

Escuela de Ingeniería Industrial

TRABAJO FIN DE GRADO

Mejora de un sistema basado en dispositivos wearables para la monitorización automática de test de marcha en pacientes cardiológicos.

Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática

ALUMNO: Simón Portela Queimaño

DIRECTORES: José Fariña Rodríguez

César Gabriel Veiga García

UniversidadeVigo

RESUMEN

El test de la marcha de los seis minutos es una prueba médica utilizada para evaluar la evolución de pacientes con patologías cardiorrespiratorias. Consiste en determinar la distancia máxima que puede recorrer una persona en un tiempo de seis minutos. Antes y después de la realización de la prueba se toman medidas de las variables fisiológicas de interés, como la frecuencia cardíaca o la saturación de oxígeno.

El procedimiento actual para la realización de la prueba consiste en hacer caminar al paciente por un pasillo interior, de longitud conocida, en el que se colocan marcas cada cierta distancia, habitualmente 3 metros. El técnico encargado de la supervisión del test toma las medidas correspondientes al inicio y al final de este y apunta la distancia recorrida ayudándose de las marcas.

Este proyecto tiene como finalidad mejorar la solución propuesta en el TFG “Desarrollo y validación de un sistema basado en dispositivos wearables para la monitorización automática de test de marcha en pacientes cardiológicos” de la alumna María Termenón Rivas; cuya finalidad era desarrollar una aplicación que facilitase la realización de esta prueba recogiendo todos los datos de interés. Para dicha aplicación, se cuenta con un dispositivo wearable desarrollado por el departamento de Tecnología Electrónica que cuenta con un sensor óptico de reflexión y un acelerómetro y giroscopio de tres ejes.

El principal objetivo de este proyecto es implementar una nueva metodología robusta, para detectar correctamente los cambios de sentido en la marcha del paciente. Además de adaptar el cálculo del resto de parámetros, como el número de pasos por cada tramo y la zancada del paciente; ya que todos estos dependen del correcto cálculo de los instantes donde el paciente realiza el cambio de sentido y así determinar el valor de la distancia total recorrida por el paciente.

Por otro lado, también se pretende mejorar la propuesta para calcular tanto la frecuencia cardíaca como la frecuencia respiratoria y valorar la posibilidad de medir más magnitudes fisiológicas como lo puede ser la saturación de oxígeno. Por último, también se pretende actualizar la representación de los datos obtenidos de forma que se muestren claramente y que resulte sencillo acceder al historial de cada paciente para ver su progresión.

Palabras clave: Test de la marcha, IMU, señal PPG, cambio de sentido, detección de pasos.

ABSTRACT

The six-minute walk test is a medical test used to evaluate the evolution of patients with cardiorespiratory pathologies. It consists of determining the maximum distance that a person can travel in six minutes. Before and after the test, measurements are taken of the physiological variables of interest, such as heart rate or oxygen saturation.

The current procedure of the test consists in telling the patient to walk through an interior corridor, of known length, in which marks are placed every certain distance, usually 3 meters. The technician in charge of supervising the test takes the corresponding measurements at the beginning and end of the test and records the distance travelled using the marks.

The purpose of this project is to improve the solution proposed in the TFG “Development and validation of a system based on wearable devices for the automatic monitoring of walking tests in cardiology patients” of the student María Termenón Rivas; The purpose of which was to develop an application that would facilitate the performance of this test by collecting all the data of interest. For this application, there is a wearable device developed by the Electronic Technology department that has an optical reflection sensor and a three-axis accelerometer and gyroscope.

The main objective of this project is to implement a new robust methodology to correctly detect changes of direction in the patient's gait. In addition to adapting the calculation of the rest of the parameters, such as the number of steps for each section and the patient's stride; since all these depend on the correct calculation of the instants where the patient makes the change of direction and thus determine the value of the total distance traveled by the patient.

Furthermore, it is also intended to improve the proposal to calculate both the heart rate and the respiratory rate and assess the possibility of measuring more physiological magnitudes such as oxygen saturation.

Finally, it is also intended to update the representation of the data obtained so that it is clearly displayed and that it is easy to access the history of each patient to see their progression.

Keywords: Walk test, IMU, PPG signal, change of direction, steps detection.

RESUMO

O test da marcha dos seis minutos é unha proba médica empregada para avaliar a evolución de pacientes con patoloxías cardiorrespiratorias. Consiste en determinar a distancia máxima que pode recorrer unha persoa nun tempo de seis minutos. Antes de despois da realización da proba, tómanse medidas das variables fisiolóxicas de interese; como a frecuencia cardíaca ou a saturación de osíxeno.

O procedimento actual para a realización da proba consiste en facer camiñar o paciente por un pasillo interior, de lonxitude coñecida, no que se colocan marcas cada certa distancia, normalmente 3 metros. O técnico encargado da supervisión do test toma as medidas correspondentes ao inicio e ao final deste e anota a distancia recorrida axudándose das marcas.

A finalidade deste proxecto é mellorar a solución proposta no TFG “Desenvolvemento e validación dun sistema baseado en dispositivos wearables para o seguimento automático do test da marcha en pacientes cardiolóxicos” da estudiante María Termenón Rivas. O propósito era desenvolver unha aplicación que facilitase a realización desta proba recollendo todos os datos de interese. Para esta aplicación, cóntase cun dispositivo wearable desenvolvido polo departamento de Tecnoloxía Electrónica que ten un sensor de reflexión óptica e un acelerómetro e xiroscopio de tres eixes.

O principal obxectivo deste proxecto é implementar unha nova metodoloxía robusta para detectar correctamente os cambios de dirección na marcha do paciente. Ademais de adaptar o cálculo do resto de parámetros, como o número de pasos para cada sección e a zancada do paciente; xa que todo isto depende do cálculo correcto dos momentos nos que o paciente realiza o cambio de dirección e determinar así o valor da distancia total percorrida polo paciente.

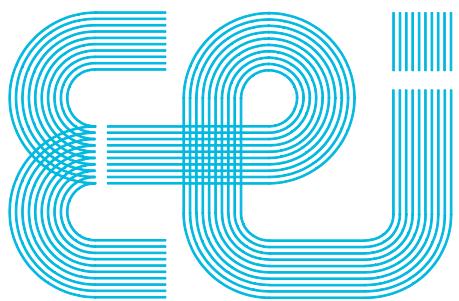
Por outra banda, tamén se pretende mellorar a proposta para calcular tanto a frecuencia cardíaca como a respiratoria e estudar a posibilidade de medir máis magnitudes fisiolóxicas como a saturación de osíxeno.

Finalmente, tamén se pretende actualizar a representación dos datos obtidos para que se mostren claramente e que sexa fácil acceder ao historial de cada paciente para ver a súa progression.

Palabras clave: Test da marcha, IMU, sinal PPG, cambios de sentido, detección dos pasos.

ÍNDICE DE DOCUMENTOS

1. Memoria
2. Anexos
3. Presupuesto



Escuela de Ingeniería Industrial

TRABAJO FIN DE GRADO

Mejora de un sistema basado en dispositivos wearables para la monitorización automática de test de marcha en pacientes cardiológicos.

Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática

Documento

MEMORIA

UniversidadeVigo

CONTENIDO

Contenido	2
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas	6
1 Introducción	7
1.1 Justificación y objetivo	7
1.2 Alcance	8
1.3 Objetivos específicos	8
1.3.1 Implementar un algoritmo robusto de detección de los cambios de sentido	8
1.3.2 Cálculo de la velocidad	8
1.3.3 Procesamiento de la señal PPG	8
1.3.4 Cálculo y representación de las frecuencias cardíaca y respiratoria	9
1.3.5 Representar de forma visual los resultados obtenidos	9
1.3.6 Almacenar los resultados	9
1.4 Antecedentes	9
2 Descripción del dispositivo wearable	11
2.1 Hardware del sistema	11
2.2 Secuencia de operación del dispositivo	12
3 Solución propuesta	15
3.1 Estructura del funcionamiento de la aplicación	15
3.1.1 Recogida de datos	15
3.1.2 Detección del inicio de la prueba	15
3.1.3 Análisis del movimiento	15
3.1.4 Procesado de la señal PPG	15
3.1.5 Almacenamiento de los resultados	15
3.1.6 Representación de los resultados	15
3.2 Descarga y preprocessado de los datos obtenidos del dispositivo	15
3.3 Detección del inicio de la prueba	17
3.4 Análisis del movimiento	20
3.4.1 Detección de los cambios de sentido	22
3.4.2 Detección de los pasos	25
3.4.3 Cálculo de la distancia recorrida	27
3.4.4 Cálculo de la velocidad instantánea	28
3.5 Procesado de la señal PPG	30
3.5.1 Preprocesado de la señal	31
3.5.2 Cálculo y representación de la frecuencia cardíaca	33
3.5.3 Cálculo y representación de la frecuencia respiratoria	35

3.5.4 Cálculo de la frecuencia respiratoria	36
3.5.5 Análisis de resultados.....	37
3.5.6 Conclusiones	40
3.5.7 Representación junto con la velocidad instantánea.....	40
4 Diseño de aplicación de usuario	42
4.1 Introducción.....	42
4.2 Diseño de la interfaz gráfica de la aplicación	42
4.2.1 Descarga de datos y almacenamiento.....	42
4.2.2 Almacenamiento de la información recogida.....	44
4.2.3 Análisis de los datos	46
4.2.4 Representación de los datos	47
5 Análisis de los resultados obtenidos	49
5.1 Introducción.....	49
5.2 Detección de los cambios de sentido.....	49
5.3 Medición de los pasos.....	50
5.4 Cálculo de la distancia total.....	51
5.5 Cálculo de la velocidad.....	52
5.6 Resultados de la señal PPG	52
6 Conclusiones y trabajo futuro.....	54
6.1 Análisis de los objetivos	54
6.1.1 Implementar un algoritmo robusto para la detección de los cambios de sentido....	54
6.1.2 Cálculo de la velocidad	54
6.1.3 Procesado de la señal PPG	54
6.1.4 Cálculo y representación de las frecuencias cardíaca y respiratoria	54
6.1.5 Representar de forma visual los resultados obtenidos	54
6.1.6 Almacenar los resultados	54
6.2 Trabajo futuro	55
7 Bibliografía	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de flujo de la distancia total	7
Figura 2: Lugar de realización de las pruebas.	10
Figura 3: Orientación de los ejes del giroscopio.....	11
Figura 4: Orientación de los ejes del acelerómetro.....	11
Figura 5: Fotografías del dispositivo wearable por ambas caras.	12
Figura 6: Localización de los LEDs.....	13
Figura 7: Diagrama de estados. Fuente: Elaboración propia.	13
Figura 8: Estructura de los datos que de la descarga. Fuente: [1].....	16
Figura 9: Efecto del patrón de inicio sobre los ejes del giroscopio.	17
Figura 10: Diagrama de flujo de la función <i>getPacientes</i> . Fuente: Elaboración propia.	19
Figura 11: Colocación del brazo del paciente.....	20
Figura 12: Diagrama de flujo del análisis del movimiento. Fuente: Elaboración propia.	21
Figura 13: Deriva en las medidas de los tres ejes del giroscopio.	22
Figura 14: Esquema de la realización de la prueba.....	24
Figura 15: Respuesta del algoritmo de detección de los cambios de sentido en la prueba 1..	25
Figura 16: Ejemplo de detección de los cambios de sentido.	25
Figura 17: Ejemplo de los resultados de la detección de pasos.	26
Figura 18: Ejemplo de detección de pasos durante los cambios de sentido.	27
Figura 19: Diagrama de flujo para el cálculo de la velocidad instantánea. Fuente: Elaboración propia.....	28
Figura 20: Ejemplo de gráfica de la velocidad.	29
Figura 21: Gráfica simplificada de la velocidad.	30
Figura 22: Espectro en frecuencias de una señal PPG cruda	31
Figura 23: Espectro en frecuencia de la señal filtrada.	32
Figura 24: Espectro en frecuencia de la componente AC	33
Figura 25: Señal del ritmo cardíaco.	34
Figura 26: Señal de la Figura 4 ampliada.	34
Figura 27: Frecuencia cardíaca con medias móviles.	35
Figura 28: Señal frecuencia respiratoria.	36
Figura 29: Señal de la frecuencia respiratoria con medias móviles.	37
Figura 30: Frecuencia respiratoria de la prueba A.	38
Figura 31: Frecuencia cardíaca de la prueba B.	39
Figura 32: Frecuencia respiratoria de la prueba B.	39
Figura 33: Comparación entre velocidad y frecuencia cardíaca.	40
Figura 34: Comparación entre velocidad y frecuencia respiratoria.	41
Figura 35: Ventana principal.	43
Figura 36: Mensaje de finalización de la descarga.	43
Figura 37: Mensaje de error en la descarga.	43
Figura 38: Ejemplo de detección de las pruebas.	44
Figura 39: Ejemplo de identificación de las pruebas.	44
Figura 40: Parámetros de la base de datos.	45

Figura 41: Mensaje de error en la búsqueda.	46
Figura 42: Ejemplo de selección de la prueba a analizar.	46
Figura 43: Selección de resultados a visualizar.	47
Figura 44: Ejemplo de la representación de resultados.	47
Figura 45: Ejemplo de revisión de los resultados.	48
Figura 46: Ejemplo de interferencias en la frecuencia cardíaca.	53
Figura 47: Ejemplo de interferencias en la frecuencia respiratoria.	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores del <i>threshold</i> en cada prueba.....	50
Tabla 2: Errores absolutos en % de la distancia total.	52

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación y objetivo

El presente proyecto pretende mejorar y solucionar los problemas que se detectaron en la solución propuesta en el Trabajo Fin de Grado (TFG) de la alumna María Termenón Rivas [1], donde, con la ayuda de un dispositivo wearable desarrollado por el departamento de Tecnología Electrónica, se implementó una aplicación para tratar todos los datos de interés recogidos por este dispositivo. Dicha aplicación se encarga de descargar los datos del dispositivo wearable y los procesa para calcular la distancia total recorrida por el sujeto que realice la prueba, su velocidad y las frecuencias cardíaca y respiratoria.

En la prueba de la marcha de 6 minutos o 6 Minute Walk Test (6MWT) en inglés, que se emplea, en el servicio de cardiología del Hospital Álvaro Cunqueiro, para el estudio de pacientes que se van a someter a un procedimiento de recambio de válvula aórtica transcatéter TAVI (Trhanscatheter Aortic Valve replacement) [2]; el parámetro más importante a medir es la máxima distancia que puede recorrer el paciente andando durante los 6 minutos que dura la prueba [3]. Para ello, es necesario medir el número de tramos con longitud fija que el paciente recorre, además de la distancia referida al último tramo. De aquí la importancia de detectar el momento en el que el paciente realiza un giro de 180°, lo que supone un cambio de sentido en la marcha; así como contar los pasos que da el paciente para que, habiendo calculado la zancada media, determinar así la distancia recorrida en el último tramo incompleto como zancada media multiplicada por número de pasos. Aunque este proceso se explica con más detalle en el apartado 3.4.3, en la Figura 1 se muestra un diagrama de flujo para entender mejor el cálculo de la distancia total.

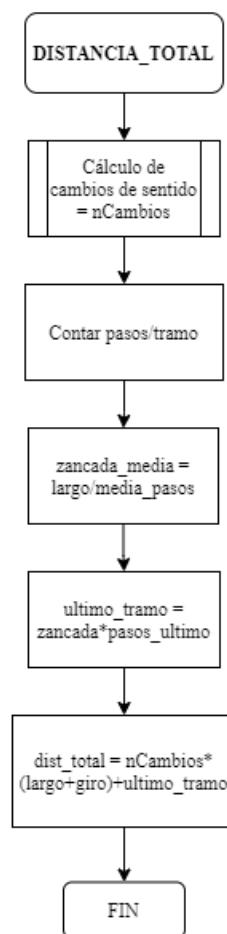


Figura 1: Diagrama de flujo de la distancia total.

Tras presentar, al departamento de Cardiología del H. Alvaro Cunqueiro, los resultados obtenidos con la solución propuesta por María [1], se encontró varios problemas que se enumeran a continuación.

- El algoritmo encargado de determinar los cambios de sentido en la marcha del paciente resultó ser poco robusto, además de que cuando se hicieron las pruebas en sujetos reales, sin tener control sobre su movimiento, el algoritmo presentó varios errores.
- De forma similar ocurrió con las medidas obtenidas de las frecuencias cardíaca y sobre todo respiratoria, ya que en algunos pacientes se obtuvieron resultados que claramente no se correspondían con la realidad.

Por otro lado, también se tomaron nota de las recomendaciones que el propio departamento de Cardiología hizo acerca de posibles nuevas implementaciones en el algoritmo, tales como la comparación de la evolución de la velocidad del paciente, con las frecuencias respiratorias y cardíacas y mejorar la representación de las mismas con respecto a la empleada en [1].

Todo esto justifica la realización del presente trabajo donde se busca completar los objetivos explicados en el apartado de Objetivos específicos.

1.2 Alcance

En este TFG se trata de hacer una modificación únicamente en el software del dispositivo y en el procedimiento a la hora de realizar el 6MWT, en caso de que se considere necesario, tal y como se explica en apartados posteriores. De esta forma, no cubre ninguna implementación Hardware ni modificación en la programación del microcontrolador incluido en el dispositivo wearable. Esta posible modificación del Hardware del dispositivo quedará explicada detalladamente como posibles mejoras en trabajos futuros.

La aplicación es desarrollada en el lenguaje de programación Python 3.0 [4], por lo que durante todo el trabajo se hace referencia a tipos de variables y funciones características de este lenguaje de programación, como puede ser la utilización de *listas* o *tuplas*; y funciones tales como *len* de una *lista*. Además, se han empleado funciones de varias bibliotecas, las cuales han sido incluidas en la bibliografía.

1.3 Objetivos específicos

1.3.1 Implementar un algoritmo robusto de detección de los cambios de sentido

Como se ha expuesto en el apartado 1.1, es de especial importancia que la aplicación sea capaz de identificar de forma robusta los instantes en los que el paciente finaliza cada tramo y realiza un cambio en el sentido de su marcha; ya que de esto depende el cálculo del resto de parámetros referidos a la dinámica del paciente.

Una vez determinado con robustez el instante de cambio de sentido, habrá que adaptar el cálculo del resto de parámetros al nuevo algoritmo implementado.

1.3.2 Cálculo de la velocidad

El método actual para el cálculo de la velocidad emplea la zancada media de todo el recorrido, por lo que los resultados obtenidos se alejan ligeramente de la realidad, especialmente cuando el sujeto que realiza la prueba varía su ritmo a lo largo de esta. Por eso es necesario implementar un nuevo cálculo de la velocidad instantánea, que, además, se pueda validar.

1.3.3 Procesamiento de la señal PPG

Es importante realizar un correcto procesado de la señal aportada por el sensor óptico con la finalidad de extraer las dos componentes a través de las cuales se pueda calcular la frecuencia cardíaca y frecuencia respiratoria.

Como se explica en apartados posteriores, no resulta una tarea sencilla debido al ruido a bajas frecuencias ocasionado por la componente en continua de la señal PPG.

1.3.4 Cálculo y representación de las frecuencias cardíaca y respiratoria

Una vez procesada la señal PPG, habrá que, no solo calcular las frecuencias cardíaca y respiratoria, sino que validar también que dichos cálculos se correspondan con la realidad. Además, se pretende comparar la gráfica de la evolución de estas frecuencias, con la velocidad del paciente a lo largo de la prueba; con el objetivo de aportar la máxima información posible al especialista sobre la fatiga y cansancio del paciente.

1.3.5 Representar de forma visual los resultados obtenidos

Una vez calculados todos los datos considerados importantes y que pueden aportar información relevante sobre el estado del paciente, es necesario representarlos y mostrarlos de forma que al especialista le resulte sencillo tomar conclusiones sobre la evolución del paciente tanto a lo largo de la prueba, como a lo largo de los días comparando pruebas anteriores.

1.3.6 Almacenar los resultados

Debido a que es de interés del especialista observar el progreso del paciente con el paso del tiempo, resulta obvio que exista la posibilidad de comparar las diferentes pruebas realizadas por el mismo paciente. Por lo que es crucial almacenar los resultados de una forma ordenada y sencilla de revisar, identificando a cada paciente con un identificador único, que puede ser, o bien su DNI, o bien con su código de la seguridad social.

Para este trabajo, se utilizará una numeración decimal ascendente de forma que la primera prueba realizada es la 1 y así sucesivamente. Del mismo modo ocurre con la identificación de los pacientes.

1.4 Antecedentes

El test de la marcha de los seis minutos es una prueba médica que consiste en evaluar la capacidad de tolerancia a esfuerzos submáximos de un sujeto determinando la distancia que es capaz de recorrer en seis minutos. Se utiliza para medir la evolución del estado funcional de pacientes con enfermedades cardiorrespiratorias antes y después de una intervención.

El 6MWT es una prueba médica que consiste en evaluar la capacidad y evolución de pacientes con patologías cardiorrespiratorias. Se basa en determinar la mayor distancia que el paciente es capaz de recorrer durante los 6 minutos.

Como se menciona en el resumen de este trabajo, el procedimiento que se emplea para medir dicha distancia es poco exacto a la par que subjetivo, ya que el técnico encargado de la prueba ha de preguntar al principio y al final de la prueba, cuánto de cansado se encuentra el paciente según la escala de Borg [5]. No se pudo incluir en este TFG, a modo de Anexo, el protocolo para la realización del 6MWT en el H. Álvaro Cunqueiro, debido a que es un documento confidencial.

La alumna María Termenón Rivas, presentó en el curso 20/21 una primera solución a este problema, empleando los datos que recoge un dispositivo wearable desarrollado por el Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Vigo [1]. Sin embargo, tal y como se justifica en el apartado 1.1, se consideró necesario realizar una mejora de dicha primera propuesta.

En la Figura 2 se muestra el pasillo donde se realiza el 6MWT en el H. Á. Cunqueiro, donde se observan unas marcas rojas pegadas en la pared, colocadas cada 0,5 metros, que sirven de guía para que el técnico pueda estimar la posición del sujeto que realiza la prueba al finalizar el recorrido.



Figura 2: Lugar de realización de las pruebas.

2 DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO WEARABLE

Como se ha explicado en apartados anteriores, para recoger todas las señales de interés a lo largo del 6MWT, se utiliza un dispositivo wearable desarrollado por el Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Vigo en colaboración con el Servicio de Cardiología del Instituto de Investigación Sanitaria Galicia Sur del Hospital Álvaro Cunqueiro.

A continuación, se detalla el hardware implementado en dicho dispositivo, así como su puesta en marcha para la realización de las pruebas.

2.1 Hardware del sistema

El dispositivo se basa en el microcontrolador de ultra bajo consumo del fabricante Texas Instruments [6]. Este cuenta con puerto USB integrado a través del cual se accede a los datos registrados en memoria durante la prueba. Un parámetro fundamental en este tipo de aplicaciones es la frecuencia de muestreo, en este caso, es de 100 Hz; es decir que realiza un total de 100 muestras cada segundo, con un periodo de 10 ms.

Por otro lado, el dispositivo cuenta con dos sensores, el fotosensor NJL5310R [7], el cual cuenta con dos LEDs de color verde y un fotodiodo de alta sensibilidad para medir la señal PPG en el paciente.

El otro sensor es una Unidad de Medida Inercial (IMU), en este caso la MCU-9250 [8] que cuenta con un acelerómetro y un giroscopio, ambos de tres ejes.

En la Figura 3 y Figura 4, respectivamente, se muestra los tres ejes del acelerómetro y del giroscopio, así como el sentido positivo de la medición; tomando como referencia la propia IMU.

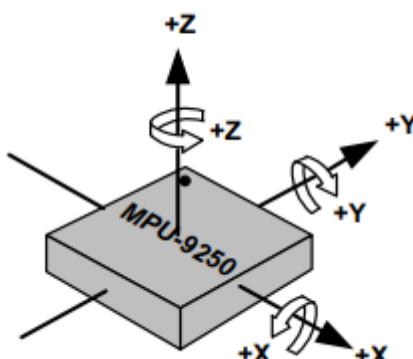


Figura 3: Orientación de los ejes del giroscopio.

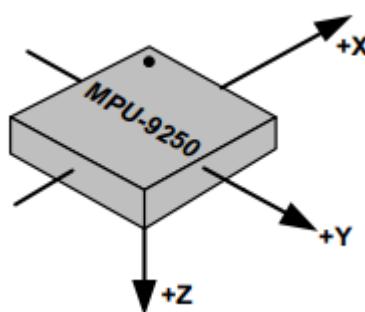


Figura 4: Orientación de los ejes del acelerómetro.

En cuanto al Fondo de Escala (FSR) de los sensores, el FSR de lo giroscopio es 1000°/segundo, con una resolución de 16 bits, es decir 2 bytes de datos. Con respecto a los acelerómetros, el FSR es $\pm 8\text{g}$ y la resolución es la misma que para los giroscopios.

Además de estos sensores, el dispositivo cuenta con un interruptor y un pulsador situados en caras opuestas del mismo. También se cuenta con tres LEDs situados en la cara superior que indican el estado en el que se encuentra.

Por último, el dispositivo lleva incorporado una memoria flash de 16 MBytes para poder almacenar todos los datos recogidos durante las pruebas.

En la Figura 5 se muestran dos fotografías del dispositivo, uno de la parte superior y otra de la parte inferior.

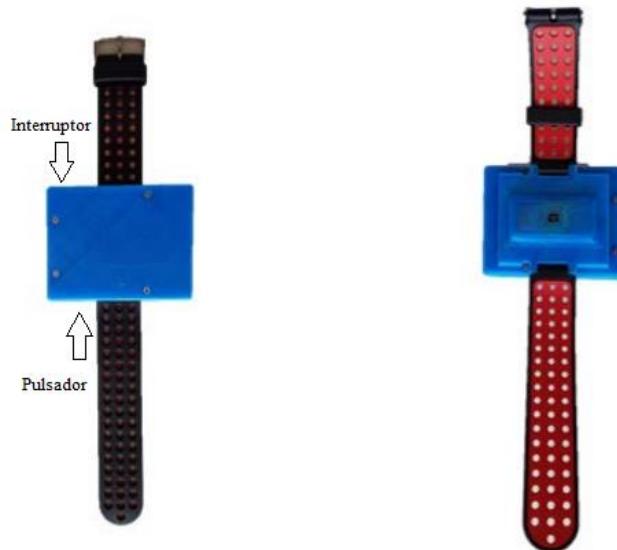


Figura 5: Fotografías del dispositivo wearable por ambas caras.

2.2 Secuencia de operación del dispositivo

Como se ha mencionado en el aparto anterior, el dispositivo cuenta con tres LEDs, dos azules y uno verde, en la cara superior, que son los indicadores del estado en el que se encuentra la secuencia. Para explicar de una forma más clara, en la Figura 6 se muestra la localización de cada uno de los LEDs y el nombre con el que se les va a hacer referencia en este apartado.

El firmware del dispositivo, también desarrollado por el Departamento de Tecnología Electrónica [9], controla la ejecución de la secuencia de operación que sigue el dispositivo, tal y como muestra el diagrama de estados de la Figura 7. El pulsador, PUL de aquí en adelante, es quien determina la evolución de dicho estado.

Lo primero que hay que hacer es colocar el interruptor, llamado SWITCH para hacer referencia a él en este apartado de la memoria, en la posición de ON. Una vez encendido el dispositivo, comenzará la secuencia.

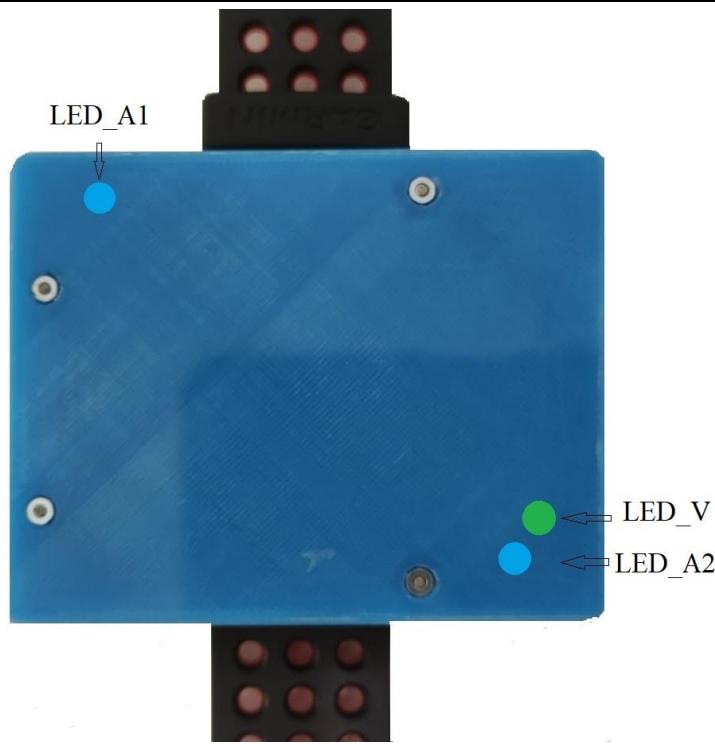


Figura 6: Localización de los LEDs.

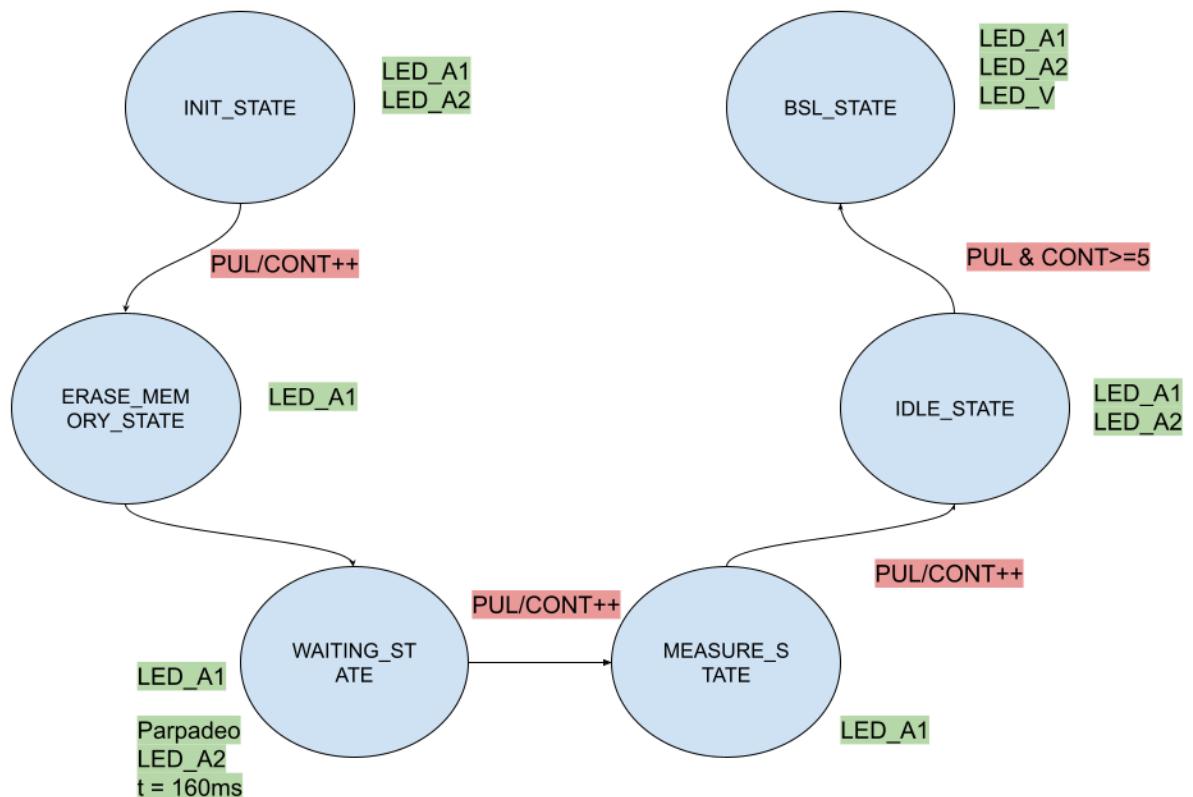


Figura 7: Diagrama de estados. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se enumeran y se explican los seis diferentes estados que puede tomar el dispositivo:

- 1) **INIT_STATE:** es el estado de inicialización, donde el sistema espera a que se pulse el pulsador PUL para que inicie el proceso. En este estado el LED_A1 y LED_A2 están encendidos.
- 2) **ERASE_MEMORY_STATE:** en este estado se borra por completo la memoria flash del dispositivo. Una vez finaliza, se pasa al siguiente estado automáticamente.
- 3) **WAITING_STATE:** el sistema espera a que el usuario esté preparado y pulse PUS para pasar al siguiente estado. Mientras se encuentra en este estado, LED_A2 parpadea con un periodo de 160 ms a la vez que LED_A1 está activado.
- 4) **MEASURE_STATE:** es el estado donde se almacenan todos los datos que el dispositivo va midiendo, hasta que se vuelve a pulsar PUS y se cambia al siguiente estado. Mientras el dispositivo está midiendo, sólo LED_A1 permanece encendido.
- 5) **IDLE_STATE:** en este estado el usuario tiene disponibles los datos para descargarlos en un dispositivo externo, para esta aplicación en un ordenador portátil a través de una aplicación diseñada en Python. Mientras dure este proceso están activados LED_A1 y LED_A2. Para pasar al siguiente estado es necesario pulsar dos veces PUL para que el contador llegue a cinco.
- 6) **BSL_STATE:** este estado fue incluido para añadir modificaciones en el firmware del dispositivo, en caso de que fuera necesario. Es decir, para reprogramar el dispositivo. Para salir de este estado es necesario llevar a la posición OFF el interruptor SWITCH.

Cabe destacar que en una prueba normal no haría falta pasar al estado 6, sino que simplemente una vez descargados los datos en el estado 5, se apagaría el dispositivo llevando el SWITCH a la posición de OFF.

3 SOLUCIÓN PROPUESTA

La solución propuesta en este trabajo se basa en una aplicación desarrollada en el lenguaje de programación Python [4].

3.1 Estructura del funcionamiento de la aplicación

La estructura del programa desarrollado es muy similar al de la solución propuesta por [1]. En este apartado se busca introducir los diferentes pasos que se llevan a cabo para el estudio de cada prueba y que se explican con más detalle en los siguientes apartados de la memoria.

3.1.1 Recogida de datos

Se le coloca al paciente el dispositivo wearable para que realice la prueba siguiendo las instrucciones explicadas por el personal encargado de su realización. Una vez terminado, se descargan todos los datos en el equipo informático donde se les hará el procesado.

3.1.2 Detección del inicio de la prueba

Con la finalidad de agilizar las pruebas con los pacientes, es posible recoger los datos de varias pruebas seguidas y a continuación procesarlos. Esto implica que el algoritmo encargado de detectar el inicio de cada prueba ha de ser robusto y por ello es necesario que el protocolo de inicio sea fácilmente distinguible y sencillo de realizar.

3.1.3 Análisis del movimiento

Este apartado cuenta con cuatro pasos que se enumeran a continuación:

- Identificación y registro de los instantes donde el paciente realiza un cambio de sentido.
- Identificación y registro de los pasos en cada tramo por separado.
- Cálculo de la distancia total recorrida por el paciente durante la prueba.
- Cálculo y representación de la velocidad del paciente a lo largo de la prueba

3.1.4 Procesado de la señal PPG

Para acabar con el procesado de los datos recogidos por el dispositivo wearable, se procede al análisis de la señal PPG donde habrá que preprocesarla correctamente para extraer las señales que permitan el cálculo de las frecuencias cardíaca y respiratoria.

3.1.5 Almacenamiento de los resultados

Una vez finalizado el procesado de los datos adquiridos a través del dispositivo, habrá que almacenarlos de forma que resulte sencillo realizar consultas de pruebas realizadas con anterioridad para analizar la evolución del paciente.

3.1.6 Representación de los resultados

Por último, es necesario exponer los resultados adquiridos de forma visual y sencilla de entender e interpretar para el personal sanitario encargado de analizarlos.

3.2 Descarga y preprocesado de los datos obtenidos del dispositivo

Para realizar la descarga de los datos, el dispositivo wearable cuenta con un puerto USB a través del cual se realiza una comunicación serie entre el microcontrolador del dispositivo y la aplicación desarrollada en Python, empleando la biblioteca PySerial [10].

La función que realiza la descarga de los datos del dispositivo y los almacena en un fichero de texto, es la función *data_download* [1], la cual crea un archivo cuyo nombre será la fecha y la hora del momento de realización de la descarga, en el siguiente formato: “AAAA.MM.DD-HH.MM.SS.txt”.

La información recogida, se divide en Bytes, habiendo un total de 16, separados para cada sensor. En la Figura 8 se muestra la distribución de los datos para cada muestra. El último Byte carece de información y está reservado por si en aplicaciones futuras se quiere utilizar para enviar cualquier dato de interés como podría ser el estado de la batería del dispositivo.



Figura 8: Estructura de los datos que de la descarga. Fuente: [1]

Para trabajar de forma más sencilla con los datos de cada sensor por separado, es necesario dividir en diferentes ficheros toda esta información, además de adaptar el valor almacenado en el primer fichero, a un rango de valores que resulten de mayor utilidad.

Los tres primeros Bytes de la trama de datos se corresponden con la señal PPG. Serán guardados en otro fichero denominado “vector_PPG_original”. Para ello, previamente se pasan a tanto por 1, es decir, se almacenan en un rango de 0 a 1. Para ello se guardan en variables locales el máximo y el mínimo valor de la señal PPG detectado en toda la prueba y a continuación se realiza la siguiente operación expresada en (1).

$$PPG_n[i] = \frac{PPG[i] - \text{mín}}{\text{máx} - \text{mín}} \quad (1)$$

Donde $PPG_n[i]$ es una lista que almacena los valores de la señal PPG en el nuevo rango de 0 a 1 para posteriormente guardarlos en el fichero ya mencionado; y la señal $PPG(i)$ son los datos recogidos del fichero original, que están almacenados en la clase *Integer* (enteros).

Los seis siguientes Bytes se corresponden con los tres ejes del acelerómetro (Dos Bytes por cada eje), los cuales son almacenados sin realizar ningún cambio, como *Integer*, en los ficheros de texto “vector_accelX”, “vector_accelY” y “vector_accelZ”.

Por último, los seis Bytes a continuación, son los correspondientes a los tres ejes del giroscopio. En este caso, se tomó la decisión de convertir el valor de °/s como *Integer*, a variación del ángulo en grados, para facilitar el estudio de cambios de sentido del paciente. La fórmula para pasar convertir los datos es la expresada en (2).

$$G[^\circ] = \frac{G[^\circ/\text{s}] * FSR}{100 * 2^{15}} \quad (2)$$

Lo primero que hay que hacer es multiplicar el valor del giroscopio por el intervalo de tiempo, en este caso 1/100Hz y después modificar el rango de valores multiplicando por el fondo de escala $FSR=1000^\circ/\text{s}$ y dividiendo por el valor máximo alcanzable con 16 bits (2^{15}).

Finalmente, los datos del giroscopio se guardan en los ficheros denominados “vector_giroscopioX”, “vector_giroscopioY” y “vector_giroscopioZ”.

Todos los archivos auxiliares que se crean para dividir los datos en cada uno de los sensores son temporales y se sobrescriben cada vez que se ejecuta el programa.

3.3 Detección del inicio de la prueba

Como se explica en 3.1.2, con la finalidad de agilizar las pruebas en pacientes que se hagan en una misma jornada, ya sea varias pruebas al mismo paciente, o diferentes pacientes; es necesario identificar el inicio de cada prueba. Además de que desde que el técnico activa el pulsador del dispositivo la última vez antes de que el mismo comience a hacer medidas, hasta que el paciente inicia la prueba, pasan varios segundos y por eso es crucial establecer un sincronismo entre las medidas de la pulsera y el tiempo que está contabilizando el técnico encargado de supervisar la prueba.

En la solución previa propuesta en [1], se comparan varias alternativas para detectar de forma sencilla y eficaz el inicio de cada prueba. Varias de estas alternativas eran dar tres golpes en el plano XY del dispositivo, darlos en el plano YZ, realizar tres giros de traslación alrededor del eje X del dispositivo y realizar tres giros de rotación sobre el eje X del dispositivo.

Finalmente, la solución que se decidió implementar fueron las tres rotaciones sobre el eje X del dispositivo debido a que "...provoca en la señal del eje X del giróscopo unos valores más elevados por lo que es una marca para el comienzo del test más fiable. Además, este evento es un gesto fácil de realizar. En resumen, para indicar el inicio de la prueba el paciente realiza tres rotaciones del antebrazo en el que lleva colocado el dispositivo y a continuación comienza a caminar."

En la solución que se propone en este trabajo se ha optado por emplear el mismo método para detectar el inicio de la prueba de cada paciente. En la Figura 9 se observa el efecto producido en los tres ejes del giroscopio tras realizar tres giros de rotación sobre el eje X del dispositivo. Cabe destacar que, para el proceso de detección del inicio de la prueba, se han convertido los datos del giroscopio al rango {0,1} para que resultase más sencillo el análisis de la señal del giroscopio del eje X.

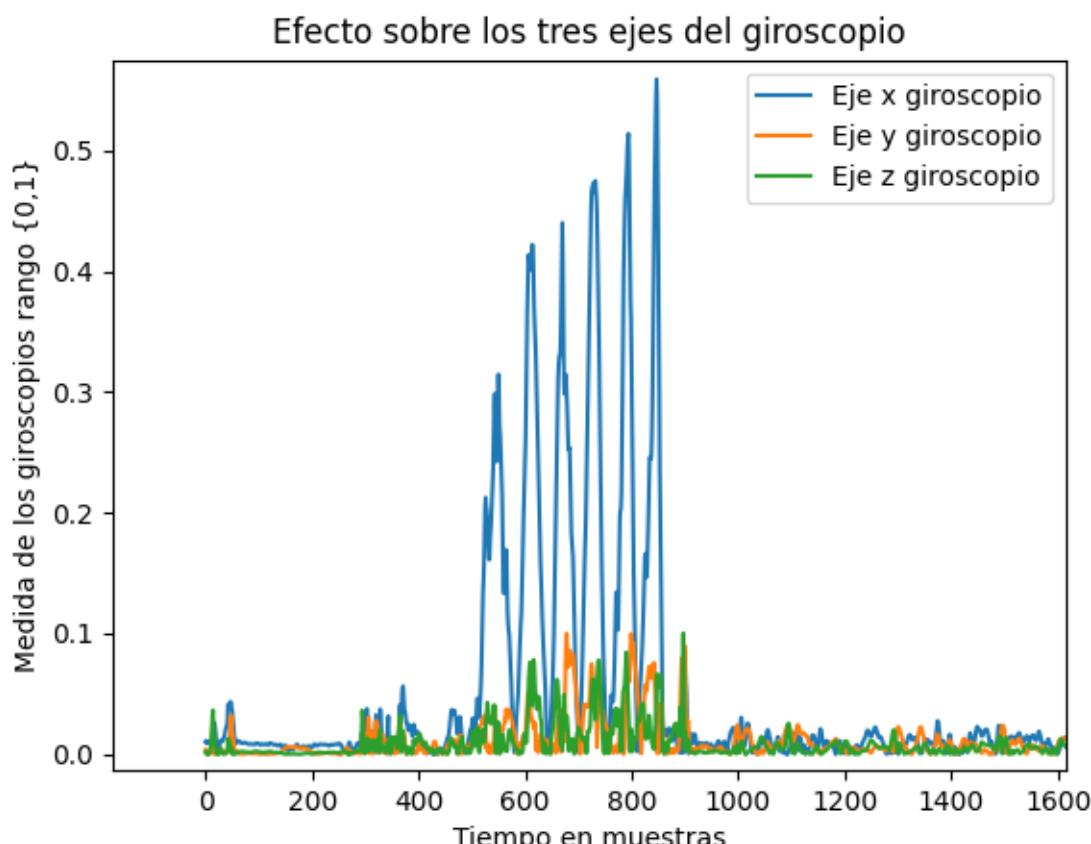


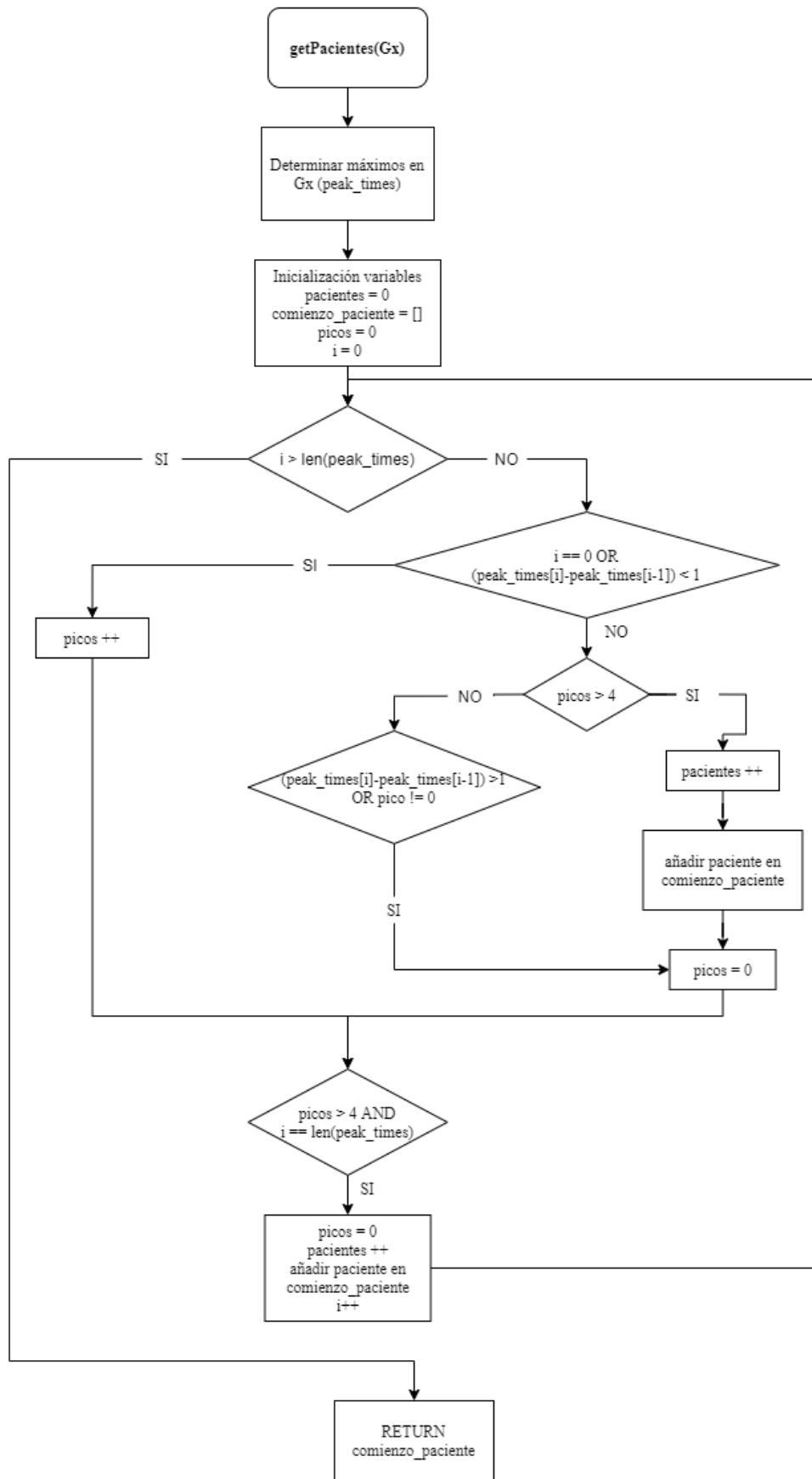
Figura 9: Efecto del patrón de inicio sobre los ejes del giroscopio.

