Localización efectiva de los acelerómetros

El "mapa de usabilidad" es una guía ergonómica que describe la interacción entre el cuerpo humano y los objetos portátiles, destacando las ubicaciones óptimas para colocar sensores con el fin de estudiar los músculos relevantes. Se propuso un enfoque que emplea un acelerómetro colocado en el pecho para detectar características respiratorias y ronquidos, facilitando el diagnóstico de apnea durante el sueño [25]. Es fundamental asegurar que los acelerómetros u otros sensores de movimiento se ajusten y sujeten de forma segura al cuerpo para evitar cualquier movimiento relativo que pueda introducir vibraciones no deseadas o desplazamientos en los sistemas portátiles. La sujeción inadecuada puede generar artefactos en la señal y comprometer la precisión del sensor.

En el caso específico de los canes, no existe una guía ergonómica que describa la interacción del cuerpo de los animales y los objetos portátiles, pero hay estudios que especifican las mejores ubicaciones para colocar los sensores según el tipo de movimiento que se quiere medir. Las 8 ubicaciones evaluadas para la colocación de los acelerómetros en perros en el estudio incluyen: parte superior del collar, parte inferior del collar, bolsillo en un chaleco sobre la porción lateral del tórax, parte lateral del húmero, antebrazo, parte lateral del tórax, debajo del esternón, debajo del abdomen.

Otra consideración importante que se realizó para una correcta ubicación de los sensores es la manera en que dichos sensores se sujetan al cuerpo, en este caso se hizo mediante una sujeción utilizando un cable gris Ribbon plano sujetadas al chaleco mediante cinta [26][27][28], con el objetivo de evitar las vibraciones y desplazamientos relativo entre los sensores y el cuerpo en movimiento del sujeto en cuestión asegurando una correcta conexión entre los acelerómetros, el microcontrolador y el material del chaleco.

1.3 Prototipo para la evaluación humana

Antes de implementar el sistema de monitoreo en caninos, se diseñó y desarrolló un prototipo adaptado para ser utilizado por humanos, con el fin de validar su funcionamiento. Este dispositivo permitió evaluar la comodidad, viabilidad y funcionalidad del sistema en un entorno controlado, lo que facilitó la obtención de retroalimentación más accesible y detallada. Gracias a la retroalimentación recibida, fue posible identificar posibles problemas y realizar los ajustes necesarios antes de aplicar el sistema en animales. Se invitó a voluntarios humanos para probar el prototipo, quienes proporcionaron valiosas sugerencias sobre su experiencia de uso, lo que permitió optimizar tanto el hardware como el software implementado.

2. Software

Una vez capturada la señal de la frecuencia cardíaca mediante su implementación en lenguaje C++, se procedió a su digitalización para su posterior procesamiento. Este primer proceso implicó un análisis mediante la transformada de Fourier, que convierte la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, permitiendo identificar con precisión las frecuencias de las señales observadas y de esta manera asegurar que las señales obtenidas correspondían a las frecuencias relacionadas a los movimientos cardíacos y respiratorios. La transferencia de datos entre el microcontrolador y la computadora se realizó primeramente mediante el almacenamiento de los datos arrojados por los acelerómetros en una tarjeta SD, para su posterior procesamiento de datos post-toma de datos en python y seguidamente realizar el procesamiento de datos en tiempo real.

2.1 Plataforma de desarrollo

Platformio es la herramienta de desarrollo que fue utilizada para garantizar una comunicación eficiente entre el microcontrolador y los acelerómetros [28]. Se configuraron los pines correspondientes, teniendo en cuenta los pines OUT de comunicación de los sensores, y se implementó el protocolo de comunicación I2C para la interacción con los acelerómetros y el microcontrolador. En esta plataforma se utilizó el lenguaje C++ para la inicialización de la toma de datos, la cual requiere un mensaje Bluetooth del usuario. En caso de que los sensores o la tarjeta SD no se inicialicen de manera correcta, se envían mensajes mediante Bluetooth al usuario para garantizar su correcto uso.

Los datos de los sensores se almacenan en un array durante 15 segundos para su posterior procesamiento, donde el primer dato siempre corresponde al sensor del pecho y el segundo dato corresponde al sensor del cuello. Después del debido almacenamiento, el array se duplica en otro para su posterior procesamiento y para vaciar el array de almacenamiento de toma de datos. En el array de procesamiento se realiza la rectificación, normalización y filtrado de datos en tiempo real. En cada proceso realizado, se crean archivos con los nombres correspondientes a cada paso para poder comparar con el proceso realizado post-captura de datos y, de esta manera, validar cada proceso implementado para el procesamiento de los datos en tiempo real.

2.2 Python

El procesamiento de las señales post-captura se llevó a cabo primeramente utilizando el lenguaje de programación Python, en donde primeramente se identificó mediante la transformada de fourier las frecuencias de las señales y de esa manera validar las señales captadas por los acelerómetros, seguidamente se implementaron técnicas de procesamiento de señales como la rectificación, normalización, filtrado y obtención de la frecuencia cardiaca o respiratoria correspondiente mediante un umbral de detección de picos.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El primero resultado presentado en el este trabajo se enfoca principalmente en el diseño final del dispositivo, en donde se logró visualizar que los únicos acelerómetros necesarios fueron los 2 MPU6050 ubicados en el pecho y en el cuello respectivamente para poder detectar los datos de frecuencia respiratoria y frecuencia cardiaca, conectados a un microcontrolador BEETLE ESP32 y a su vez, al microcontrolador se le conecta una tarjeta para USD micro SD, el esquemático se puede apreciar en la Figura 2, en donde utilizaron los colores verde oscuro para la línea de alimentación o 3.3 V, el color negro para la línea de GND o tierra, los colores rosado oscuro para la línea de SDA y el color azul para la línea de SCL desde el microcontrolador a los sensores, en donde se tiene que se utiliza el mismo pin de SDA y SCL para una correcta coordinación de la entrega de los datos, desde el código se tiene para cada sensor una dirección I2C diferente y de esa manera identificar qué dato corresponde a cada sensor. Por otro lado, las conexiones de la tarjeta para USD micro SD son la alimentación y tierra que también corresponde a los pines utilizados por los sensores y también se le conectan los pines CS, MISO, MOSI, SCK con los pines D2, D3, D4, D7 respectivamente para facilitar la comunicación mediante el protocolo SPI (Serial Peripheral Interface). Para hacer el dispositivo portátil, se conectó una batería de litio de 3.7 V a los pines VIN y GND del microcontrolador.

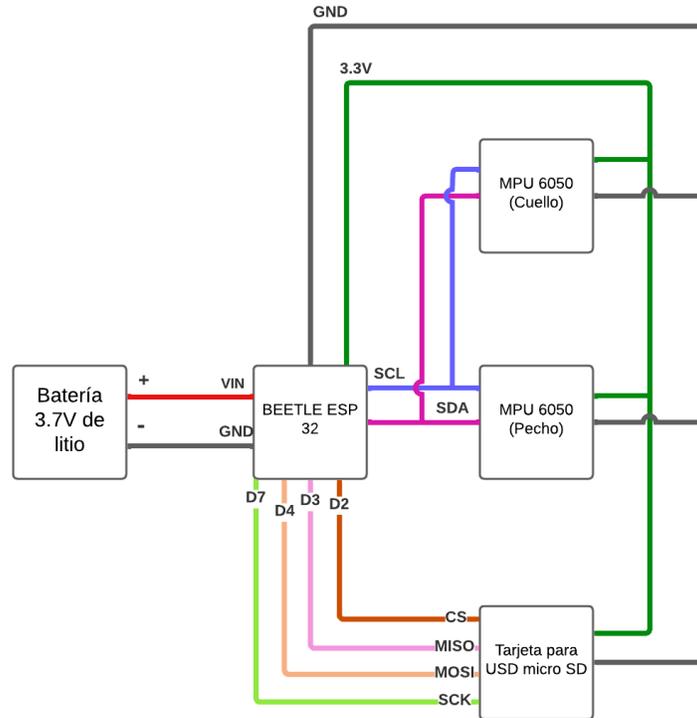


Figura 2. Esquemático electrónico (fuente propia).