Aunque se haya utilizado el mismo método para detectar el inicio de la prueba de cada paciente, se han llevado a cabo varias modificaciones con la finalidad de que sea un algoritmo más robusto y que no haga falta indicar el número de pacientes previamente por programa, sino que sea el propio algoritmo el encargado de identificar el número de pruebas que se han realizado.

La función encargada de guardar en una lista el instante de inicio de las pruebas de los pacientes se llama *getPacientes* y se le pasa por parámetro la lista con los datos muestreados del eje X del giroscopio (Gx). Dicho algoritmo se explica de forma más detallada en el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 10.

En la propia función se crean una serie de variables locales, una de ellas es *picos* la cual es un entero cuyo valor representa el número de picos detectados con distancia entre ellos menor a un segundo. Si el valor de esta variable es mayor a 4, entonces es que se ha detectado una nueva prueba, sin embargo, se identifica el inicio de la prueba cuando se determina el último pico válido (lo normal es que se den 6 picos) añadiendo un segundo y medio de seguridad.

Otra variable local es *comienzo_pacientes*, que es una lista donde se guardan los instantes donde se identificó el inicio de las pruebas. Finalmente, la última variable es *pacientes*, la cual es prescindible ya que coincide con *len(comienzo_pacientes)*; sin embargo, se emplea para hacer más claro el programa y el diagrama de flujo.

Figura 10: Diagrama de flujo de la función *getPacientes*. Fuente: Elaboración propia.

3.4 Análisis del movimiento

Como se viene repitiendo a lo largo de esta memoria, el parámetro más importante a determinar es la distancia total recorrida por el paciente. Para ello, en el módulo denominado *análisis_movimiento*, se calcula la distancia recorrida, tanto la total como la instantánea; además de la velocidad de paciente en cada momento.

Como *inputs*, son necesarios los datos obtenidos del giroscopio y del acelerómetro, además del vector con el instante de tiempo donde comienza cada prueba, la distancia del pasillo donde se realiza, y la duración de la misma; que por lo general serán seis minutos.

Por otro lado, se ha modificado el protocolo en la realización de las pruebas con respecto a [1], ya que, para determinar los cambios de sentido, se ha decidido estudiar únicamente el eje Y del giroscopio, por lo que el paciente deberá llevar el brazo colocado de tal forma que el eje Y del dispositivo quede perpendicular al suelo. Esta decisión se explica en detalle y se justifica en el siguiente apartado.

A continuación, se muestra en la Figura 11, una imagen de cómo debe ir colocado el brazo del paciente.



Figura 11: Colocación del brazo del paciente.

En la Figura 12 se muestra el diagrama de flujo que explica de forma esquemática el proceso llevado a cabo en este módulo. Las funciones de cálculo de la velocidad y distancia recorrida instantáneas se detallan en apartados posteriores.

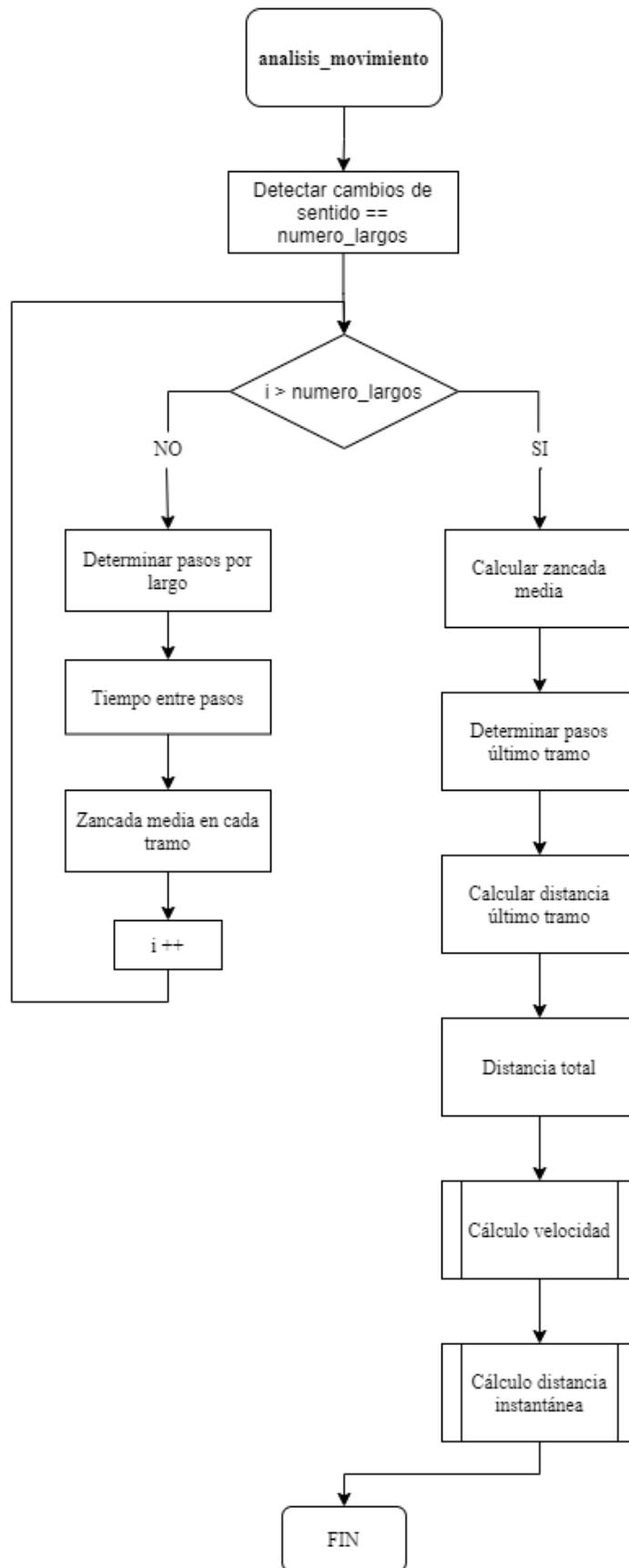


Figura 12: Diagrama de flujo del análisis del movimiento. Fuente: Elaboración propia.

3.4.1 Detección de los cambios de sentido

Según diversas fuentes [11], [12], [13], para el estudio del movimiento de una persona, lo más recomendable es determinar los ángulos de Euler [14], concretamente el ángulo *Yaw*, que es el que aporta la información sobre el rumbo o la dirección de, en este caso, el paciente. Para ello es necesario implementar un algoritmo de fusión de datos con los datos del giroscopio y del acelerómetro; sin embargo, no se dispone de ninguna referencia externa fija por lo que, en pruebas de largas duración, como es el caso, será imposible determinar con la robustez y precisión que se le exige, los instantes en los que se produce un cambio de sentido. Precisamente por esta razón se ha decidido mantener la pulsera en una posición fija con respecto al cuerpo del paciente.

La propuesta previa [1] para solucionar este problema es, en intervalos de 20 segundos, determinar qué eje del giroscopio se encuentra más vertical. Sin embargo, esto acarrea varios problemas. El más evidente es que al estudiar ventanas de tiempo aisladas, se puede iniciar el giro en una de ellas y acabar en la siguiente ventana. Además, si durante esos 20 segundos la posición del brazo del paciente varía mucho, puede ocasionar errores significativos en la medida si se está produciendo el giro en ese momento.

Por otro lado, las medidas del giroscopio presentan un error que se mantiene más o menos constante en el tiempo, esto es, una deriva, denominado *drift* en inglés el cual ocasionará un gran error a largo plazo especialmente en esta aplicación donde se recurre a la variación acumulada del ángulo medido por el giroscopio, con la finalidad de detectar los cambios de sentido en el paciente.

Esta deriva no es la misma en los tres ejes del giroscopio, tal y como se observa en la Figura 13 donde se ha dejado en reposo el dispositivo wearable para observar los datos medidos por la IMU.

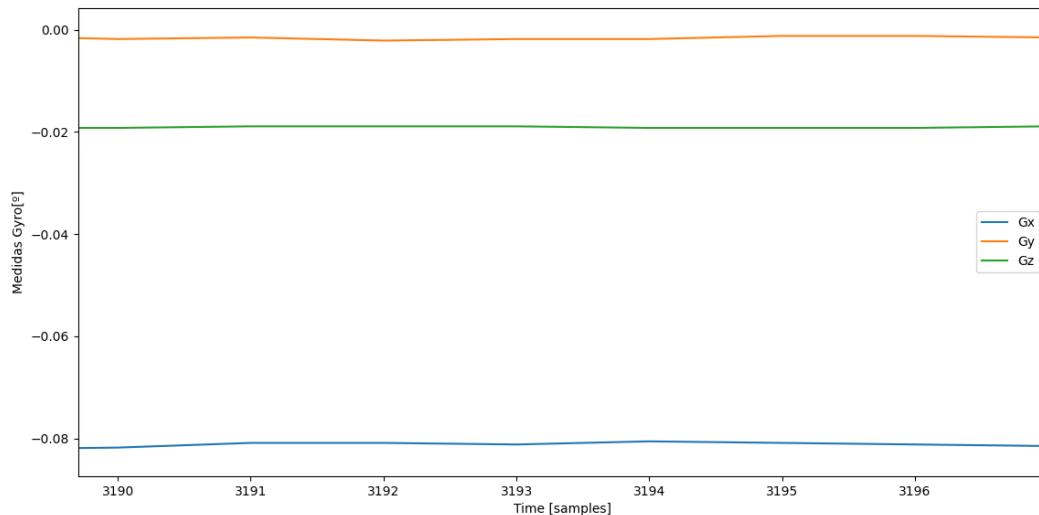


Figura 13: Deriva en las medidas de los tres ejes del giroscopio.

Se observa claramente cómo las medidas del eje X son las que presentan un mayor error en la medida cuando el dispositivo se encuentra en reposo, mientras que las medidas tomadas por el eje Y, a penas se alejan unas milésimas de grado del valor de 0° estando en reposo.

Por esta razón, se ha decidido estudiar la evolución de los datos recogidos por el eje Y del giroscopio. Para ello, se le pedirá al paciente que lleve el brazo de tal forma que la cara superior de la pulsera quede paralela a su cuerpo, dejando el antebrazo paralelo al suelo, consiguiendo así que el eje Y del giroscopio quede lo más perpendicular suelo posible.

Tras analizar los resultados expuestos en el Anexo 1, se observa que no es necesario que el eje Y del giroscopio quede perfectamente perpendicular al suelo, sino que puede estar ligeramente inclinado.

Existen varios estudios que se centran en eliminar la deriva en la medida de los giroscopios [15], [16], donde se implementan algoritmos complejos de alta carga computacional. Sin embargo, para esta aplicación, tras observar los resultados obtenidos, se decidió por no implementar ninguno de los algoritmos referenciados ya que la deriva del eje Y es prácticamente nula y no afecta a la detección de los cambios de sentido en la marcha del paciente.

El proceso de detección de los instantes en los que el paciente realiza un giro de 180°, es decir, un cambio de sentido en la marcha se realiza a través de la función, de elaboración propia, *getCambios*, al cual hay que pasársela por parámetros una lista con los datos de la variación del ángulo medido por el eje Y del giroscopio, *dgy*; el instante donde comienza la prueba, *start*; la duración de la misma, *min*, para determinar el final de la prueba; y un valor en ángulos, denominado *threshold*, el cual indica el giro necesario para determinar que se ha realizado un cambio de sentido, ya que en ocasiones el eje Y del giroscopio no será perfectamente perpendicular al suelo por lo que el ángulo acumulado en el giro puede ser ligeramente menor a 180°.

Dicha función determina tanto el final del giro en el cambio de sentido, como el inicio del mismo, empleando la misma metodología, pero recorriendo la lista con los datos del giroscopio en un sentido u en otro.

El valor de la variación del ángulo del eje Y, *dgy*, se obtiene a través de una sencilla función denominada *deltaList*, la cual simplemente acumula el valor de la lista que se le pasa por parámetro. Sin embargo, la lista *dgy* es necesario filtrarla, para eliminar el ruido a altas frecuencias, además de para suavizar su gráfica. Para ello se implementa un filtro paso bajo Butterworth de orden 4 y frecuencia de corte 0,25Hz con la función *signal.build_filter* y *signal.filter_signal* de la biblioteca *sensormotion* [17].

Por otro lado, la metodología que implementa la función *getCambios*, se basa en detectar el instante donde se supera, por aumento o por defecto, en un valor igual a *threshold*, el menor o mayor valor de la señal *dgy*, respectivamente, en los tramos donde el paciente camina en línea recta.

Esto es, si por ejemplo el valor más pequeño de la señal en el tramo X es de 15° y el paciente realiza un giro en sentido que aumenta el valor de *dgy*, entonces en el momento en que supere el valor de *threshold* + 15°, se detecta un cambio de sentido. Si el paciente realizará el giro en el otro sentido, de forma que el valor de *dgy* disminuye, se compararía con el valor más alto de esta señal en el mismo tramo.

En la Figura 14 se muestra un esquema del recorrido del paciente alrededor de los dos conos representados por los dos triángulos de color naranja. Los cuadrados azules representan posibles posiciones del paciente durante la realización de la prueba, donde “1” es la posición antes de realizar un cambio de sentido, donde el valor del ángulo acumulado podría ser, por ejemplo 15° y en “2” es el momento donde el programa detecta que se realizó un cambio de sentido cuando el ángulo acumulado alcanza un valor de 15°+/- el valor del *threshold*.

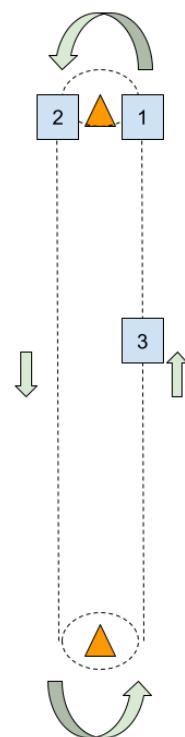


Figura 14: Esquema de la realización de la prueba.

Sin embargo, aún pueden darse dos situaciones de error. ¿Qué sucede si *threshold* tiene un valor de 160° , por ejemplo, y el sensor detecta 190° en los cambios de sentido? Para resolver esta situación, a la hora de guardar en otra lista el instante tanto de comienzo como de finalización del cambio de sentido, se añade un segundo de margen desde que se detectó el fin o comienzo del giro.

La otra situación que podría ocasionar un problema es si durante el tramo en línea recta, en la posición “3” de la Figura 14, el paciente realiza un pequeño giro de unos 90° , sin que se llegue a contabilizar como cambio de sentido, y al finalizar dicho tramo, realice el giro en la otra dirección, una situación muy hipotética. Esto incluiría un pequeño error o bien en el instante de inicio del cambio de sentido, o bien en el instante de finalizarlo, de un par de segundos, en el cual, tal y como se explica en apartados posteriores, no se contabilizarían los pasos realizados en ese tramo ya que con total certeza sería un número mayor a la media y por tanto se acabaría descartando.

Este último escenario se ha tenido en cuenta en las pruebas incluidas en el Anexo 1, y se pueden observar los resultados obtenidos. En la Figura 15 se muestra la respuesta del algoritmo de detección de los cambios de sentido en la prueba 1 de dicho anexo, donde se pone en práctica la segunda situación que se acaba de explicar.

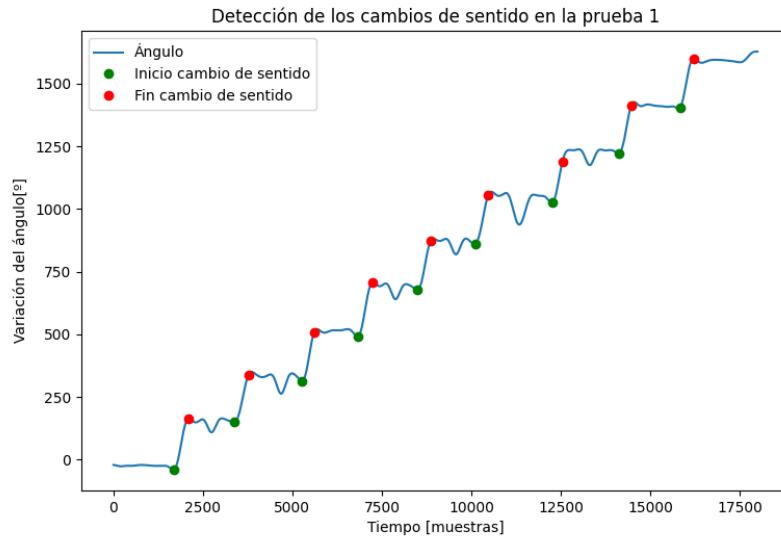


Figura 15: Respuesta del algoritmo de detección de los cambios de sentido en la prueba 1.

La Figura 16 muestra el ejemplo de una de las pruebas realizadas donde se detecta el inicio y el final de los cambios de sentido. Se presenta un intervalo de tiempo de 1.500 muestras aproximadamente, lo que equivale a 150 segundos, es decir, dos minutos y medio de la prueba.

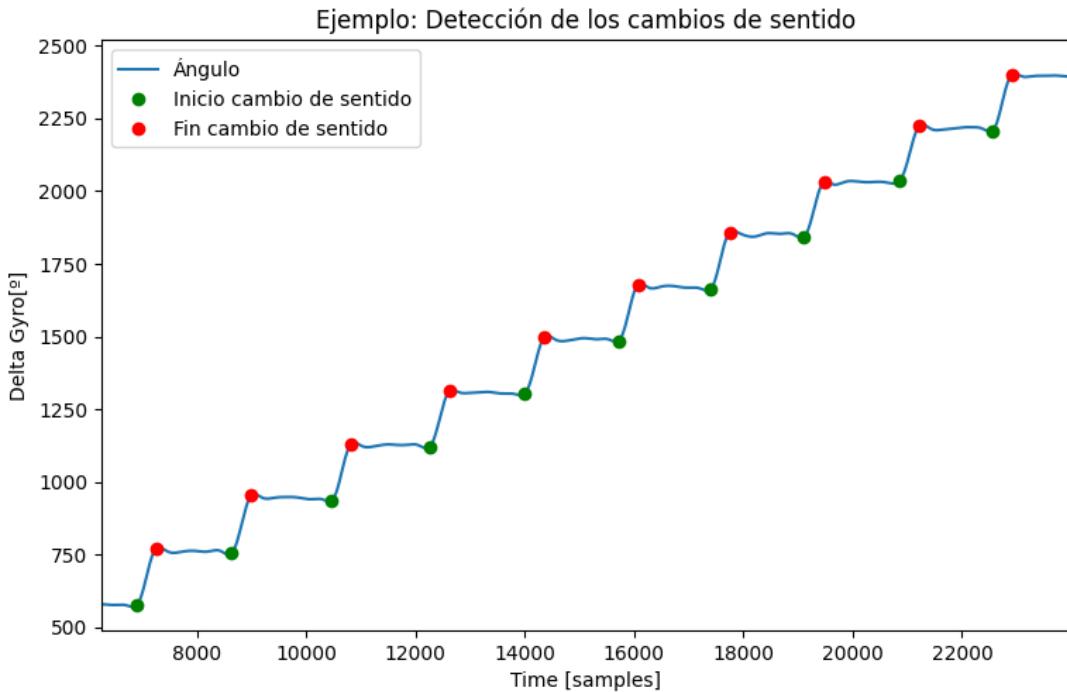


Figura 16: Ejemplo de detección de los cambios de sentido.

3.4.2 Detección de los pasos

Para detectar los pasos que da el paciente en cada tramo, se analizará la señal del acelerómetro, la cual mostrará una serie de picos de amplitud similar para cada paso que dé el paciente [18]. Gracias a que el paciente lleva el brazo fijo, los efectos de los pasos se verán reflejados fundamentalmente en el eje Y del acelerómetro, que tiene la misma dirección que el eje Y del giroscopio. Por lo tanto, para esta aplicación únicamente se analizará dicho eje.

Del mismo modo que ocurre en el apartado anterior con los datos del giroscopio, es necesario filtrar previamente la señal del eje Y del acelerómetro, *accY*, para eliminar el ruido a altas frecuencias, así como para suavizar la señal. El filtro implementado en este caso es un filtro paso bajo Butterworth de orden 4 y frecuencia de corte, en este caso, 3 Hz. Dicho filtro es diseñado nuevamente con las funciones *signal.build_filter* y *signal.filter_signal* de la biblioteca *sensormotion* [17].

Para determinar los instantes de tiempo donde el paciente realiza cada paso, se le pasa por parámetro a la función *calcula_pasos*, la señal *accY* entre el inicio del tramo y el final de este. Dicha función detecta los máximos relativos de la lista dada como parámetro gracias a la función *peak.find_peaks* de la biblioteca *sensormotion* [17], la cual detecta los picos de una señal, que estén por encima de un *threshold* indicado en el atributo *min_val* y cuya distancia al pico anterior sea mayor a la indicada en el atributo *min_dist*. Para esta función se ha definido la distancia mínima en 0,4 segundos, es decir 40 muestras, y el *threshold* en un 60% del valor máximo dentro de cada intervalo a analizar. De esta forma, quedan registrados en dos listas el instante en que se produce cada paso, así como el valor de la amplitud de la señal *accY*, en ese instante.

En la Figura 17 se muestra un ejemplo de un intervalo de tiempo de una prueba donde se representa la gráfica de la señal *accY* con los picos identificados como pasos pintados sobre la misma señal.

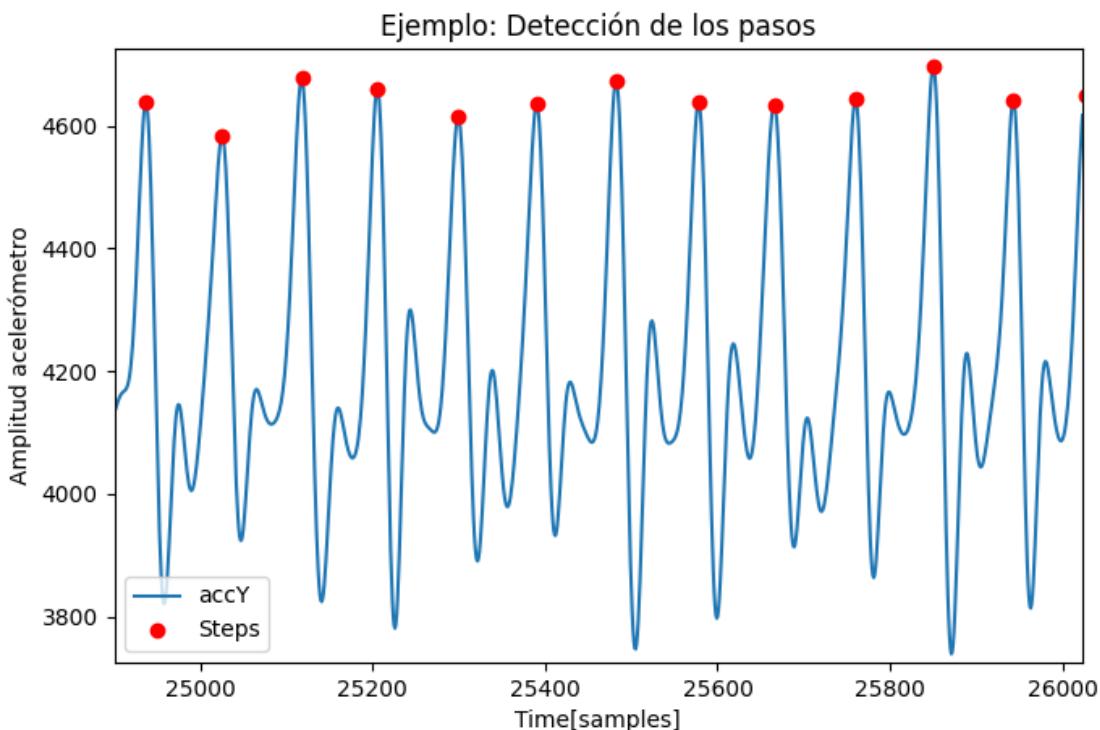


Figura 17: Ejemplo de los resultados de la detección de pasos.

Como ya se mencionó en el apartado anterior, cabe la posibilidad de que se detecte de forma incorrecta, bajo alguna circunstancia, el instante de inicio o de fin del cambio de sentido en algún tramo; lo que ocasiona en que dicho tramo sea más largo o corto de lo que debería, por lo tanto, se puede dar el caso de que se contabilicen más o menos pasos de los que en realidad se han dado en ese tramo.

Esto puede ser un problema ya que para el cálculo de la distancia es necesario el valor de la zancada media, el cual se obtiene a partir del número de pasos medio por tramo. Por lo tanto, resulta de interés no tener en cuenta aquellos tramos donde el número de pasos se desvíe considerablemente de la media. Como solución a este posible inconveniente, se calcula la

desviación típica del número de pasos en cada tramo, y se descartan, para el cálculo de la media del número de pasos, aquellos tramos con una desviación mayor a 7 pasos.

Tras analizar los diferentes resultados obtenidos, se detectó que en la mayoría de los tramos no se estaba llevando la cuenta ni del primer paso justo después de realizar el cambio de sentido, ni del último paso antes de realizar el giro. Por lo que, con el objetivo de tener estos pasos en cuenta, se estudia dentro de los intervalos donde se está produciendo el cambio de sentido (recordar que se tiene guardado tanto el comienzo como el final de cada cambio de sentido), y se añaden al cómputo de pasos aquellos que tienen una amplitud mayor o igual al 95% del valor de la media de los pasos del tramo anterior al giro. Para añadir estos pasos al global, se calcula la media de pasos válidos durante los giros y se le suma a la media de pasos durante los tramos.

En la Figura 18 se observa un intervalo de tiempo donde se aprecia un paso de similar amplitud a los anteriores, pero que se estaba descartando por ser el primero antes de un cambio de sentido. Cabe destacar que el intervalo de muestras donde no se detecta ningún paso es cuando el paciente está realizando el cambio de sentido.

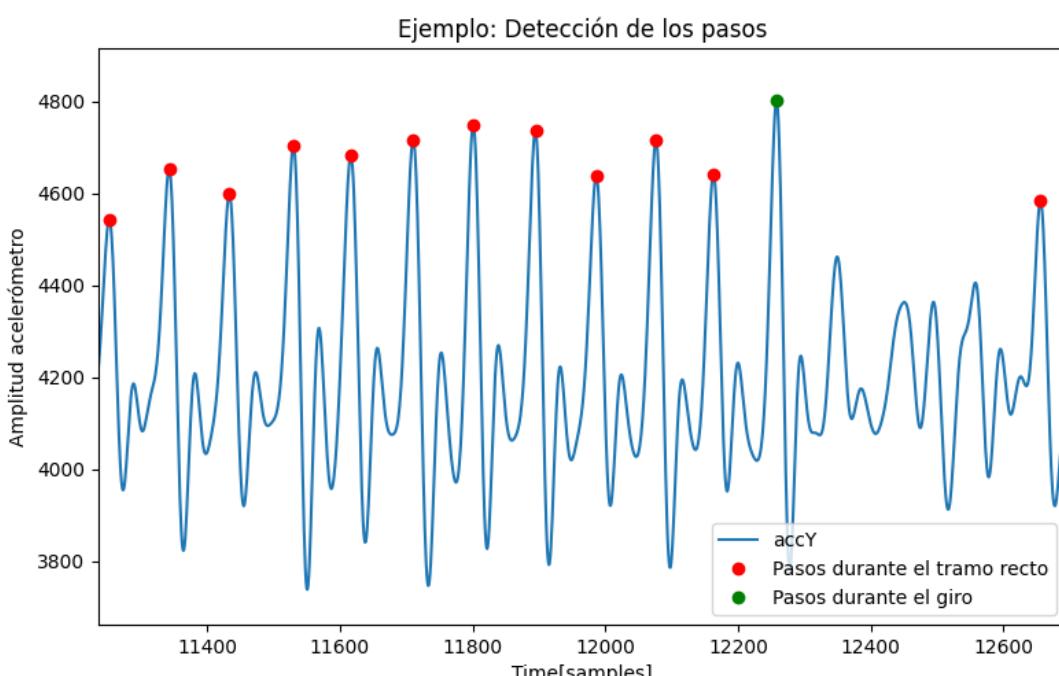


Figura 18: Ejemplo de detección de pasos durante los cambios de sentido.

3.4.3 Cálculo de la distancia recorrida

En el procedimiento que se lleva a cabo a día de hoy en el Hospital Álvaro Cunqueiro solo se tiene en cuenta la distancia recorrida en los tramos rectos, es decir se cuenta el número de largos completos que realiza el sujeto y se le añade la posición donde finaliza el paciente al transcurrir los 6 minutos que dura la prueba; es decir, que no se tiene en cuenta la distancia que se recorre en los cambios de sentido.

Sin embargo, tras hablar con los responsables de realizar el 6MWT, se tomó la decisión de añadir a cada tramo, la distancia que se recorre durante el cambio de sentido. Para ello, debido a las características de los conos que limitan el pasillo y a las instrucciones que se les da a los sujetos que van a realizar la prueba, se ha decidido realizar un ajuste asociado a los cambios de sentido, que consiste en añadir una distancia igual al semiperímetro de una circunferencia de radio medio metro.

Finalmente, la fórmula con la que se calcula la distancia total recorrida es (3), donde *ultPasos* hace referencia a los pasos recorridos en el último tramo, *zancada* es el valor de la zancada media calculada como *largo* (distancia fija del pasillo) partido por la media de los pasos durante el resto de los tramos. Finalmente, *cambiosSentido* representa el número de cambios de sentido realizados por el paciente, que coincide con el número de tramos enteros recorridos.

$$distancia = cambiosSentido * (largo + 0,5\pi) + ultPasos * zancada \quad (3)$$

3.4.4 Cálculo de la velocidad instantánea

En el apartado 1.3.2 se justifica brevemente la necesidad de realizar un nuevo algoritmo para calcular la velocidad instantánea del sujeto que realice la prueba, con la finalidad de comparar la gráfica resultante, con la frecuencia cardíaca y respiratoria para observar la evolución.

Para explicar el algoritmo que realiza el cálculo de la velocidad instantánea, se ha desarrollado el diagrama de flujo de la Figura 19.

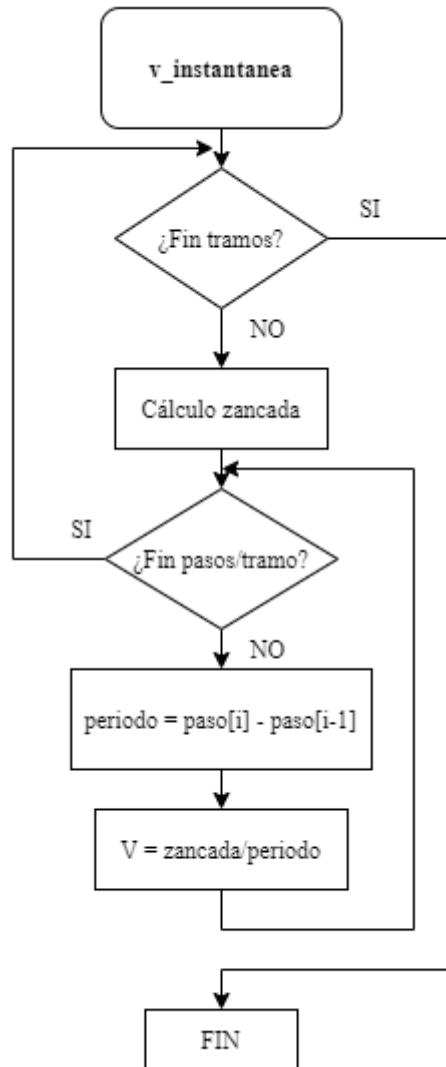


Figura 19: Diagrama de flujo para el cálculo de la velocidad instantánea. Fuente: Elaboración propia.

El funcionamiento se basa en calcular la velocidad en cada instante donde se ha registrado un paso, como $v = \text{zancada}/\text{periodo}$ entre pasos; pero calculando la zancada media en cada tramo y no la zancada media en toda la prueba.

Por otro lado, el último tramo que es incompleto, sí se emplea la zancada media para el cálculo de la velocidad ya que es el método que se ha empleado para calcular la distancia recorrida en dicho tramo.

Con el objetivo de verificar que los cálculos realizados son correctos, se ha calculado la velocidad media teórica en cada tramo, aprovechando que se tiene guardado en una lista los instantes donde se realiza un cambio de sentido, que se corresponde con el instante donde comienza y donde finaliza cada tramo. Por lo que la velocidad media será igual a la longitud fija del pasillo dividida por el tiempo que tarda el paciente en realizar el tramo.

Debido a esto, se representa en la Figura 20 una gráfica donde se muestra la señal resultante con los datos de la velocidad instantánea, junto con medias móviles de la misma de diferentes tamaños. Además, se ha añadido a dicha gráfica la señal de la velocidad media y del resultado tras aplicar el método presentado en [1].

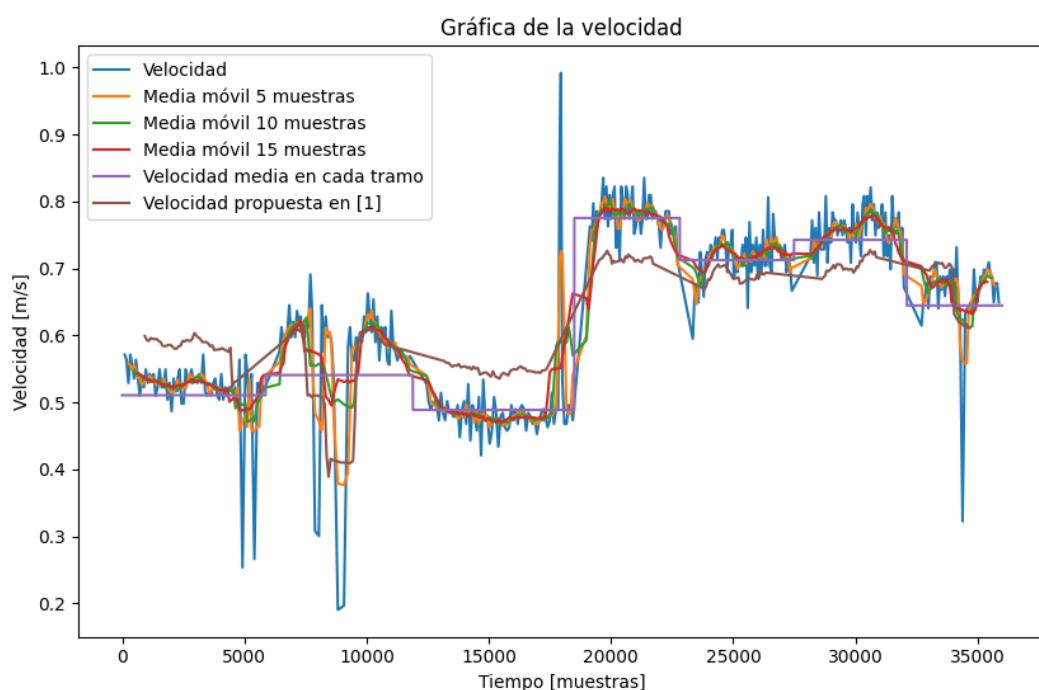


Figura 20: Ejemplo de gráfica de la velocidad.

Como se observa, se ha escogido de ejemplo una gráfica donde el sujeto que realizó la prueba tuvo un cambio de ritmo en su marcha a mitad de los seis minutos que dura esta. Además, queda claro que el algoritmo implementado en este trabajo tiene un mejor comportamiento que en la propuesta anterior [1], ya que como se ve en la gráfica de color marrón, al emplear el valor de la zancada media de toda la prueba, en los momentos donde la velocidad media es baja, la velocidad instantánea quedará por encima y al revés, si la media es alta, la instantánea quedará por debajo.

Con el motivo de presentar una gráfica más clara, se ha representado en la Figura 21 sólo las señales correspondientes a la media móvil de 15 muestras junto con la de la velocidad media y la de la solución propuesta en el trabajo predecesor a este.

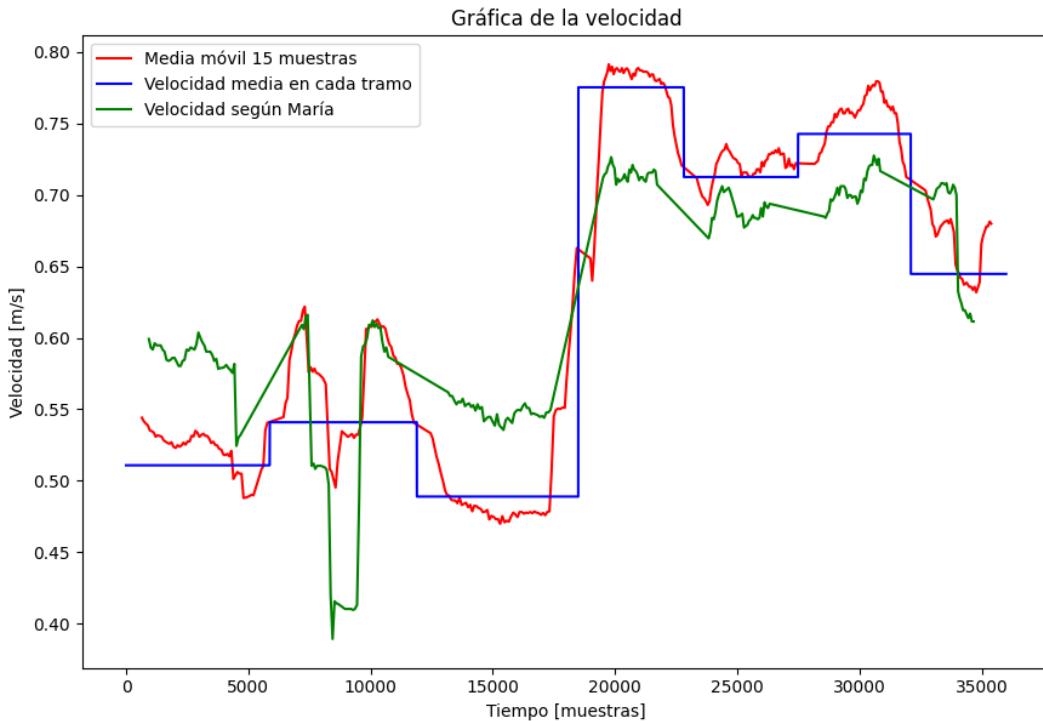


Figura 21: Gráfica simplificada de la velocidad.

Cabe destacar que, como se observa en la gráfica anterior, hay tramos donde el ritmo que lleva el paciente es más constante que en otros, por eso la señal de la velocidad instantánea puede variar tanto dentro de un mismo tramo. Cada escalón de la señal azul se corresponde con un tramo distinto; y se observa como aquellos tramos de mayor duración temporal, son los que presentan una menor velocidad media.

3.5 Procesado de la señal PPG

El principal objetivo de la prueba 6MWT es determinar la máxima distancia que puede recorrer el paciente andando durante los 6 minutos que dura dicha prueba, para ello, es de especial interés comprobar la fatiga o el cansancio del paciente en el transcurso de esta. Precisamente por esta razón, conocer la evolución de las frecuencias cardíaca y respiratoria, y compararlas con la velocidad instantánea, puede resultar de especial interés para el especialista encargado de analizar los datos recogidos por el dispositivo wearable.

Para medir las frecuencias cardíaca y respiratoria, el dispositivo cuenta con un fotosensor, concretamente el NJL5310R; el cual cuenta con dos LEDs verdes y un fotodiodo de alta sensibilidad [7].

Gracias a este sensor se puede obtener una señal PPG (Photoplethysmography), a través de la cual es posible extraer las componentes de la frecuencia respiratoria y la frecuencia cardíaca.

A continuación, se explica el proceso de procesado de la señal PPG, para ello se utiliza fundamentalmente el ejemplo de una prueba cuya duración fue de 6 minutos (36000 muestras), para ilustrar a modo de gráficas lo que se va introduciendo paso a paso.

3.5.1 Preprocesado de la señal

La señal PPG cuenta con una componente en continua DC debida a la absorción de la luz por la sangre, huesos y tejidos [19]; y una componente alterna AC. Para el estudio de las frecuencias respiratoria y cardíaca se necesita procesar la componente en AC a bajas frecuencias, por lo cual la componente en continua que ha de ser filtrada.

La Figura 22 muestra el espectro en frecuencias de la señal PPG cruda en una de las pruebas realizadas, se puede apreciar perfectamente el efecto de la componente en continua a frecuencia 0 Hz.

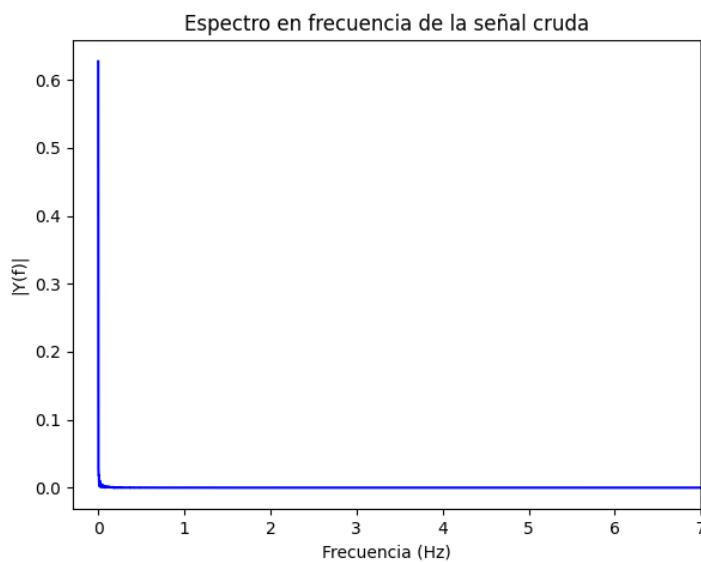


Figura 22: Espectro en frecuencias de una señal PPG cruda

3.5.1.1 Filtrado de la componente en continua

En algunas fuentes utilizan un filtro paso alto para eliminar la componente en continua de la señal [20]. Para esta aplicación, dicho filtro no sería eficaz ya que las componentes en frecuencia que se buscan extraer de la señal son a partir de los 0,1 Hz y aunque se aplique un filtro paso alto de frecuencia de corte 0,1 Hz, no se estaría eliminando por completo el ruido a frecuencias bajas producido por la componente en continua.

Esto se aprecia perfectamente en la Figura 23, donde se representa el espectro en frecuencia de la señal PPG filtrada, primeramente, con un filtro paso bajo orden 8 y frecuencia de corte 10 Hz y posteriormente filtrada con un filtro paso alto de orden 5 y frecuencia de corte 0,1 Hz.