Una vez se tenía en el correcto esquemático del dispositivo realizaron pruebas iniciales en un entorno controlado utilizando el prototipo humano, lo que permitió identificar y corregir errores en el código del dispositivo principalmente para poder identificar que los sensores y la micro SD se han inicializado correctamente debido a que en las pruebas realizadas por las personas, se pudo determinar que en muchas ocasiones, se creía que se estaban registrando y guardando los datos de manera correcta y cuando se iban a revisar los datos se observaba que no estaban los archivos creados de ese sujeto, es por eso que se decidió enviar mensajes que permitieran al sujeto saber que todas las inicializaciones y todas las conexiones estuvieran funcionando de manera adecuada como se puede observar en la Figura 3.

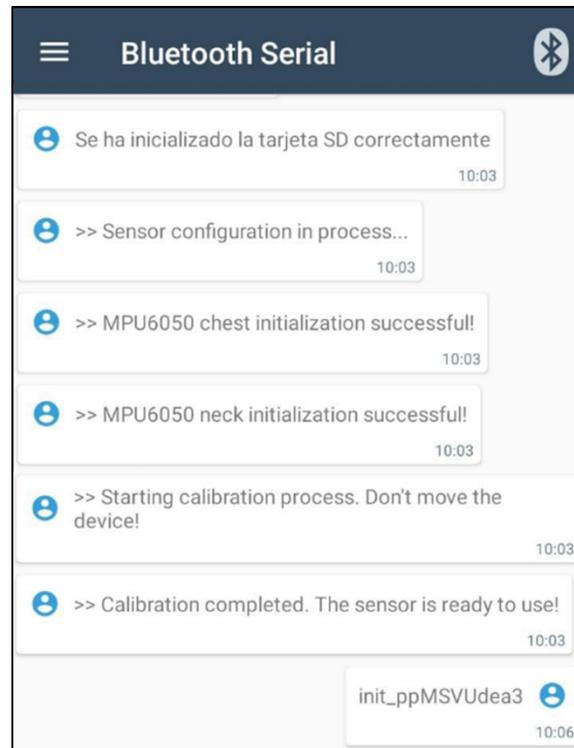


Figura 3. Mensajes en Bluetooth Serial.

Los datos en la micro SD se guardaban en una fila de datos para cada sensor, en donde se tenía que la primera fila correspondía a los datos registrados por el sensor del pecho y la segunda fila eran los datos registrados por el sensor del cuello separados por comas como se puede observar en la Figura 4.

```
60, -256
214, 294
-96, -709
-356, 220
-195, -230
217, 23
108, 223
355, 403
3, 255
-35, 299
151, -263
-299, 87
162, -179
-107, 117
```

Figura 4. Datos RAW guardados en la SD.

Como se mencionó previamente en la metodología, en este proyecto se realizó inicialmente un análisis de los datos de manera no simultánea. Por lo tanto, los primeros resultados que se presentarán corresponden al procesamiento de datos realizado fuera de tiempo real, seguido de los resultados obtenidos tras implementar el procesamiento en el código principal para calcular las frecuencias cardíaca y respiratoria en tiempo real.

1. Procesamiento de los datos a destiempo

En el procesamiento de datos a destiempo se hizo en el lenguaje de programación Python, en archivos .ipynb, el primer paso que se realizó fue leer los datos raw de los archivos guardados en la SD, los cuales estaban en una ruta específica en el pc y se almacenaron en una lista que se había definido vacía con anterioridad. Para cada línea de código se eliminan los espacios en blanco o los datos de línea con `strip()`. Debido a que los datos guardados en los archivos corresponden a diferentes sensores separados por comas, se dividieron las líneas en elementos individuales por las comas. Luego, se convirtieron esos elementos a enteros y se almacenan como una lista dentro de la lista datos, en donde cada fila dentro de la lista “datos” tiene 2 valores, que son distribuidos en diferentes listas para analizarlos y graficarlos por separado. En la lista pecho se extrajo el primer valor de cada fila (índice 0) y para la lista cuello se extrajo el segundo valor de cada fila (índice 1).

En la Figura 5 se pueden observar los datos graficados guardados en la micro SD, en donde la primera gráfica corresponde a los datos del sensor ubicado en el cuello y la segunda grafica corresponde a los datos del sensor ubicado en el pecho. Para poder sacar el vector de tiempo correspondiente para graficar los datos de los sensores en función del tiempo se tuvo en cuenta la frecuencia de muestreo que se utilizaba en el código main para los datos originales y el tamaño de las señales para generar la longitud del tamaño del vector del tiempo.

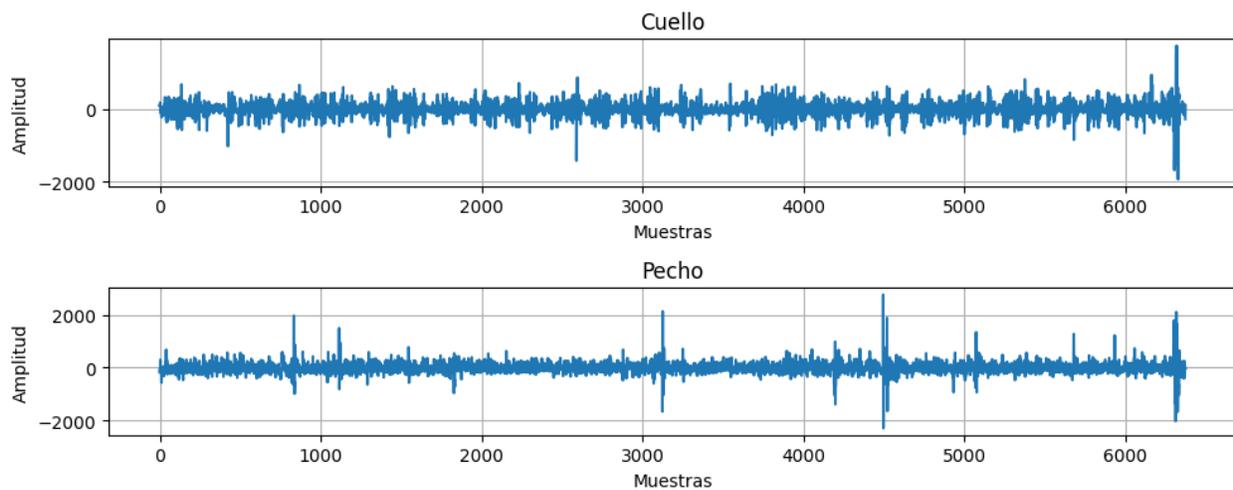


Figura 5. Grafica de los datos del cuello y del pecho Amplitud vs Muestras

En la Figura 6 se pueden observar los datos graficados guardados en la micro SD, en donde la primera gráfica corresponde a los datos del sensor ubicado en el cuello y la segunda grafica corresponde a los datos del sensor ubicado en el pecho en función del tiempo.