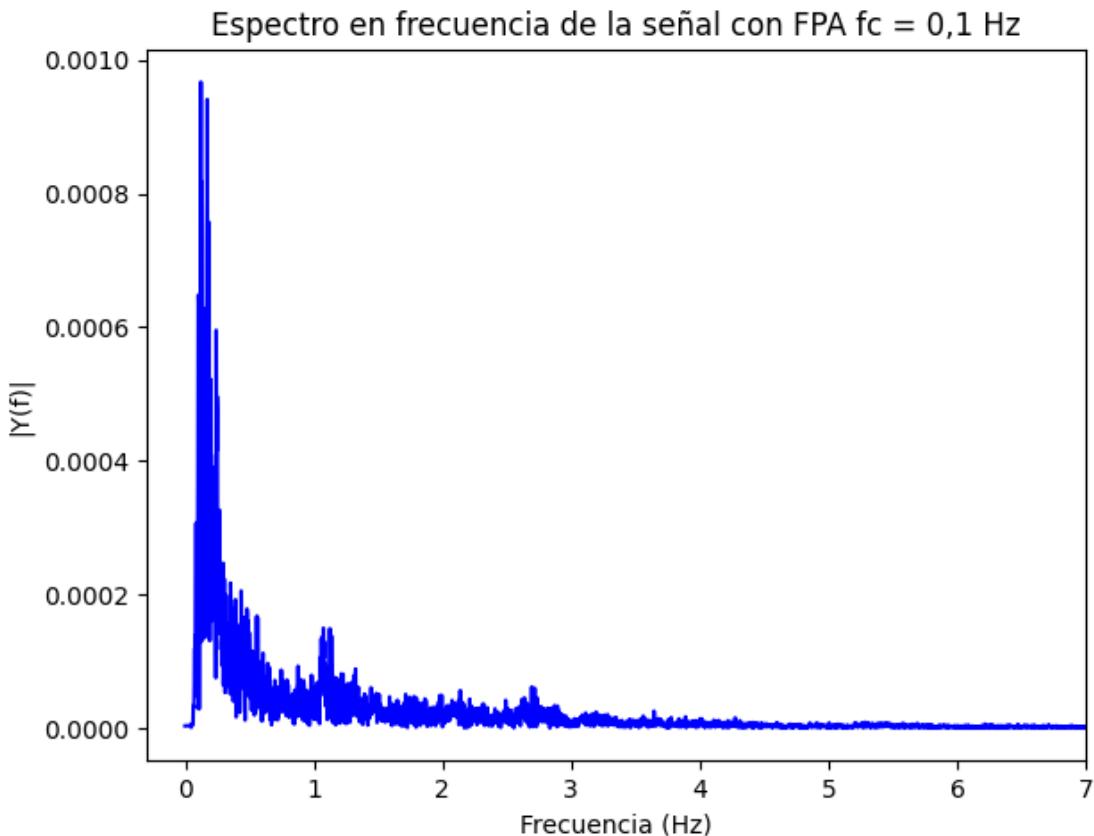


Figura 23: Espectro en frecuencia de la señal filtrada.

En otros artículos se utiliza la *Discrete Wavelet Transform (DWT)* [19]. Sin embargo, en este trabajo se ha optado por aplicar un filtro de la mediana para extraer la señal DC para restársela a la señal original, filtrada previamente con un filtro paso bajo orden 8 frecuencia de corte 10 Hz, y así obtener la componente AC de la señal PPG.

Para la aplicación del filtro de la mediana se ha utilizado la función *medfilt* de la biblioteca *scipy* [21] con 250 muestras. Es decir, se sustituye cada muestra por la media de las 250 muestras vecinas.

En la Figura 24 se muestra el espectro en frecuencia de la señal tras haberle extraído la componente en continua, es decir, la señal AC. Se observa que no se ha podido eliminar del todo el efecto de la componente DC en las frecuencias más bajas, pero sí es posible extraer la señal correspondiente a esas frecuencias, tal y como se explica en los siguientes apartados.

Tanto el filtro paso bajo de frecuencia de corte 10 Hz como el paso alto de frecuencia de corte 0,1 Hz, han sido implementados con la función *signal.build_filter* de la biblioteca *sensormotion* de Python [17]

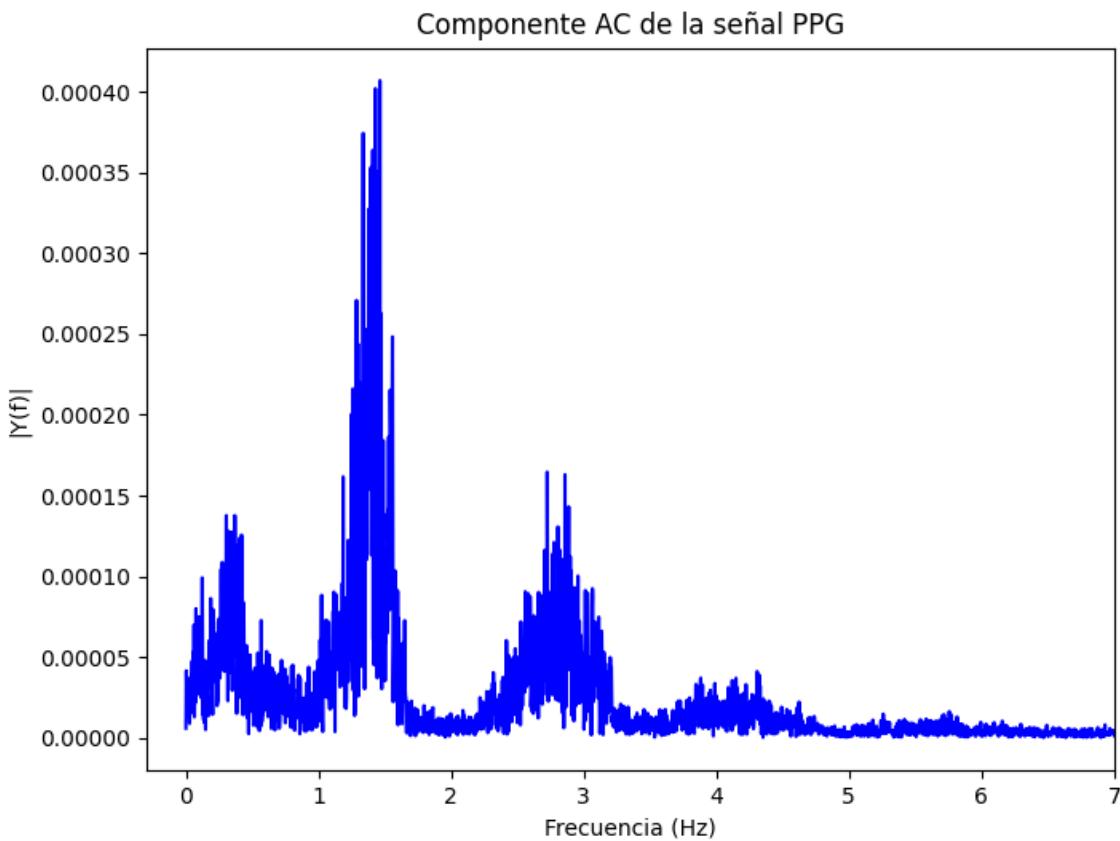


Figura 24: Espectro en frecuencia de la componente AC

3.5.2 Cálculo y representación de la frecuencia cardíaca

3.5.2.1 Identificación de los latidos

Analizando nuevamente el espectro en frecuencia de la Figura 24, podemos observar varias componentes. La primera se corresponde con la frecuencia respiratoria, la segunda, con la frecuencia cardíaca y las siguientes son los harmónicos de estas dos, ya que no son cosenos perfectos.

Para extraer la señal que contiene la información de la frecuencia cardíaca, por tanto, habrá que aplicar un filtro paso banda con frecuencias de corte las que se observan en el espectro en frecuencia; estas son 1 – 1,5 Hz [22].

El filtro paso banda implementado es de orden 3 y se ha utilizado nuevamente la función `signal.build_filter` de la biblioteca `sensormotion` de Python [17].

Una vez extraída la señal portadora de la información de la frecuencia cardíaca, se le pasa por parámetro a la función `calcula_HR`, la cual tiene por parámetros la señal a analizar y el tamaño del intervalo de tiempo, en segundos, en el que se va a dividir la señal.

La decisión de segmentar la señal en intervalos de 5 o 10 segundos es porque para determinar las pulsaciones, hay que detectar los picos de la señal mediante la función `peak.find_peaks` de la biblioteca `sensormotion` [17], a la cual hay que introducirle como parámetro el valor mínimo de amplitud de los máximos relativos de la señal para considerarlos como picos y así filtrar posibles falsos valores ocasionados por el ruido que se pudo no filtrar correctamente.

Este valor mínimo se expresa como porcentaje del pico con mayor amplitud, y debido a que la amplitud de los máximos relativos varía mucho a lo largo de toda la señal, es necesario dividirla como se ha explicado.

En la Figura 25 se puede observar la señal senoidal con los picos detectados e identificados con puntos rojos, que se corresponden con las pulsaciones del paciente que realizó la prueba.

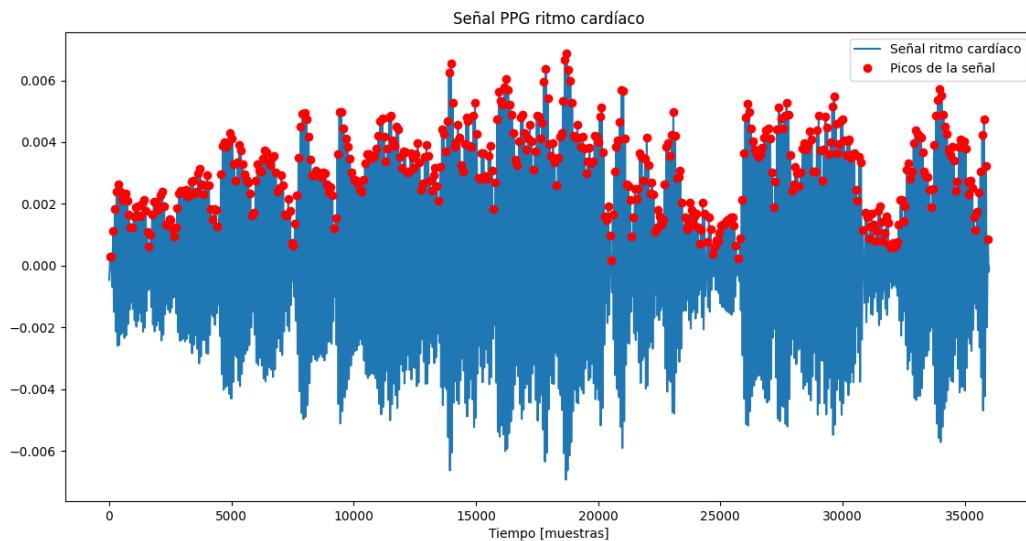


Figura 25: Señal del ritmo cardíaco.

Para observar mejor la señal, en la Figura 26 se muestra la misma señal ampliada.

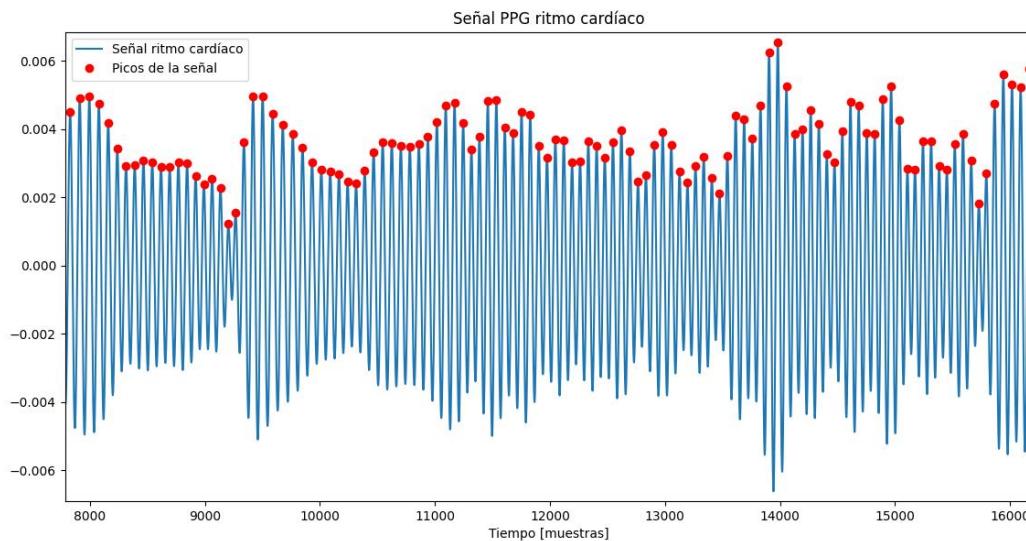


Figura 26: Señal de la Figura 4 ampliada.

3.5.2.2 Cálculo de la frecuencia cardíaca

Una vez se tienen identificados los instantes donde se produce cada pulso, hay que calcular la frecuencia cardíaca en cada instante con la fórmula (4)

$$f_{\text{cardíaca}} = \frac{60 * 100}{\text{periodo}} \quad (4)$$

El periodo será la distancia temporal entre dos picos sucesivos. Como el instante en que se produce cada pico está cuantificado como número de muestras, para pasarlo a segundos multiplicamos por 100 en el numerador ya que la frecuencia de muestreo es de 100 Hz.

Con esto conseguimos una lista donde se recoge el valor de la frecuencia cardíaca medida cada dos picos. Por lo que si se produce algún error en la medida de estos picos, como puede ser que no se detecte uno donde debería detectarse; o al revés, que debido al ruido se detecten dos picos muy cercanos. Esto podría ocasionar una medida errónea de la frecuencia cardíaca.

Para solucionar este problema, se ha optado por aplicar una media móvil que consisten en sustituir cada muestra por la media de las X muestras siguientes. Esta media móvil se calcula a través de la función *media_móvil*, de elaboración propia, a la cual se le pasan tres parámetros; dos listas, una con el valor del periodo en cada instante donde se produjo un pico y otra con valor del tiempo. En el tercer parámetro se indica el valor de muestras que se quiere aplicar para la media móvil.

En la Figura 27 se muestra la señal original que indica la frecuencia cardíaca calculada a partir de los picos de la Figura 25, utilizando la fórmula (3), acompañada de medias móviles con diferentes muestras, tal y como se observa en la leyenda de la gráfica. MA(x) significa *Mobile Average* (media móvil en castellano) y el número indicado entre paréntesis es el número de muestras tomadas para la media móvil.

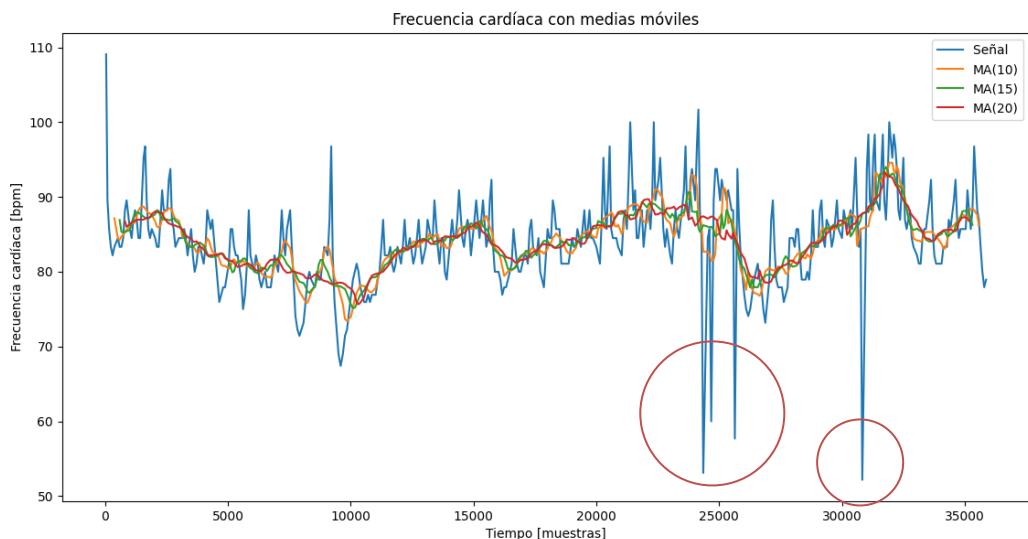


Figura 27: Frecuencia cardíaca con medias móviles.

Se pueden observar en la Figura 27, tres picos que van hasta las 60 pulsaciones por minuto, en torno a las 25000 muestras, indicados con una circunferencia de color rojo. Del mismo modo ocurre con otro pico pasadas las 30000 muestras, indicado con una segunda circunferencia. Estos son debidos a instantes donde no se ha contabilizado máximos relativos de la señal PPG y por ello la distancia entre picos, es decir, el periodo en esos instantes es superior a la media. Sin embargo, debido al uso de las medias móviles, el efecto que produce estos errores en la señal resultante se ve amortiguado.

Por último, y recordando que la finalidad de esta gráfica es mostrar la evolución de la frecuencia cardíaca del paciente, se ha optado por escoger la media móvil de 20 muestras para representar la frecuencia cardíaca del paciente.

3.5.3 Cálculo y representación de la frecuencia respiratoria

Para el cálculo y la representación de la frecuencia respiratoria se procede de forma análoga que con la cardíaca. Con la diferencia de que las frecuencias de corte para el filtro paso banda son inferiores, concretamente para esta aplicación se ha decidido por seleccionar unas frecuencias de corte de 0,25 – 0,42 Hz que se corresponde con 15 a 25,2 respiraciones por minuto. Esta decisión

se basa en que el perfil de los pacientes que realizan esta prueba muestra un rango de respiraciones alto durante la prueba y por tanto la frecuencia de corte inferior es 0,25 Hz y no menor.

3.5.3.1 Identificación de las respiraciones

Del mismo modo que en el apartado 2.2.1, se detectan los picos de la señal PPG llevada a banda base para luego calcular el periodo entre cada pico.

En la Figura 28 se muestra la señal PPG filtrada con los máximos relativos identificados como picos.

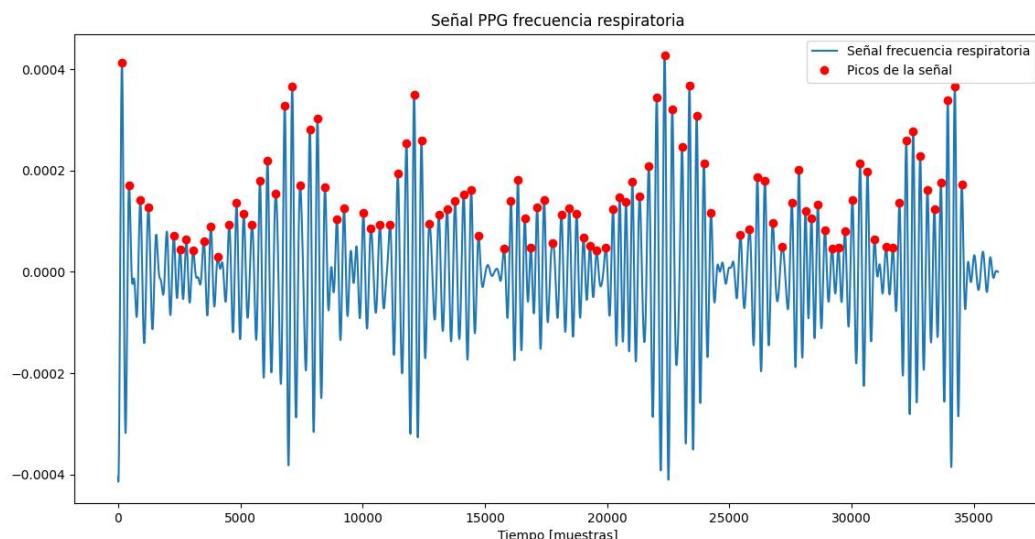


Figura 28: Señal frecuencia respiratoria.

Se pueden observar varias zonas donde, debido al ruido y a la variación en amplitud de la señal, no se han detectado ningún pico; lo que ocasionará errores en el cálculo de las respiraciones por minuto, tal y como se muestra en el siguiente apartado.

3.5.4 Cálculo de la frecuencia respiratoria

Para el cálculo de la frecuencia respiratoria se ha procedido igual que para la frecuencia cardíaca, con la diferencia del tamaño de las medias móviles, ya que el número de respiraciones que se detectan durante los 6 minutos que dura la prueba, es considerablemente menor que el número de pulsaciones.

La Figura 29 muestra la gráfica con la señal de la frecuencia respiratoria y tres medias móviles de tamaño diferente.

De las tres medias móviles, se escogió la de 15 muestras para representar la evolución de la frecuencia respiratoria del paciente a lo largo del transcurso de la prueba.

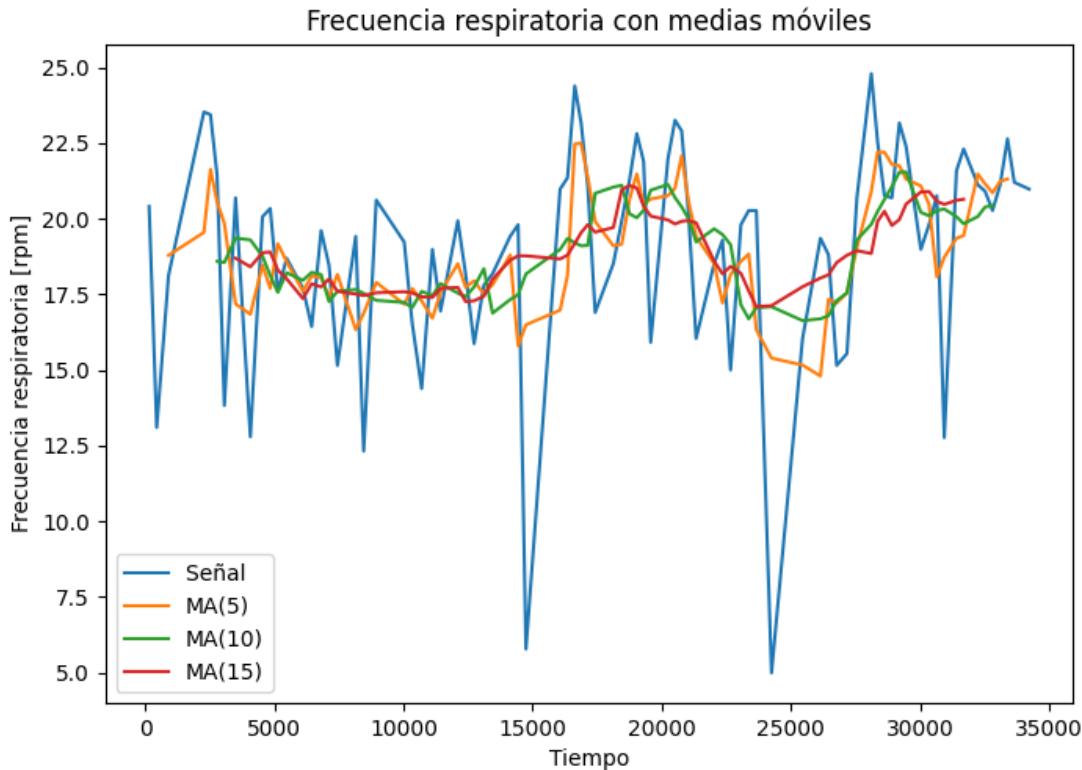


Figura 29: Señal de la frecuencia respiratoria con medias móviles.

3.5.5 Análisis de resultados

Para comprobar la calidad de los resultados obtenidos, se han hecho dos pruebas donde se ha controlado y medido tanto la frecuencia cardíaca como respiratoria. Se les hará referencia como pruebas A y B a lo largo de este apartado.

En la prueba A el paciente estaba sentado en situación de reposo. Se ha llevado la cuenta del número de respiraciones cada 10 segundos, intentando intercalar entre 1 minuto con ritmo de respiración medio y otro minuto con ritmo de respiración alto; así durante 6 minutos.

Además, el paciente ha mantenido la respiración entre el minuto y 30 segundos hasta casi los dos minutos. Se repitió esta dinámica en el minuto 4 y 10 segundos hasta el minuto 4 y 30 segundos.

Cabe destacar que debido a que la frecuencia de corte inferior del filtro paso banda utilizado es 0,25 Hz y no 0 Hz, no se van a detectar frecuencias inferiores a 15 respiraciones por minuto y por eso los intervalos donde el paciente mantuvo la respiración se ven reflejados como picos descendentes en la señal que indica la frecuencia respiratoria.

Esto se puede apreciar en la Figura 30, donde se observan los cambios en el ritmo de la frecuencia respiratoria del paciente al comenzar con una frecuencia respiratoria en torno a 20 rpm (respiraciones por minuto), a continuación, disminuye el ritmo hasta las 18 rpm para luego subir hasta las 22 rpm al pasar la mitad de la prueba. Finalmente vuelve a descender hasta casi 18 rpm para acabar la prueba en 23 rpm.

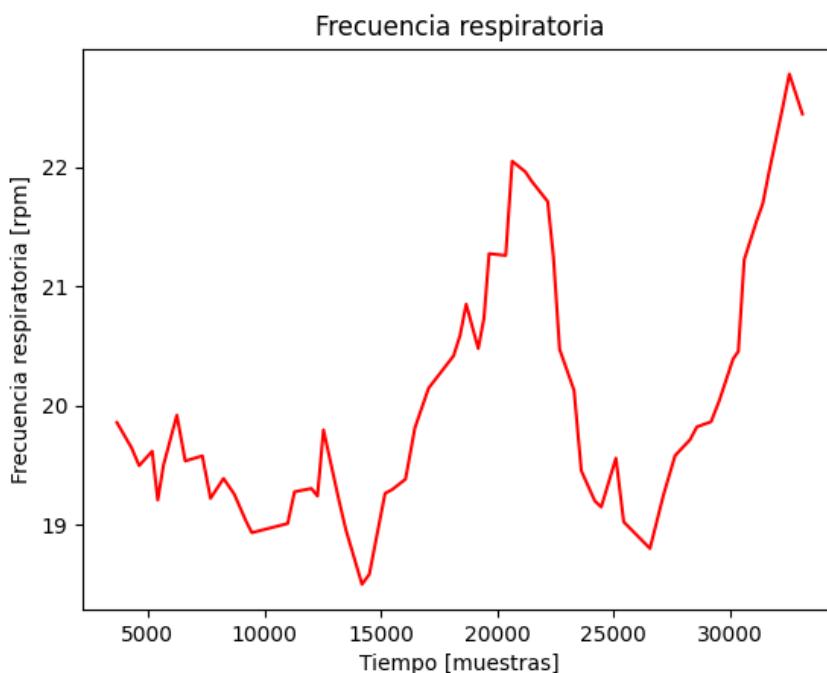


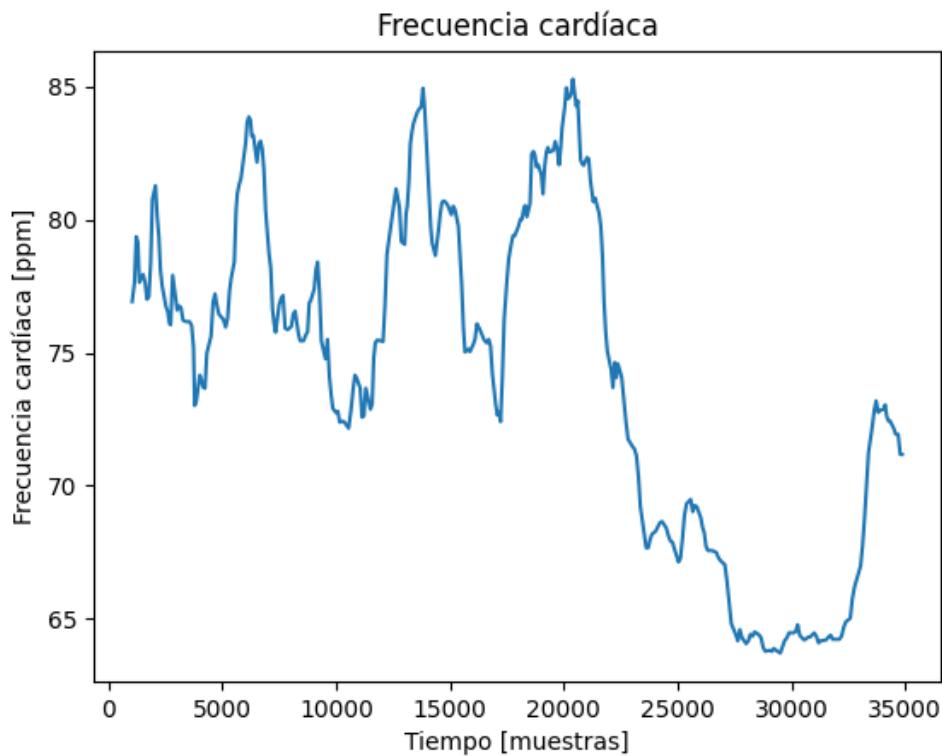
Figura 30: Frecuencia respiratoria de la prueba A.

La gráfica correspondiente a la frecuencia cardíaca de la prueba A es la ya mostrada en la Figura 27.

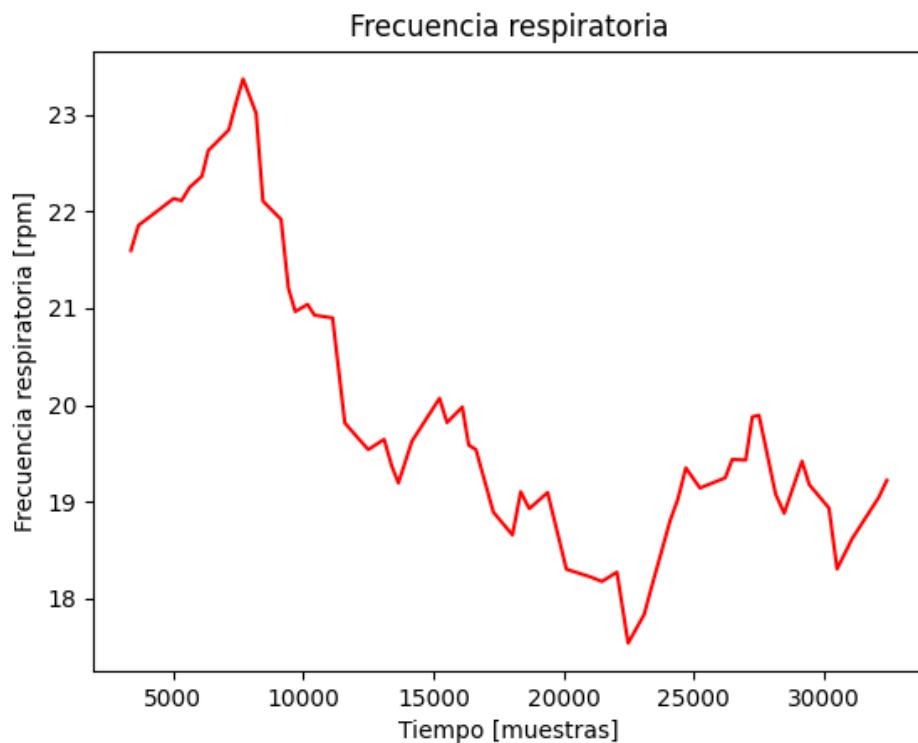
En la prueba B, con motivo de validar la medida de la frecuencia cardíaca, el paciente estuvo, durante la primera mitad de la prueba, moviéndose y activándose para acelerar el pulso. A continuación, se sentó y mediante respiraciones lentas, trató de disminuir su frecuencia cardíaca.

Finalmente, el último minuto de la prueba el paciente se mantuvo sentado, pero con un ritmo de respiración normal.

En la Figura 31 se muestra la frecuencia cardíaca del paciente. Se observa con facilidad como transcurrida la mitad de la prueba, las pulsaciones del paciente disminuyen considerablemente en forma de parábola, para finalmente recuperarse un poco y quedarse en torno a las 70 ppm (pulsaciones por minuto); pero siempre inferior al ritmo cardíaco de la primera mitad de la prueba (media de 80 ppm).

**Figura 31: Frecuencia cardíaca de la prueba B.**

En la Figura 32 se presenta la gráfica de la frecuencia respiratoria, donde se puede apreciar lo ya mencionado sobre que, a partir de la mitad de la prueba, el paciente disminuyó el ritmo respiratorio para conseguir relajar las pulsaciones.

**Figura 32: Frecuencia respiratoria de la prueba B.**

3.5.6 Conclusiones

Tras observar los resultados obtenidos de las pruebas A y B se puede afirmar la validez de estos resultados para la finalidad que se les busca, es decir, representar la evolución y tendencia de la frecuencia cardíaca y respiratoria del paciente para, tras compararlas con la velocidad y el ritmo de la marcha del paciente, relacionar estos resultados con la fatiga o cansancio de la persona que realice la prueba.

Precisamente por esto, se ha tomado la decisión de emplear las medias móviles de mayor tamaño, 15 para la frecuencia respiratoria y 20 para la cardíaca.

3.5.7 Representación junto con la velocidad instantánea

Por último, se representan en una misma gráfica la señal correspondiente a la velocidad instantánea del sujeto junto con la de la frecuencia cardíaca; y en otra comparada con la frecuencia respiratoria, para poder observar la relación entre estas dos frecuencias con la velocidad, y por tanto tener un indicador objetivo de la fatiga.

En la Figura 33 se muestra una comparación entre la velocidad instantánea y la frecuencia cardíaca de una de las pruebas realizadas. Del mismo modo, en la Figura 34 se representa la comparativa entre la velocidad instantánea y la frecuencia respiratoria de la misma prueba.

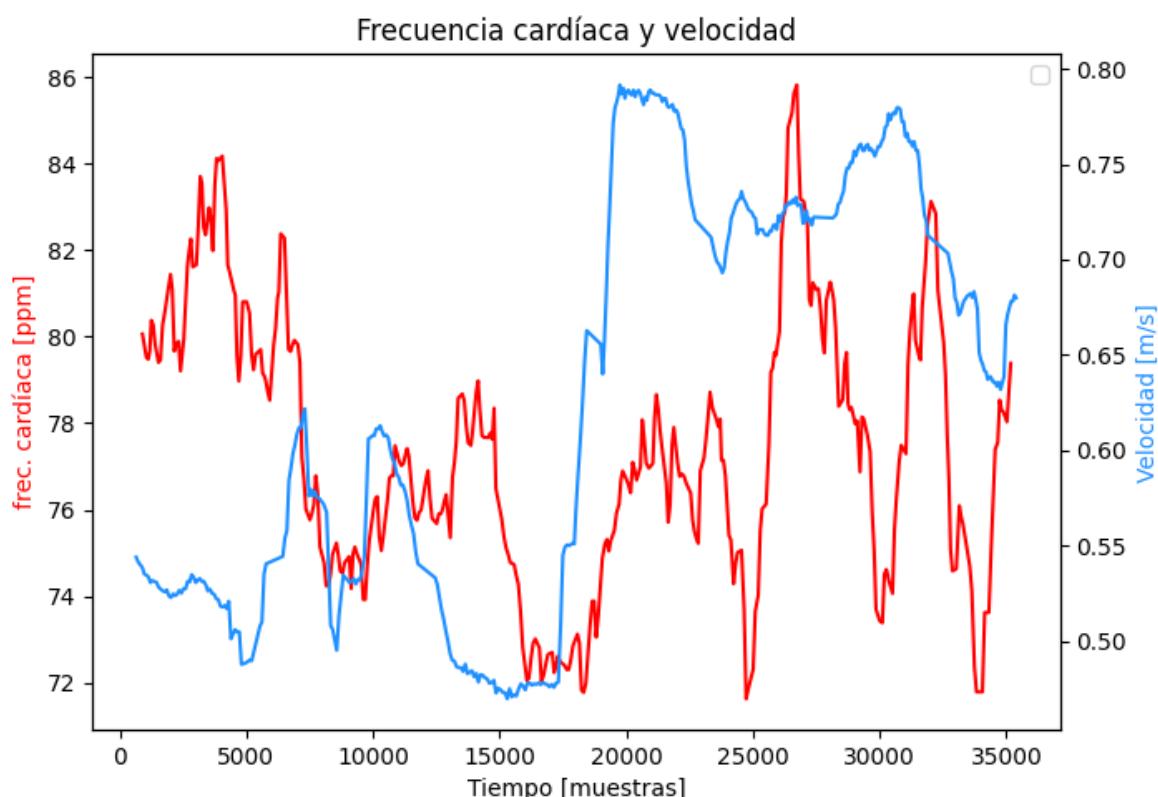


Figura 33: Comparación entre velocidad y frecuencia cardíaca.

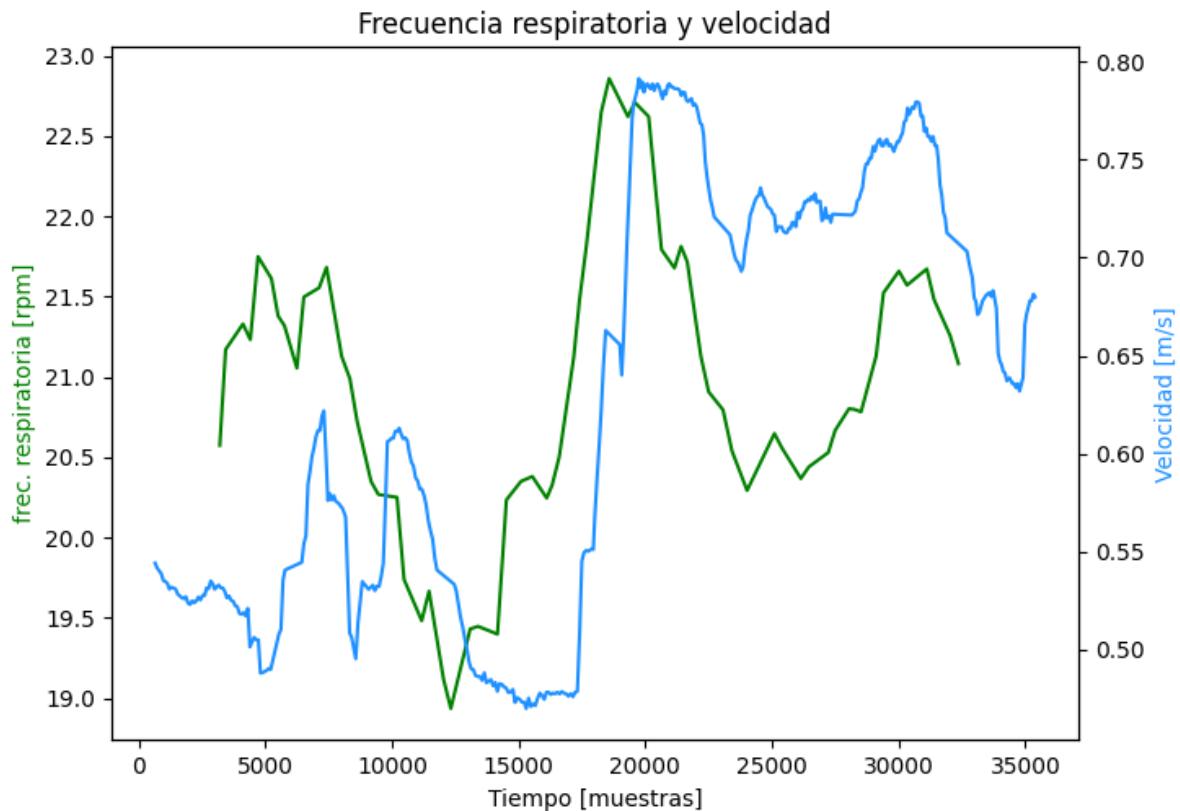


Figura 34: Comparación entre velocidad y frecuencia respiratoria.

4 DISEÑO DE APLICACIÓN DE USUARIO

4.1 Introducción

En este apartado se explica el diseño de la aplicación encargada de realizar las siguientes acciones:

- Descarga y procesado de los datos.
- Almacenamiento de la información recogida.
- Representación visual de los datos.

El nombre que se le ha designado a la aplicación desarrollada es *PD6MM*, en gallego “Proba Dos 6 Minutos Marcha”.

4.2 Diseño de la interfaz gráfica de la aplicación

Del mismo modo que es necesario mostrar los resultados de forma visual, también lo es diseñar una interfaz gráfica de usuario, GUI (Graphic User Interface), que sea sencilla de utilizar para el personal sanitario encargado de la realización de la prueba.

La GUI es diseñada empleando la biblioteca *tkinter* [24], que permite la creación de ventanas empleando elementos denominados *widgets*, como botones, etiquetas o *messageboxes*.

En este apartado se describe el diseño de la GUI de la aplicación, aunque en el Anexo 2: Manual de usuario, se realiza una descripción más detallada, enfocada al personal sanitario y técnico encargado de llevar a cabo las pruebas.

4.2.1 Descarga de datos y almacenamiento

Una vez iniciada la aplicación, se muestra en pantalla la ventana principal, la cual cuenta con tres secciones, tal y como se muestra en la Figura 35. La primera de ellas es la descarga de datos, donde por defecto se adjudica al nombre del fichero donde se vuelcan los datos, la fecha y hora del momento de ejecución del programa. Una vez finalizada la descarga, que puede durar hasta 2 minutos, se visualiza por pantalla el mensaje que se puede observar en la Figura 36.

Sin embargo, si se especifica de forma incorrecta el puerto COM del equipo informático al que se conecta el dispositivo wearable, se mostrará por pantalla el mensaje indicado en la Figura 37.

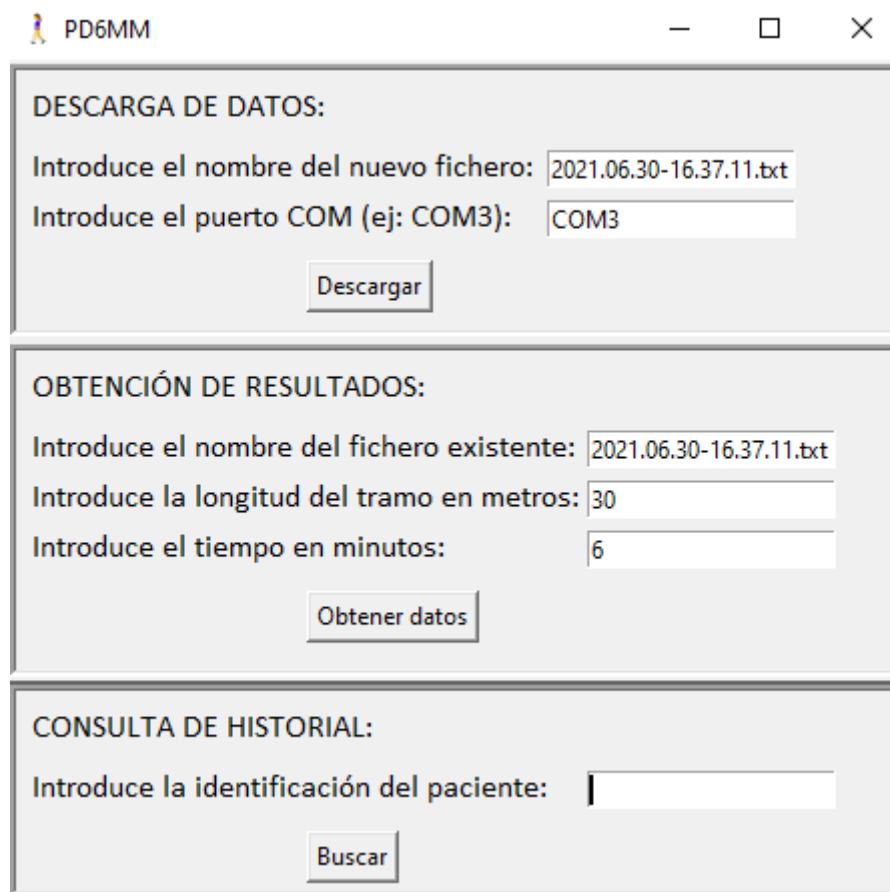


Figura 35: Ventana principal.



i Fichero descargado correctamente!

Aceptar

Figura 36: Mensaje de finalización de la descarga.



i ¡Ha ocurrido un error!

Desconecte el dispositivo e intentélo de nuevo.
Asegúrese de que el puerto COM es el correcto

Aceptar

Figura 37: Mensaje de error en la descarga.

A continuación, el usuario deberá indicar en la siguiente sección “Obtención de resultados”, la longitud del pasillo donde se realiza la prueba, en metros y el tiempo en minutos. Por defecto estos valores son 30 metros y 6 minutos. Además, si la obtención de resultados no se realiza después de la descarga de los datos, se ha de introducir el nombre del fichero creado en la descarga, ya que el nombre por defecto varía cada vez que se ejecuta el programa.

Una vez finalizado este proceso, un nuevo mensaje saldrá por pantalla indicando el número de pruebas que se han detectado en el fichero de texto indicado. Se recuerda que en una misma jornada se pueden realizar más de una prueba al mismo paciente, o a pacientes distintos. En la Figura 38, se muestra un ejemplo de dicho mensaje en forma de *messagebox*.

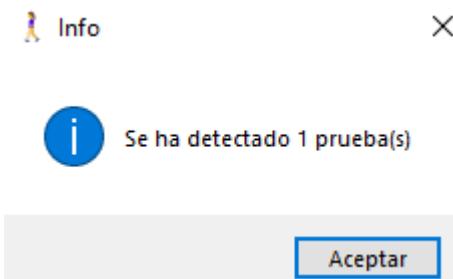


Figura 38: Ejemplo de detección de las pruebas.

Al pulsar en aceptar, aparecerá una nueva ventana donde se deberá indicar el número de identificación del paciente que realiza cada una de las pruebas detectadas. En la Figura 39 se muestra un ejemplo donde se detectaron tres pruebas.

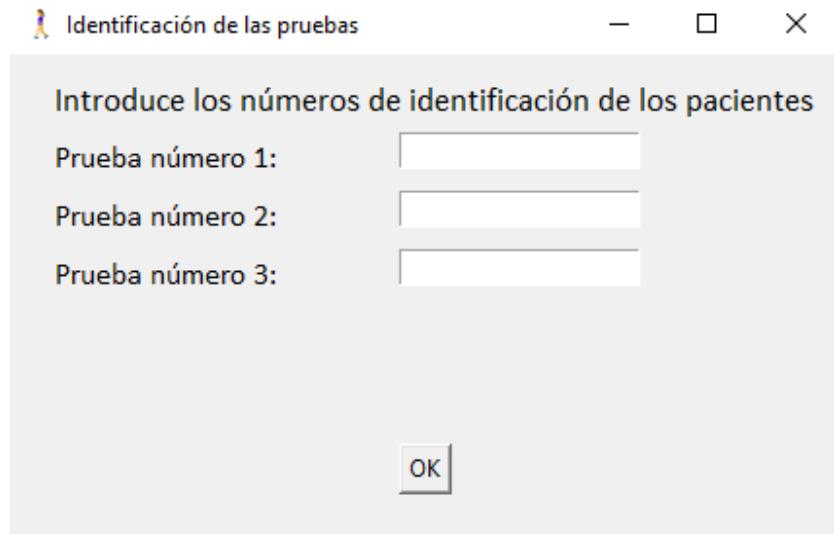


Figura 39: Ejemplo de identificación de las pruebas.