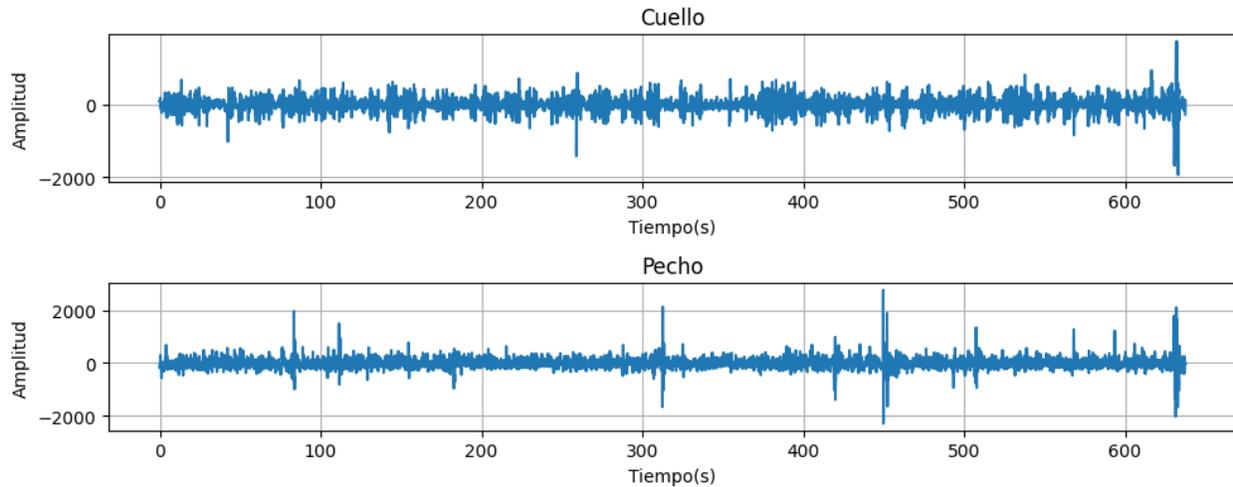


Figura 6. Gráfica de los datos del cuello y del pecho Amplitud vs Tiempo

1.1. Normalización

Una vez se tuvieron los datos en función del tiempo se normalizaron los datos para que todos los datos se encuentren en una escala en común, en este caso, que los datos se encuentren -1 y 1, como se puede observar en la Figura 7, para facilitar la comparación de los datos y el análisis.

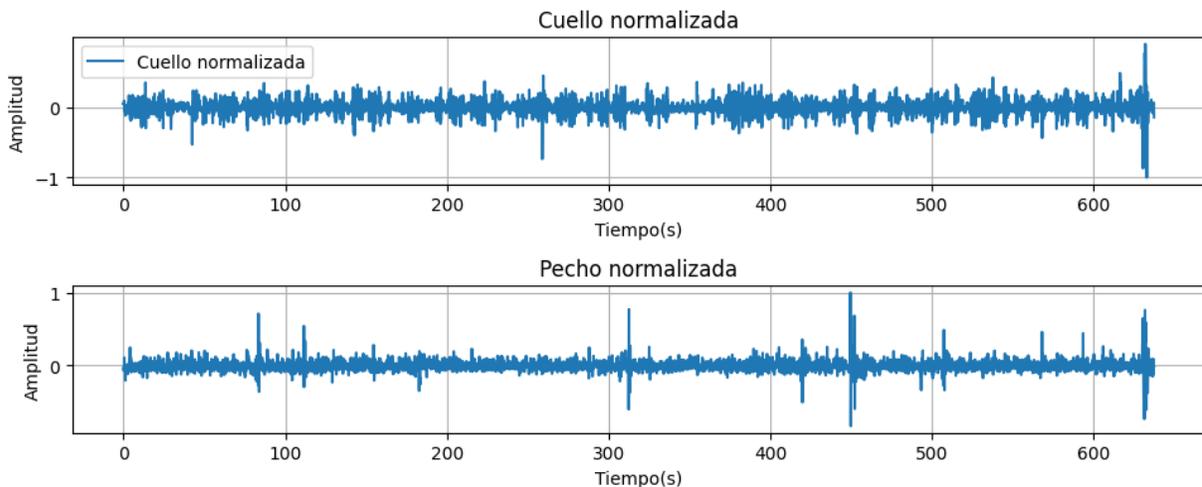


Figura 7. Gráfica de los datos de normalizados de cuello y del pecho Amplitud vs Tiempo

1.2. Rectificación y Filtrado – Rolling average

Para poder trabajar únicamente con valores positivos que representan mejor la magnitud de las variaciones de los datos se eliminó la parte negativa de la señal para un posterior filtrado de la señal, en este caso, se filtraron los datos con Rolling average para poder suavizar la señal, reducir

el ruido y de esa manera mejorar la detección de picos correspondientes a los latidos cardiacos y ciclos respiratorios, conservando la dinámica natural de las señales fisiológicas. En la Figura 8 se puede observar las gráficas de la señal del pecho después de la normalización, siendo esta la curva de color azul. Debajo de la gráfica de la curva del pecho se puede observar la señal del cuello después de la normalización, siendo esta la curva de color rojo y la curva de color negro en ambos subplot corresponde a las señales rectificadas y filtradas de las señales correspondientes.