Si por ejemplo las pruebas 1 y 2 las realiza el mismo paciente, se debe indicar el mismo número de identificación en ambas. En el caso de que esto suceda, ambas pruebas tendrían el mismo identificador de fecha y número de usuario, por lo que se le añade 10 segundos en la fecha a la segunda prueba. En el caso de ser tres, a esta tercera se le añadirían otros 10 y así sucesivamente. Esto se puede realizar gracias a la biblioteca *time* de Python [26].

Tras pulsar el botón “OK”, se cerrará esta ventana y habrá finalizado el proceso de la obtención de los resultados, ya que automáticamente se almacenan los datos obtenidos en la base de datos explicada en el apartado 4.2.2.

4.2.2 Almacenamiento de la información recogida

Los resultados obtenidos en cada prueba han de ser guardados para que el personal sanitario pueda realizar comprobaciones rápidas y sencillas de la evolución del paciente con el paso del tiempo, comparando resultados de pruebas anteriores.

Para ello, cada prueba tendrá un identificador único, que será el id del paciente que realiza la prueba (número de identificación del paciente), junto con la fecha de la descarga de los datos de dicha prueba.

Por otro lado, con motivo de no tener que hacer el procesado completo de los datos para cada prueba que se quiera analizar en un futuro, se guardan en ficheros independientes aquellas señales empleadas en la representación de resultados del apartado 4.2.4. De forma que cuando el personal encargado quiera analizar pruebas anteriores, los resultados se muestren de forma inmediata, ya que, sobre todo el procesado de la señal PPG, puede durar hasta 20 segundos dependiendo del equipo informático empleado. Estos datos se guardan en ficheros de texto la primera vez que se procesan los datos de esa misma prueba y son los siguientes:

- Velocidad instantánea, tanto el valor como el instante de tiempo en muestras: “*idPaciente_Fecha_velocidad.txt*”
- Frecuencia cardíaca, tanto el valor como el instante de tiempo en muestras: “*idPaciente_Fecha_HR.txt*”
- Frecuencia respiratoria, tanto el valor como el instante de tiempo en muestras: “*idPaciente_Fecha_RR.txt*”
- Datos necesarios para representar la gráfica que muestra los cambios de sentido: “*idPaciente_Fecha_cambios_sentido.txt*”
- Datos necesarios para representar la gráfica que muestra los pasos del paciente: “*idPaciente_Fecha_steps.txt*”

Además, también se guardan en una base de datos lo resultados numéricos de distancia total recorrida, distancia en el último tramo, frecuencia cardíaca media y máxima, frecuencia respiratoria media y máxima, y velocidad media y máxima.

De la misma forma que en [1], la base de datos consiste en la generación y modificación de un archivo de extensión CSV y otro XSL, los cuales se crean la primera vez que se ejecuta la aplicación, y el resto de las veces simplemente se modifica dicho archivo añadiendo los datos correspondientes a cada prueba.

Para la gestión de la base de datos se emplea la biblioteca Pandas [23] la cual permite a sus usuarios trabajar con estructuras de datos tabulares denominadas *DataFrames*, y gestionar archivos de diferentes formatos como CSV o XSL, que son los que se emplean en esta aplicación. Ambos archivos son compatibles con multitud de programas como Documentos de Google o Microsoft Excel, por lo que también se puede acceder a la base de datos de forma externa a la aplicación.

Estos archivos generados se denominan “*DataBase.xlsx*” y “*DataBase.csv*”, ambos son completamente iguales, simplemente cambia la extensión del archivo. Están formados por un total de 12 columnas las cuales se muestran en la Figura 40 donde se observa una captura del archivo “*DataBase.xlsx*” vacío y abierto desde Microsoft Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	idPaciente	Fecha	Longitud	Duracion	Distancia_Total	Ult_tramo	HR_medio	HR_max	RR_medio	RR_max	V_media	V_max	
2													
3													
4													
5													

Figura 40: Parámetros de la base de datos.

A continuación, se detalla el contenido de cada una de las columnas:

- “*idPaciente*”: Número de identificación único del paciente.
- “*Fecha*”: Fecha de realización de la prueba. Formato AAAA.MM.DD-HH.MM.SS
- “*Longitud*”: Longitud fija del lugar de realización de la prueba en metros.
- “*Duración*”: Duración de la prueba en minutos. Generalmente será de 6 minutos
- “*Distancia_Total*”: Distancia total recorrida por el paciente en metros.
- “*Ult_tramo*”: Distancia recorrida en el último tramo en metros.
- “*HR_medio*”: Valor medio de la frecuencia cardíaca en ppm.
- “*HR_max*”: Valor máximo de la frecuencia cardíaca en ppm.
- “*RR_medio*”: Valor medio de la frecuencia respiratoria en rpm.
- “*RR_max*”: Valor máximo de la frecuencia respiratoria en rpm.
- “*V_media*”: Valor medio de la velocidad instantánea en m/s.
- “*V_max*”: Valor máximo de la velocidad instantánea en m/s.

Es importante aclarar que el número de identificación de cada paciente es único y es el mismo para todas las pruebas que este realice, de forma que cada prueba se distingue del resto en la fecha de realización y en el número del paciente; es decir, combinando ambos identificadores, es imposible que existan dos pruebas iguales.

4.2.3 Análisis de los datos

Para el estudio de las pruebas, habrá que ejecutar de nuevo el programa, por lo que la ventana inicial será la misma que en la Figura 35. Sin embargo, en este caso habrá que introducir en el apartado de “Consulta del historial”, el número de identificación del paciente para acceder al registro de todas sus pruebas.

En el caso de introducir un número de identificación del paciente no válido, se muestra un mensaje en una nueva ventana, similar al de la Figura 41.

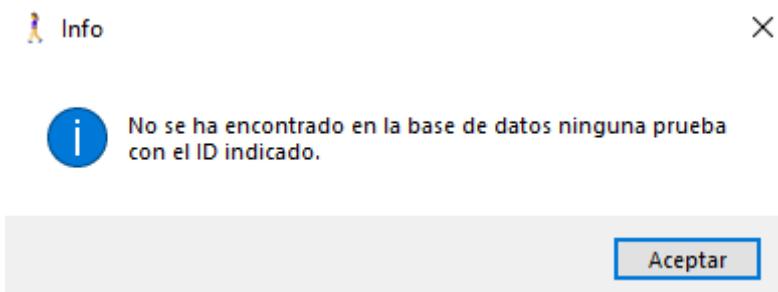


Figura 41: Mensaje de error en la búsqueda.

Al introducir un número de identificación válido, aparece una nueva ventana donde se puede acceder al historial de pruebas asociadas al paciente indicado. En la Figura 42 se muestra un ejemplo de esta situación.

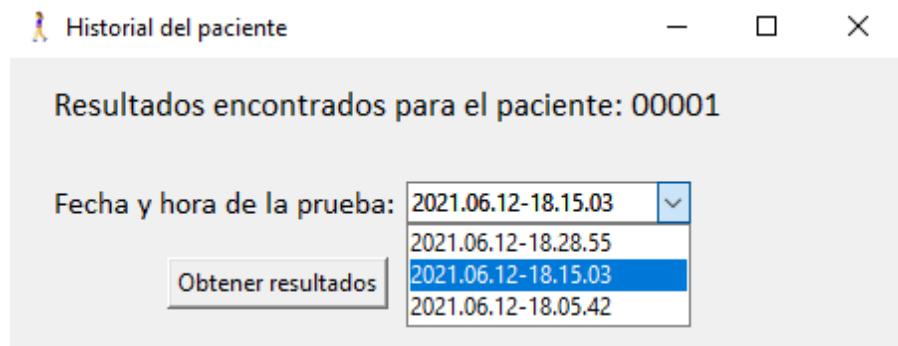


Figura 42: Ejemplo de selección de la prueba a analizar.

Una vez seleccionada la prueba, existe la posibilidad de visualizar los resultados, o si se considera que estos resultados no se corresponden con la realidad, es posible visualizar las señales donde se identifican los pasos del paciente, así como la de los cambios de sentido, para ver si se produjo algún error en ellas. En la Figura 43 se muestra la ventana donde se selecciona los resultados que se desean visualizar.

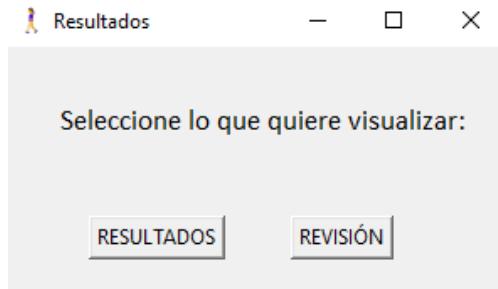


Figura 43: Selección de resultados a visualizar.

En el apartado siguiente se explica qué se visualiza en ambas opciones.

4.2.4 Representación de los datos

Es importante representar los resultados obtenidos de una forma visual y sencilla de entender, analizar y sacar conclusiones para el personal sanitario encargado de realizar y valorar la prueba.

Para ello, en este apartado no solo se representa el valor de la distancia total recorrida, sino que se muestran un total de tres gráficas, tal y como se puede observar en la Figura 44.

- Comparación de la frecuencia cardíaca con la velocidad (superior izquierda)
- Comparación de la frecuencia respiratoria con la velocidad (superior derecha)
- Velocidad instantánea y velocidad media (inferior)

Además, también se muestra un pequeño resumen de resultados en la parte izquierda de la pantalla, con los datos de la distancia total recorrida, la distancia correspondiente al último tramo, la frecuencia cardíaca media y máxima, la frecuencia respiratoria media y máxima, y la velocidad media y máxima.

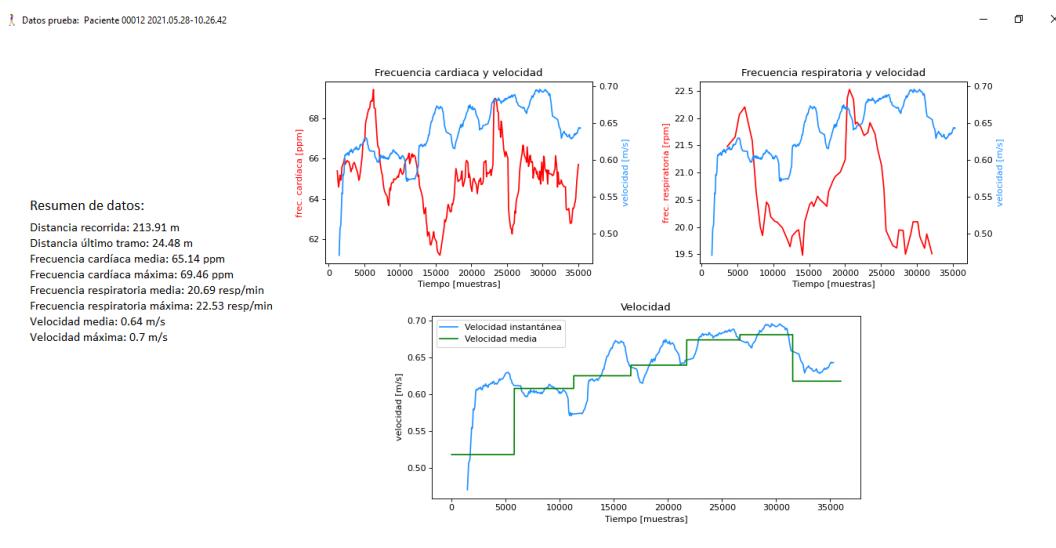


Figura 44: Ejemplo de la representación de resultados.

Para la realización de la ventana anterior, se ha empleado la biblioteca *tkinter* [24] que es la biblioteca estándar para la realización de interfaces gráficas en Python. Con ella es posible crear etiquetas como las mostradas en la Figura 44, que contengan información de los resultados

numéricos; además de crear figuras donde se puedan representar gráficas empleando la biblioteca *matplotlib* [25].

Por otro lado, tal y como se explica en el siguiente apartado, se le da la opción al usuario de visualizar las señales donde se identifican los cambios de sentido del paciente, así como la de los pasos. Con la finalidad de que, si se detecta un error en la visualización de los resultados, se pueda comprobar si dicho error es ocasionado por una incorrecta identificación de los pasos o de los cambios de sentido.

En la Figura 45 se muestra un ejemplo de visualización de estas señales para revisar las pruebas.

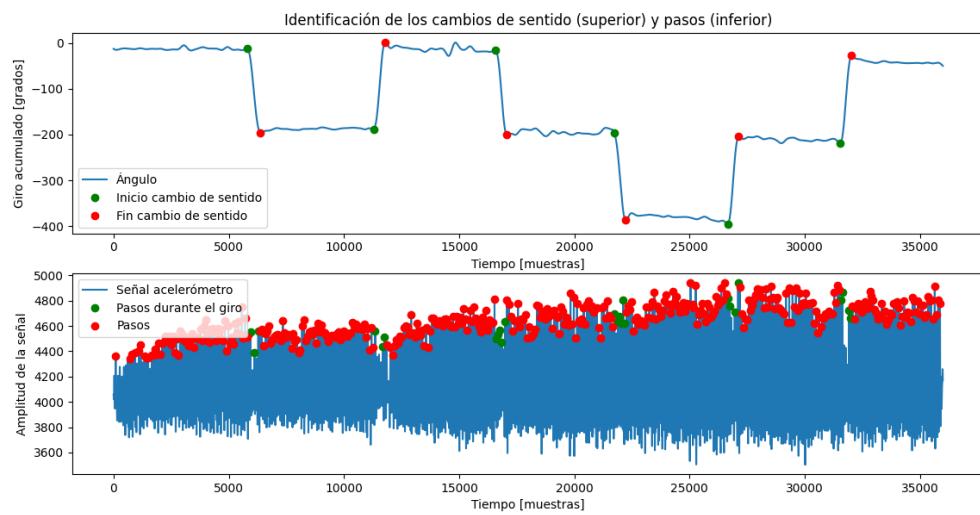


Figura 45: Ejemplo de revisión de los resultados.

5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

5.1 Introducción

En este apartado se discuten los resultados obtenidos en las pruebas incluidas en el *Anexo 1 Pruebas realizadas*. Tal y como se explica en dicho documento, se presentan un total de 23 pruebas realizadas a sujetos reales.

Por otro lado, se tratan los siguientes puntos en el análisis de los resultados:

- Detección de los cambios de sentido.
- Medición de los pasos.
- Cálculo de la distancia total recorrida con su error.
- Cálculo de la velocidad.
- Análisis de la señal PPG.

5.2 Detección de los cambios de sentido.

En todas las pruebas contempladas en el Anexo 1, se ha detectado correctamente el instante tanto de comienzo del cambio de sentido, como de finalización del mismo.

Sin embargo, en algunas pruebas, el algoritmo de detección de los cambios de sentido precisa de un valor mayor del *threshold* que en otras. Esto se debe principalmente a la colocación del dispositivo wearable; ya que, si la posición del brazo del paciente no es del todo correcta, siguiendo las pautas especificadas en el apartado 3.4.1, el *threshold* deberá de ser menor.

En la Tabla 1 se recoge el valor del *threshold* especificado para cada prueba. Se ha indicado el valor máximo con el cual el algoritmo detecta correctamente los cambios de sentido.

Se observa como a excepción de las pruebas 3 y 4, las cuales están justificadas en el Anexo 1, todas las pruebas presentan un *threshold* máximo, mayor o igual de 165° el cual es un valor muy cercano a 180° (15° menos) lo cual representa un giro de media vuelta. Por lo tanto, se decide escoger un valor de 165° para el *threshold* de la solución final.

Esto implica que en aquellos casos donde el *threshold* podría ser mayor, por ejemplo, en las pruebas donde se le indicó un valor de 175°, puede darse el caso de que se detecte el instante del cambio de sentido, hasta medio segundo antes, en función de la velocidad a la que realice el giro.

Tabla 1: Valores del *threshold* en cada prueba.

Prueba	Threshold [°]
1	180
2	170
3	155
4	155
5	-
6	-
7	-
8	-
9	-
10	170
11	170
12	175
13	175
14	175
15	165
16	165
17	165
18	165
19	165
20	175
21	170

5.3 Medición de los pasos

En aquellas pruebas donde no hay ningún tipo de interrupción o movimiento que interfiera en la señal del acelerómetro a modo de ruido, la detección de los pasos que da el paciente se realiza de forma correcta y se ajusta al valor real.

Sin embargo, en aquellas pruebas donde el dispositivo wearable está mal colocado, el paciente se recoloca el dispositivo, o este se tropieza; se introduce ruido en la señal del acelerómetro por lo que el número de pasos dados en dichos tramos no se corresponden con los que realmente el paciente ha dado. Estas situaciones que perjudican a la medición de los pasos han sido identificadas e incluidas en el apartado de *Notas* de cada prueba en el Anexo 1.

El problema que ocurre con esta desviación de los datos reales es que se acumula y se ve reflejado en el cálculo de la velocidad instantánea, tal y como se explica en el apartado 5.5.

5.4 Cálculo de la distancia total.

Para el análisis cuantitativo del cálculo de la total, se calcula el error absoluto en cada prueba, frente a la distancia total que realmente recorre el sujeto que realiza la prueba.

En la Tabla 2 se recoge el valor del error absoluto en % de cada una de las pruebas realizadas y presentadas en el Anexo 1.

Se observa como el error más alto alcanzado es de **0,527%** que equivale a 1,32 metros en una de las pruebas realizadas para verificar la robustez del algoritmo de identificación de cambios de sentido. Sin embargo, el error medio se corresponde con un **0,178%**. Por lo que se llega a la conclusión de que el cálculo de la distancia es válido, aunque haya situaciones que incorporen interferencias en la medida, especialmente al contabilizar los pasos.

Además, en la mayoría de las pruebas realizadas, el cálculo de la distancia total realizado por programa es más preciso que el tomado como referencia en el momento en el que el sujeto se detiene al pasar los 6 minutos; ya que en ocasiones se da el caso de que los seis minutos finalizan antes de que el paciente se detenga y por tanto la distancia sería menor a la contabilizada y al revés. Por otro lado, a la hora de indicar la distancia recorrida en el último tramo, que es, al fin y al cabo, donde se encuentra el error, se ha llevado a cabo el protocolo que se sigue en el H. Álvaro Cunqueiro, que consiste en tomar la medida de la punta del pie más adelantado del sujeto en el momento de finalización de los seis minutos.

Tabla 2: Errores absolutos en % de la distancia total.

Prueba	Error [%]
1	0,234
2	0,189
3	0,527
4	0,454
5	-
6	-
7	-
8	-
9	-
10	0,407
11	0,186
12	0,038
13	0,117
14	0,018
15	0,056
16	0,142
17	0,000
18	0,214
19	0,052
20	0,051
21	0,425
22	0,038
23	0,047

5.5 Cálculo de la velocidad

En el apartado 3.4.4 se explica cómo se calcula la velocidad instantánea del paciente y por qué influye en su cálculo la correcta medida de los pasos. Por eso, en aquellas pruebas donde hay interferencias en la señal del acelerómetro a través de la cual de determinan los pasos del paciente, tendrá como consecuencia un error en el cálculo de la velocidad instantánea.

Para disminuir la presencia de este error, se representa la media móvil de 15 muestras de la velocidad instantánea, y se compara con la velocidad media en cada tramo, calculada a partir de los datos recogidos de forma externa a los de que recoge el dispositivo wearable; es decir, identificando el tiempo que tarda el paciente en recorrer cada tramo y dividiéndoselo a la distancia (que es fija) de cada tramo.

5.6 Resultados de la señal PPG

En el apartado 3.5.5 se analizan los resultados de en concreto dos pruebas que se realizaron con la finalidad de validar el cálculo de las frecuencias cardíaca y respiratoria.

Sin embargo, tras analizar el resto de las pruebas expuestas en el Anexo 1, se llega a la conclusión de que es necesario que el sensor incluido en el dispositivo wearable esté, en todo

momento, en contacto con la piel del paciente; ya que, hay pruebas de las realizadas, donde el paciente recoloca la posición de dicho dispositivo durante el desarrollo de la prueba por lo que introduce interferencias en la señal y hace que las señales resultantes no sean heterogéneas.

Este problema que se acaba de describir se explica mejor en las figuras Figura 46 y Figura 47, donde se muestra un intervalo de tiempo de las frecuencias cardíaca y respiratoria donde las señales que se observan en ambas figuras presentan irregularidades en su forma de onda, no son cosenos perfectos. Esto provoca que, o bien se detecta un máximo relativo de la señal donde no debería, o bien no se detecta uno que si debiera; lo que afecta al periodo entre picos que es la base del cálculo tanto de la frecuencia respiratoria como cardíaca.

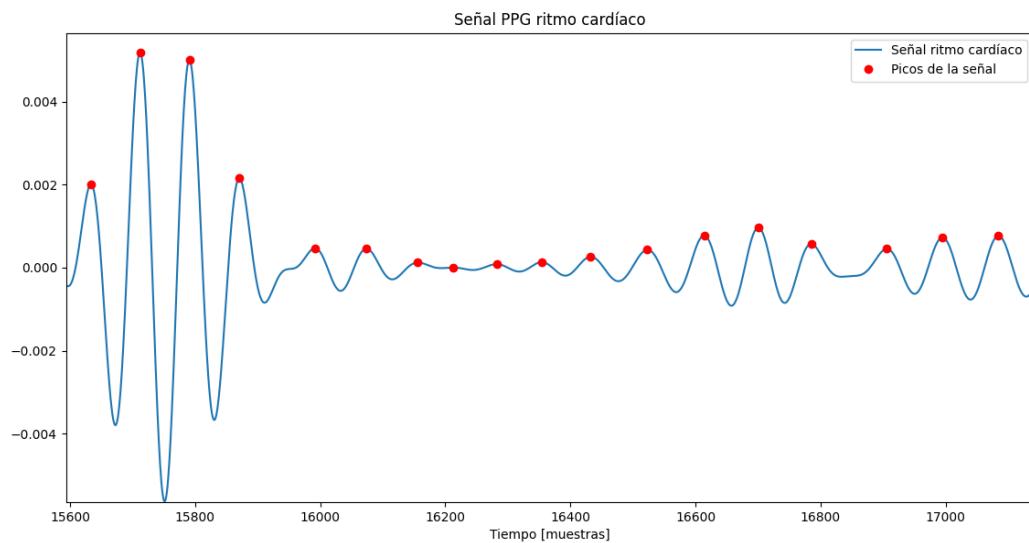


Figura 46: Ejemplo de interferencias en la frecuencia cardíaca.

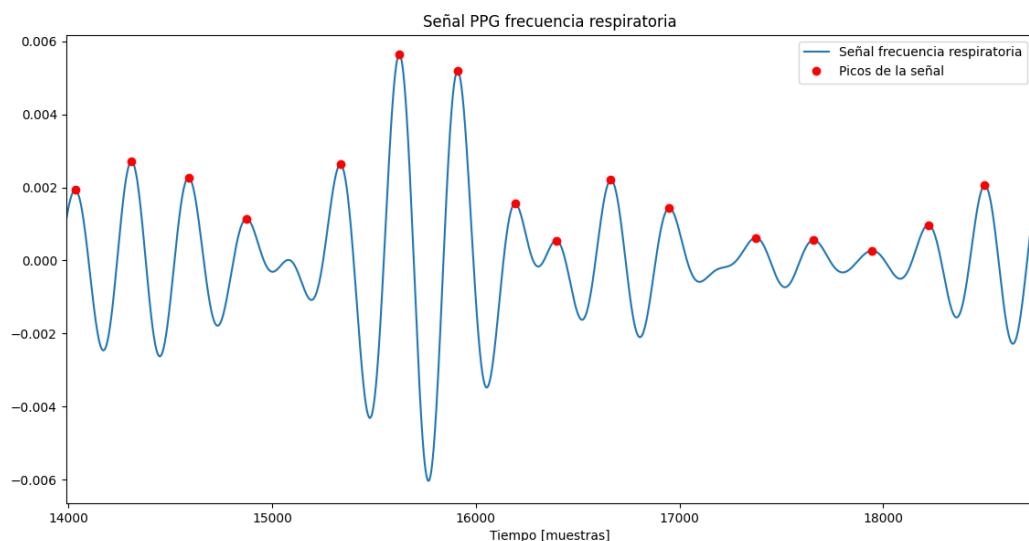


Figura 47: Ejemplo de interferencias en la frecuencia respiratoria.

6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.

Al comienzo de este documento se detallan los principales objetivos específicos marcados para desarrollar en el presente TFG. En este apartado se hace una revisión a dichos objetivos indicando si se han cumplido o no y en qué medida. Finalmente, se concluye el documento con una serie de propuestas que pueden servir de partida para trabajos futuros.

6.1 Análisis de los objetivos

A continuación, se enumeran los objetivos específicos introducidos en 1.3; y se detalla si se han cumplido o no.

6.1.1 Implementar un algoritmo robusto para la detección de los cambios de sentido

El algoritmo presentado en 3.4.1 cumple con este objetivo previamente definido como el más importante de todos los expuestos, ya que es la base para el cálculo del resto de parámetros.

Además, se ha probado la robustez ante situaciones donde dicho algoritmo podría haber producido o generado errores y no ha ocurrido; este es el caso de, por ejemplo, la prueba 1 presentada en el Anexo 1. Por lo tanto, la necesidad de un algoritmo que realice la detección de los cambios de sentido en la marcha de los pacientes que participen en el 6MWT en Hospital Álvaro Cunqueiro, queda satisfecha.

6.1.2 Cálculo de la velocidad

No solo se ha mejorado la propuesta para el cálculo de la velocidad del trabajo predecesor a este [1], sino que se presenta en una misma gráfica, tanto la velocidad instantánea como la velocidad media en cada tramo, con cálculos distintos para así poder comparar ambas señales y verificar el correcto cálculo de la velocidad.

Adicionalmente, se ha conseguido incluir en una misma gráfica la velocidad y las frecuencias cardíaca y respiratoria, sin necesidad de rehacer los cálculos de la velocidad para adaptar el eje de temporal, que era algo necesario en [1].

6.1.3 Procesado de la señal PPG

Tal y como se explica en el apartado 3.5, se ha realizado un correcto procesado de la señal adquirida del sensor PPG, filtrando la componente en continua y extrayendo las componentes necesarias para el cálculo de las frecuencias cardíaca y respiratoria, gracias al análisis del espectro en frecuencias de la señal PPG original.

6.1.4 Cálculo y representación de las frecuencias cardíaca y respiratoria

Una vez realizado el procesado de la señal PPG, el cálculo de las frecuencias cardíaca y respiratoria resultó ser sencillo, aplicando medias móviles de 20 y 15 muestras respectivamente, para facilitar el análisis de los resultados por parte del personal sanitario.

6.1.5 Representar de forma visual los resultados obtenidos

Tras el procesado de todos los datos adquiridos por el dispositivo wearable, se ha diseñado una interfaz gráfica a través de la cual se muestran los resultados obtenidos de cada prueba además de las gráficas de mayor interés para el análisis de la prueba, haciendo caso a las peticiones del personal sanitario.

6.1.6 Almacenar los resultados

Por último, los datos descargados y procesados por primera vez se almacenan en una base de datos con un indicador único para cada prueba y paciente, de forma que se pueda analizar la evolución del paciente con el paso del tiempo, mediante el estudio de pruebas anteriores.

Concluyendo, se ha conseguido alcanzar todos y cada uno de los objetivos marcados al inicio de la memoria.

6.2 Trabajo futuro

Se propone como una línea de trabajo futuro, realizar una modificación tanto en el *hardware* como en el *firmware* del dispositivo.

En primer lugar, en la realización del 6MWT del H. Álvaro Cunqueiro, se toman medidas de la saturación de oxígeno al principio y al final de cada prueba, parámetro que se puede medir con un sensor PPG, proporcionando una monitorización continua. Sin embargo, el sensor incluido en la versión actual del dispositivo cuenta con dos LEDs del mismo color (verde), cuando para el cálculo de la saturación de oxígeno se necesita que tengan distinta longitud de onda para comparar las dos señales generadas.

Se propone el uso del sensor OSRAM SFH 7050 el cual ofrece la posibilidad de utilizar LEDs de tres longitudes de onda distintas (infrarrojo, rojo y verde), además de que está incorporado en dispositivos wearables comerciales [26].

Otra modificación *hardware* que se propone es la incorporación de un pulsador adicional que indique el inicio de cada prueba, para que haya un mejor sincronismo entre las mediciones tomadas por el técnico que realiza la prueba, y el propio dispositivo. Además, que así se estaría evitando cualquier tipo de error que pueda suceder tras un mal protocolo de inicio.

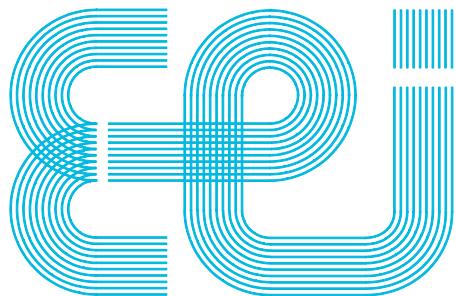
Llevar a cabo estas dos modificaciones implicaría realizar una actualización del *firmware* del dispositivo para adaptarlo a la nueva versión del *hardware*.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Termenón Rivas, «Desarrollo y validación de un sistema basado en dispositivos wearables para la monitorización automática de test de marcha en pacientes cardiológicos (Trabajo fin de grado),» Vigo, 2020.
- [2] I. A. G.-E. García, «Pronóstico de la estenosis valvular aórtica grave en su contexto epidemiológico actual : utilidad de la prueba de la marcha de los 6 minutos y del NT proBNP,» *Proyecto de investigación*, 2017.
- [3] L. Gochicoa-Rangel et al., «Prueba de caminata de seis minutos: Recomendaciones y procedimientos,» *Neumol Cir Torax*, nº S2, 2019.
- [4] «Python 3.0,» 2008. [En línea]. Available: <https://www.python.org/>.
- [5] «ATS statement: guidelines for the six-minute walk test,» *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 166, nº 1, pp. 111-117, 2002.
- [6] Texas Instruments, «Datasheet MSP430F5529 microcontroler,» [En línea]. Available: <https://www.ti.com/product/MSP430F5529>.
- [7] «Datasheet NJL5310R PPG sensor PPG,» [En línea]. Available: https://www.njr.com/electronic_device/PDF/NJL5310R_E.pdf.
- [8] InvenSense, «Datasheet MCU-9250 IMU,» [En línea]. Available: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/5/5/0/MPU9250REV1.0.pdf.
- [9] C. Veiga et al., «Optimized PPG-based wearable acquisition unit for massive analysis of heart rhythms,» *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 2044-2049, 2017.
- [10] C. Liechti, «PySerial,» 2001. [En línea]. Available: <https://pythonhosted.org/pyserial/>.
- [11] M. Meghji, A. Balloch, D. Habibi, I. Ahmad, N. Hart, R. Newton, J. Weber y A. Waqar, «An Algorithm for the Automatic Detection and Quantification of Athletes' Change of Direction Incidents Using IMU Sensor Data,» *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, nº 12, pp. 4518-4527, 2019.
- [12] T. Michel, H. Fourati, P. Genevès y N. Layaïda, «A comparative analysis of attitude estimation for pedestrian navigation with smartphones,» *2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 1-10, 2015.
- [13] Q. Gang y Y.-X. Chen, «Research and Design of Wearable Human Motion Capture System,» de *Proceedings of the 2017 7th International Conference on Social Network, Communication and Education (SNCE 2017)*, Atlantis Press, 2017, pp. 287-290.
- [14] A. Barrientos, L. Felipe Peñín, C. Balaguer y R. Aracil, «Capítulo 3: Herramientas matemáticas para la localización espacial,» de *Fundamentos de Robótica*, McGRAW-HILL, 2007, pp. 65-117.
- [15] N. O-larnnithipong y A. Barreto, «Gyroscope drift correction algorithm for inertial measurement unit used in hand motion tracking,» *2016 IEEE SENSORS*, pp. 1-3, 2016.
- [16] A. Norouzpour-Shirazi, D. Serrano, M. Zaman, G. Casinovi y F. Ayazi, «A dual-mode gyroscope architecture with in-run mode-matching capability and inherent bias

cancellation,» *2015 Transducers - 2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, pp. 23-26, 2015.

- [17] S. Ho, «Sensor Motion,» 2018. [En línea]. Available: <https://sensormotion.readthedocs.io/en/latest/>.
- [18] A. Abadleh, E. Al-Hawari, E. Alkafaween y H. Al-Sawalqah, «Step detection algorithm for accurate distance estimation using dynamic step length,» *2017 18th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM)*, pp. 324-327, 2017.
- [19] G. a. J. A. a. T. G. a. T. R. M. a. J. D. Joseph, «Photoplethysmogram (PPG) signal analysis and wavelet de-noising,» *2014 Annual International Conference on Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMM&D)*, pp. 1-5, 2014.
- [20] J. Allen, «Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement,» *Physiological Measurement*, vol. 28, pp. R1-39, 2007.
- [21] SciPy Developers, «SciPy,» 2003. [En línea]. Available: <https://scipy.org/scipylib/>.
- [22] N. a. S. M. a. S. R. Daimiwal, «Respiratory rate, heart rate and continuous measurement of BP using PPG,» *2014 International Conference on Communication and Signal Processing*, pp. 999-1002, 2014.
- [23] The pandas development team, «pandas,» 2008. [En línea]. Available: <https://pandas.pydata.org/>.
- [24] Python Software Foundation, «Graphical User Interfaces with Tk,» [En línea]. Available: <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html>.
- [25] John Hunter, Darren Dale, Eric Firing, Michael Droettboom and the Matplotlib development team, «Matplotlib,» [En línea]. Available: <https://matplotlib.org/>.
- [26] Python Software Foundation, «Time access and conversions,» 2001-2021. [En línea]. Available: <https://docs.python.org/3/library/time.html>.
- [27] A. Paz Martínez, «Desarrollo de un sistema de adquisición y visualización de datos de sensores PPG. TFG,» 2016.



Escuela de Ingeniería Industrial

TRABAJO FIN DE GRADO

Mejora de un sistema basado en dispositivos wearables para la monitorización automática de test de marcha en pacientes cardiológicos.

Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática

Documento

ANEXOS

UniversidadeVigo

CONTENIDO

Contenido	2
Índice de figuras.....	5
Índice de tablas	7
1 Anexo 1: Pruebas realizadas	9
1.1 Introducción.....	9
1.1.1 Contenido del anexo.....	9
1.1.2 Formato de la información mostrada	9
1.2 Prueba 1	12
1.2.1 Tablas de resultados	12
1.2.2 Notas.....	13
1.3 Prueba 2	14
1.3.1 Tablas de resultados	14
1.3.2 Gráficas de los resultados.....	15
1.3.3 Notas.....	16
1.4 Prueba 3	17
1.4.1 Tablas de resultados	17
1.4.2 Gráficas de los resultados.....	18
1.4.3 Notas.....	19
1.5 Prueba 4	20
1.5.1 Tablas de resultados	20
1.5.2 Gráficas de los resultados.....	21
1.5.3 Notas.....	22
1.6 Prueba 5	23
1.6.1 Gráficas de los resultados.....	23
1.6.2 Notas.....	24
1.7 Prueba 6	25
1.7.1 Gráficas de los resultados.....	25
1.7.2 Notas.....	26
1.8 Prueba 7	27
1.8.1 Gráficas de los resultados.....	27
1.8.2 Notas.....	28
1.9 Prueba 8	29
1.9.1 Gráficas de los resultados.....	29
1.9.2 Notas.....	30
1.10 Prueba 9	31
1.10.1 Gráficas de los resultados.....	31

1.10.2 Notas.....	32
1.11 Prueba 10	33
1.11.1 Tablas de resultados	33
1.11.2 Gráficas de los resultados.....	34
1.11.3 Notas.....	35
1.12 Prueba 11	36
1.12.1 Tablas de resultados	36
1.12.2 Gráficas de los resultados.....	37
1.12.3 Notas.....	38
1.13 Prueba 12	39
1.13.1 Tablas de resultados	39
1.13.2 Gráficas de los resultados.....	40
1.13.3 Notas.....	41
1.14 Prueba 13	42
1.14.1 Tablas de resultados	42
1.14.2 Gráficas de los resultados.....	43
1.14.3 Notas.....	44
1.15 Prueba 14	45
1.15.1 Tablas de resultados	45
1.15.2 Gráficas de los resultados.....	46
1.15.3 Notas.....	47
1.16 Prueba 15	48
1.16.1 Tablas de resultados	48
1.16.2 Gráficas de los resultados.....	49
1.16.3 Notas.....	50
1.17 Prueba 16	51
1.17.1 Tablas de resultados	51
1.17.2 Gráficas de los resultados.....	52
1.17.3 Notas.....	53
1.18 Prueba 17	54
1.18.1 Tablas de resultados	54
1.18.2 Gráficas de los resultados.....	55
1.18.3 Notas.....	56
1.19 Prueba 18	57
1.19.1 Tablas de resultados	57
1.19.2 Gráficas de los resultados.....	58
1.19.3 Notas.....	59
1.20 Prueba 19	60
1.20.1 Tablas de resultados	60
1.20.2 Gráficas de los resultados.....	61
1.20.3 Notas.....	62
1.21 Prueba 20	63

1.21.1 Tablas de resultados	63
1.21.2 Gráficas de los resultados.....	64
1.21.3 Notas.....	65
1.22 Prueba 21	66
1.22.1 Tablas de resultados	66
1.22.2 Gráficas de los resultados.....	67
1.22.3 Notas.....	68
1.23 Prueba 22	69
1.23.1 Tablas de resultados	69
1.23.2 Gráficas de los resultados.....	70
1.23.3 Notas.....	71
1.24 Prueba 23	72
1.24.1 Tablas de resultados	72
1.24.2 Gráficas de los resultados.....	73
1.24.3 Notas.....	74
2 Anexo 2: Manual de usuario	75
2.1 Introducción.....	75
2.2 Instalación del software	75
2.3 Realización de la prueba y extracción de los datos	76
2.3.1 Colocación del dispositivo wearable.....	76
2.3.2 Indicaciones de la realización de la prueba	76
2.3.3 Puesta en marcha.....	76
2.3.4 Batería y carga del dispositivo	78
2.3.5 Inicio de la prueba	78
2.3.6 Transcurso de la prueba.....	79
2.3.7 Finalización de la prueba.....	79
2.3.8 Descarga de los datos	79
2.3.9 Procesado de los datos.....	81
2.4 Análisis de los datos	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Respuesta del algoritmo de detección de los cambios de sentido.....	13
Figura 2: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 2.....	15
Figura 3: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 2.....	15
Figura 4: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 2.....	16
Figura 5: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 3.....	18
Figura 6: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 3.....	18
Figura 7: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 3.....	19
Figura 8: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 4.....	21
Figura 9: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 4.....	21
Figura 10: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 4.....	22
Figura 11: Gráfica de la frecuencia cardíaca. Prueba 5	23
Figura 12: Gráfica de la frecuencia respiratoria. Prueba 5	23
Figura 13: Gráfica de la frecuencia cardíaca. Prueba 6	25
Figura 14: Gráfica de la frecuencia respiratoria. Prueba 6	25
Figura 15: Gráfica de la frecuencia cardíaca. Prueba 7	27
Figura 16: Gráfica de la frecuencia respiratoria. Prueba 7	27
Figura 17: Gráfica de la frecuencia cardíaca. Prueba 8	29
Figura 18: Gráfica de la frecuencia respiratoria. Prueba 8	29
Figura 19: Gráfica de la frecuencia cardíaca. Prueba 9	31
Figura 20: Gráfica de la frecuencia respiratoria. Prueba 9	31
Figura 21: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 10.....	34
Figura 22: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 10.....	34
Figura 23: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 10.....	35
Figura 24: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 11.....	37
Figura 25: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 11.....	37
Figura 26: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 11	38
Figura 27: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 12.....	40
Figura 28: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 12	40
Figura 29: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 12	41
Figura 30: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 13.....	43
Figura 31: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 13	43
Figura 32: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 13	44
Figura 33: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 14.....	46
Figura 34: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 14	46
Figura 35: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 14	47
Figura 36: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 15.....	49
Figura 37: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 15	49
Figura 38: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 15	50
Figura 39: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 16.....	52
Figura 40: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 16	52
Figura 41: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 16	53

MEJORA DE UN SISTEMA BASADO EN DISPOSITIVOS WEARABLES PARA LA MOTORIZACIÓN AUTOMÁTICA
DE TEST DE MARCHA EN PACIENTES CARDIOLÓGICOS

SIMÓN PORTELA QUEIMAÑO

Figura 42: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 17.....	55
Figura 43: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 17.....	55
Figura 44: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 17.....	56
Figura 45: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 18.....	58
Figura 46: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 18.....	58
Figura 47: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 18.....	59
Figura 48: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 19.....	61
Figura 49: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 19.....	61
Figura 50: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 19.....	62
Figura 51: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 20.....	64
Figura 52: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 20.....	64
Figura 53: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 20.....	65
Figura 54: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 21.....	67
Figura 55: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 21.....	67
Figura 56: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 21.....	68
Figura 57: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 22.....	70
Figura 58: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 22.....	70
Figura 59: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 22.....	71
Figura 60: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 23.....	73
Figura 61: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 23.....	73
Figura 62: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 23.....	74
Figura 63: Dispositivos e impresoras del equipo informático.	76
Figura 64: Posición del interruptor y del pulsador.....	77
Figura 65: Posición de los LEDs del dispositivo.....	77
Figura 66: Posición del brazo del paciente.	78
Figura 67: Indicaciones de las rotaciones de muñeca.	79
Figura 68: Ventana principal.	80
Figura 69: Mensaje de finalización de la descarga.	80
Figura 70: Mensaje de error en la descarga.	81
Figura 71: Ejemplo de detección de las pruebas.....	81
Figura 72: Ejemplo de identificación de las pruebas.	81
Figura 73: Mensaje de error en la búsqueda.	83
Figura 74: Ejemplo de selección de prueba.	83
Figura 75: Selección de resultados a visualizar.	83
Figura 76: Ejemplo de visualización de los resultados.	84
Figura 77: Ejemplo de revisión de los resultados.	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen contenido del Anexo	9
Tabla 2: Ejemplo de la primera tabla.	10
Tabla 3: Ejemplo de la segunda tabla.	10
Tabla 4: Ejemplo de la última tabla.	10
Tabla 5: Información general de la prueba 1.	12
Tabla 6: Resultados obtenidos de la prueba 1.....	12
Tabla 7: Pasos en cada tramo de la prueba 1.	12
Tabla 8: Información general de la prueba 2.	14
Tabla 9: Resultados obtenidos de la prueba 2.....	14
Tabla 10: Pasos en cada tramo de la prueba 2	14
Tabla 11: Información general de la prueba 3.	17
Tabla 12: Resultados obtenidos de la prueba 3.....	17
Tabla 13: Pasos en cada tramo de la prueba 3.	17
Tabla 14: Información general de la prueba 4.	20
Tabla 15: Resultados obtenidos de la prueba 4.....	20
Tabla 16: Pasos en cada tramo de la prueba 4.	20
Tabla 17: Información general de la prueba 10.	33
Tabla 18: Resultados obtenidos de la prueba 10.....	33
Tabla 19: Pasos en cada tramo de la prueba 10.	33
Tabla 20: Información general de la prueba 11.	36
Tabla 21: Resultados obtenidos de la prueba 11.....	36
Tabla 22: Pasos en cada tramo de la prueba 11.	36
Tabla 23: Información general de la prueba 12.	39
Tabla 24: Resultados obtenidos de la prueba 12.....	39
Tabla 25: Pasos en cada tramo de la prueba 12.	39
Tabla 26: Información general de la prueba 13.	42
Tabla 27: Resultados obtenidos de la prueba 13.....	42
Tabla 28: Pasos en cada tramo de la prueba 13.	42
Tabla 29: Información general de la prueba 14.	45
Tabla 30: Resultados obtenidos de la prueba 14.....	45
Tabla 31: Pasos en cada tramo de la prueba 14.	45
Tabla 32: Información general de la prueba 15.	48
Tabla 33: Resultados obtenidos de la prueba 15.....	48
Tabla 34: Pasos en cada tramo de la prueba 15.	48
Tabla 35: Información general de la prueba 16.	51
Tabla 36: Resultados obtenidos de la prueba 16.....	51
Tabla 37: Pasos en cada tramo de la prueba 16.	51
Tabla 38: Información general de la prueba 17.	54
Tabla 39: Resultados obtenidos de la prueba 17.....	54
Tabla 40: Pasos en cada tramo de la prueba 17.	54
Tabla 41: Información general de la prueba 18.	57

MEJORA DE UN SISTEMA BASADO EN DISPOSITIVOS WEARABLES PARA LA MOTORIZACIÓN AUTOMÁTICA

DE TEST DE MARCHA EN PACIENTES CARDIOLÓGICOS

SIMÓN PORTELA QUEIMAÑO

Tabla 42: Resultados obtenidos de la prueba 18.....	57
Tabla 43: Pasos en cada tramo de la prueba 18.....	57
Tabla 44: Información general de la prueba 19.....	60
Tabla 45: Resultados obtenidos de la prueba 19.....	60
Tabla 46: Pasos en cada tramo de la prueba 19.....	60
Tabla 47: Información general de la prueba 20.....	63
Tabla 48: Resultados obtenidos de la prueba 20.....	63
Tabla 49: Pasos en cada tramo de la prueba 20.....	63
Tabla 50: Información general de la prueba 21.....	66
Tabla 51: Resultados obtenidos de la prueba 21.....	66
Tabla 52: Pasos en cada tramo de la prueba 21.....	66
Tabla 53: Información general de la prueba 22.....	69
Tabla 54: Resultados obtenidos de la prueba 22.....	69
Tabla 55: Pasos en cada tramo de la prueba 22.....	69
Tabla 56: Información general de la prueba 23.....	72
Tabla 57: Resultados obtenidos de la prueba 23.....	72
Tabla 58: Pasos en cada tramo de la prueba 23.....	72

1 ANEXO 1: PRUEBAS REALIZADAS

1.1 Introducción

1.1.1 Contenido del anexo

En este Anexo se presentan todas las pruebas realizadas para la comprobación y validación de la aplicación desarrollada y presentada en este trabajo.

En el presente documento se incluyen pruebas de sujetos reales además de pruebas realizadas con el objetivo específico de comprobar una característica concreta de la aplicación como puede ser la robustez del algoritmo de detección de cambios de sentido ante situaciones donde el dispositivo wearable está colocado de una forma incorrecta, o si el paciente realiza paradas durante la misma. Estas pruebas se corresponden con las 4 primeras.

Por otro lado, también se incluyen pruebas realizadas en el Hospital Álvaro Cunqueiro, pero con el protocolo anterior. Por lo tanto, no se pudo utilizar esos datos para el estudio del movimiento del paciente, pero si para analizar las frecuencias cardíaca y respiratoria, que son los resultados incluidos en este anexo para esas pruebas. Se corresponde con las pruebas 1.6 a la 1.10, ambas incluidas.

Por último, también se hacen anotaciones sobre los datos recogidos en cada prueba, si fuera necesario, para explicar cualquier inconveniente o peculiaridad de la prueba en particular; de forma que pueda aportar información sobre los resultados obtenidos para dicha prueba.

Tabla 1: Resumen contenido del Anexo.

Contenido	Pruebas	Problemas/particularidades
Pruebas para validar aspectos concretos de la memoria.	1.2 - 1.5	Pruebas realizadas para validar la robustez del algoritmo de detección de los cambios de sentido.
Pruebas en sujetos del H. Álvaro Cunqueiro con protocolo anterior.	1.6 - 1.10	Pruebas realizadas en el H. Á. Cunqueiro el curso anterior, con un protocolo distinto al propuesto en este trabajo.
Pruebas en sujetos reales	1.121.11 - 1.22	Pruebas realizadas a sujetos reales siguiendo el protocolo establecido en este trabajo. Algunas pruebas tienen particularidades concretas explicadas en el apartado Notas.

1.1.2 Formato de la información mostrada

Para cada prueba se muestran un total de tres tablas, siempre y cuando se cuente con toda la información necesaria.

En la primera tabla se recoge la información necesaria para la identificación de cada prueba, que se explica a continuación:

- “*idPaciente*”: Es el número de identificación del sujeto que realiza la prueba
- “*Longitud tramo*”: Longitud fija del tramo donde se realiza la prueba expresada en metros
- “*Duración prueba*”: Tiempo de duración de la prueba en minutos. Por lo general serán 6 minutos.
- “*Lugar de desarrollo*”: Indica el lugar de desarrollo de la prueba. Por ejemplo, un pasillo o al aire libre.

- “*Threshold*”: Valor en grados del ángulo necesario para que el algoritmo de detección de los cambios de sentido detecte que se ha realizado un giro en la marcha del paciente.

La Tabla 2 es un ejemplo de la representación de la información anteriormente mencionada.

Tabla 2: Ejemplo de la primera tabla.

idPaciente	XXXX
Longitud tramo	30 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Pasillo interior
Threshold [º]	180

En la segunda tabla se recogen los resultados obtenidos tras la realización de la prueba, comparándolos con los datos reales en aquellos casos donde se han tomado nota de estos parámetros. La información contenida en dicha tabla es la siguiente:

- “*Distancia total*”: Indica la distancia total recorrida por el paciente, en metros.
- *Cambios de sentido/Tramos enteros*: Número de cambios de sentido, que coincide con el número de tramos enteros recorridos.
- “*Media de pasos*”: Indica la media de los pasos dados en los tramos enteros.
- “*Zancada media*”: Indica el valor de la zancada media a lo largo de la prueba, en metros
- “*Distancia último tramo*”: Indica el valor de la distancia recorrida en el último tramo, el cual es incompleto, en metros.

De la misma forma que con la tabla anterior, la Tabla 3 muestra un ejemplo de cómo se representan los datos recogidos en esta segunda tabla.

Tabla 3: Ejemplo de la segunda tabla.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	172,22	172,08
Cambios de sentido/Tramos enteros	5	5
Media de pasos	54	53
Zancada media [m]	0,56	0,57
Distancia último tramo [m]	22,22	22,08

Por último, en la tercera tabla se recogen los pasos dados por el paciente en cada tramo, incluyendo también el último, que por lo general serán menos pasos que en el resto; y se compara con los pasos detectados por el algoritmo de detección de pasos.

La Tabla 4, muestra un ejemplo de la representación de los datos de la última tabla.

Tabla 4: Ejemplo de la última tabla.

Tramo	Real	Calculados
1	54	53
2	55	54
3	56	55
4	51	50

Además de estas tablas, también se presentan tres gráficas, que se corresponden con las que visualizan por pantalla en la interfaz gráfica de la aplicación. Estas son:

- *Gráfica 1:* Comparativa entre la velocidad del paciente y la frecuencia cardíaca
- *Gráfica 2:* Comparativa entre la velocidad del paciente y la frecuencia respiratoria
- *Gráfica 3:* Comparativa entre la velocidad instantánea y la velocidad media en cada tramo

Todas las tablas y figuras incluidas en este Anexo son de elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de cada prueba.

1.2 Prueba 1

1.2.1 Tablas de resultados

Tabla 5: Información general de la prueba 1.

idPaciente	00001
Longitud tramo	8 metros
Duración prueba	3 minutos
Lugar de desarrollo	Pasillo interior
Threshold [°]	180

Tabla 6: Resultados obtenidos de la prueba 1.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	94,14	93,92
Cambios de sentido/Tramos enteros	9	9
Media de pasos	¿?	16,44
Zancada media [m]	¿?	0,49
Distancia último tramo [m]	8	7,78

Tabla 7: Pasos en cada tramo de la prueba 1.

Tramo	Real	Calculados
1	¿?	17
2	¿?	14
3	¿?	18
4	¿?	16
5	¿?	15
6	¿?	15
7	¿?	16
8	¿?	21
9	¿?	16

1.2.2 Notas

El objetivo de esta prueba es comprobar la respuesta del algoritmo de detección de los cambios de sentido, realizando giros de forma espontánea, en mitad de los tramos en línea recta. La respuesta es la que se muestra en la Figura 1.

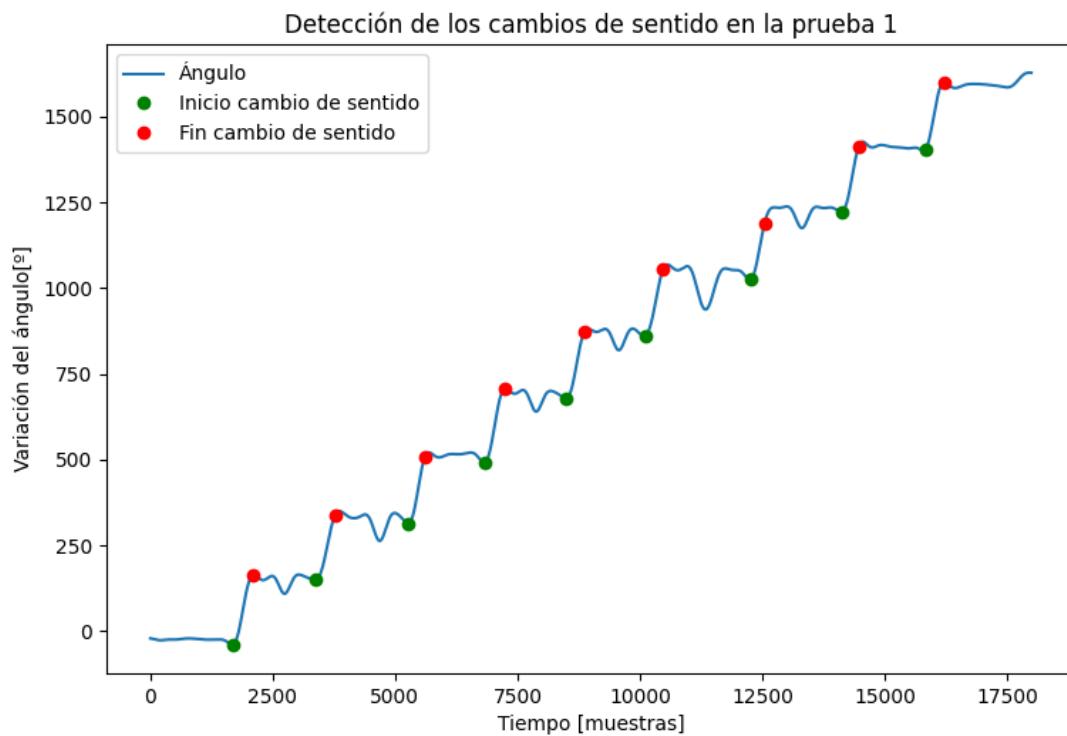


Figura 1: Respuesta del algoritmo de detección de los cambios de sentido.

1.3 Prueba 2

1.3.1 Tablas de resultados

Tabla 8: Información general de la prueba 2.

idPaciente	00002
Longitud tramo	20 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Césped al aire libre
Threshold [º]	170

Tabla 9: Resultados obtenidos de la prueba 2.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	355,13	355,80
Cambios de sentido/Tramos enteros	16	16
Media de pasos	36	33,52
Zancada media [m]	0,56	0,63
Distancia último tramo [m]	10	10,66

Tabla 10: Pasos en cada tramo de la prueba 2

Tramo	Real	Calculados
1	29	27
2	?	28
3	34	32
4	36	31
5	36	32
6	37	34
7	39	38
8	41	32
9	40	34
10	39	28
11	36	33
12	34	28
13	32	33
14	33	31
15	37	33
16	37	36
17	17	17

1.3.2 Gráficas de los resultados

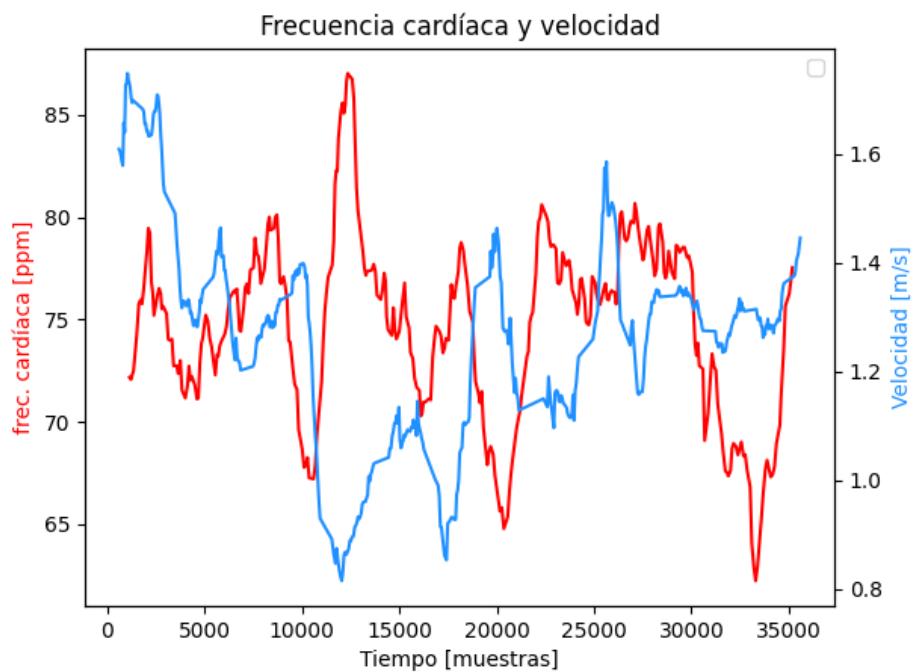


Figura 2: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 2.

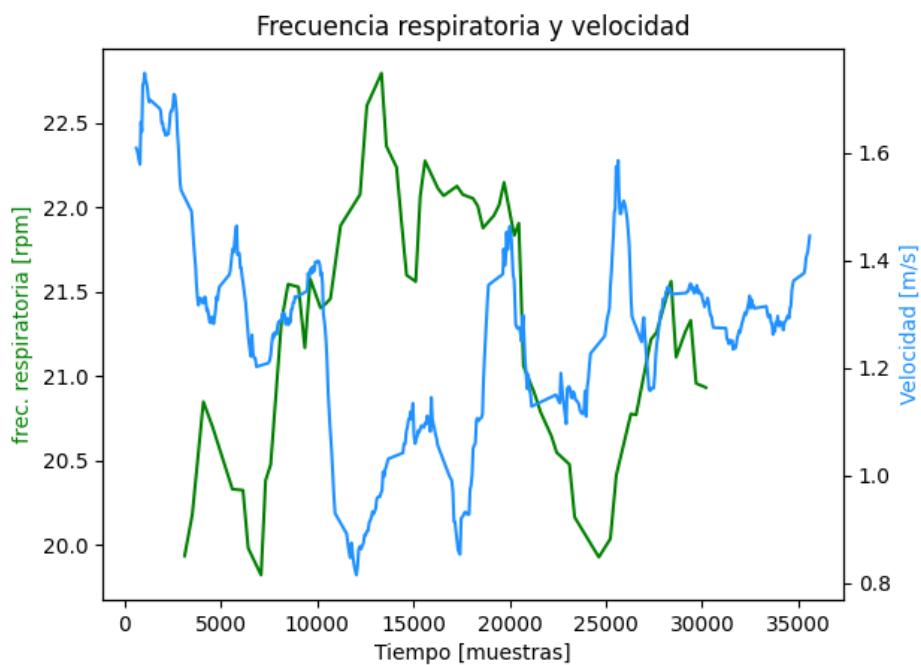


Figura 3: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 2.

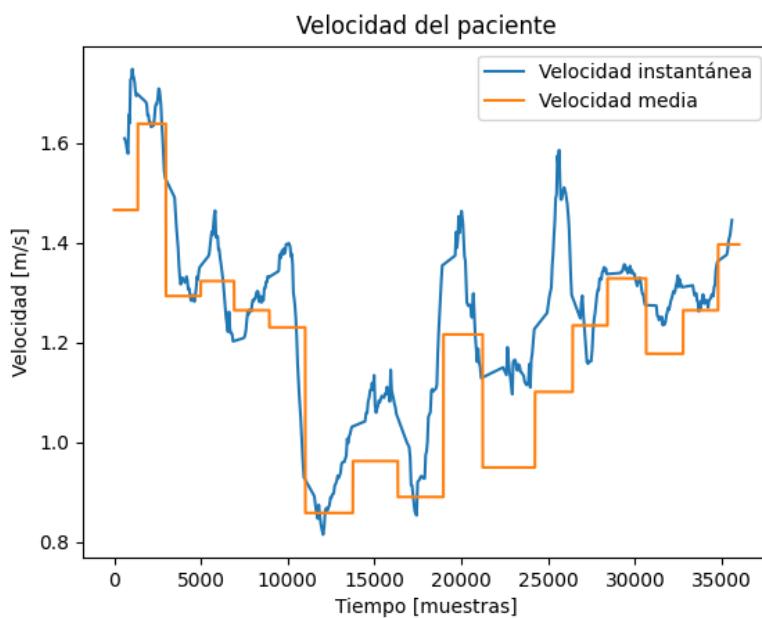


Figura 4: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 2.

1.3.3 Notas

Esta prueba se realiza con la finalidad de comprobar la robustez del algoritmo de detección de los cambios de sentido. Para ello, el sujeto escogido para la realización de esta prueba es una niña de 7 años, es decir, una persona totalmente impredecible. De hecho, entre los tramos 8 y 9, el paciente se detuvo a recoger algo del suelo durante aproximadamente 2 segundos.

1.4 Prueba 3

1.4.1 Tablas de resultados

Tabla 11: Información general de la prueba 3.

idPaciente	00003
Longitud tramo	20 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Césped al aire libre
Threshold [º]	155

Tabla 12: Resultados obtenidos de la prueba 3.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	250,28	251,60
Cambios de sentido/Tramos enteros	11	11
Media de pasos	37,45	34,91
Zancada media [m]	0,53	0,57
Distancia último tramo [m]	13	14,32

Tabla 13: Pasos en cada tramo de la prueba 3.

Tramo	Real	Calculados
1	35	33
2	38	35
3	39	38
4	38	37
5	35	32
6	39	41
7	35	33
8	39	36
9	38	30
10	38	37
11	38	32
12	26	25

1.4.2 Gráficas de los resultados

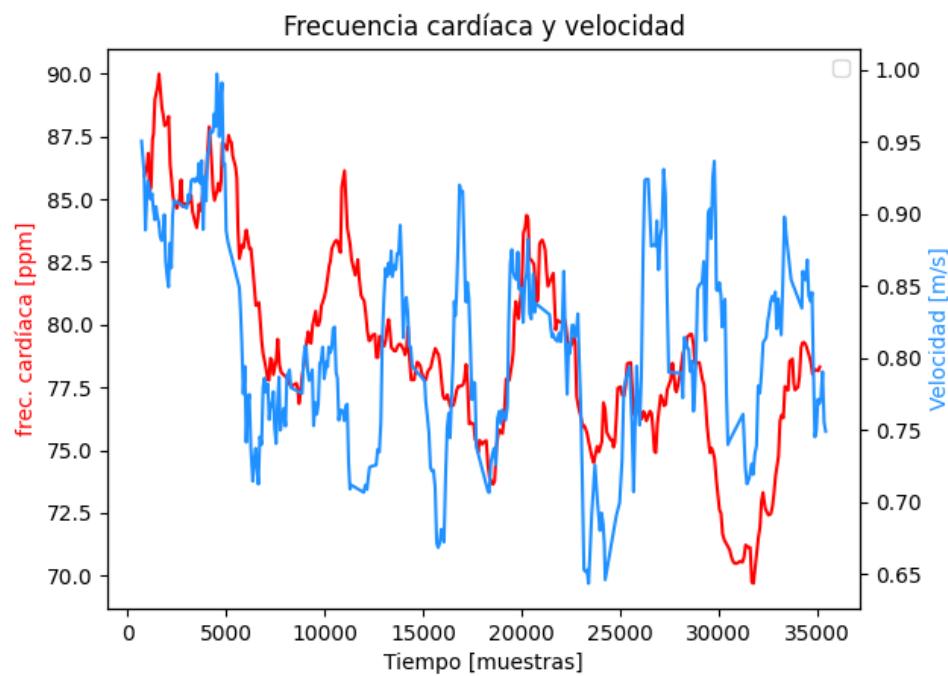


Figura 5: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 3.

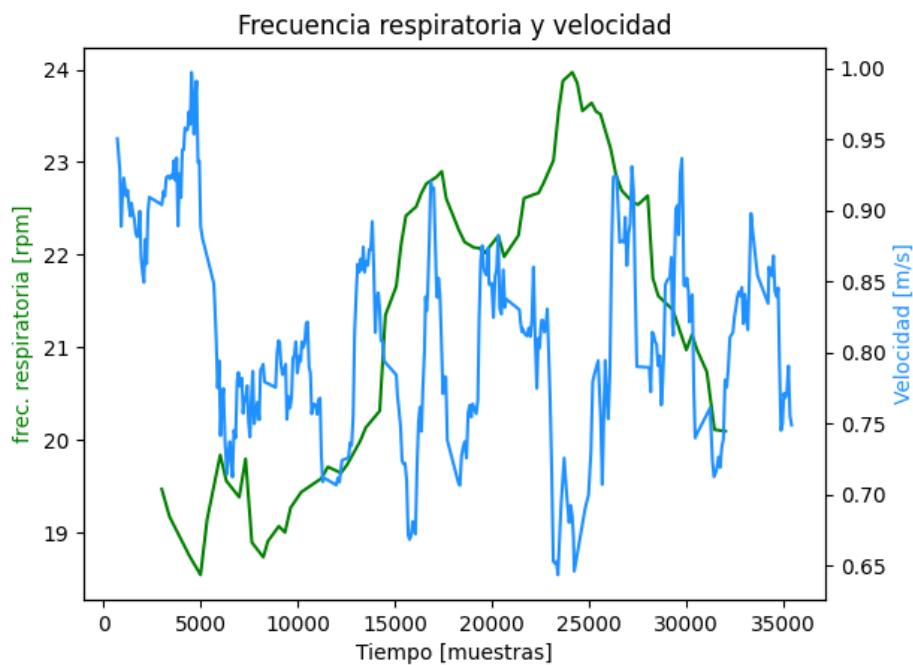


Figura 6: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 3.

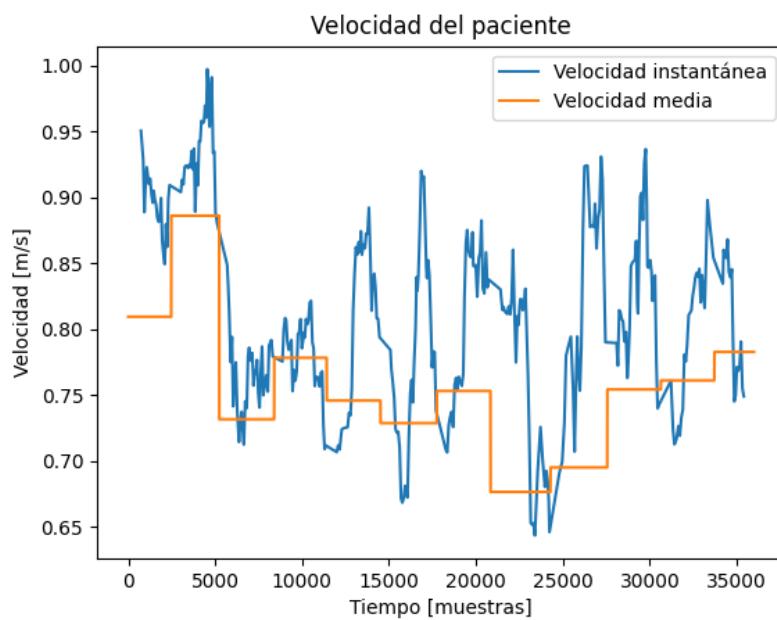


Figura 7: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 3.

1.4.3 Notas

Del mismo modo que la prueba mostrada en 1.3, el sujeto que realiza esta prueba es un niño, pero en este caso de 13 años. Además, dicho sujeto llevó, durante toda la prueba, el dispositivo wearable mal colocado; por eso el *threshold* tiene que ser menor que en otras pruebas (155°).

1.5 Prueba 4

1.5.1 Tablas de resultados

Tabla 14: Información general de la prueba 4.

idPaciente	00004
Longitud tramo	30 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Césped al aire libre
Threshold [º]	155

Tabla 15: Resultados obtenidos de la prueba 4.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	384,70	386,45
Cambios de sentido/Tramos enteros	17	17
Media de pasos	28,76	24,31
Zancada media [m]	0,70	0,82
Distancia último tramo [m]	18	19,74

Tabla 16: Pasos en cada tramo de la prueba 4.

Tramo	Real	Calculados
1	27	26
2	31	27
3	28	27
4	28	27
5	27	24
6	30	13
7	30	24
8	29	21
9	26	21
10	31	24
11	26	27
12	28	23
13	27	22
14	33	21
15	30	24
16	30	27
17	28	24
18	25	24

1.5.2 Gráficas de los resultados

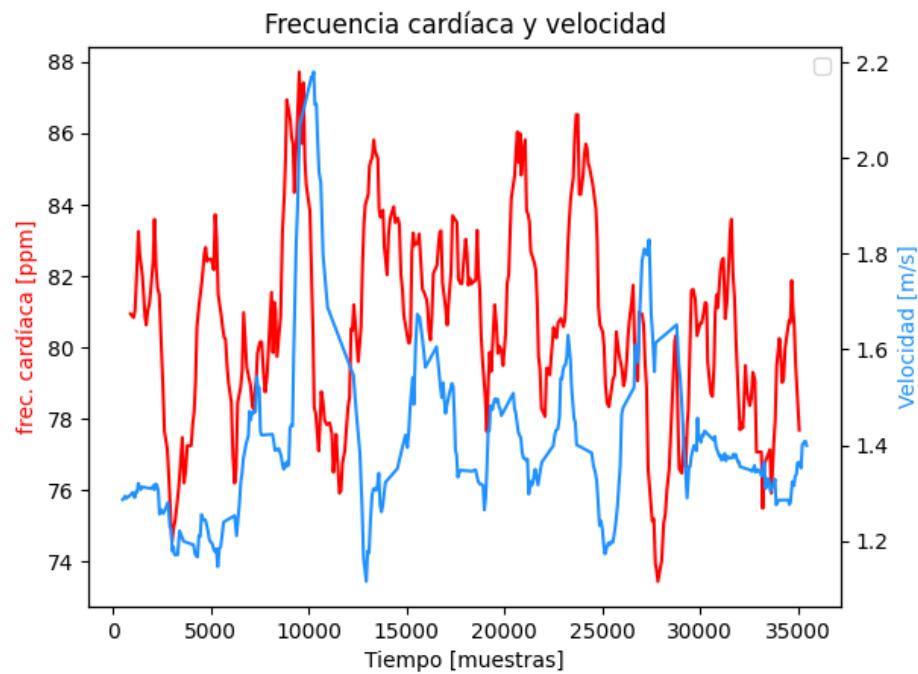


Figura 8: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 4.

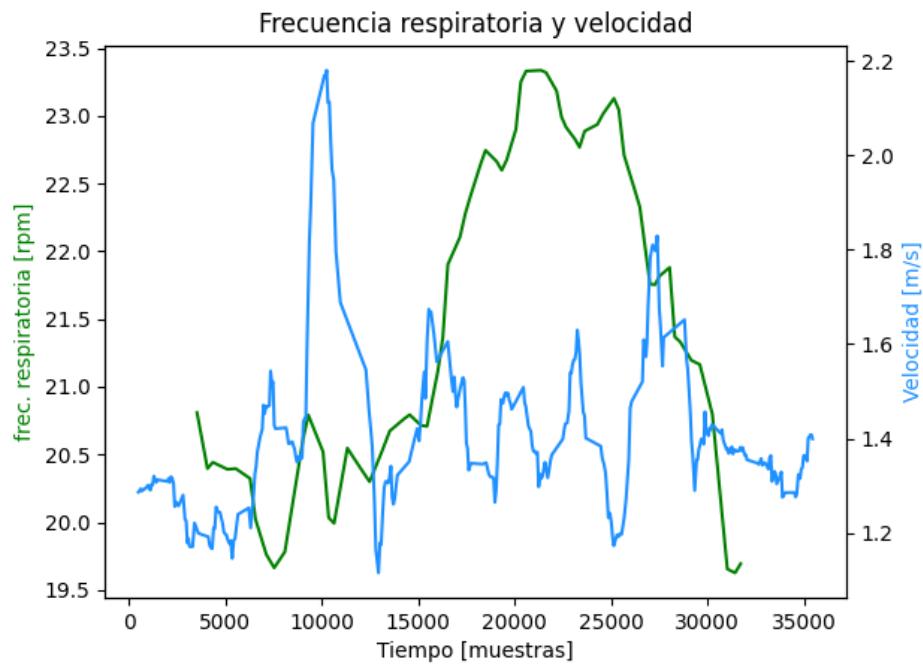


Figura 9: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 4.

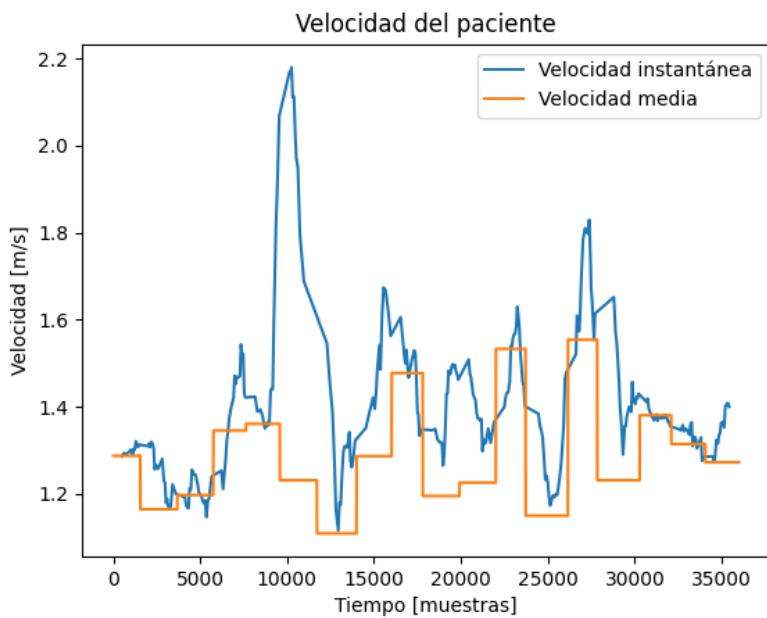


Figura 10: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 4.

1.5.3 Notas

Del mismo modo que las dos pruebas anteriores, el sujeto que realizó esta prueba era una niña de 12 años. Sin embargo, esta prueba presenta una mayor desviación en el cálculo de los pasos de cada tramo con los que se contaron como reales; aunque el error en la distancia total recorrida por el paciente es del 0,45%.

Los resultados de esta prueba se consideran no representativos debido a que el perfil del sujeto que realizó dicha prueba no se corresponde con el perfil de los pacientes que realizan el 6MWT; sin embargo, tanto esta como las dos anteriores pruebas, aportan información valiosa acerca de la robustez del algoritmo que determina los cambios de sentido, tal y como se explica en el apartado de resultados del documento de la memoria.

1.6 Prueba 5

1.6.1 Gráficas de los resultados

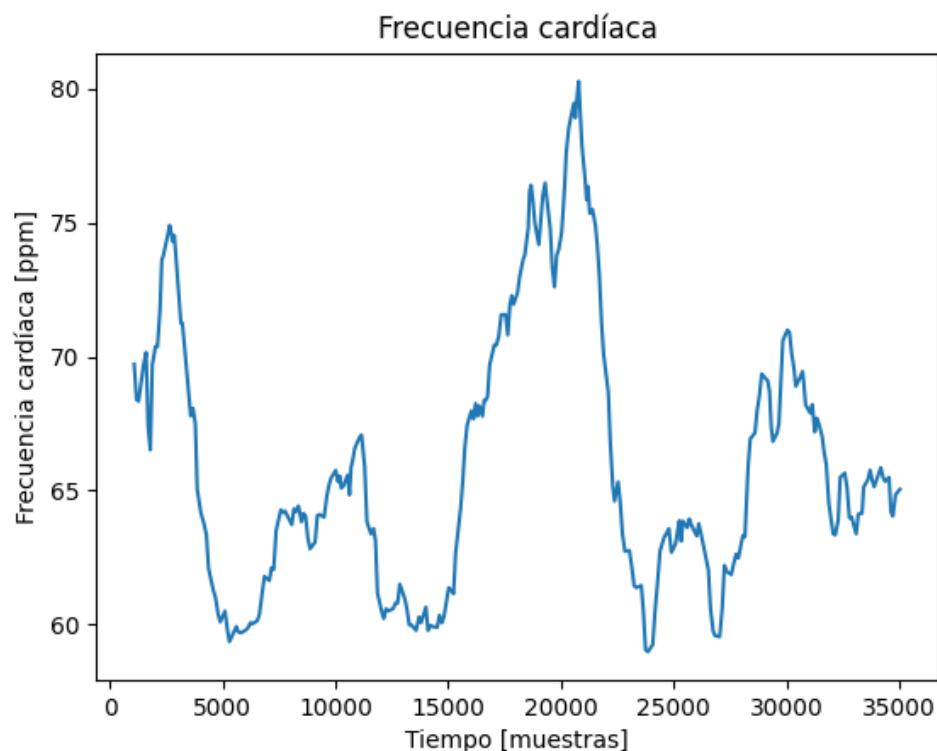


Figura 11: Gráfica de la frecuencia cardíaca. Prueba 5.

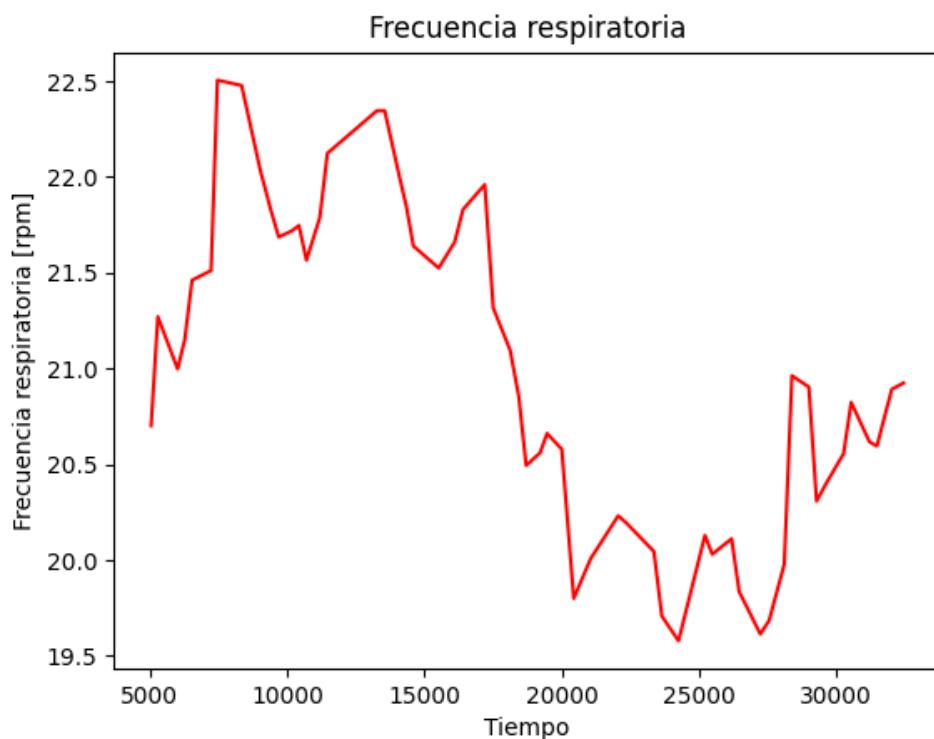


Figura 12: Gráfica de la frecuencia respiratoria. Prueba 5.

1.6.2 Notas

Esta prueba es la primera de las que se realizaron en el Hospital con un protocolo distinto al presentado en este trabajo. Por eso solo se muestran en este apartado, las gráficas correspondientes a las frecuencias cardíaca y respiratoria.

1.7 Prueba 6

1.7.1 Gráficas de los resultados

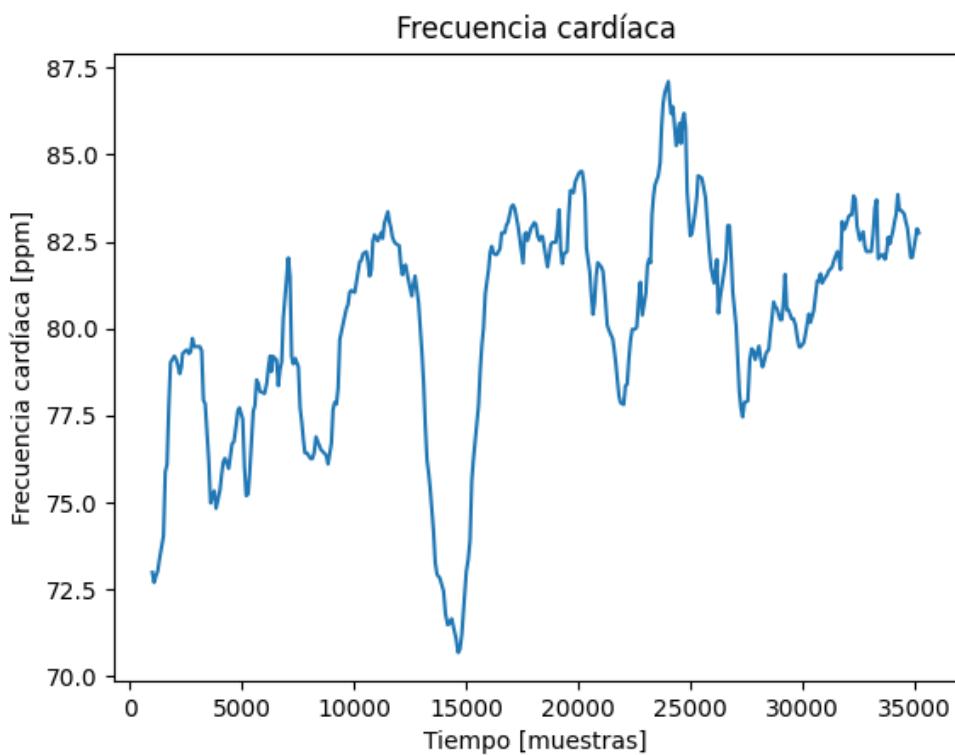


Figura 13: Gráfica de la frecuencia cardíaca. Prueba 6.

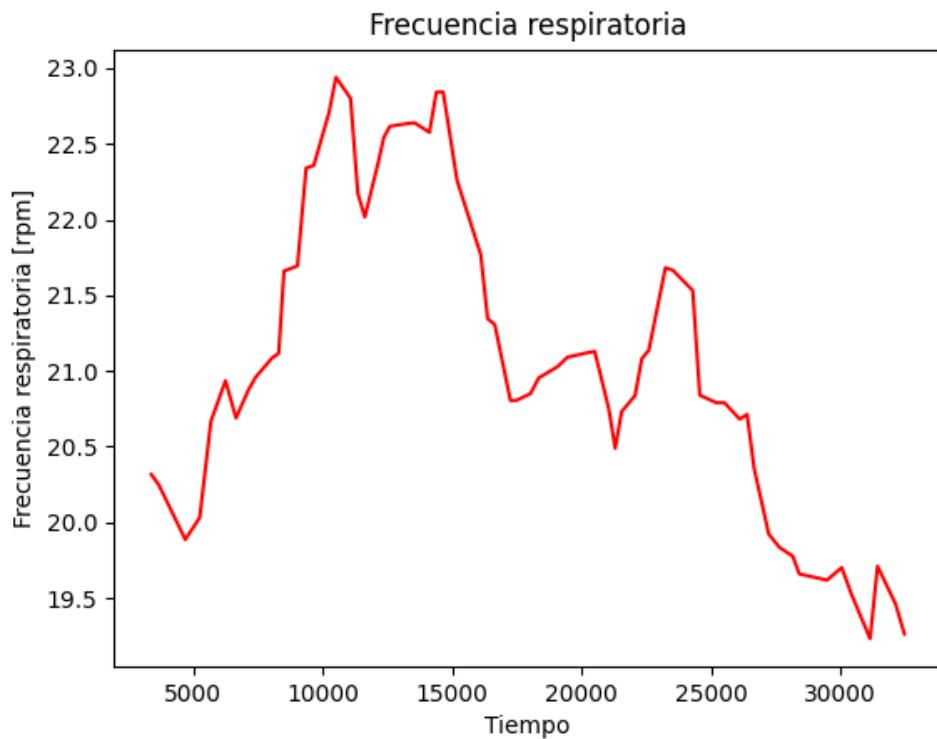


Figura 14: Gráfica de la frecuencia respiratoria. Prueba 6.

1.7.2 Notas

Esta prueba es la segunda de las que se realizaron en el Hospital con un protocolo distinto al presentado en este trabajo. Por eso solo se muestran en este apartado, las gráficas correspondientes a las frecuencias cardíaca y respiratoria.

1.8 Prueba 7

1.8.1 Gráficas de los resultados

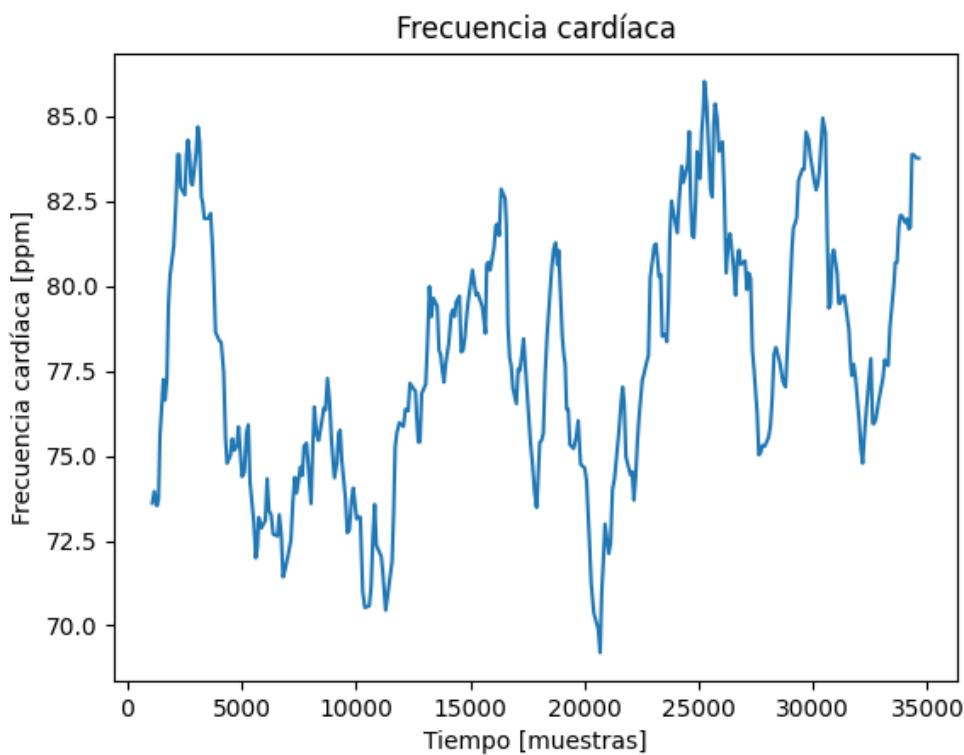


Figura 15: Gráfica de la frecuencia cardíaca. Prueba 7.

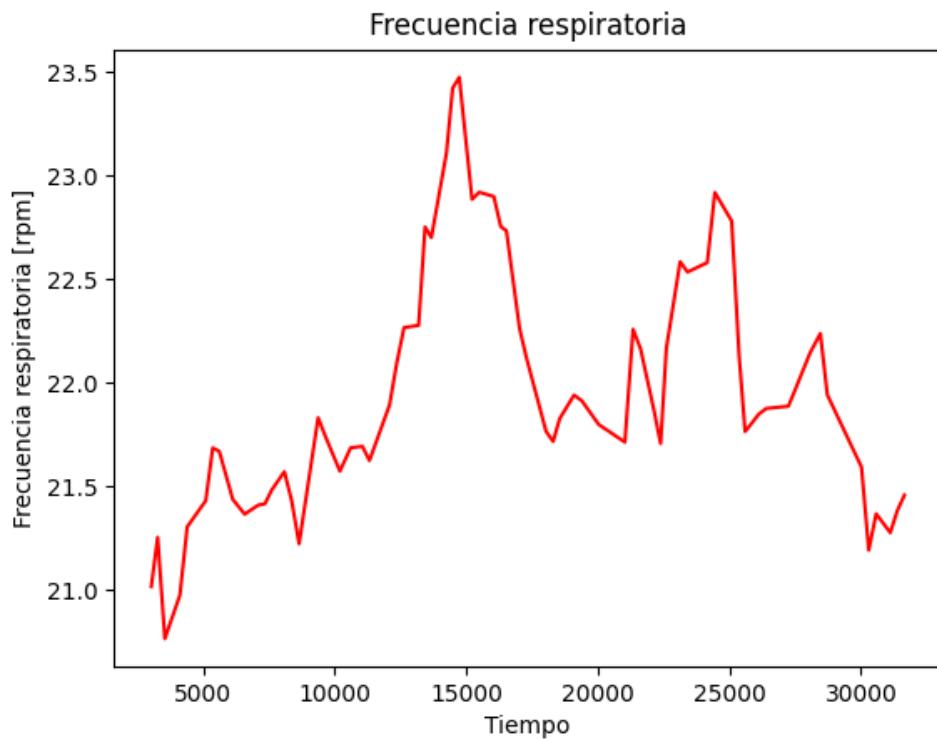


Figura 16: Gráfica de la frecuencia respiratoria. Prueba 7.

1.8.2 Notas

Esta prueba es la tercera de las que se realizaron en el Hospital con un protocolo distinto al presentado en este trabajo. Por eso solo se muestran en este apartado, las gráficas correspondientes a las frecuencias cardíaca y respiratoria.