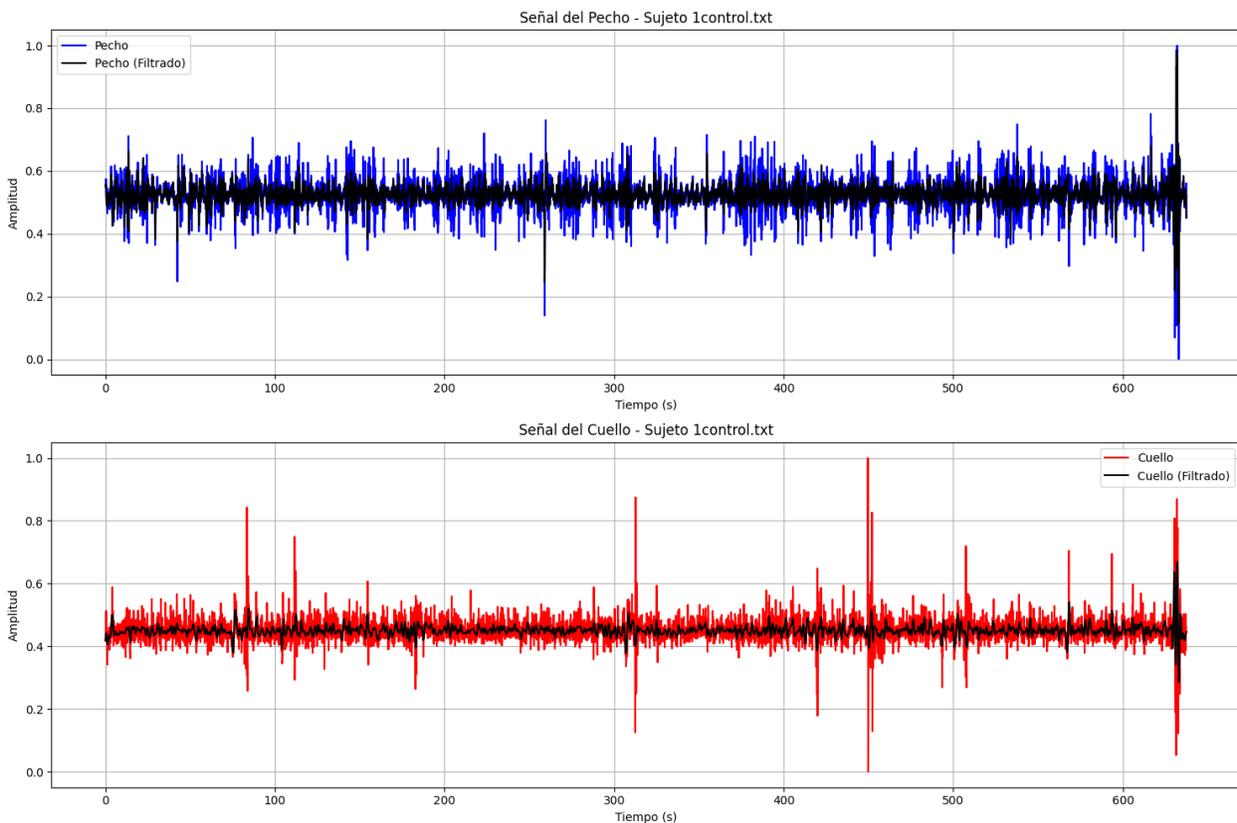


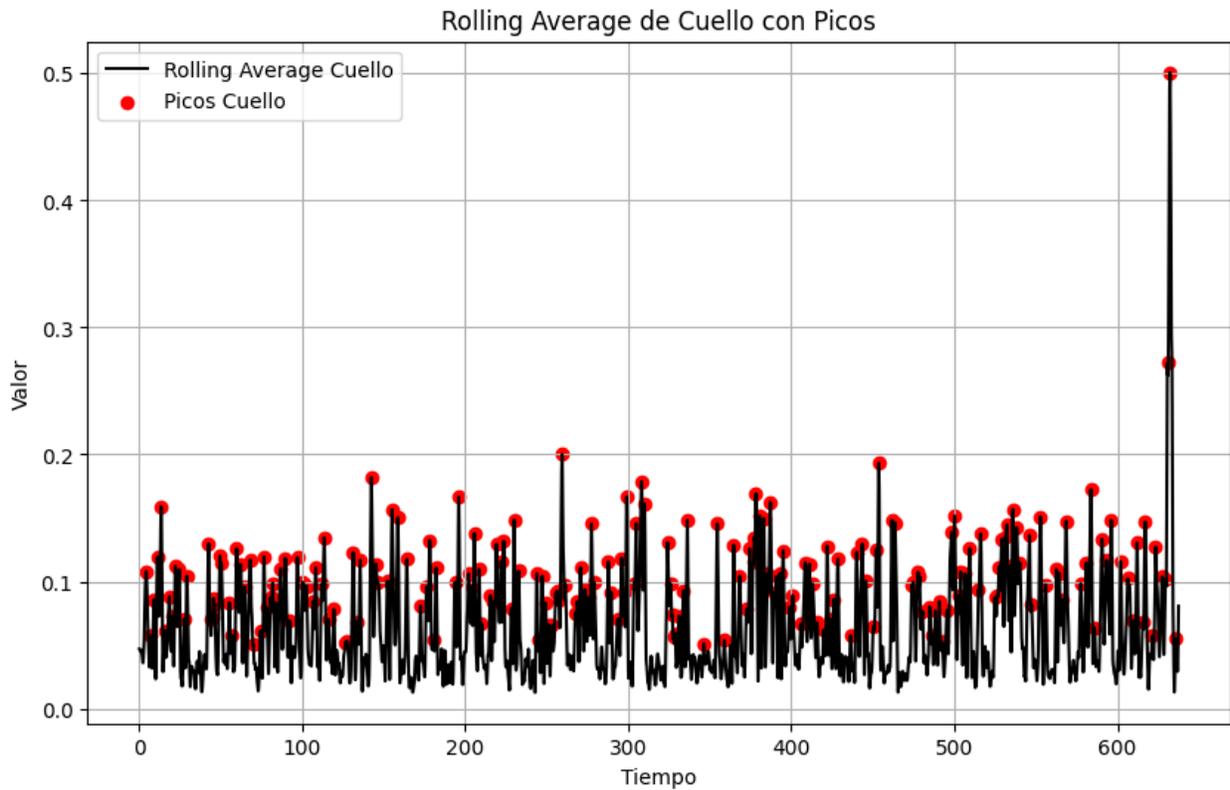
Figura 8. Gráfica de los datos de cuello normalizado y filtrado y del pecho normalizado y filtrado - Amplitud vs Tiempo

1.3. Umbralización de las señales.

Para poder detectar los picos de las señales correspondientes de los picos del pulso cardiaco y de los ciclos respiratorios se utilizó una umbralización, en donde se determinaban los picos los datos que estuvieran por encima de ese umbral con la función `find_peaks` de `scipy.signal` dentro de un intervalo de tiempo de un minuto, para obtener los picos que corresponden a ese periodo de tiempo.

Una vez identificados los picos, se calculan los intervalos de tiempo entre los picos consecutivos, con la función `np.diff()` en donde estos intervalos corresponden a la duración de cada ciclo de la señal.

La frecuencia (cardíaca o respiratoria) se calcula tomando el valor inverso del intervalo promedio entre los picos. Esto se debe a que la frecuencia es el número de ciclos por unidad de tiempo, y los ciclos se pueden derivar de los intervalos entre picos.



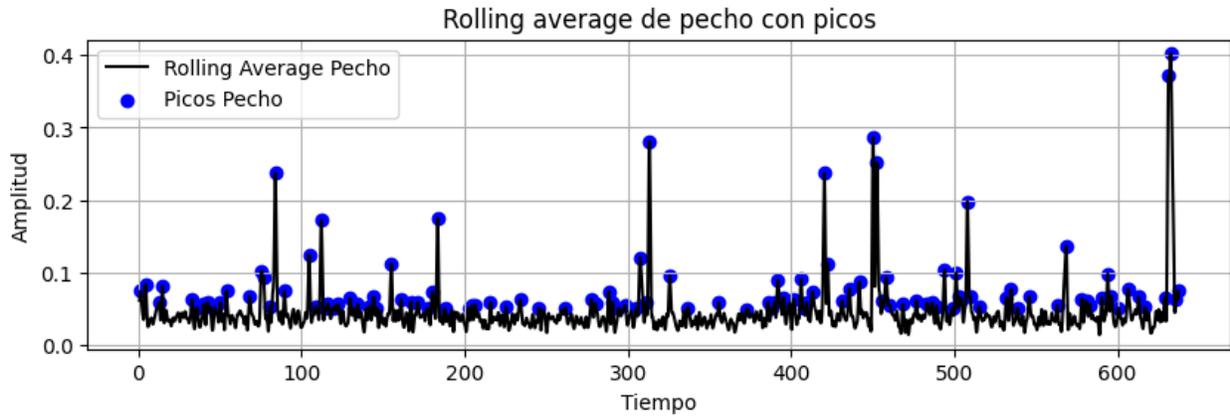


Figura 10. Gráfica de la función de find_peaks() para la señal del pecho

```
# Calcular intervalos entre picos consecutivos en segundos
intervalos_pecho = np.diff(df_suavizada['Tiempo'].iloc[peaks_pecho])

# Calcular frecuencia respiratoria en respiraciones por minuto (rpm)
frecuencia_respiratoria = 60 / np.mean(intervalos_pecho)

print("Frecuencia Respiratoria (rpm):", np.round(frecuencia_respiratoria, 4))
```

Frecuencia Respiratoria (rpm): 10.952

Figura 11. Calculo de la frecuencia respiratoria

```
# Calcular intervalos entre picos consecutivos en segundos
intervalos_cuello = np.diff(df['Tiempo'].iloc[peaks_cuello])

# Calcular frecuencia cardíaca en latidos por minuto (bpm)
frecuencia_cardiaca = 60 / np.mean(intervalos_cuello)

print("Frecuencia Cardíaca (bpm):", np.round(frecuencia_cardiaca, 4))
```

Frecuencia Cardíaca (bpm): 82.1074

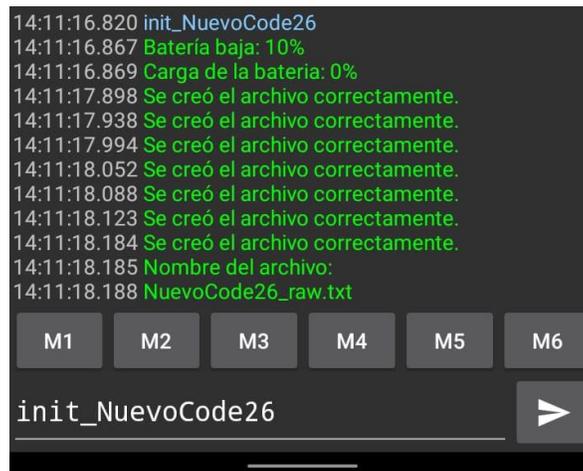
Figura 12. Calculo de la frecuencia cardiaca

Una vez se observó que si era posible hacer un correcto procesamiento de las señales para hallar las frecuencias fisiológicas se procedió a implementar los mismos procesos realizados al código main utilizado en tiempo real.

2. *Procesamiento de los datos a tiempo real*

En el código utilizado para el procesamiento de los datos a tiempo real se utilizaron librerías como la `Arduino.h`, `MPU6050_Sense.h`, `SPI.h`, `BluetoothSerial.h`, `SdFat.h` y `Tarjeta_SD.h`, `Preferences.h` (permite guardar configuraciones y preferencias en la memoria no volátil del microcontrolador, asegurando que ciertos parámetros se mantengan guardados incluso después de apagar el dispositivo), `Wire.h` (librería utilizada para la comunicación I2C), `cfloat` (se incluye para manejar valores extremos en cálculos, como `FLT_MAX`, que representa el valor máximo que puede tomar un número flotante, útil al buscar valores máximos en un conjunto de datos), `esp_task_wdt.h` (maneja el "Watchdog Timer" en el ESP32, una función que reinicia el sistema si detecta que ha dejado de funcionar correctamente, lo cual es crucial para evitar bloqueos en sistemas de tiempo real).

En el código utilizado, después de la configuración de los sensores y la inicialización adecuada de los mismos se crean los 7 archivos correspondientes a los datos raw, datos rectificados, datos normalizados, datos filtrados, datos utilizados en el proceso de la umbralización (desviación estándar y media) y los datos de las frecuencias. En la Figura 13, se puede observar los mensajes correspondientes a la correcta creación de los archivos en la micro SD.



```
14:11:16.820 init_NuevoCode26
14:11:16.867 Bateria baja: 10%
14:11:16.869 Carga de la bateria: 0%
14:11:17.898 Se creó el archivo correctamente.
14:11:17.938 Se creó el archivo correctamente.
14:11:17.994 Se creó el archivo correctamente.
14:11:18.052 Se creó el archivo correctamente.
14:11:18.088 Se creó el archivo correctamente.
14:11:18.123 Se creó el archivo correctamente.
14:11:18.184 Se creó el archivo correctamente.
14:11:18.185 Nombre del archivo:
14:11:18.188 NuevoCode26_raw.txt
```

M1 M2 M3 M4 M5 M6

init_NuevoCode26

Figura 13. Mensajes de la creación de archivos

2.1. *Rectificación*

Los datos raw se rectifican, es decir que se toma el valor absoluto de cada lectura y de esa manera eliminando los valores negativos, que pueden surgir debido a la dirección del movimiento.

```
60.00,256.00
214.00,294.00
96.00,709.00
356.00,220.00
195.00,230.00
217.00,23.00
108.00,223.00
355.00,403.00
3.00,255.00
35.00,299.00
151.00,263.00
299.00,87.00
162.00,179.00
107.00,117.00
```

Figura 14. Rectificación de los datos RAW

2.2. Normalización

Los datos se escalan para estar dentro de un rango estándar, dividiendo cada valor por el valor máximo encontrado en la muestra, en el caso de los datos en tiempo real, puede que aparezcan datos en el tiempo que se vuelva el valor máximo encontrado, el cual se va a estar actualizando siempre que se tomen los datos rectificadas.

```
0.17,0.36
0.60,0.41
0.27,1.00
1.00,0.31
0.55,0.32
0.61,0.03
0.30,0.31
1.00,0.57
0.01,0.36
0.10,0.42
0.42,0.37
0.84,0.12
0.46,0.25
0.30,0.17
```

Figura 15. Normalización de los datos rectificadas

2.3. Filtrado con promedio móvil o rolling average:

Se aplica un filtro de promedio móvil para suavizar la señal de 5 datos muestreados.

```
0.168539,0.361072  
0.384831,0.387870  
0.346442,0.591914  
0.509831,0.521509  
0.517416,0.482087  
0.605618,0.416361  
0.303371,0.314528  
0.650281,0.441467  
0.436330,0.414198  
0.351826,0.416079  
0.424157,0.370945  
0.632022,0.246827  
0.573034,0.248707  
0.504916,0.227786
```

Figura 16. Filtrado de datos normalizados

2.4. Cálculo de frecuencias

El umbral para detectar picos se calcula utilizando la media y la desviación estándar de los datos filtrados, considerándose un valor como pico si supera dicho umbral. Posteriormente, se calcula la frecuencia cardíaca (FC) y la frecuencia respiratoria (FR), inicialmente en personas, como se muestra en la Figura 17, donde se compara el dispositivo basado en acelerómetros con el valor de frecuencia cardíaca de un oxímetro de pulso. Cabe destacar que, en el dispositivo desarrollado, las frecuencias se obtuvieron como números flotantes, pero dado que los dispositivos médicos actuales no tienen una resolución menor a 1, los datos obtenidos de los perros fueron ajustados en consecuencia. Este ajuste se realizó para los resultados de dos perros: Berlín, un perro grande cruzado entre pitbull y labrador y Chanel, un perro pequeño, con similitudes a un bulldog Francés.