1.9 Prueba 8

1.9.1 Gráficas de los resultados

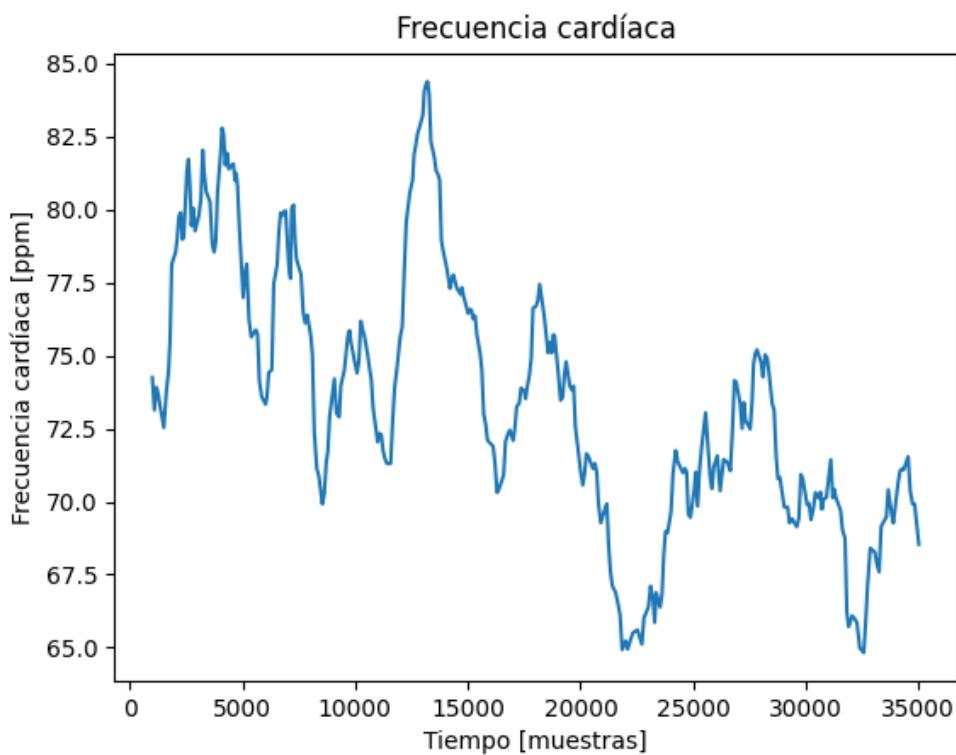


Figura 17: Gráfica de la frecuencia cardíaca. Prueba 8.

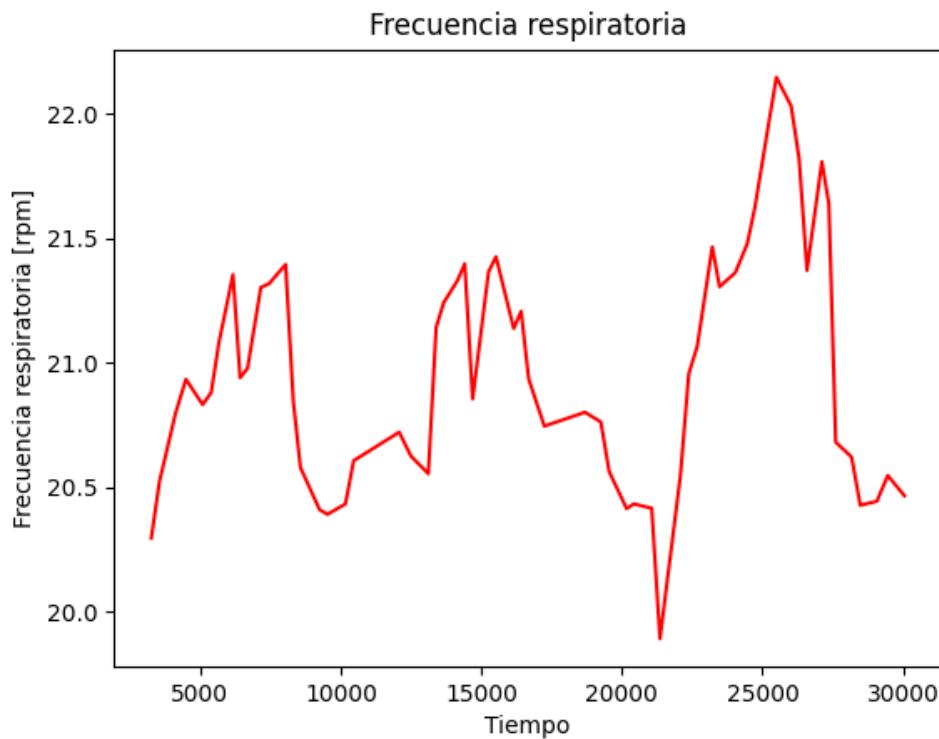


Figura 18: Gráfica de la frecuencia respiratoria. Prueba 8.

1.9.2 Notas

Esta prueba es la cuarta de las que se realizaron en el Hospital con un protocolo distinto al presentado en este trabajo. Por eso solo se muestran en este apartado, las gráficas correspondientes a las frecuencias cardíaca y respiratoria.

1.10 Prueba 9

1.10.1 Gráficas de los resultados

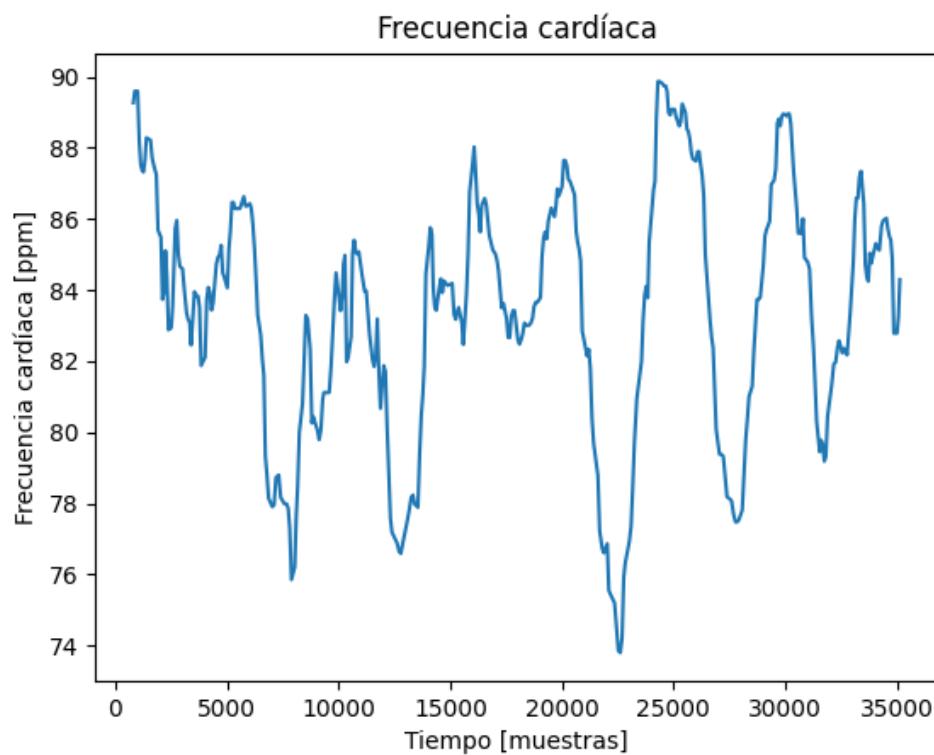


Figura 19: Gráfica de la frecuencia cardíaca. Prueba 9.

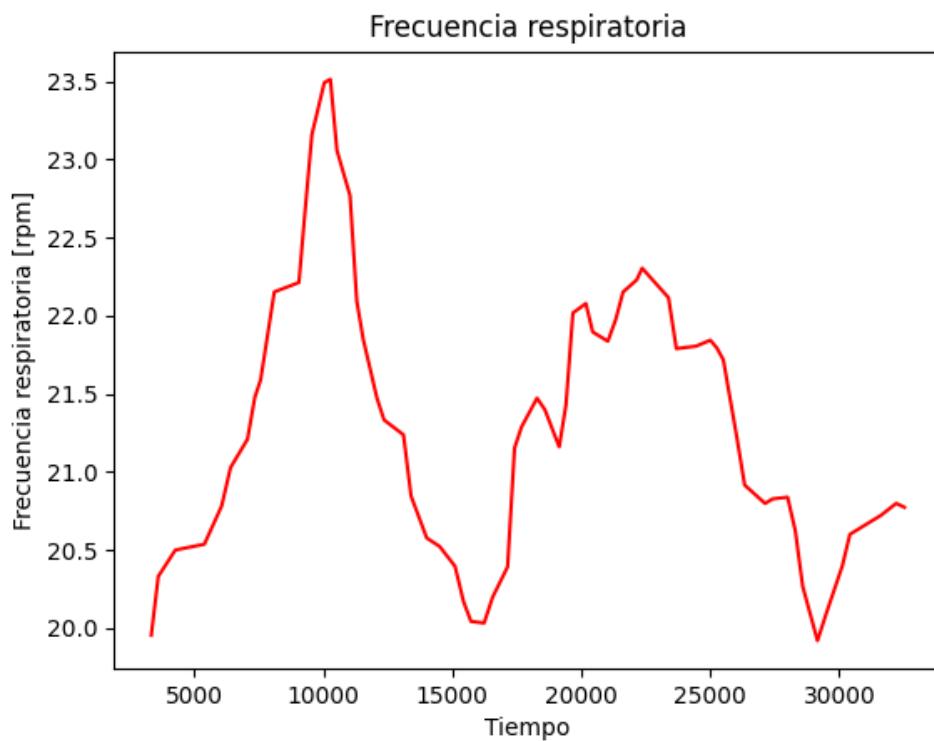


Figura 20: Gráfica de la frecuencia respiratoria. Prueba 9.

1.10.2 Notas

Esta prueba es la quinta de las que se realizaron en el Hospital con un protocolo distinto al presentado en este trabajo. Por eso solo se muestran en este apartado, las gráficas correspondientes a las frecuencias cardíaca y respiratoria.

1.11 Prueba 10

1.11.1 Tablas de resultados

Tabla 17: Información general de la prueba 10.

idPaciente	00010
Longitud tramo	10 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Pasillo
Threshold [°]	170

Tabla 18: Resultados obtenidos de la prueba 10.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	122,71	123,21
Cambios de sentido/Tramos enteros	10	10
Media de pasos	¿?	20
Zancada media [m]	¿?	0,5
Distancia último tramo [m]	7	7,5

Tabla 19: Pasos en cada tramo de la prueba 10.

Tramo	Real	Calculados
1	¿?	50
2	¿?	39
3	¿?	20
4	¿?	20
5	¿?	37
6	¿?	20
7	¿?	17
8	¿?	17
9	¿?	18
10	¿?	18
11	¿?	15

1.11.2 Gráficas de los resultados

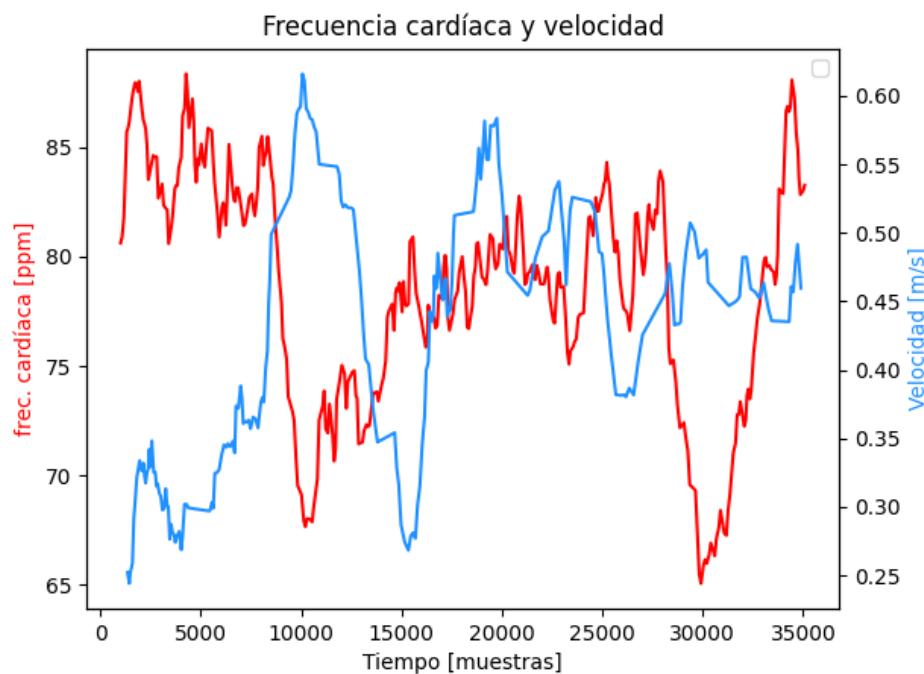


Figura 21: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 10.

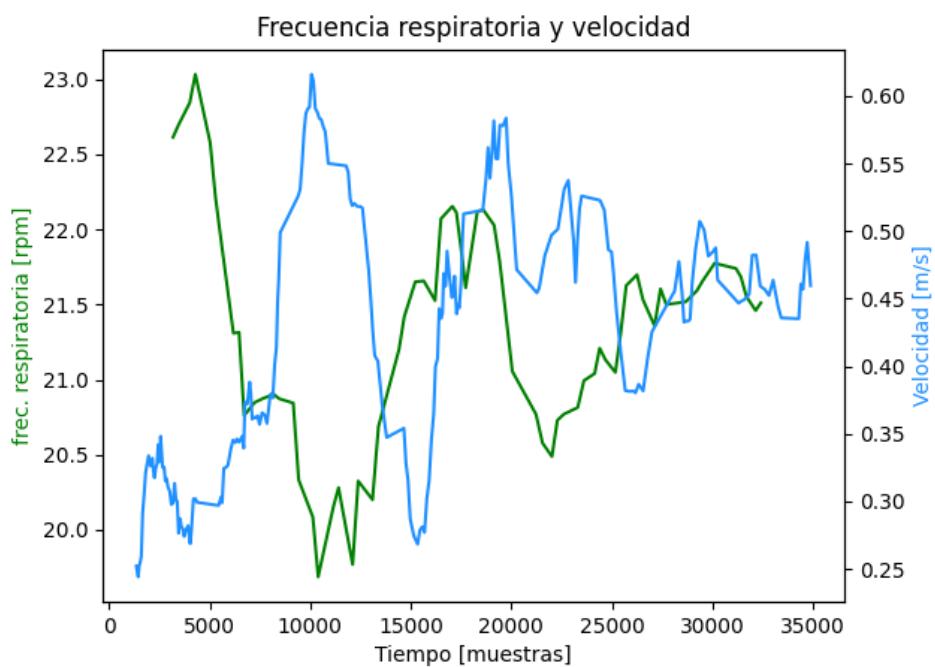


Figura 22: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 10.

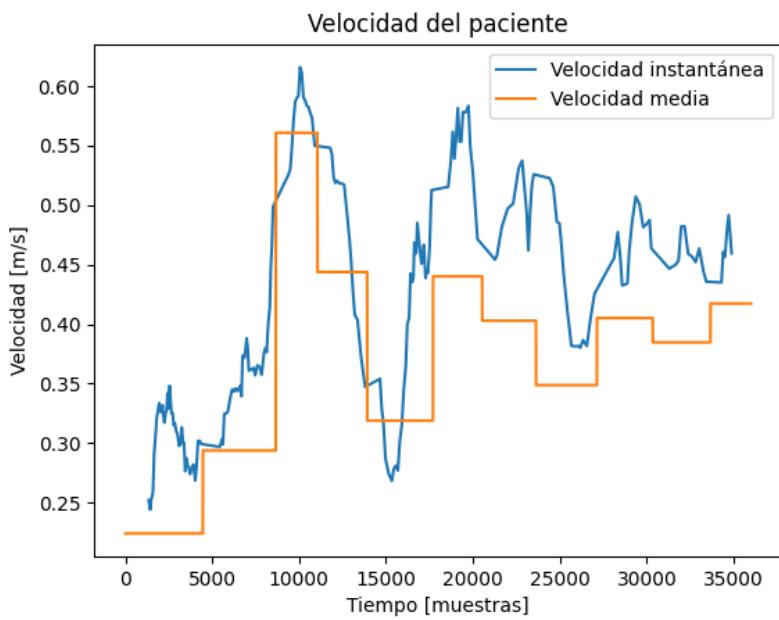


Figura 23: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 10.

1.11.3 Notas

Durante toda la prueba, pero especialmente en los dos primeros tramos, la señal filtrada para la detección de los pasos contiene mucho ruido y por ello la gráfica de la Figura 23, la señal de la velocidad instantánea no coincide con la de la velocidad media; a pesar de que si evolucionan de forma similar.

Por otro lado, en esta prueba no se llevó la cuenta de los pasos que fue dando el sujeto durante la prueba y por ello no se puede comparar con los resultados obtenidos.

Por último, cabe destacar que el paciente presentó un cambio de ritmo ya que los dos primeros tramos los realizó con un menor ritmo que los tramos siguientes. Esto se puede apreciar en el número de pasos detectados, además de en la gráfica de la velocidad en la Figura 23 donde claramente se detectan estos cambios en la velocidad del sujeto.

1.12 Prueba 11

1.12.1 Tablas de resultados

Tabla 20: Información general de la prueba 11.

idPaciente	00011
Longitud tramo	10 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Pasillo
Threshold [°]	170

Tabla 21: Resultados obtenidos de la prueba 11.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	155,82	156,11
Cambios de sentido/Tramos enteros	13	13
Media de pasos	24,50	26,39
Zancada media [m]	0,41	0,38
Distancia último tramo [m]	5,4	5,69

Tabla 22: Pasos en cada tramo de la prueba 11.

Tramo	Real	Calculados
1	?	28
2	?	29
3	26	26
4	24	24
5	24	27
6	24	28
7	?	28
8	?	27
9	?	25
10	?	27
11	?	24
12	?	27
13	?	23
14	?	15

1.12.2 Gráficas de los resultados

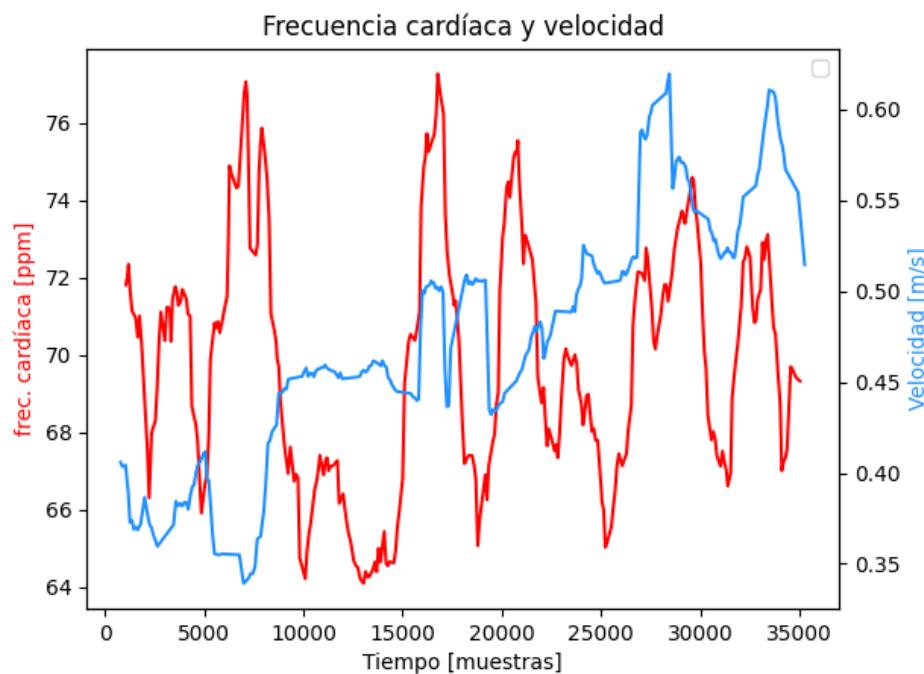


Figura 24: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 11.

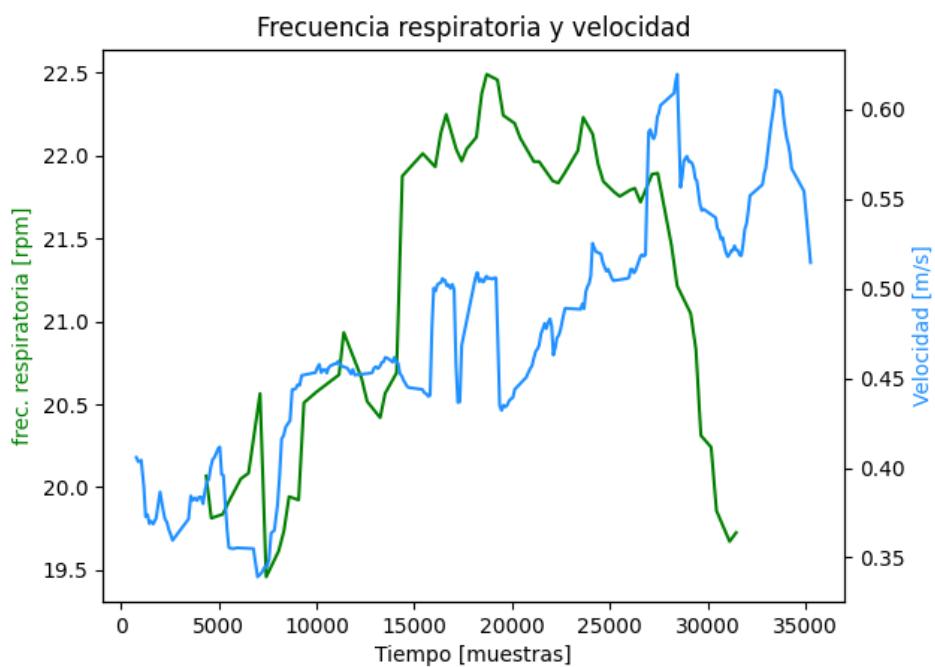


Figura 25: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 11.

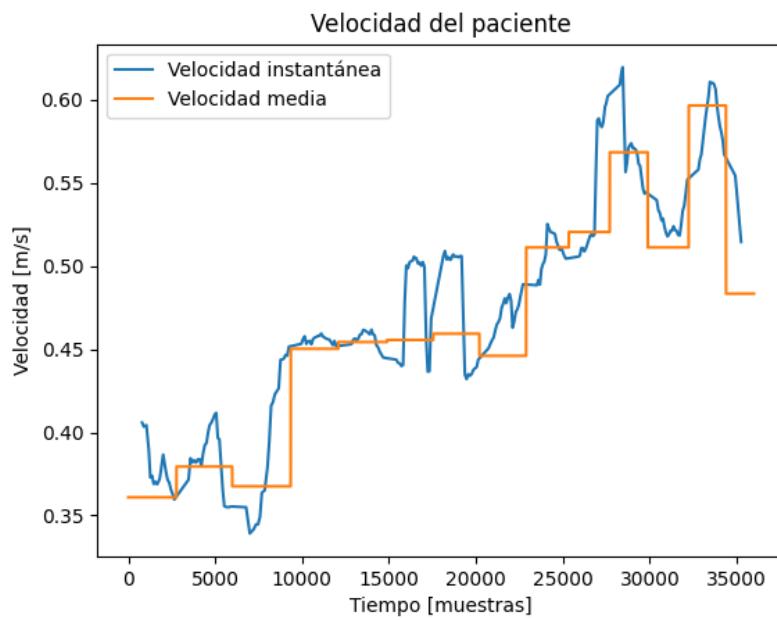


Figura 26: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 11.

1.12.3 Notas

El sujeto que realizó la prueba que se presenta en este apartado, sufre de la enfermedad de Párkinson, por lo que, durante toda la prueba, el dispositivo wearable estuvo sometido a vibraciones producidas por el movimiento de la mano del paciente.

Sin embargo, los resultados obtenidos presentan un error del 0,19% en el cálculo de la distancia total recorrida, además de la gráfica de la velocidad que se presenta en la Figura 26, donde la señal de la velocidad instantánea tiene un valor coherente comparándolo con la señal de la velocidad media.

1.13 Prueba 12

1.13.1 Tablas de resultados

Tabla 23: Información general de la prueba 12.

idPaciente	00012
Longitud tramo	8 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Pasillo
Threshold [º]	175

Tabla 24: Resultados obtenidos de la prueba 12.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	182,86	182,79
Cambios de sentido/Tramos enteros	19	19
Media de pasos	17,32	17
Zancada media [m]	0,46	0,47
Distancia último tramo [m]	1,01	0,94

Tabla 25: Pasos en cada tramo de la prueba 12.

Tramo	Real	Calculados
1	18	18
2	18	19
3	17	16
4	18	18
5	17	17
6	18	17
7	17	15
8	17	16
9	17	17
10	17	18
11	18	18
12	18	17
13	17	17
14	17	17
15	18	18
16	17	16
17	17	17
18	17	16
19	16	16
20	2	2

1.13.2 Gráficas de los resultados

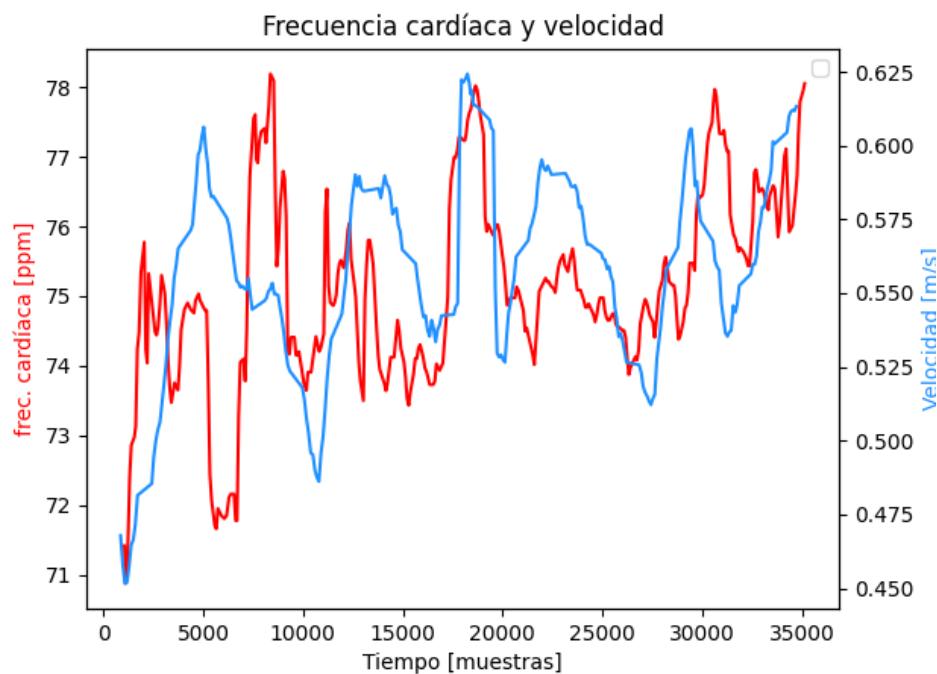


Figura 27: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 12.

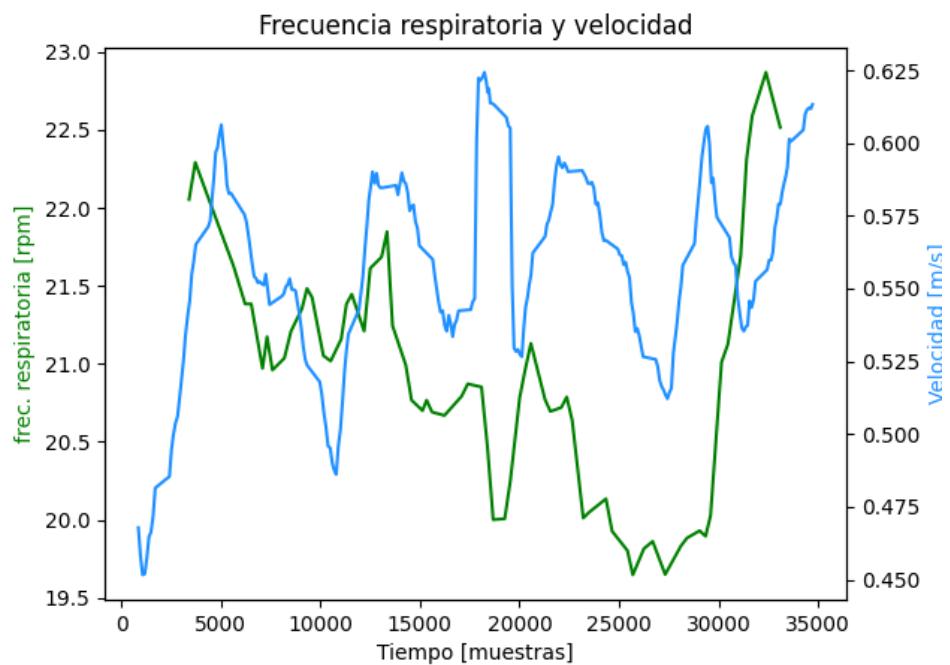


Figura 28: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 12.

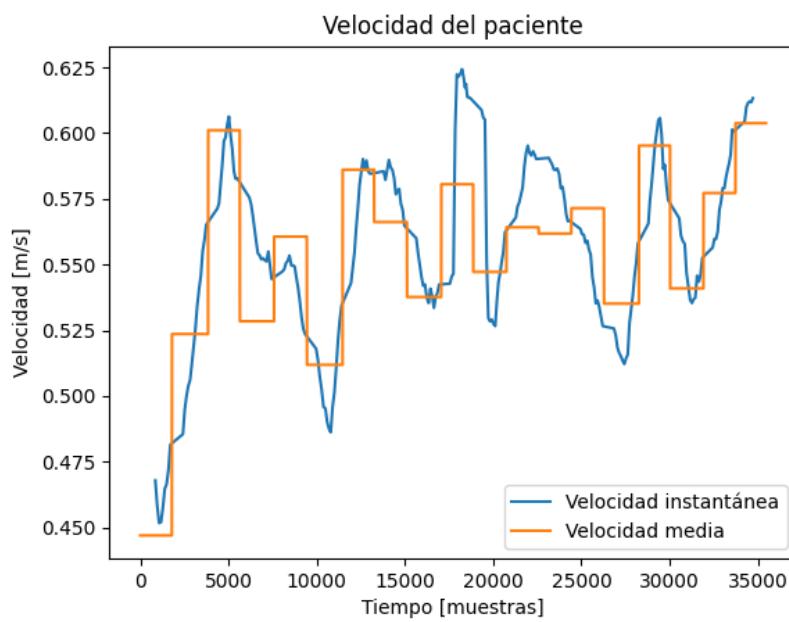


Figura 29: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 12.

1.13.3 Notas

Esta prueba no presenta ninguna anomalía ni hubo ningún inconveniente ni ningún agente externo a la prueba que afectase a los resultados obtenidos.

1.14 Prueba 13

1.14.1 Tablas de resultados

Tabla 26: Información general de la prueba 13.

idPaciente	00013
Longitud tramo	8 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Pasillo
Threshold [º]	175

Tabla 27: Resultados obtenidos de la prueba 13.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	196,92	197,15
Cambios de sentido/Tramos enteros	20	20
Media de pasos	17,25	16,75
Zancada media [m]	0,46	0,48
Distancia último tramo [m]	5,5	5,73

Tabla 28: Pasos en cada tramo de la prueba 13.

Tramo	Real	Calculados
1	17	16
2	18	17
3	17	17
4	17	16
5	17	16
6	18	17
7	17	17
8	17	16
9	17	16
10	17	17
11	17	17
12	18	16
13	17	18
14	17	18
15	17	16
16	17	17
17	17	16
18	17	16
19	18	18
20	18	18
21	12	12

1.14.2 Gráficas de los resultados

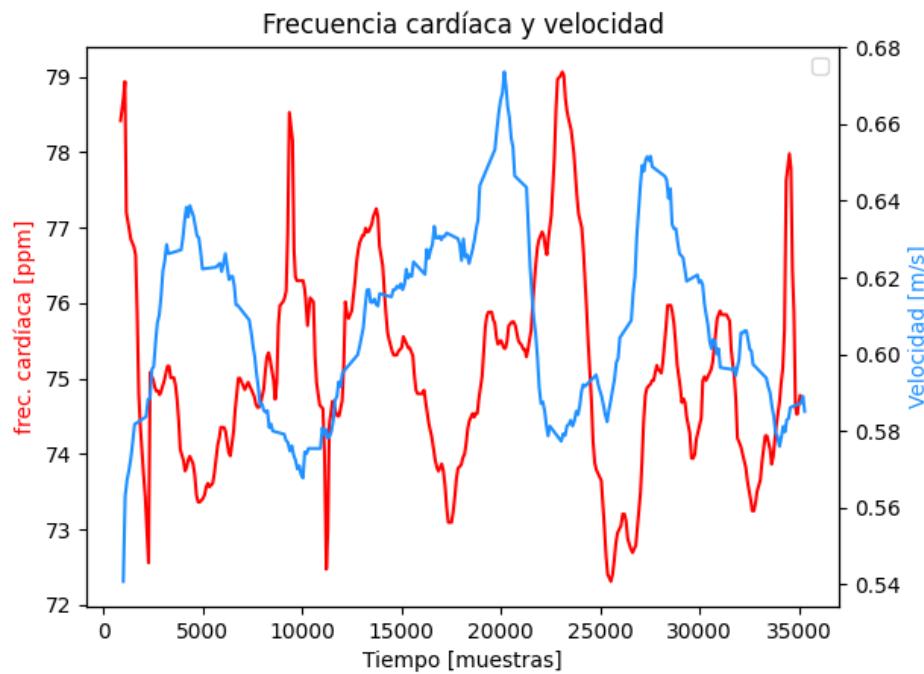


Figura 30: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 13.

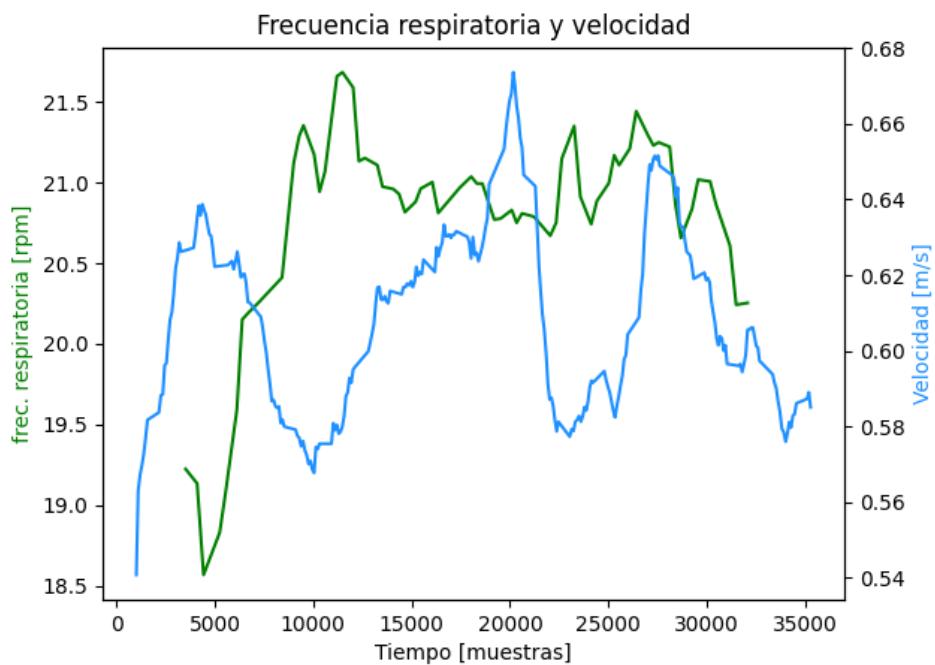


Figura 31: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 13.

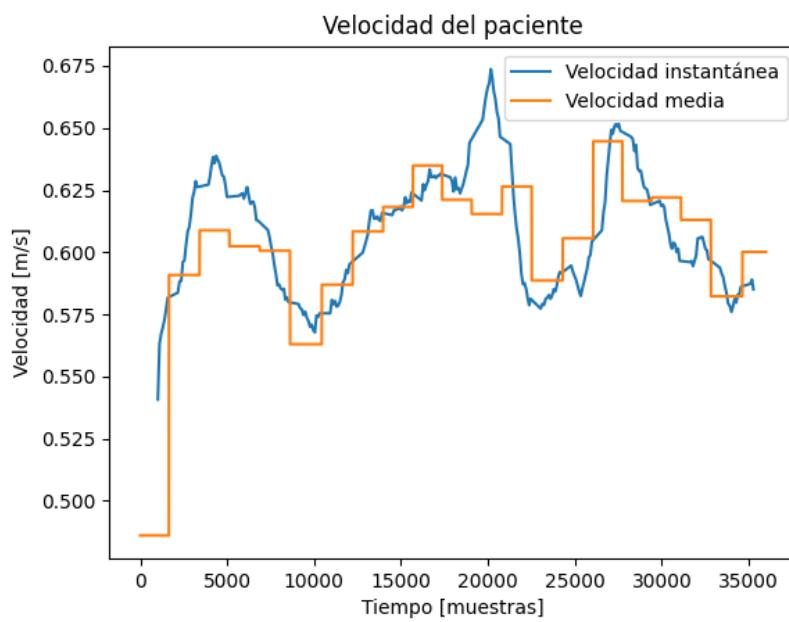


Figura 32: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 13.

1.14.3 Notas

Esta prueba no presenta ninguna anomalía ni hubo ningún inconveniente ni ningún agente externo a la prueba que afectase a los resultados obtenidos.

1.15 Prueba 14

1.15.1 Tablas de resultados

Tabla 29: Información general de la prueba 14.

idPaciente	00014
Longitud tramo	8 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Pasillo
Threshold [º]	175

Tabla 30: Resultados obtenidos de la prueba 14.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	164,70	164,67
Cambios de sentido/Tramos enteros	17	17
Media de pasos	19,65	20,38
Zancada media [m]	0,41	0,39
Distancia último tramo [m]	2	1,96

Tabla 31: Pasos en cada tramo de la prueba 14.

Tramo	Real	Calculados
1	21	7
2	22	22
3	21	22
4	21	23
5	21	23
6	21	21
7	20	22
8	20	20
9	19	19
10	20	19
11	19	19
12	18	19
13	18	19
14	19	20
15	18	20
16	18	18
17	18	20
18	5	5

1.15.2 Gráficas de los resultados

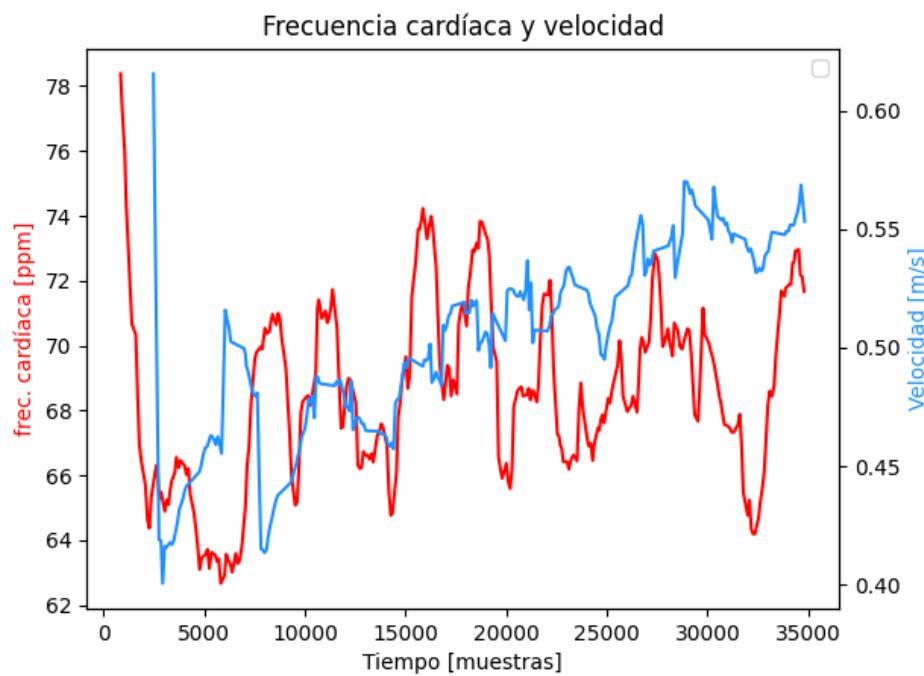


Figura 33: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 14.

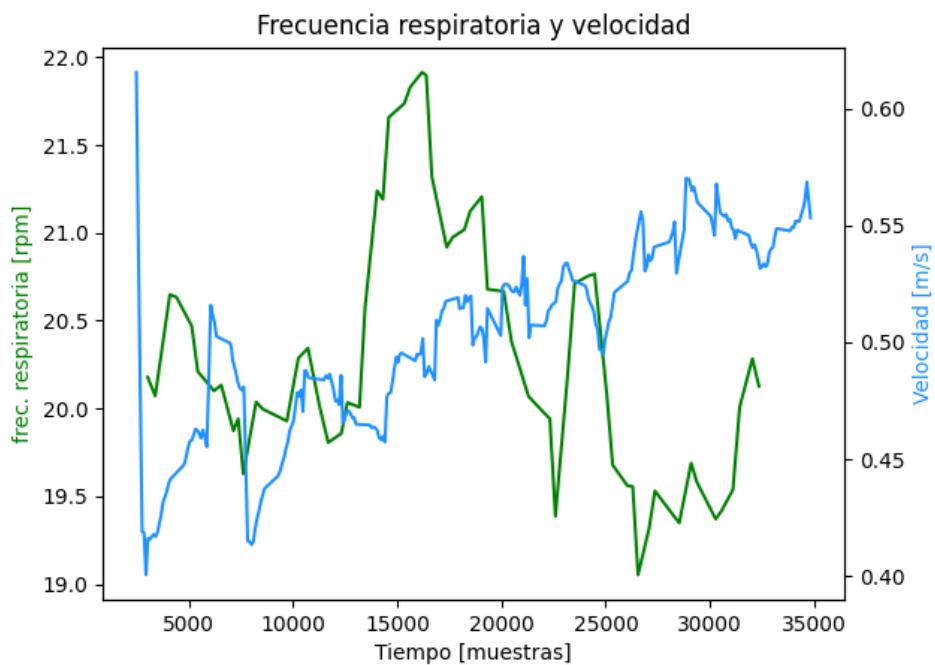


Figura 34: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 14.

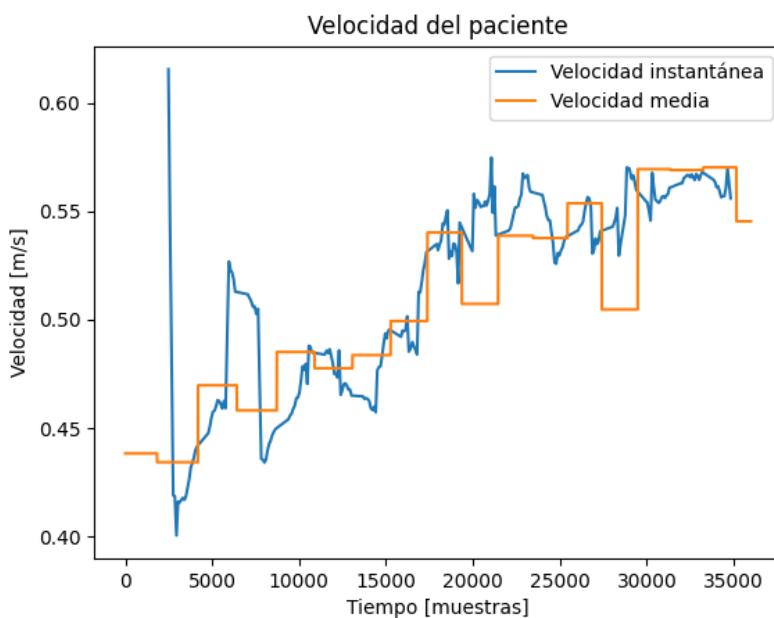


Figura 35: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 14.

1.15.3 Notas

Al inicio de la prueba, cuando ya había comenzado, el sujeto se recolocó el dispositivo wearable. Esto afecta al cálculo de los pasos del primer tramo y por tanto a la velocidad instantánea de dicho tramo, además de a la señal PPG ya que el sensor debe de estar colocado pegado a la muñeca del paciente para una correcta medida.

Sin embargo, para el cálculo de la distancia total recorrida por el paciente, no afecta esta desviación en el cálculo de los pasos, ya que el programa discrimina los tramos donde la desviación típica de los pasos frente a la media es superior a 7 pasos.

1.16 Prueba 15

1.16.1 Tablas de resultados

Tabla 32: Información general de la prueba 15.

idPaciente	00015
Longitud tramo	8 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Pasillo
Threshold [º]	165

Tabla 33: Resultados obtenidos de la prueba 15.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	177,78	177,88
Cambios de sentido/Tramos enteros	18	18
Media de pasos	18,39	18,56
Zancada media [m]	0,44	0,43
Distancia último tramo [m]	5,50	5,60

Tabla 34: Pasos en cada tramo de la prueba 15.

Tramo	Real	Calculados
1	19	18
2	19	19
3	19	19
4	18	19
5	18	20
6	18	18
7	19	19
8	18	22
9	19	21
10	19	17
11	18	17
12	18	2
13	18	19
14	18	16
15	17	17
16	19	10
17	18	19
18	19	17
19	13	13

1.16.2 Gráficas de los resultados

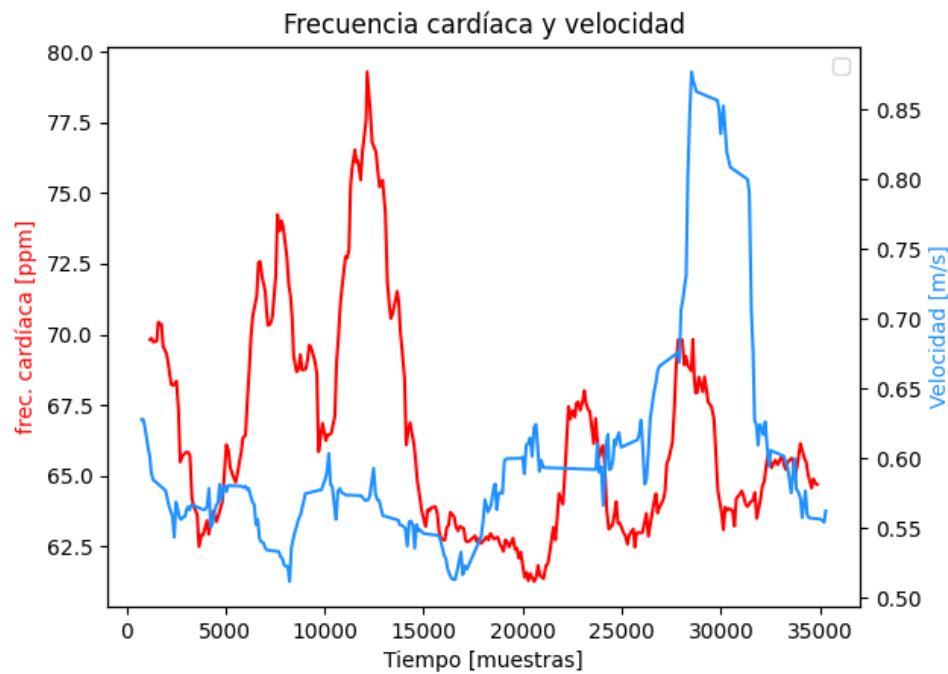


Figura 36: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 15.