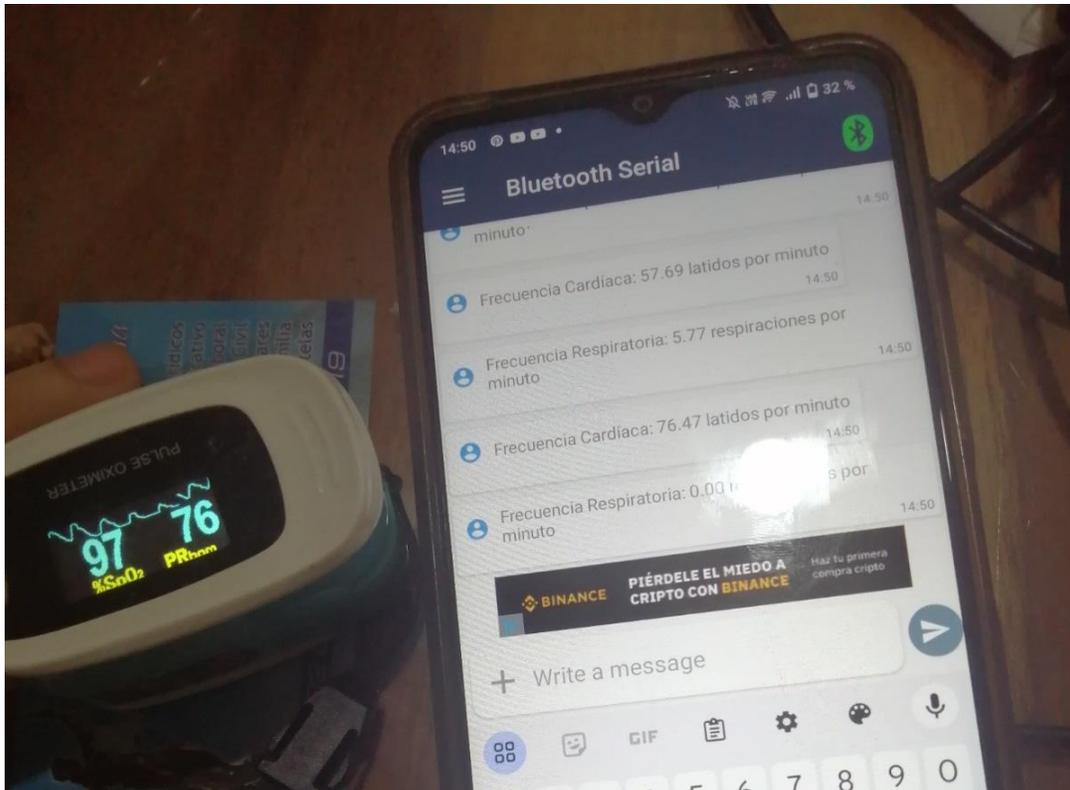


Figura 17. Datos de frecuencia cardiaca en oxímetro y en el dispositivo

Una vez se compararon los datos en personas, se decidió hacer las pruebas en animales. Las pruebas en el perro llamado Berlín se hicieron mientras el perro estaba realizando un paseo en un parque, en donde se pudo observar que en el momento en el que se sacó el perro, sus niveles de frecuencia cardiaca y respiratoria aumentaron, como se puede observar en la Figura 18 que los datos de frecuencia cardiaca y respiratoria se encuentra entre los rangos apropiados de perros de tamaño grande.

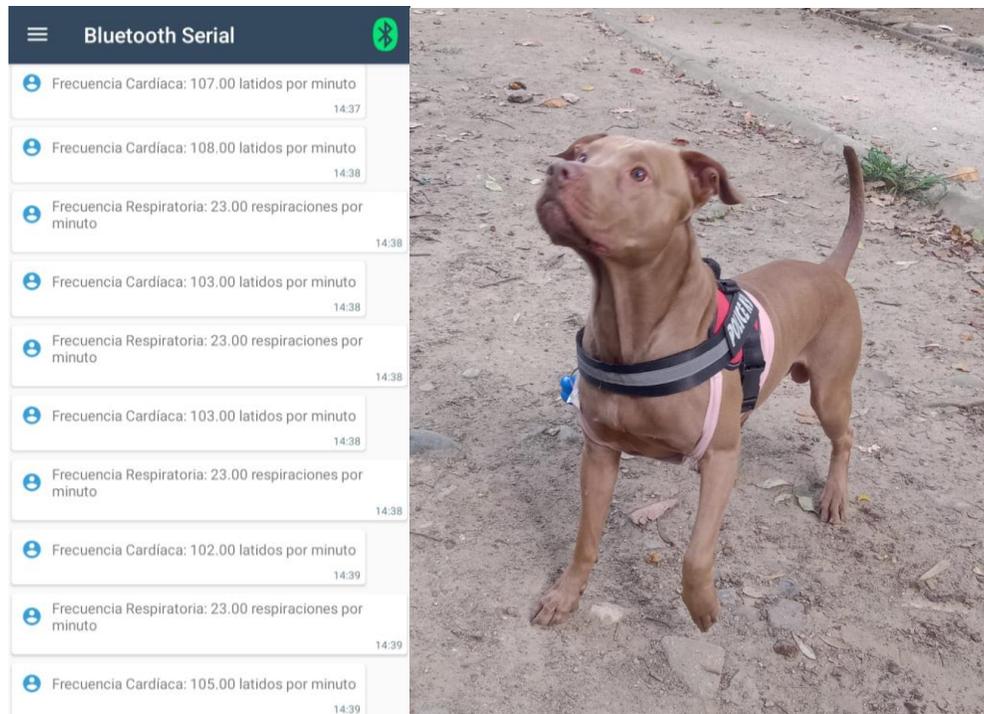


Figura 18. Datos de frecuencia cardíaca y respiratoria de Berlín

Las pruebas en el perro llamado Chanel se hicieron mientras el perro estaba comiendo una paleta de pollo, en donde se pudo observar que los valores de frecuencia cardíaca y respiratoria fueron muy erráticos, debido quizás al hecho de que el perro parecía nervioso, aún así, se pudo apreciar que los datos de frecuencia cardíaca y respiratoria se encuentra entre los rangos apropiados de perros de tamaño pequeño como se puede apreciar en la Figura 19.

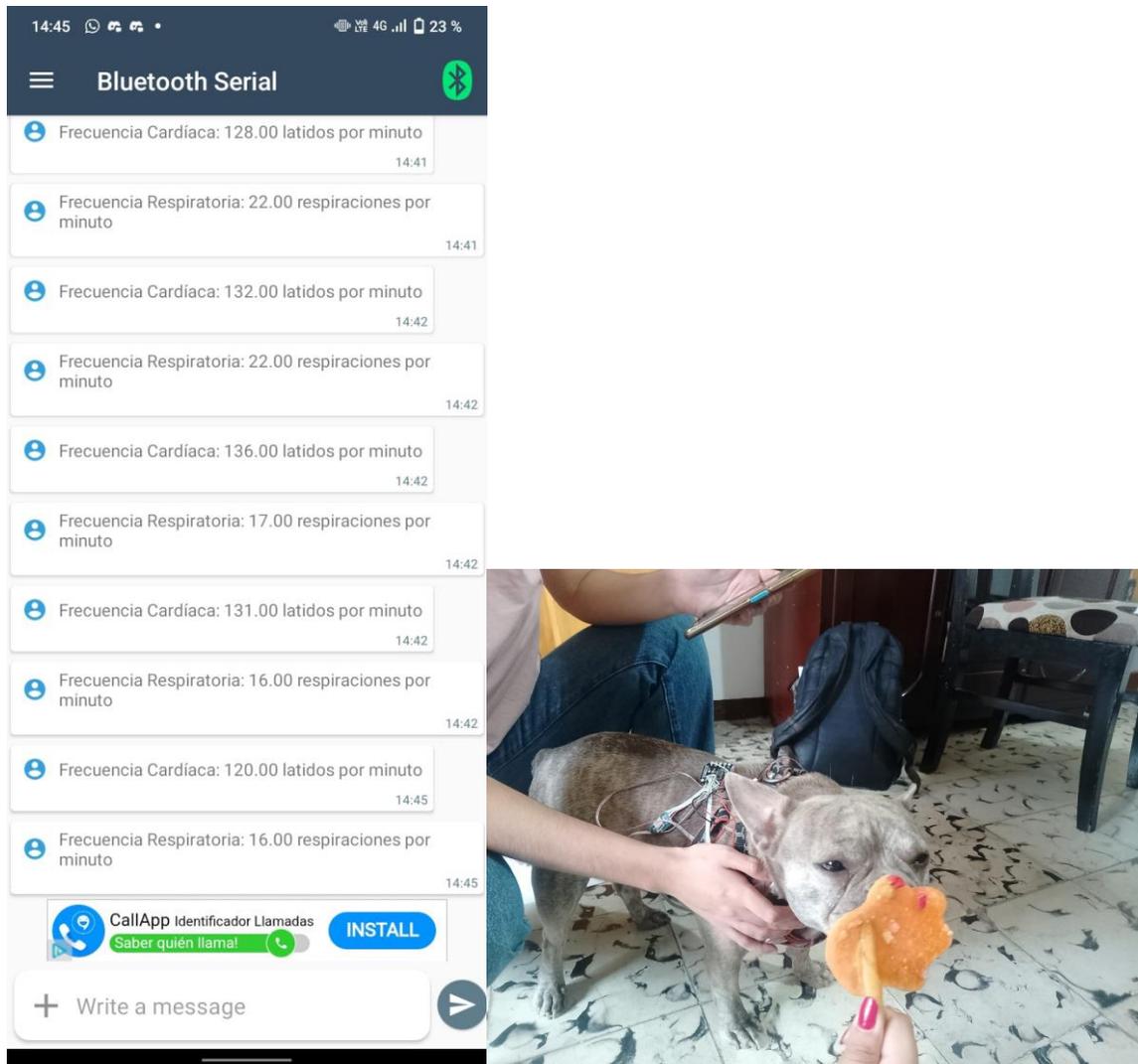


Figura 19. Datos de frecuencia cardíaca y respiratoria de Chanel

3. Conexión a un aplicativo móvil

Para poder compartir los datos a un aplicativo móvil, se debe de crear un archivo .json, el cual se debería de implementar antes del set up() del código original:

```
struct FrequencyData {
    time_t timestamp;
    float heartRate;
    float respiratoryRate;
};

class JohnsonArchive {
private:
```

```

std::vector<FrequencyData> archive;
const size_t maxSize = 1000; // Maximum number of entries to store

public:
void addData(float hr, float rr) {
    FrequencyData data;
    data.timestamp = time(nullptr);
    data.heartRate = hr;
    data.respiratoryRate = rr;

    if (archive.size() >= maxSize) {
        archive.erase(archive.begin());
    }
    archive.push_back(data);
}

String getJSONData() {
    String json = "[";
    for (size_t i = 0; i < archive.size(); ++i) {
        if (i > 0) json += ",";
        json += "{\"timestamp\":\"" + String(archive[i].timestamp);
        json += "\",\"hr\":\"" + String(archive[i].heartRate, 2);
        json += "\",\"rr\":\"" + String(archive[i].respiratoryRate, 2) + "\"}";
    }
    json += "]";
    return json;
}

void clear() {
    archive.clear();
}
};

```

```
JohnsonArchive johnsonArchive;
```

De igual forma también se modificaría la función en la que se sacan los valores de las frecuencias para añadir estos datos al archivo Johnson en donde sólo se le tendría que agregar la siguiente línea de código:

```
johnsonArchive.addData(FC, FR);
```

De igual forma, se agregaría una nueva función para manejar los web request de los datos de los archivos Johnson, la cual se estaría llamando en el loop para que siempre se esté actualizando los datos de frecuencias en el aplicativo web:

```
void handleWebRequest() {
    if (SerialBT.available()) {
        String request = SerialBT.readStringUntil('\n');
        request.trim();

        if (request == "get_johnson_data") {
            String jsonData = johnsonArchive.getJSONData();
            SerialBT.println(jsonData);
        }
    }
}
```

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se seleccionaron dos acelerómetros MPU6050 como los más adecuados para este proyecto, debido a su capacidad para medir movimientos tanto lineales como angulares en tres ejes, en donde se tuvo en cuenta la investigación bibliográfica, las cuales, junto con las pruebas realizadas confirmaron que estos sensores son eficaces para capturar las señales fisiológicas necesarias para medir las frecuencias cardíaca y respiratoria de manera no invasiva en perros.

El diseño final del sistema incluyó la ubicación de los acelerómetros en el pecho y el cuello del perro, posiciones que permitieron obtener datos precisos tanto de la frecuencia respiratoria como de la frecuencia cardíaca. El análisis de la literatura científica respaldó la selección de estas ubicaciones, lo cual fue confirmado por las pruebas experimentales, en donde se pudo observar que cuando los acelerómetros se movían de lugares originales los datos registrados eran muy poco normales si se relacionaban con los datos de frecuencias de perros pequeños o grandes.

Las pruebas realizadas tanto en un entorno controlado como en condiciones reales demostraron que el sistema es capaz de captar y almacenar datos de manera confiable, en donde el procesamiento de las señales permitió identificar las frecuencias cardíaca y respiratoria con un alto grado de fiabilidad al compararlo con los datos de frecuencia cardíaca observados en la Figura 17. Además, la transmisión de datos a la aplicación móvil se espera que sea fluida y efectiva, para que de esta manera se asegure una experiencia de usuario óptima en términos de monitoreo en tiempo real.

Los algoritmos de procesamiento de señales implementados, como la rectificación, normalización y filtrado mediante el uso del promedio móvil (rolling average), permitieron detectar los picos correspondientes a las frecuencias cardíaca y respiratoria. Aunque se observó que los movimientos bruscos del perro introducen cierto ruido en los datos, los algoritmos lograron mantener un nivel adecuado de precisión en la mayoría de los casos. Esto indica que el sistema puede mejorar con el uso de técnicas de filtrado más avanzadas.

La transmisión de datos a través de Bluetooth permitió a los usuarios visualizar los parámetros fisiológicos de los perros en tiempo real, con un rendimiento estable, una distancia entre el aplicativo móvil y el perro lo suficiente para que este se pueda mover sin problema y sin interrupciones significativas. Esto demuestra la viabilidad del sistema como herramienta de monitoreo remoto en entornos domésticos y veterinarios.

Sin embargo, se identificaron algunas limitaciones en el proyecto como lo fue la precisión de las mediciones, la cual puede verse afectada por movimientos bruscos del animal, lo que introduce ruido en los datos, subrayando la importancia de seguir investigando en métodos de filtrado y procesamiento de señales para mejorar la robustez del sistema. Además, la ubicación de los sensores en el chaleco es un aspecto crítico que debe optimizarse para diferentes tamaños y razas de perros, ya que esto puede influir en la calidad de los datos obtenidos, dichas observaciones sugieren que futuras investigaciones deben enfocarse en mejorar el filtrado de señales y la precisión en situaciones de movimiento intenso.

Basándose en lo anteriormente mencionado se hacen las siguientes recomendaciones para trabajos a futuro en esta línea para el monitoreo canino:

1. Mejora en el procesamiento de señales: Se recomienda explorar técnicas de procesamiento de señales más avanzadas, como el filtrado adaptativo, filtros de Kalman o algoritmos de machine learning. Estas técnicas podrían mejorar significativamente la detección de las frecuencias cardíaca y respiratoria, minimizando el impacto del ruido causado por los movimientos bruscos del perro.
2. Optimización del diseño de hardware: Sería beneficioso integrar todos los componentes (acelerómetros, microcontrolador y tarjeta SD) en un módulo flexible y compacto que se ajuste mejor a la morfología del perro. Este diseño podría mejorar la comodidad del animal y la fiabilidad de las mediciones, reduciendo el riesgo de desconexiones indeseados o desplazamientos del sistema.
3. Desarrollo de la aplicación móvil: Las recomendaciones relacionadas al aplicativo móvil se basan más que todo en incluir funcionalidades personalizadas como los son las alertas según las necesidades específicas del perro, almacenamiento de un historial de datos para análisis a largo plazo, y la opción de compartir estos datos directamente con veterinarios para una supervisión más detallada.
4. Optimización energética: Aunque el sistema es funcional con una batería de 3.7 V, se recomienda optimizar el consumo energético del dispositivo para prolongar la vida útil de la batería durante sesiones de monitoreo prolongadas o en casos en los que el perro se encuentre perdido con la idea de poder saber por el mayor tiempo posible la salud del perro hasta encontrarlo. Esto podría incluir el uso de modos de bajo consumo en el microcontrolador o la implementación de baterías con mayor capacidad.