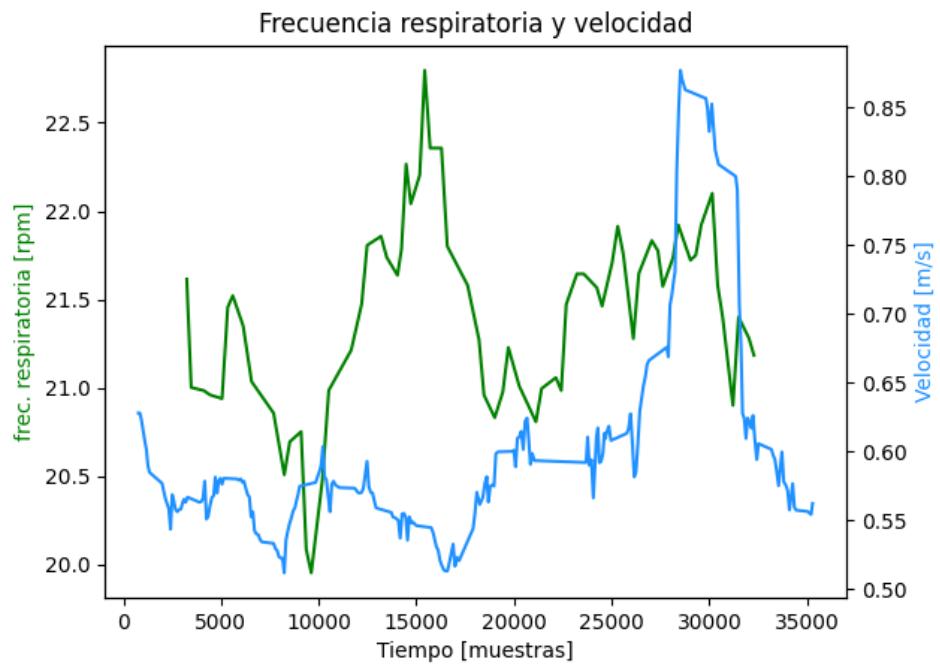


Figura 37: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 15.

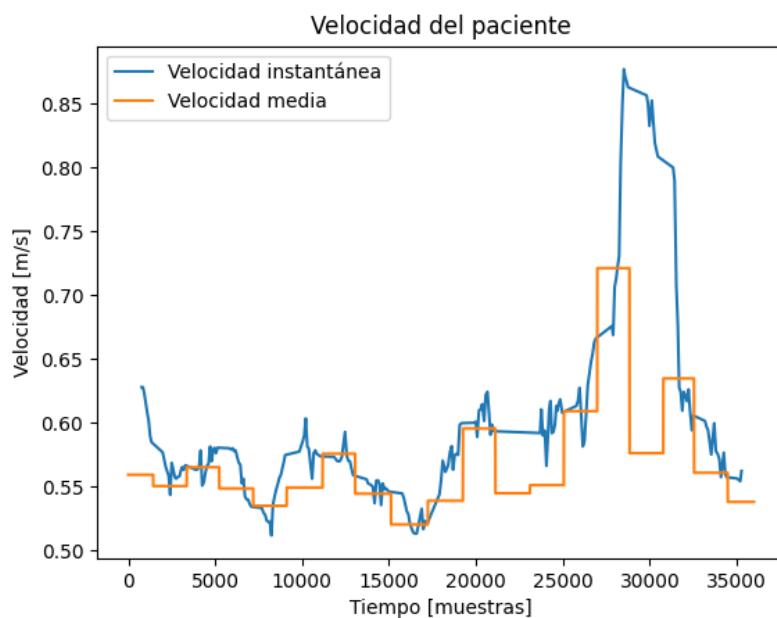


Figura 38: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 15.

1.16.3 Notas

En los tramos 12 y 16 el paciente se tropezó, aunque luego pudo continuar con la marcha. Esto introdujo ruido en la señal del acelerómetro a partir de la cual se calculan los pasos, lo que justifica la desviación en ambos tramos.

Por consecuencia de este incidente, la gráfica de la velocidad instantánea representada en la Figura 38, se desvía también de la señal de la velocidad media teórica.

1.17 Prueba 16

1.17.1 Tablas de resultados

Tabla 35: Información general de la prueba 16.

idPaciente	00016
Longitud tramo	30 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Pasillo
Threshold [º]	165

Tabla 36: Resultados obtenidos de la prueba 16.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	168,65	168,41
Cambios de sentido/Tramos enteros	5	5
Media de pasos	66,2	62,5
Zancada media [m]	0,45	0,48
Distancia último tramo [m]	10,80	10,56

Tabla 37: Pasos en cada tramo de la prueba 16.

Tramo	Real	Calculados
1	68	73
2	69	68
3	64	66
4	63	59
5	67	38
6	23	22

1.17.2 Gráficas de los resultados

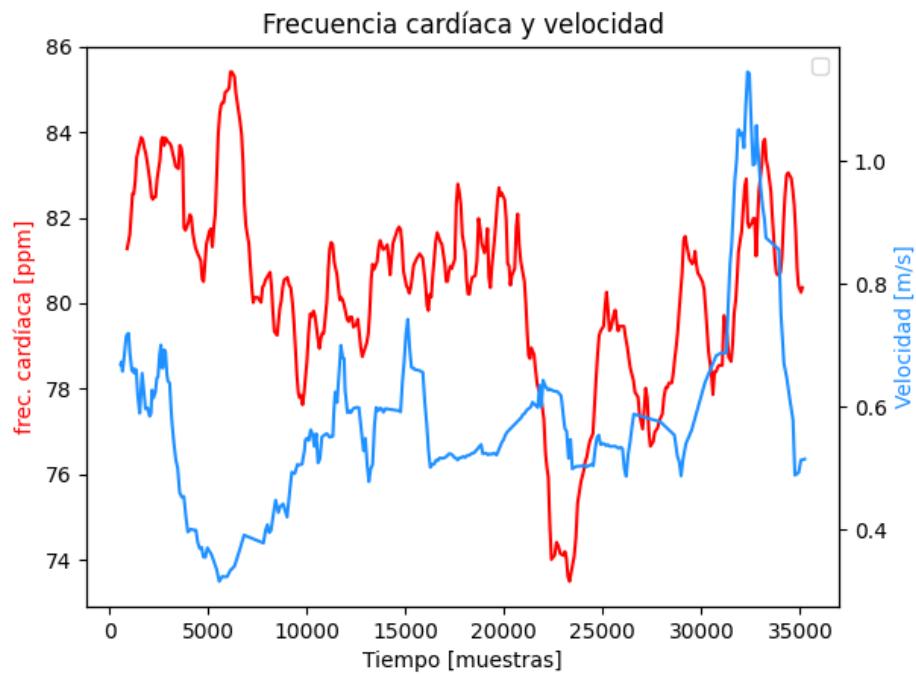


Figura 39: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 16.

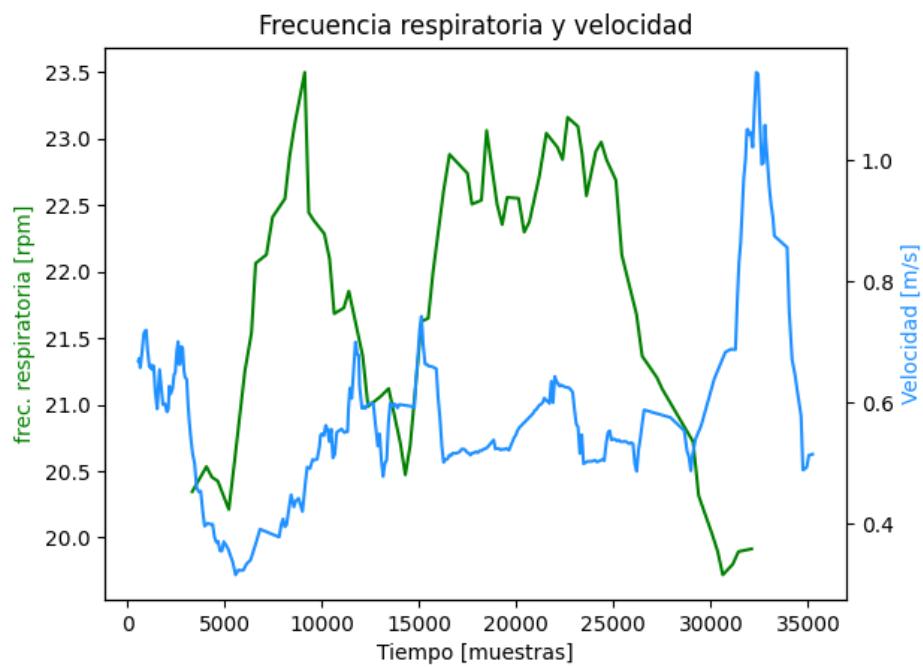


Figura 40: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 16.

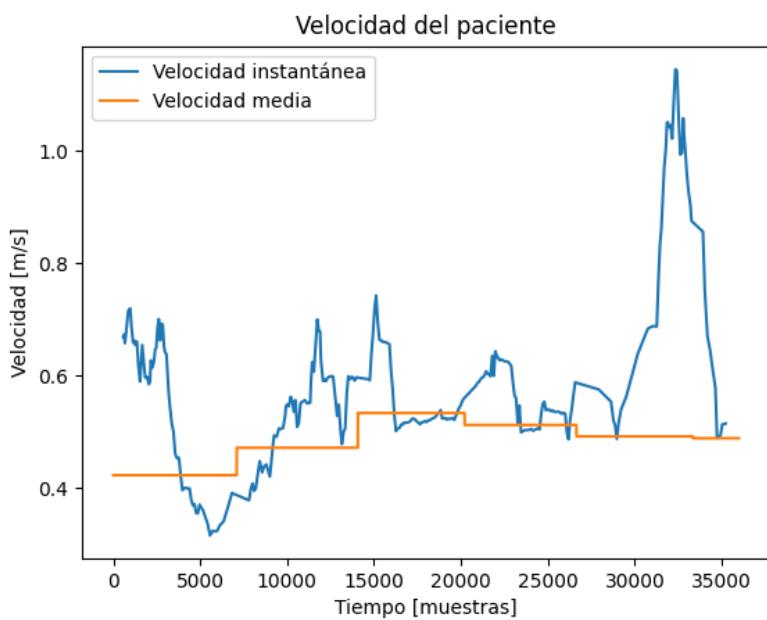


Figura 41: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 16.

1.17.3 Notas

Durante la prueba, el paciente recolocó la posición de la pulsera lo que introduce ruido en la señal del acelerómetro a través de la cual se identifican los instantes donde el paciente realiza cada paso. Esto tiene un claro efecto sobre la señal de la velocidad instantánea, que en el tramo 5, donde hubo una desviación en el cálculo de los pasos de 29 unidades.

Sin embargo, debido a que ese quinto tramo no se tiene en cuenta para el resto de cálculos, el error en la distancia total recorrida por el paciente es de un 0,14%.

1.18 Prueba 17

1.18.1 Tablas de resultados

Tabla 38: Información general de la prueba 17.

idPaciente	00017
Longitud tramo	30 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Pasillo
Threshold [°]	165

Tabla 39: Resultados obtenidos de la prueba 17.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	219,42	219,42
Cambios de sentido/Tramos enteros	6	6
Media de pasos	60,67	60
Zancada media [m]	0,49	0,50
Distancia último tramo [m]	30	30

Tabla 40: Pasos en cada tramo de la prueba 17.

Tramo	Real	Calculados
1	64	63
2	57	60
3	63	62
4	59	58
5	60	59
6	61	58
7	58	60

1.18.2 Gráficas de los resultados

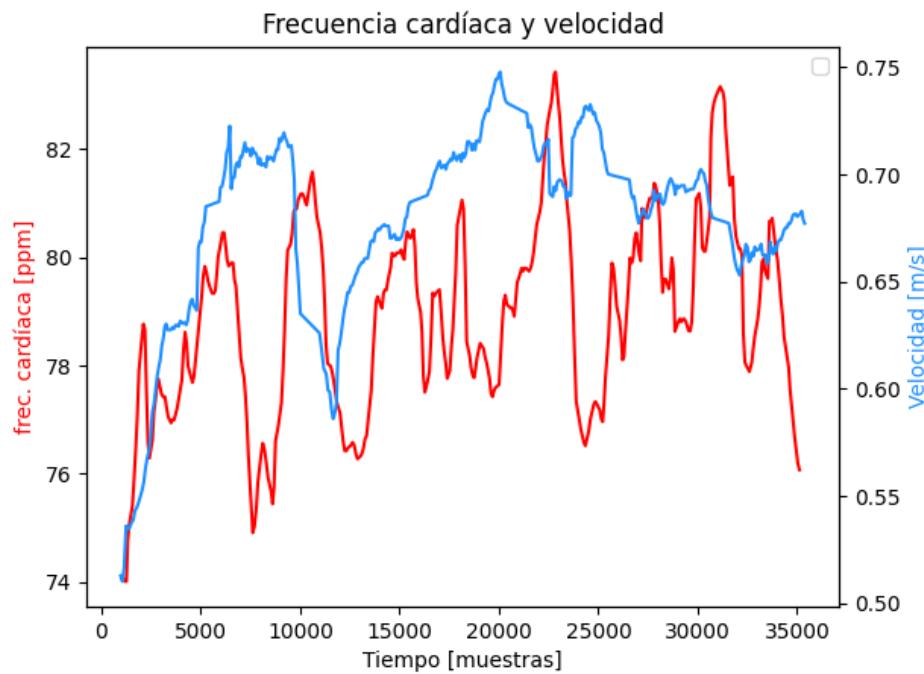


Figura 42: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 17.

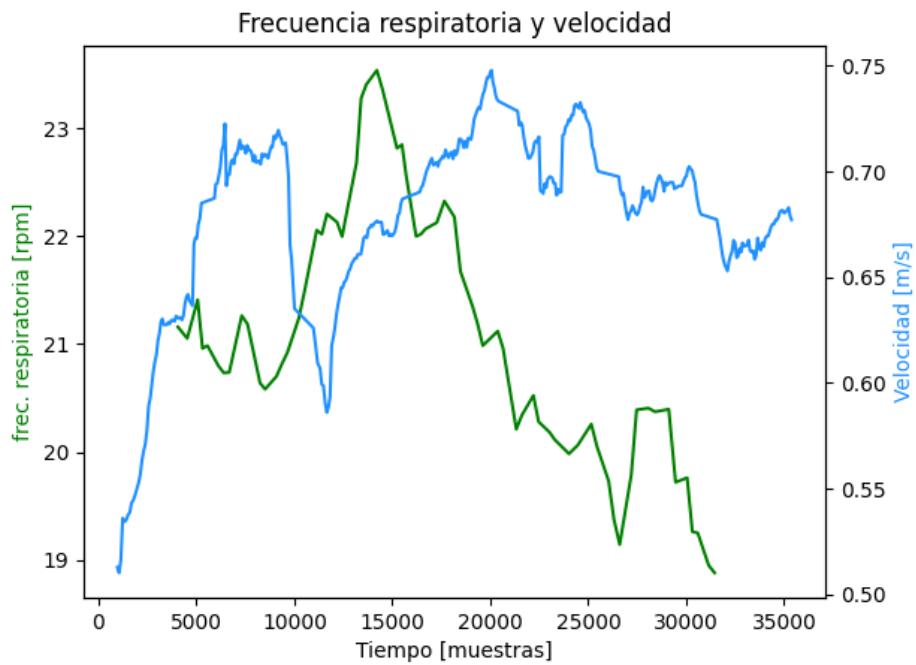


Figura 43: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 17.

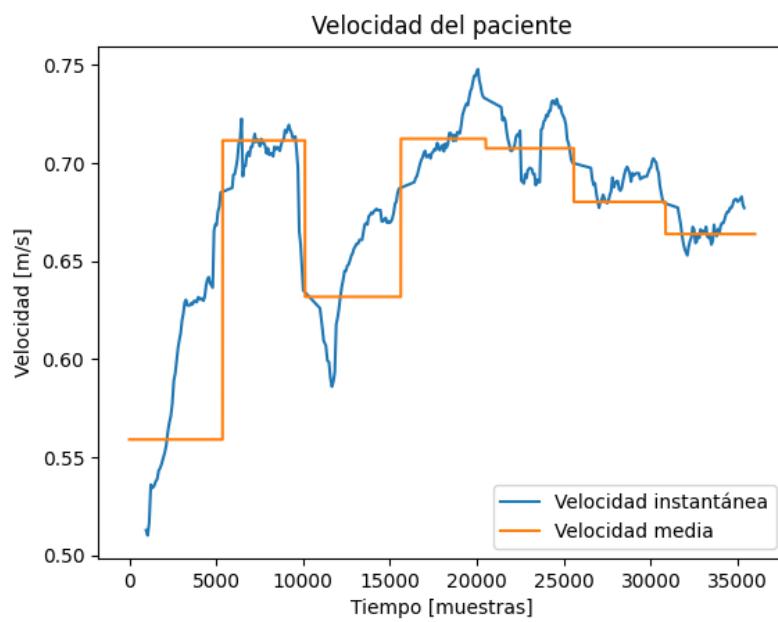


Figura 44: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 17.

1.18.3 Notas

Esta prueba no presenta ninguna anomalía ni hubo ningún inconveniente ni ningún agente externo a la prueba que afectase a los resultados obtenidos.

1.19 Prueba 18

1.19.1 Tablas de resultados

Tabla 41: Información general de la prueba 18.

idPaciente	00018
Longitud tramo	30 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Pasillo
Threshold [º]	165

Tabla 42: Resultados obtenidos de la prueba 18.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	196,22	195,80
Cambios de sentido/Tramos enteros	6	6
Media de pasos	68,33	70,5
Zancada media [m]	0,44	0,43
Distancia último tramo [m]	6,8	6,38

Tabla 43: Pasos en cada tramo de la prueba 18.

Tramo	Real	Calculados
1	72	72
2	69	69
3	67	72
4	68	69
5	67	71
6	67	70
7	14	15

1.19.2 Gráficas de los resultados

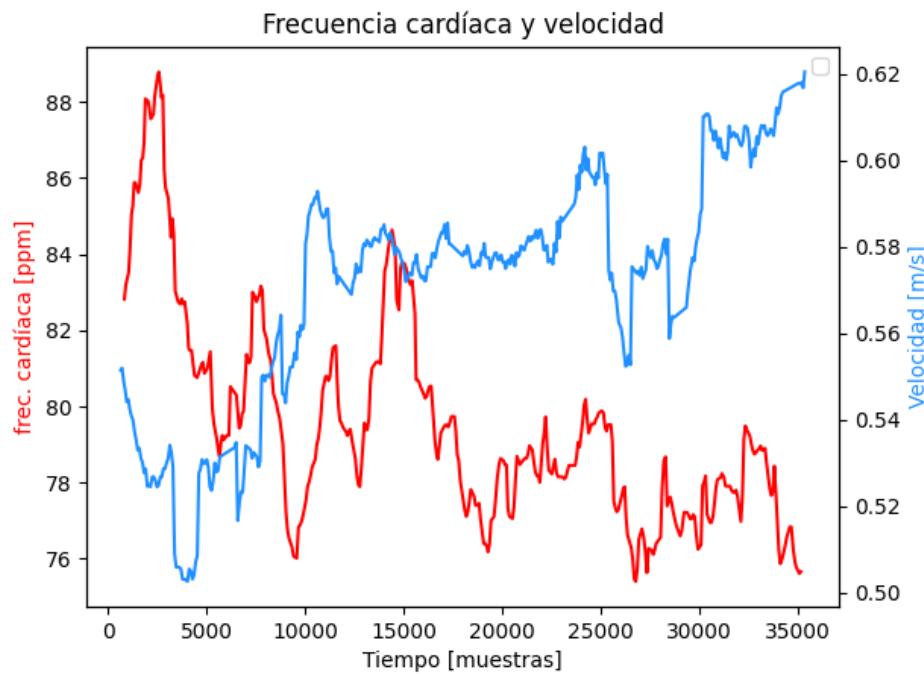


Figura 45: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 18.

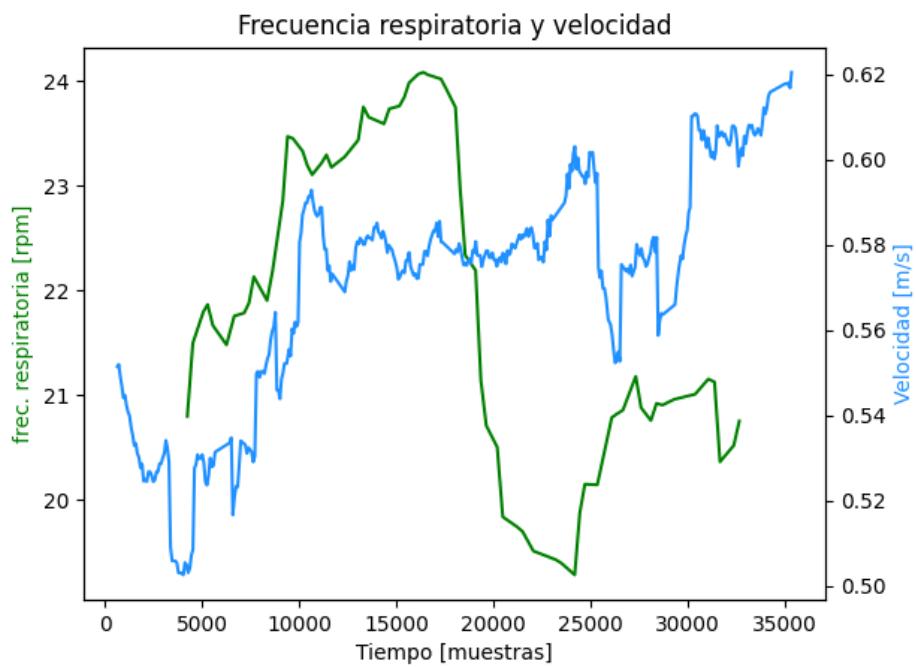


Figura 46: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 18.

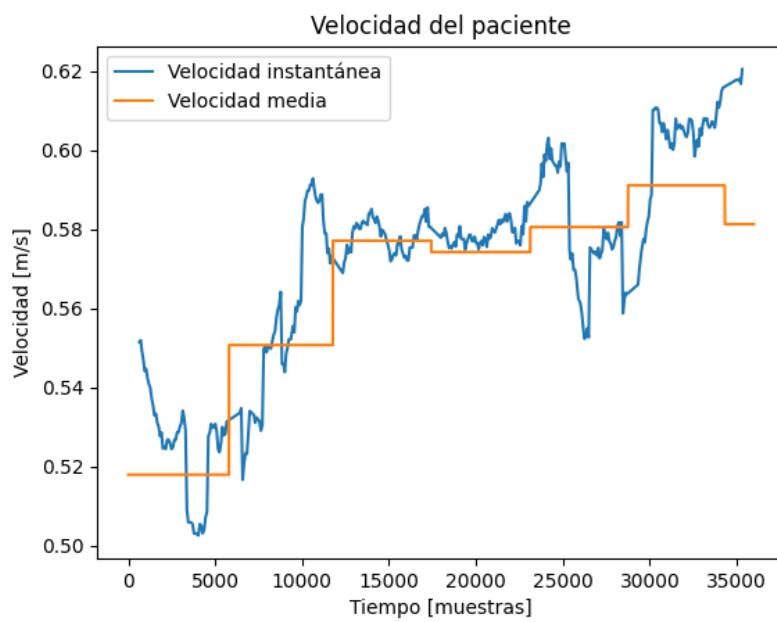


Figura 47: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 18.

1.19.3 Notas

En el último tramo la zancada media del paciente es de 0,49; un 11% mayor que la zancada media a lo largo del resto de la prueba. Por eso, pese a que el programa detecta un paso más de los que realmente se dieron, la distancia calculada para el último tramo (6,38 metros) es menor que la que recorrió en realidad el paciente (6,8 metros).

1.20 Prueba 19

1.20.1 Tablas de resultados

Tabla 44: Información general de la prueba 19.

idPaciente	00019
Longitud tramo	30 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Pasillo
Threshold [º]	175

Tabla 45: Resultados obtenidos de la prueba 19.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	498,56	498,82
Cambios de sentido/Tramos enteros	15	20
Media de pasos	39,13	38,00
Zancada media [m]	0,77	0,79
Distancia último tramo [m]	25	25,26

Tabla 46: Pasos en cada tramo de la prueba 19.

Tramo	Real	Calculados
1	39	38
2	39	38
3	40	38
4	39	38
5	38	39
6	38	37
7	38	37
8	38	37
9	39	38
10	40	38
11	40	39
12	39	39
13	39	37
14	40	39
15	41	38
16	31	32

1.20.2 Gráficas de los resultados

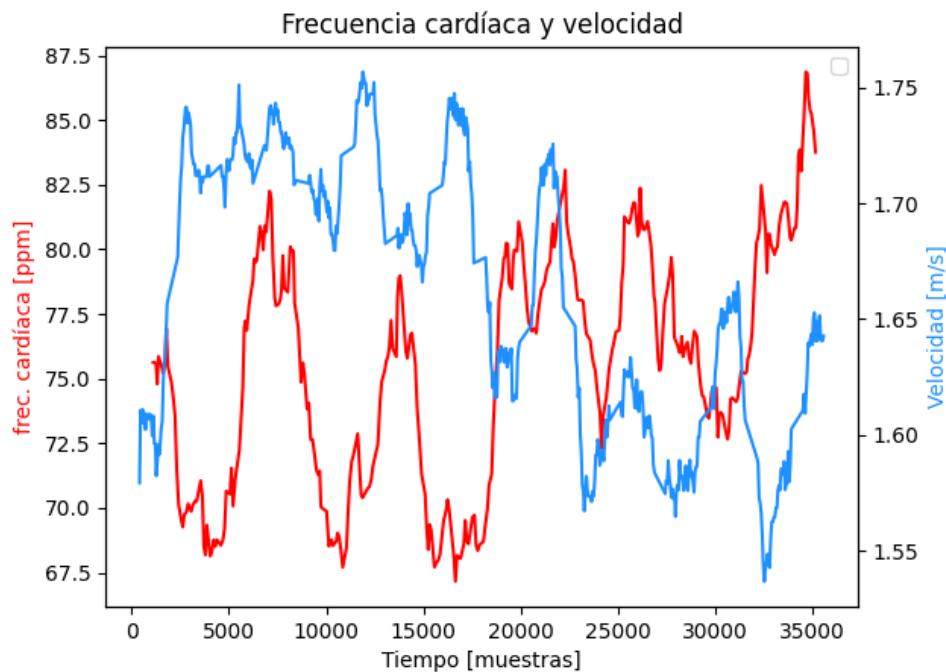


Figura 48: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 19.

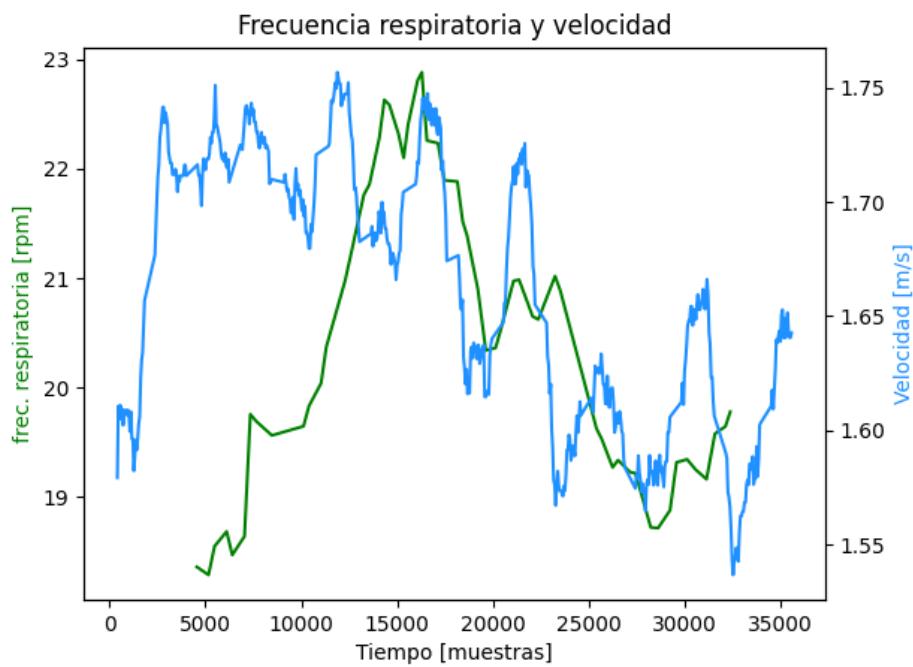


Figura 49: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 19.

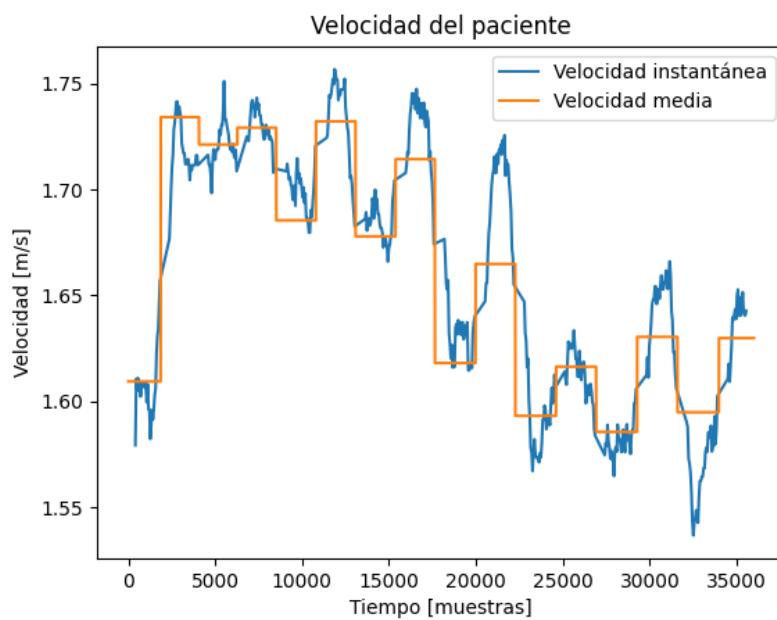


Figura 50: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 19.

1.20.3 Notas

Esta prueba no presenta ninguna anomalía ni hubo ningún inconveniente ni ningún agente externo a la prueba que afectase a los resultados obtenidos.

1.21 Prueba 20

1.21.1 Tablas de resultados

Tabla 47: Información general de la prueba 20.

idPaciente	00020
Longitud tramo	30 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Pasillo
Threshold [º]	175

Tabla 48: Resultados obtenidos de la prueba 20.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	214,02	213,91
Cambios de sentido/Tramos enteros	6	6
Media de pasos	64,83	66,17
Zancada media [m]	0,46	0,45
Distancia último tramo [m]	24,60	24,48

Tabla 49: Pasos en cada tramo de la prueba 20.

Tramo	Real	Calculados
1	66	67
2	68	69
3	64	65
4	64	68
5	63	64
6	64	64
7	54	54

1.21.2 Gráficas de los resultados

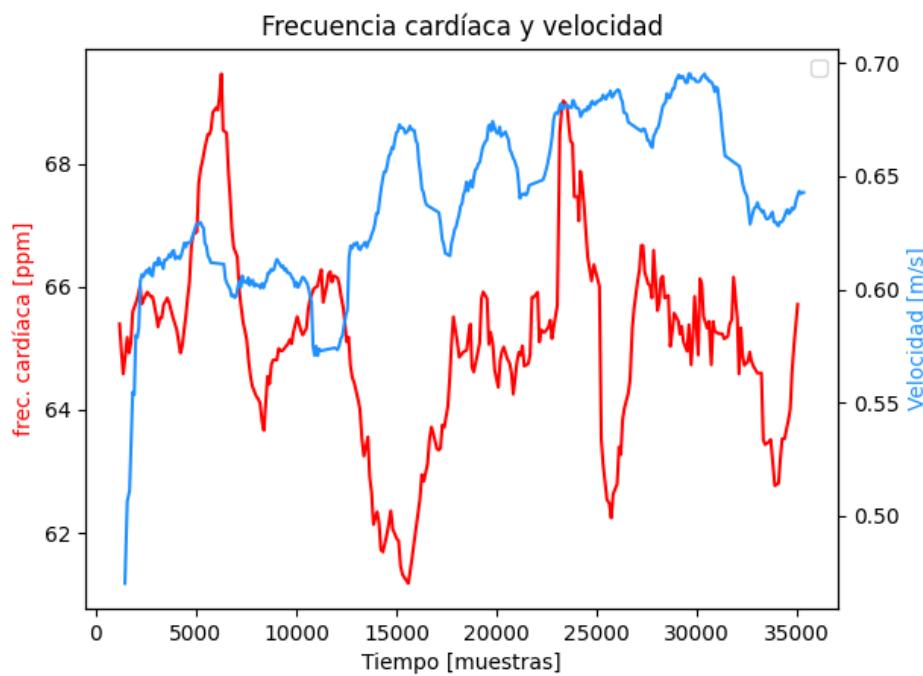


Figura 51: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 20.

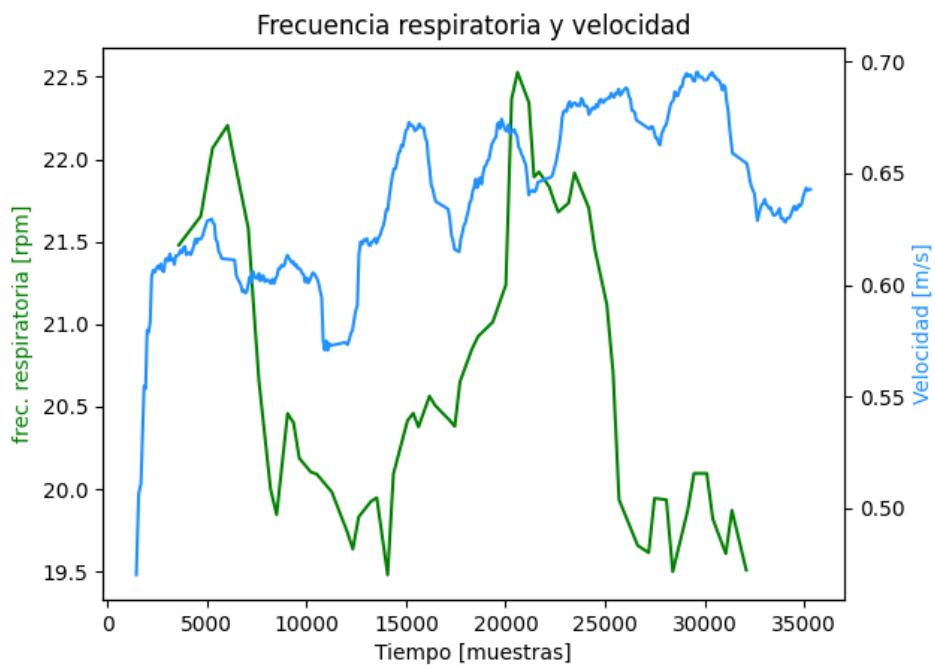


Figura 52: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 20.

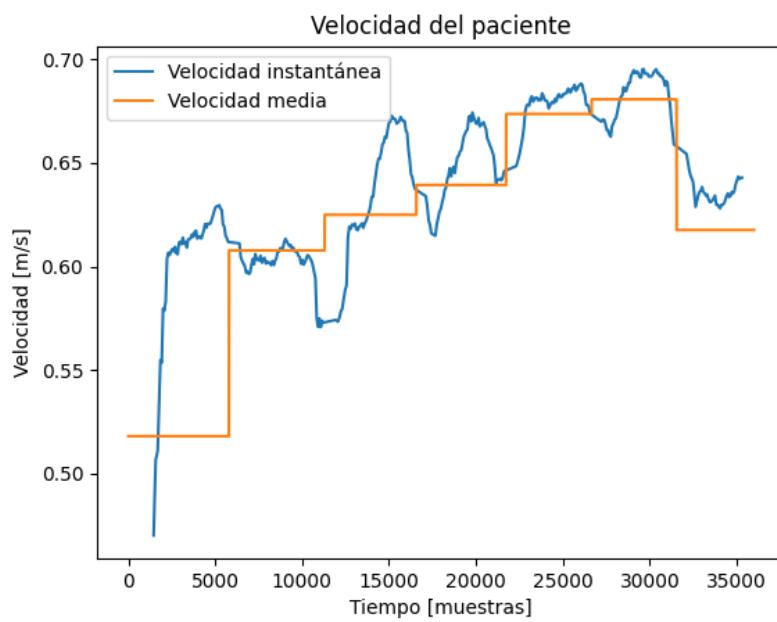


Figura 53: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 20.

1.21.3 Notas

Esta prueba no presenta ninguna anomalía ni hubo ningún inconveniente ni ningún agente externo a la prueba que afectase a los resultados obtenidos.

1.22 Prueba 21

1.22.1 Tablas de resultados

Tabla 50: Información general de la prueba 21.

idPaciente	00021
Longitud tramo	30 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Pasillo
Threshold [º]	170

Tabla 51: Resultados obtenidos de la prueba 21.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	211,62	210,72
Cambios de sentido/Tramos enteros	6	6
Media de pasos	66,17	64,8
Zancada media [m]	0,45	0,46
Distancia último tramo [m]	22,20	21,30

Tabla 52: Pasos en cada tramo de la prueba 21.

Tramo	Real	Calculados
1	74	73
2	72	66
3	74	77
4	59	62
5	59	62
6	59	61
7	46	46

1.22.2 Gráficas de los resultados

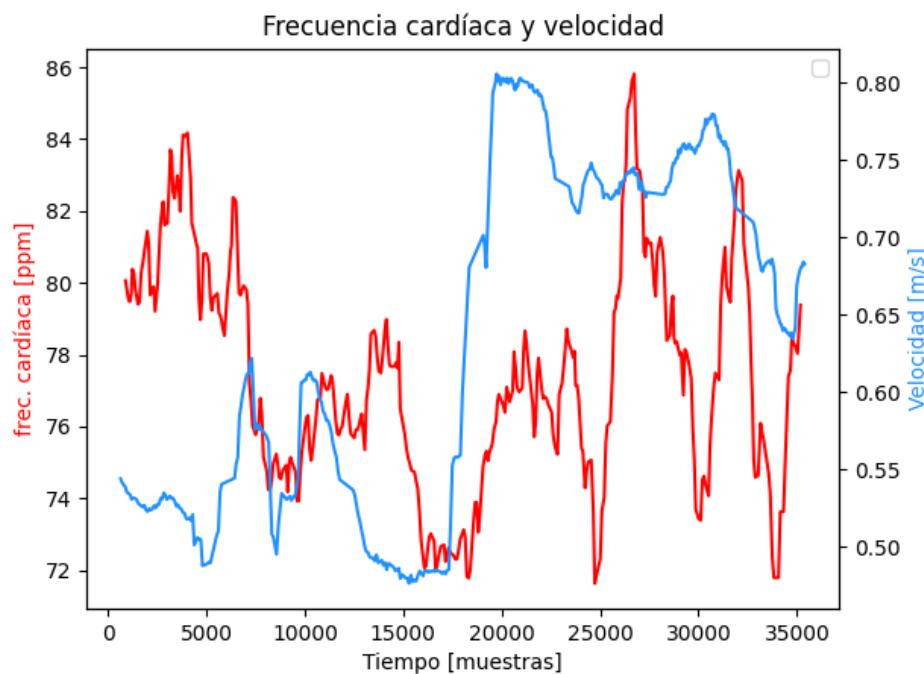


Figura 54: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 21.

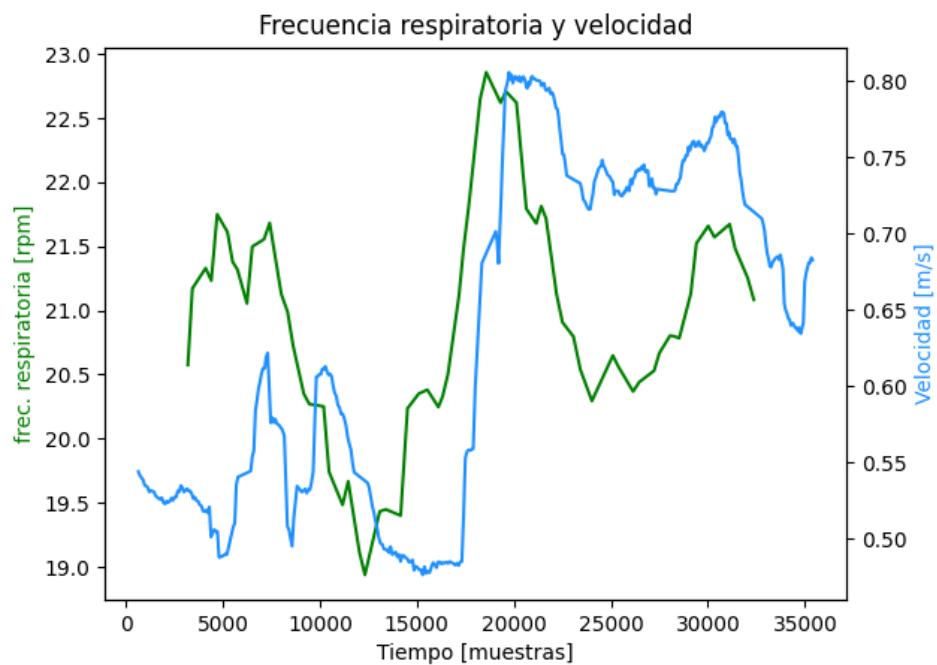


Figura 55: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 21.

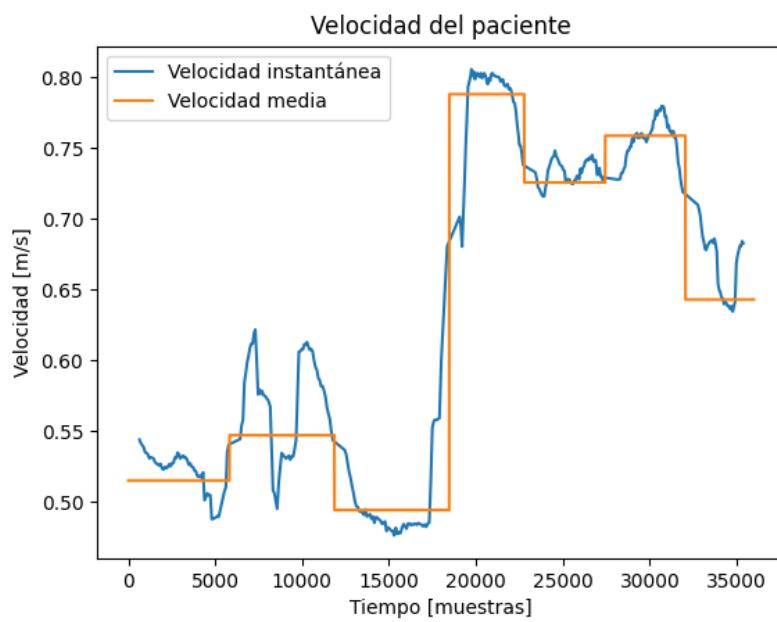


Figura 56: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 21.

1.22.3 Notas

Esta prueba no presenta ninguna anomalía ni hubo ningún inconveniente ni ningún agente externo a la prueba que afectase a los resultados obtenidos. Simplemente hubo un cambio de ritmo a mitad de la prueba donde el paciente aumentó su velocidad.

1.23 Prueba 22

1.23.1 Tablas de resultados

Tabla 53: Información general de la prueba 22.

idPaciente	00022
Longitud tramo	30 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Pasillo
Threshold [º]	175

Tabla 54: Resultados obtenidos de la prueba 22.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	423,42	423,58
Cambios de sentido/Tramos enteros	13	13
Media de pasos	37,31	36,46
Zancada media [m]	0,80	0,82
Distancia último tramo [m]	13	13,16

Tabla 55: Pasos en cada tramo de la prueba 22.