5. Exploración de tecnologías de comunicación alternativas: Si bien la transmisión de datos vía Bluetooth fue efectiva, se podría explorar la incorporación de otras tecnologías como LoRa o Wi-Fi para ampliar el rango de operación del dispositivo y permitir el monitoreo a mayor distancia.
6. Mejora en la conexión de cables: Durante las pruebas, se observó que los cables se desconectaban frecuentemente, lo cual puede afectar la fiabilidad del sistema. Para abordar este problema, se recomienda:
 - a) Utilizar conectores más robustos y seguros, como conectores de bloqueo o de tipo industrial, que sean resistentes a las vibraciones y movimientos.
 - b) Implementar un sistema de gestión de cables más eficiente, como el uso de arneses o fundas protectoras que mantengan los cables organizados y protegidos.
 - c) Explorar la posibilidad de utilizar tecnología de conexión inalámbrica entre los sensores y el microcontrolador principal, eliminando así la necesidad de cables físicos entre estos componentes.

REFERENCIAS

- [1] Foster, M., Brugarolas, R., Walker, K., Mealin, S., Cleghern, Z., Yuschak, S., ... Bozkurt, A. (2020). Preliminary Evaluation of a Wearable Sensor System for Heart Rate Assessment in Guide Dog Puppies. *IEEE Sensors Journal*, 1–1. doi:10.1109/jsen.2020.2986159
- [2] Brugarolas, R., Latif, T., Dieffenderfer, J., Walker, K., Yuschak, S., Sherman, B. L., ... Bozkurt, A. (2016). Wearable Heart Rate Sensor Systems for Wireless Canine Health Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 16(10), 3454–3464. doi:10.1109/jsen.2015.2485210
- [3] El Espectador, "Revelan el número de mascotas que hay en Colombia: son más perros que gatos," *El Espectador*. [Online]. Available: <https://www.elespectador.com/la-red-zoocial/revelan-el-numero-de-mascotas-que-hay-en-colombia-son-mas-perros-que-gatos-noticias-hoy/>. [Accessed: 15-07-2024].
- [4] Colpoys, J., & DeCock, D. (2021). Evaluation of the FitBark activity monitor for measuring physical activity in dogs. *Animals*, 11(3), 781.
- [5] World Small Animal Veterinary Association (WSAVA), "Global Guidelines," [wsava.org](https://wsava.org/global-guidelines/). <https://wsava.org/global-guidelines/>
- [6] Infobae, "El 60% de los colombianos tienen perro, según cifras del Dane," *Infobae*, Jul. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.infobae.com/colombia/2024/07/21/el-60-de-los-colombianos-tienen-perro-segun-cifras-del-dane/>
- [7] Belda, B., Enomoto, M., Case, B. C., & Lascelles, B. D. X. (2018). Initial evaluation of PetPace activity monitor. *The Veterinary Journal*, 237, 63-68.
- [8] Kawada, T.; Shimizu, T.; Fujii, A.; Kuratomi, Y.; Suto, S.; Kanai, T.; Nishime, A.; Sato, K.; Otsuka, Y. Activity and sleeping time monitored by an accelerometer in rotating shift workers. *Work* 2008, 30, 157-160.
- [9] LI, Qibing. Analysis of Innovation Opportunities for AirTag. En 2021 3rd International Conference on Economic Management and Cultural Industry (ICEMCI 2021). Atlantis Press, 2021. p. 1496-1498.].
- [10] BestReviews.Guide, "Pet Locator GPS," [Online]. Available: <https://www.bestreviews.guide/pet-locator-gps>.
- [11] Tractive, "Time on Pet," [En línea]. Disponible en: <https://tractive.com/pages/en/time-on-pet/>.
- [12] Copete Lucumi, V y Restrepo Moreno, A. (2019). Desarrollo de un prototipo de monitoreo no invasivo de signos vitales y localización para caninos. Institución Universitaria Antonio José Camacho. Disponible en: <https://repositorio.uniajc.edu.co/handle/uniajc/1138>
- [13] Álvarez R. Iván, Cruz M. Luis Eduardo. Fisiología cardiovascular aplicada en caninos con insuficiencia cardíaca. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rmv/n21/n21a09.pdf>
- [14] Alvarenga. F. Rosy. Parámetros de monitorización bajo anestesia en perros y gatos. [En línea] Disponible en:

- <https://www.agronomia.ues.edu.sv/agrociencia/index.php/agrociencia/article/download/37/45/460>
- [15] Angelucci, A., Biretoni, F., Bufalari, A., & Aliverti, A. (2024). Validation of a Wearable System for Respiratory Rate Monitoring in Dogs. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10546922/>
- [16] B. M. Corcoran, "Static respiratory compliance in normal dogs," *J. Small Animal Pract.*, vol. 32, no. 9, pp. 438–442, Sep. 1991.
- [17] I. Asorey, L. Pellegrini, S. Canfrán, G. Ortiz-Díez, and D. Aguado, "Factors affecting respiratory system compliance in anaesthetised mechanically ventilated healthy dogs: A retrospective study," *J. Small Animal Pract.*, vol. 61, no. 10, pp. 617–623, Oct. 2020
- [18] N. E. Sigrist, K. N. Adamik, M. G. Doherr, and D. E. Spreng, "Evaluation of respiratory parameters at presentation as clinical indicators of the respiratory localization in dogs and cats with respiratory distress," *J. Veterinary Emergency Crit. Care*, vol. 21, no. 1, pp. 13–23, Feb. 2011
- [19] ARENY, Ramón Pallás. *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo, 2004
- [20] M. J. Aguilar Cordero, A. M. Sánchez López, R. Guisado Barrilao, R. Rodríguez Blanque, J. Noack Segovia y M. D. Pozo Cano. Descripción del acelerómetro como método para valorar la actividad física en los diferentes periodos de la vida; revisión sistemática. [En línea] Disponible en: https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112014000600005
- [21] MPU6050 Datasheet. [En línea] Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/517744/ETC1/MPU-6050.html>
- [22] ADXL345 Datasheet. [En línea] Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/254714/AD/ADXL345.html>
- [23] PÉREZ, D. *Sistemas embebidos y sistemas operativos embebidos. Lecturas en ciencias de la computación*. Universidad Central de Venezuela, Vols. % i de % 2 ISSN, 2009, p. 1316-6239
- [24] MILLAHUAL, Claudio Peña. *Descubriendo arduino*. RedUsers, 2020.
- [25] ARRIETA ALMARIO, Álvaro; FUENTES AMÍN, Oscar. Lengua electrónica portátil para el análisis de leche cruda basada en tecnología PSoC (Programmable System on Chip) y Android. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 2016, vol. 24, no 3, p. 445-453.
- [26] CAMARMAS-ALONSO, Diego, et al. "Integración del simulador creator con hardware risc-v: caso de estudio con microcontrolador esp32. XXXIII Jornadas de Paralelismo (JP2023), 2023.].
- [27] C.-C. Yang y Y.-L. Hsu, "A Review of Accelerometry-Based Wearable Motion Detectors for Physical Activity Monitoring,"
- [28] Park, J.H.; Kim, H.J.; Kang, S.J. Validation of the AMP331 monitor for assessing energy expenditure of free-living physical activity. *Res. Quart. Exerc. Sport* 2006, 77, A40-A40.
- [29] Menz, H.B.; Lord, S.R.; Fitzpatrick, C. Age-related differences in walking stability. *Age*

Ageing 2003, 32, 137-142.

- [30] Menz, H.B.; Lord, S.R.; Fitzpatrick, R.C. Acceleration patterns of the head and pelvis when walking are associated with risk of falling in community-dwelling older people. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 2003, 58, 446-452.