Tramo	Real	Calculados
1	36	35
2	36	35
3	38	36
4	36	36
5	38	36
6	37	37
7	38	36
8	38	36
9	38	37
10	35	37
11	38	38
12	39	38
13	38	37
14	16	16

1.23.2 Gráficas de los resultados

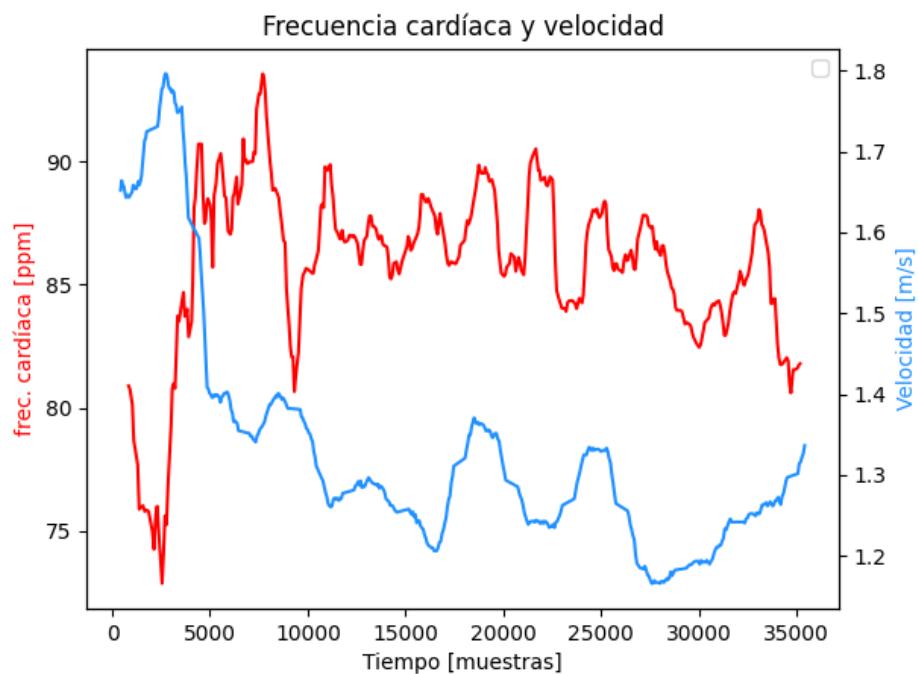


Figura 57: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 22.

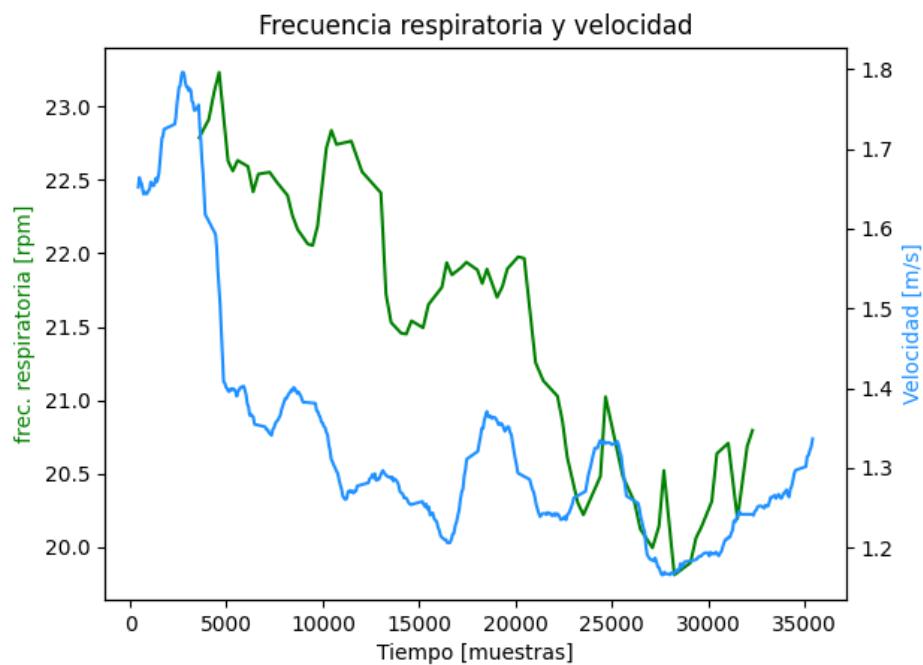


Figura 58: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 22.

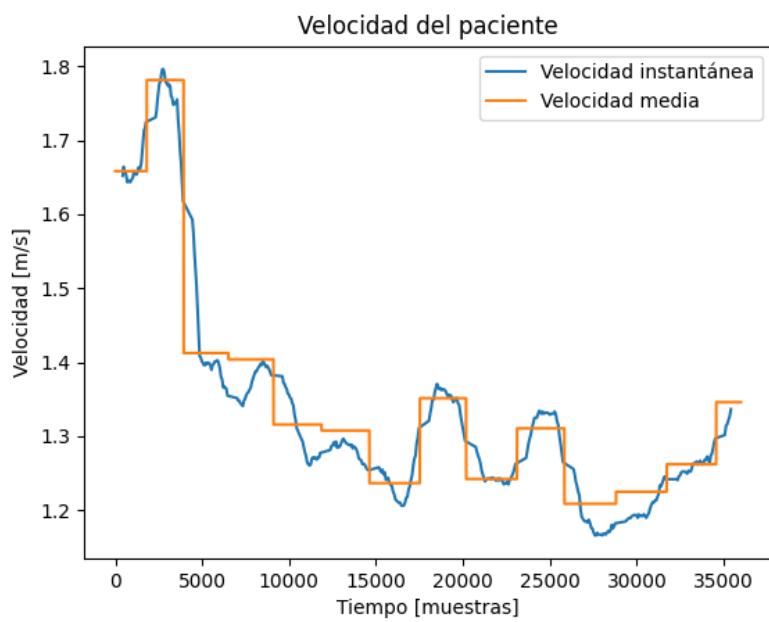


Figura 59: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 22.

1.23.3 Notas

Esta prueba no presenta ninguna anomalía ni hubo ningún inconveniente ni ningún agente externo a la prueba que afectase a los resultados obtenidos.

1.24 Prueba 23

1.24.1 Tablas de resultados

Tabla 56: Información general de la prueba 23.

idPaciente	00023
Longitud tramo	30 metros
Duración prueba	6 minutos
Lugar de desarrollo	Pasillo
Threshold [º]	175

Tabla 57: Resultados obtenidos de la prueba 23.

	Real	Cálculos
Distancia total [m]	361,28	361,11
Cambios de sentido/Tramos enteros	11	11
Media de pasos	48,91	47,73
Zancada media [m]	0,61	0,63
Distancia último tramo [m]	14	13,83

Tabla 58: Pasos en cada tramo de la prueba 23.

Tramo	Real	Calculados
1	49	52
2	49	50
3	50	49
4	47	48
5	49	44
6	47	47
7	50	49
8	47	47
9	50	46
10	49	46
11	51	47
12	21	22

1.24.2 Gráficas de los resultados

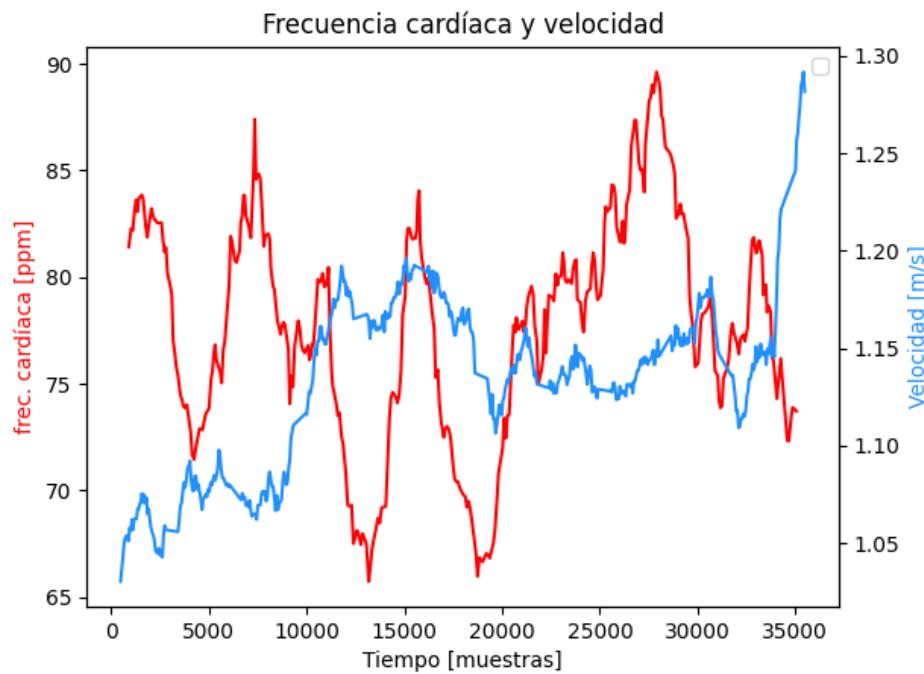


Figura 60: Gráfica de la frecuencia cardíaca y velocidad. Prueba 23.

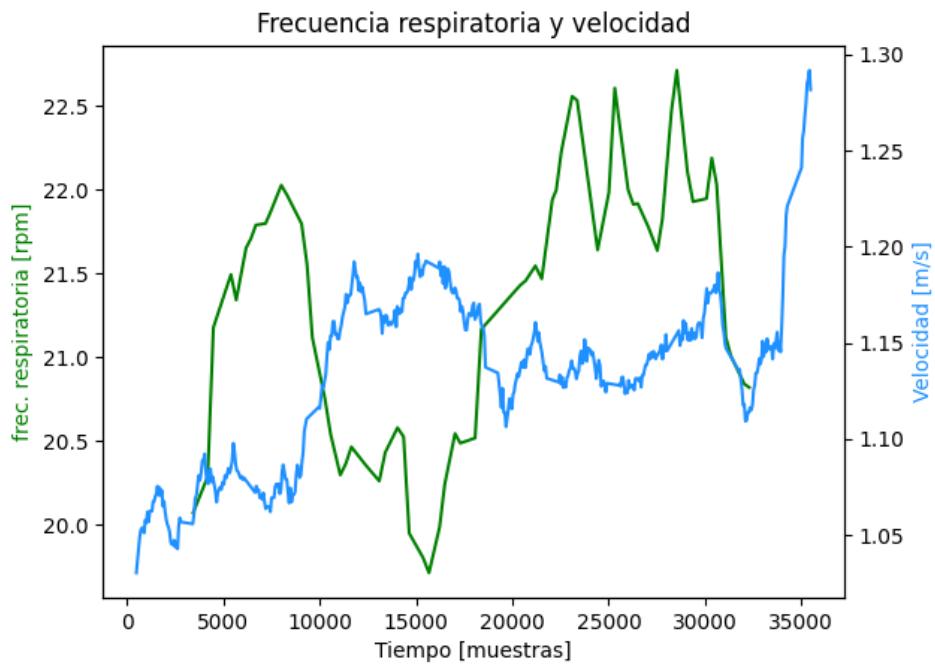


Figura 61: Gráfica de la frecuencia respiratoria y velocidad. Prueba 23.

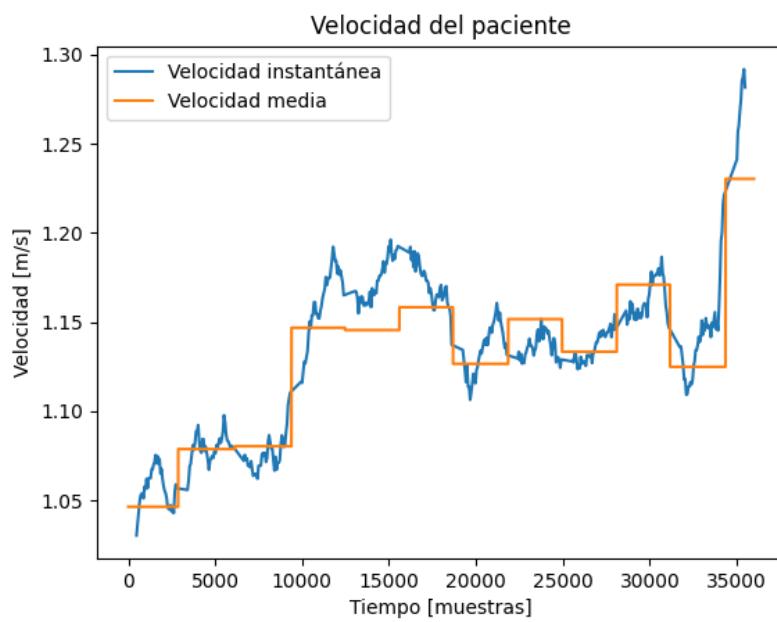


Figura 62: Gráfica de la velocidad instantánea y media. Prueba 23.

1.24.3 Notas

Esta prueba no presenta ninguna anomalía ni hubo ningún inconveniente ni ningún agente externo a la prueba que afectase a los resultados obtenidos.

2 ANEXO 2: MANUAL DE USUARIO

2.1 Introducción

El presente documento pretende ser una guía para los usuarios que vayan a realizar el 6MWT con el dispositivo wearable y la aplicación desarrollada en este TFG. Además, está dirigido al personal sanitario del H. Álvaro Cunqueiro, por lo que se ha adaptado el manual de usuario a la guía que recoge el procedimiento actual que llevan a cabo. Esta guía no ha podido ser incluida en este trabajo ya que es confidencial.

Por otro lado, en el estudio y realización del 6MWT participan dos perfiles de usuarios; un técnico es encargado de realizar la prueba a los pacientes y recoger los datos de interés. Mientras que es un médico el encargado de analizar dichos resultados, pudiendo hacer dicho análisis varios días después de la realización de la prueba.

Teniendo esto último en cuenta, se ha dividido este documento en dos partes. La primera es una guía dirigida al perfil del técnico, donde se explica la puesta en marcha del dispositivo, así como la descarga y almacenamiento de los datos.

En segundo lugar, se describe cómo emplear correctamente la interfaz gráfica de usuario para acceder a las pruebas de cada paciente y proceder a su análisis.

Finalmente, será necesaria una instalación por parte de un técnico, de un compilador de Python, además de las librerías necesarias para que la aplicación diseñada pueda funcionar.

2.2 Instalación del software

La aplicación desarrollada, denominada “PD6MM”, funciona en lenguaje Python, por lo que es necesario instalarlo en el equipo informático que va a correr la aplicación; concretamente, se ha utilizado la versión 3.9, aunque versiones posteriores también son válidas.

Para instalar dicho software, el cual es *open source*, se seguirán los pasos recogidos en <https://www.python.org/downloads/>.

A mayores, será necesario instalar la siguiente lista de bibliotecas, mediante el comando *pip install* en el CMD:

- scipy
- numpy
- sensormotion
- matplotlib
- pylab
- tkinter
- pandas
- os
- time

Por último, el técnico responsable de esta instalación deberá comprobar el COM del equipo al que se asocia el dispositivo wearable al conectarse. Para ello habrá que seguir la siguiente ruta:

Panel de control > Hardware y sonido > Dispositivos e impresoras > Click derecho > Administrador de dispositivos.

Si el dispositivo está correctamente conectado, aparecerá la siguiente información donde se observa el puerto COM asignado. En la Figura 63 se observa el COM asignado.

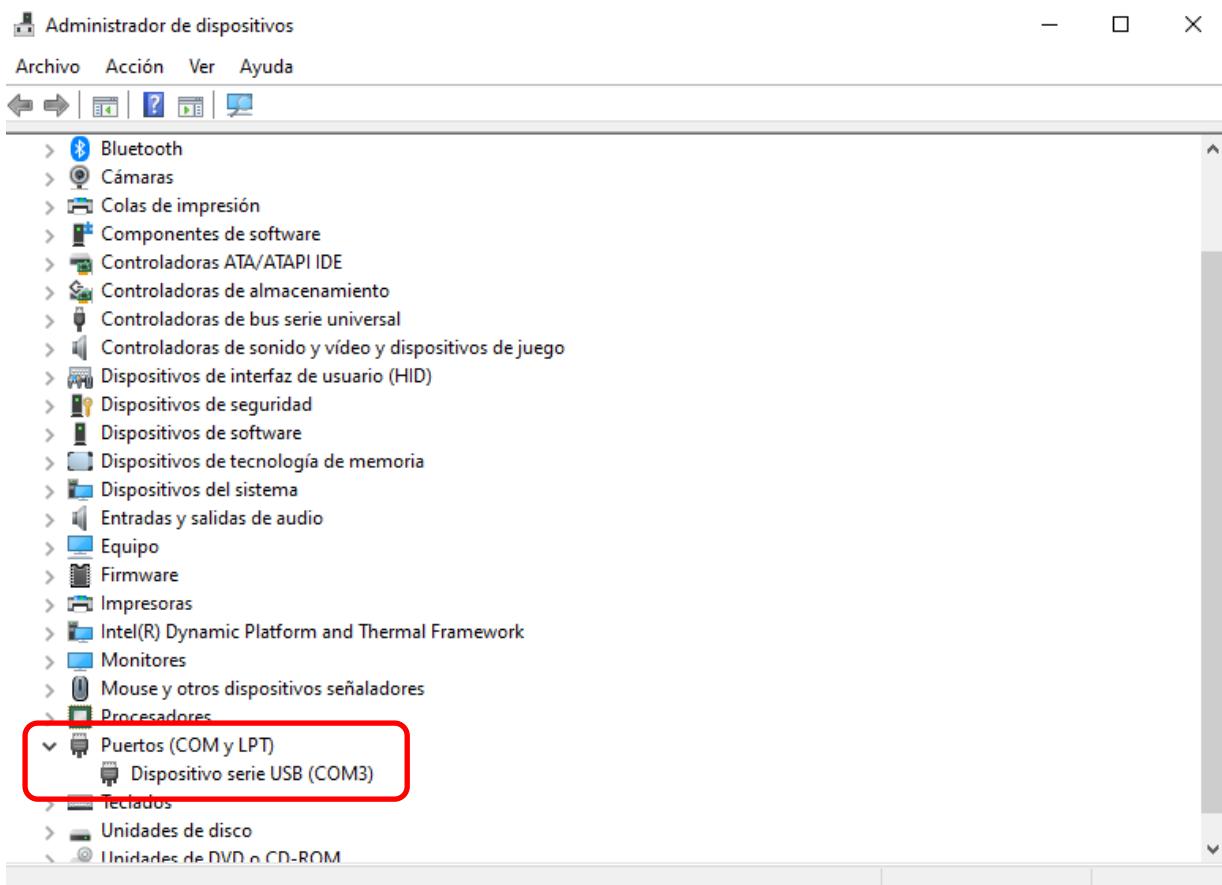


Figura 63: Dispositivos e impresoras del equipo informático.

2.3 Realización de la prueba y extracción de los datos

2.3.1 Colocación del dispositivo wearable

Después de hacer el procedimiento previo a la realización de la prueba recogido en el protocolo actual del H. Á. Cunqueiro, lo primero que se ha de hacer es colocar el dispositivo en una de las muñecas del sujeto, preferiblemente su brazo débil (si fuera diestro, su brazo débil es el izquierdo), habiendo extraído todo tipo de pulseras o relojes, de forma que el dispositivo wearable esté en contacto directo con la piel del paciente.

Es necesario que el dispositivo esté apretado hasta que no quede flojo, preguntando al paciente para que no quedé demasiado apretado ya que, si queda muy apretado, puede influir negativamente en el cálculo de la frecuencia cardíaca.

2.3.2 Indicaciones de la realización de la prueba

Una vez hecho esto, se le debe explicar al sujeto el recorrido que ha de hacer, bordeando los conos que limitan el pasillo, nunca realizar un cambio de sentido sobre sí mismos. Hacer una demostración si fuera necesario.

También es necesario indicar que en el momento en el que haya finalizado el tiempo de los 6 minutos, el sujeto debe permanecer en el mismo sitio hasta que el técnico tome la medida de la distancia recorrida en el último tramo.

2.3.3 Puesta en marcha

Para explicar mejor este apartado, en las figuras Figura 64 y Figura 65 se muestra la posición del interruptor y del pulsador, además de la de los LEDs de la cara superior del dispositivo.

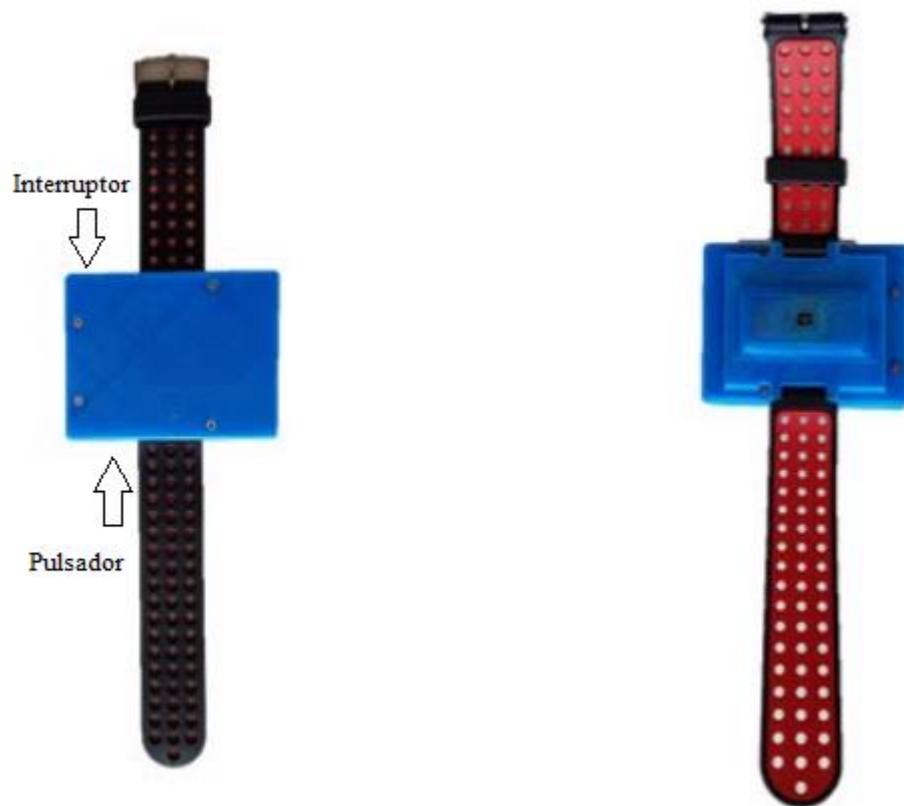


Figura 64: Posición del interruptor y del pulsador.

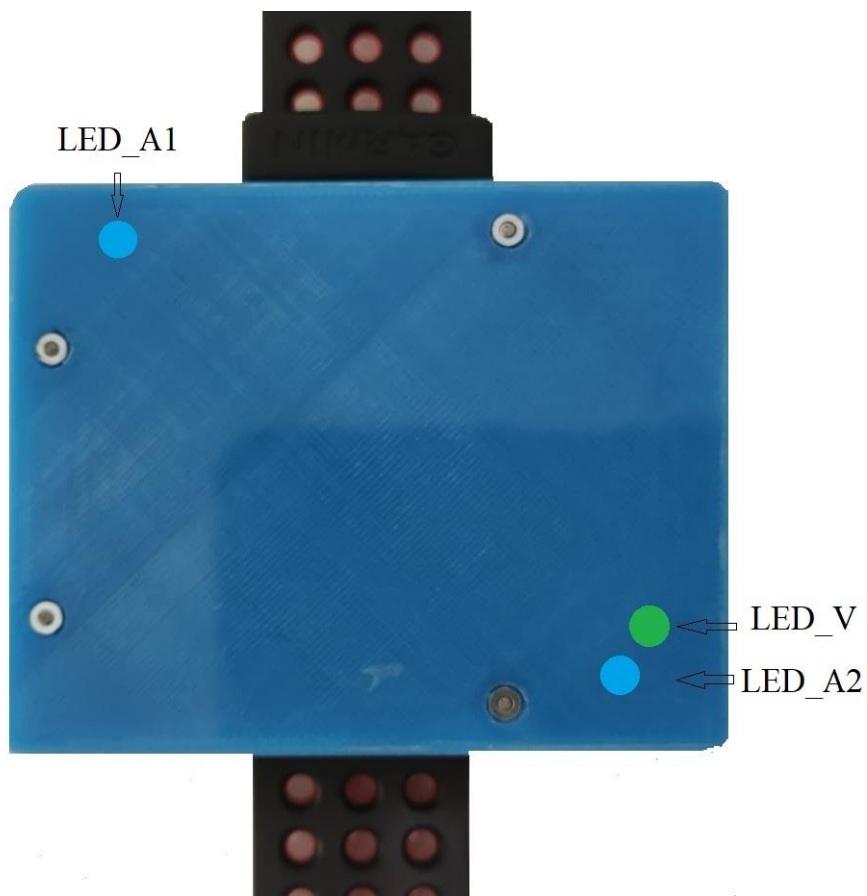


Figura 65: Posición de los LEDs del dispositivo.

A continuación, se debe poner el interruptor del dispositivo en posición de ON, por lo que comenzará a parpadear el LED de color verde. Cuando cese dicho parpadeo, el siguiente paso es presionar el pulsador, lo que iniciará el proceso de borrado de la memoria. Esta acción puede llegar a durar hasta 2 minutos, cuando comience a parpadear el LED_A2, es el indicador de que el borrado de memoria ha finalizado y se puede proceder al inicio de la prueba.

2.3.4 Batería y carga del dispositivo

El dispositivo wearable contiene una batería cuya autonomía es de 8 horas, por lo que el técnico deberá tenerlo en cuenta al inicio de la jornada de pruebas.

Por otro lado, el dispositivo se carga simplemente conectándolo a cualquier equipo informático mediante un puerto micro USB tipo B.

Se recomienda al técnico encargado de la realización de las pruebas que antes de empezar la jornada cargue durante una hora el dispositivo para que su batería dure hasta finalizar la jornada.

2.3.5 Inicio de la prueba

Una vez finalizado el protocolo que se explica en el apartado anterior, se ha de indicar al sujeto la posición que debe llevar del brazo que tiene el dispositivo, durante la realización de la prueba, insistiendo en que intente no mover dicho brazo siempre que le sea posible.

En la Figura 66 se muestra la posición óptima del brazo del paciente.



Figura 66: Posición del brazo del paciente.

A continuación, se presiona el pulsador una vez más, lo que apagará el LED_A2 que se encontraba parpadeando, y hay que realizar el protocolo de inicio, el cual consiste en hacer tres rotaciones de la muñeca del paciente como se explica en la Figura 67.

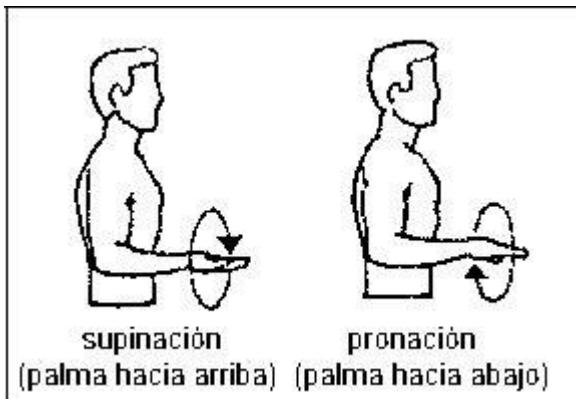


Figura 67: Indicaciones de las rotaciones de muñeca.

Una vez realizadas las tres rotaciones, el técnico deberá iniciar la cuenta de los 6 minutos con la ayuda de un cronómetro, y el paciente podrá comenzar a la prueba.

2.3.6 Transcurso de la prueba

No será necesario que el técnico realice ninguna anotación, ni de los pasos que da el paciente, ni de los instantes donde el paciente finaliza cada tramo. Únicamente llevará la cuenta de los posibles incidentes que se puedan producir, como, por ejemplo, que el paciente comience a mover el brazo donde lleva el dispositivo.

En estos casos, será decisión del técnico si es necesario realizar de nuevo la prueba.

2.3.7 Finalización de la prueba

En el momento en el que se llegue a los seis minutos, se le indicará al paciente que se detenga para que el técnico le retire el dispositivo wearable. Se recuerda que no es necesario anotar la posición en la que el sujeto finaliza la prueba.

Cuando se le haya retirado el dispositivo, se le colocará al siguiente paciente que vaya a realizar la prueba y se repetirá todo el procedimiento.

En caso de ser la última prueba, el técnico deberá pulsar nuevamente el pulsador para que el dispositivo deje de medir más datos, y proceder a la descarga de los datos en el equipo informático.

2.3.8 Descarga de los datos

Una vez conectado el dispositivo al equipo informático mediante un puerto micro USB, se deberá ejecutar el programa, por lo que se mostrará por pantalla una ventana como la indicada en la Figura 68.

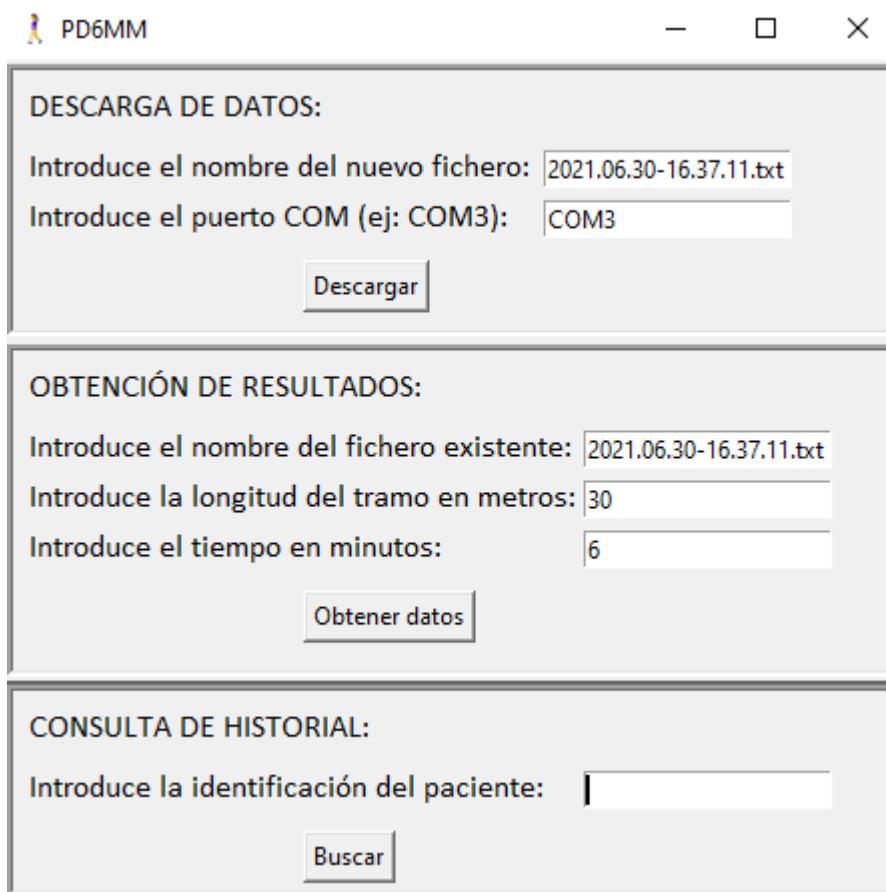


Figura 68: Ventana principal.

En el apartado de Descarga de datos, aparecerá por defecto la fecha en ese momento como nombre del fichero que se generará con los datos descargados en crudo. Es necesario indicar el puerto del equipo informático al que se conecta el dispositivo, por lo general será el “COM3”.

A continuación, tras presionar el botón de “Descargar”, se procederá a la descarga, la cual puede tardar hasta 2 minutos. El usuario sabrá que ha finalizado con éxito, si le aparece el mensaje que se muestra en la Figura 69.

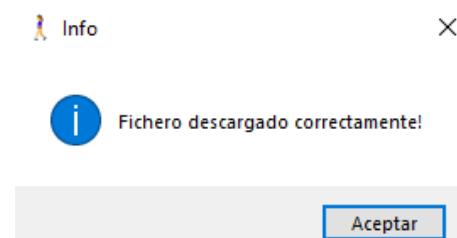


Figura 69: Mensaje de finalización de la descarga.

En el caso de que haya habido algún error en la descarga, saltará otra ventana con el mensaje que se muestra en la Figura 70.

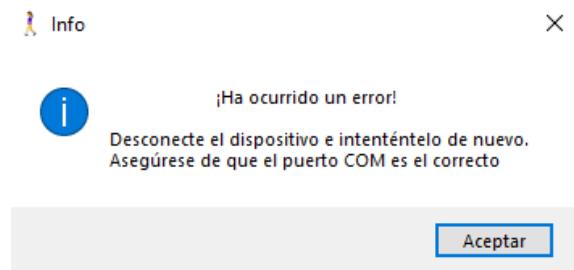


Figura 70: Mensaje de error en la descarga.

En el caso de que se haya detectado un error, el técnico deberá desconectar el dispositivo y volver a conectar asegurándose de que el puerto COM sea el que se especifica.

2.3.9 Procesado de los datos

Una vez descargado los datos del dispositivo, se puede apagar llevando el interruptor a la posición de OFF.

El siguiente paso es introducir los datos de la prueba, en el apartado de obtención de resultados, por defecto el nombre del archivo será el mismo que el del archivo generado en la descarga, la longitud será 30 metros, y la duración de la prueba 6 minutos.

Tras pulsar el botón “Obtener datos”, el programa mostrará en una nueva ventana el número de pruebas detectadas tal y como se muestra en la Figura 71.

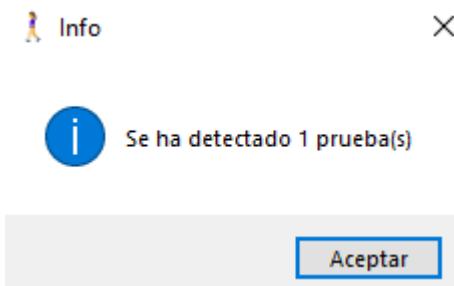


Figura 71: Ejemplo de detección de las pruebas.

Al pulsar en aceptar, aparecerá una nueva ventana donde se deberá indicar el número de identificación del paciente que realiza cada una de las pruebas detectadas. En la Figura 72 se muestra un ejemplo donde se detectaron tres pruebas.

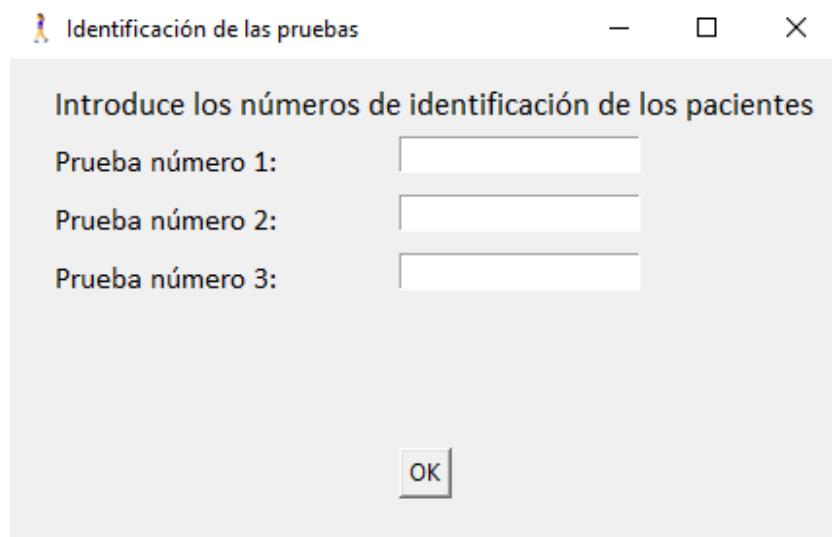


Figura 72: Ejemplo de identificación de las pruebas.

MEJORA DE UN SISTEMA BASADO EN DISPOSITIVOS WEARABLES PARA LA MOTORIZACIÓN AUTOMÁTICA
DE TEST DE MARCHA EN PACIENTES CARDIOLÓGICOS

SIMÓN PORTELA QUEIMAÑO

Tras pulsar el botón “OK”, se cerrará esta ventana y habrá finalizado el proceso de la obtención de los resultados, ya que automáticamente se almacenan los datos obtenidos en la base de datos.

2.4 Análisis de los datos

Una vez el técnico ha realizado la extracción de todos los datos obtenidos de las pruebas, es turno del especialista de analizar los resultados obtenidos. Para ello, el técnico tendrá que cederle el equipo informático al médico encargado del análisis de las pruebas, ya que la propuesta actual cuenta con una base de datos local.

Para el estudio de las pruebas, habrá que ejecutar de nuevo el programa, por lo que la ventana inicial será la misma que en la Figura 68. Sin embargo, en este caso habrá que introducir en el apartado de “Consulta del historial”, el número de identificación del paciente para acceder al registro de todas sus pruebas.

En el caso de que no exista ninguna prueba con el número de identificación introducido, se muestra un mensaje como el de la Figura 73.

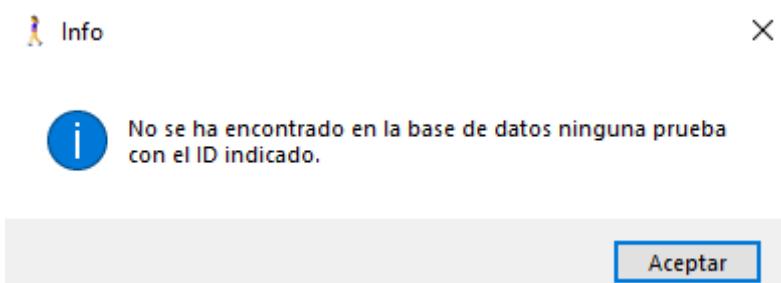


Figura 73: Mensaje de error en la búsqueda.

Al introducir un número de identificación válido, se muestra una nueva ventana donde se puede acceder a todas las pruebas asociadas al paciente indicado. En la Figura 74 se muestra un ejemplo de esta situación.

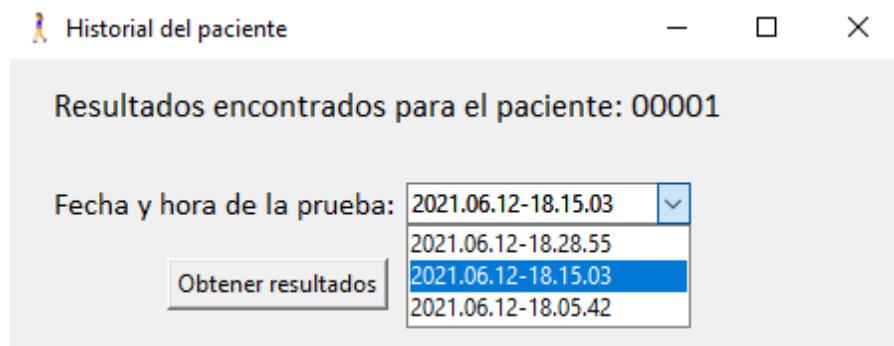


Figura 74: Ejemplo de selección de prueba.

Una vez seleccionada la prueba, existe la posibilidad de visualizar los resultados de la prueba, o si se considera que estos resultados no se corresponden con la realidad, es posible visualizar las señales donde se identifican los pasos del paciente, así como la de los cambios de sentido, para ver si se produjo algún error en ellas. En la Figura 75 se muestra la ventana donde se selecciona los resultados que se desean visualizar.

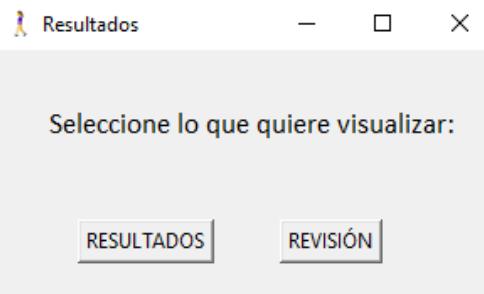


Figura 75: Selección de resultados a visualizar.

Un ejemplo de la disposición de los resultados es el que se muestra en la Figura 76.

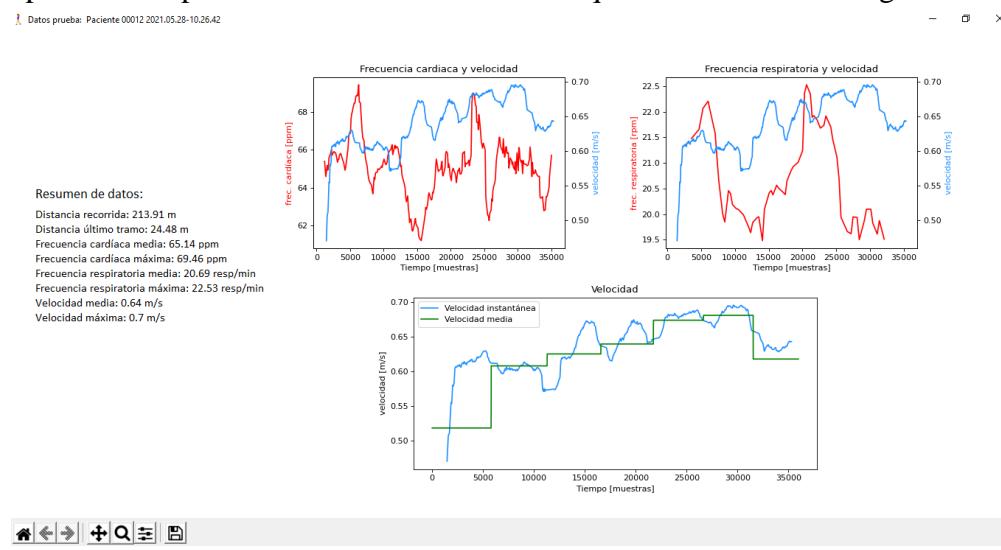


Figura 76: Ejemplo de visualización de los resultados.

En esta ventana se visualiza en la parte izquierda, aquellos resultados numéricos de interés, que son los que se enumeran a continuación:

- Distancia total recorrida
- Distancia recorrida en el último tramo
- Frecuencia cardíaca media
- Frecuencia cardíaca máxima
- Frecuencia respiratoria media
- Frecuencia respiratoria máxima
- Velocidad media
- Velocidad máxima

Por otro lado, se representan tres gráficas, donde las dos primeras muestran en una misma gráfica la velocidad instantánea frente a la frecuencia cardíaca (izquierda) y frecuencia respiratoria (derecha). En la gráfica inferior se compara la velocidad instantánea con la velocidad media en cada tramo.

Por último, la Figura 77 muestra la ventana que se visualiza si el usuario selecciona la opción de “REVISIÓN”.

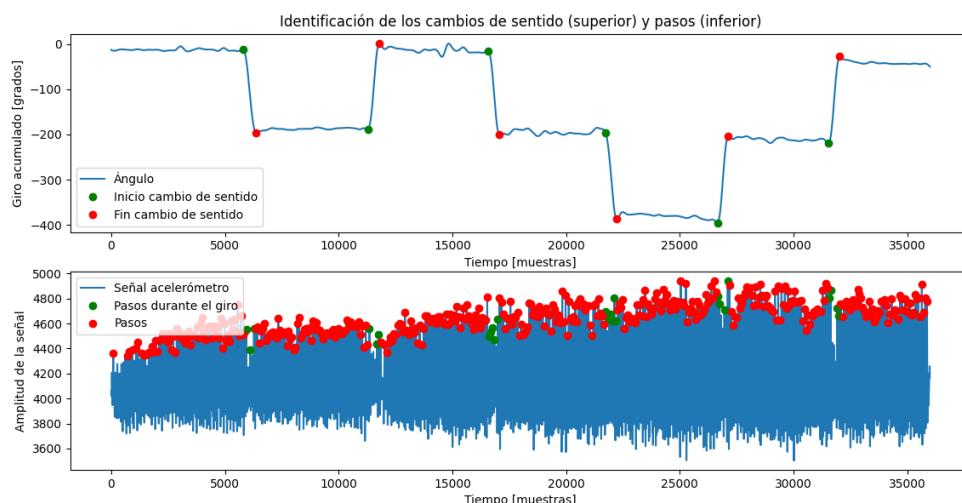
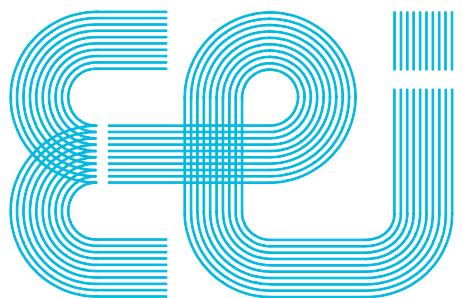


Figura 77: Ejemplo de revisión de los resultados.



Escuela de Ingeniería Industrial

TRABAJO FIN DE GRADO

Mejora de un sistema basado en dispositivos wearables para la monitorización automática de test de marcha en pacientes cardiológicos.

Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática

Documento

PRESUPUESTO

UniversidadeVigo

CONTENIDO

Contenido	2
Presupuesto	3
1.1 Recursos humanos	3
1.2 Recursos materiales	3
1.3 Licencias software	3
1.4 Precio total de desarrollo	3

PRESUPUESTO

1.1 Recursos humanos

Partida	Concepto	Cantidad [horas]	Coste unitario [€/h]	Coste total [€]
1	Formación	30	20,00	600,00
2	Desarrollo de la aplicación	240	20,00	4800,00
3	Realización y análisis de pruebas	90	20,00	1800,00
4	Elaboración de documentos	140	20,00	2800,00
Total				10000,00

Para este presupuesto no se han tenido en cuenta las horas de trabajo del personal del H. A. Cunqueiro empleadas en la realización de las pruebas sobre pacientes reales.

1.2 Recursos materiales

Partida	Concepto	Cantidad [ud.]	Coste unitario [€/ud.]	Coste total [€]
1	Equipo informático	1	500,00	500,00
2	Dispositivo wearable	1	300,00	300,00
Total				800,00

1.3 Licencias software

Partida	Concepto	Cantidad [ud.]	Coste unitario [€/ud.]	Coste total [€]
1	Licencia de Python	1	0,00	0,00
Total				0,00

1.4 Precio total de desarrollo

Mano de obra	10.000,00 €
Material	800,00 €
Licencias	0,00 €
Total	10.800,00 €

Asciende la totalidad del presente presupuesto a la cantidad de DIEZ MIL OCHOCIENTOS EUROS (10.800,00 €) IVA no incluido.