

MONITORIZACION DE LA FRECUENCIA CARDIACA EN PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA MEDIANTE TECNOLOGIA NO INVASIVA

Nerea Perez, Ane Uriarte, Patrick Vermander, Aitziber Mancisidor, Itziar Cabanes
 {nerea.perezo, patrick.vermander, aitziber.mancisidor, itziar.cabanes}@ehu.eus
 Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática,
 Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU

Resumen

La monitorización de variables fisiológicas en personas con movilidad reducida es de vital importancia para realizar una correcta evaluación de su estado funcional. En este trabajo, se presenta un sistema de monitorización basado en un reloj inteligente que permite monitorizar y almacenar la frecuencia cardiaca del usuario en tiempo real. El sistema propuesto está compuesto por dos aplicaciones, una para el reloj inteligente y otra para el teléfono móvil del usuario. Para validar el sistema, se han realizado diferentes ensayos con el reloj inteligente TicWatch Pro 3 y el teléfono móvil Xiaomi 11 Lite 5G. Los resultados muestran unas mediciones adecuadas, continuas y en tiempo real, mejorando la oferta comercial actual.

Palabras clave: Monitorización; Frecuencia Cardiaca; Reloj Inteligente; Movilidad Reducida

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día, según cifra la Organización Mundial de la Salud (OMS), hay más de mil millones de personas con alguna discapacidad, lo que supone casi un 15% de la población mundial [1]. En un estudio de 2011 la OMS estima que el 1% de la población mundial tiene problemas de movilidad [2]. Concretamente, en España hay 2,5 millones de personas con movilidad reducida [3]. Además, la discapacidad móvil aumenta exponencialmente con la edad, siendo este uno de los tipos más comunes de deficiencias funcionales [4].

Para estas personas, realizar una correcta evaluación y monitorización de su estado funcional es de vital importancia. Esto permite realizar una detección temprana y disminuir los riesgos derivados de la propia evolución o sintomatología de su enfermedad. Así mismo, esto puede contribuir al desarrollo de tratamientos específicos que permitan mejorar la calidad de vida de las personas afectadas. Para ello, es necesaria una buena monitorización del estado fisiológico del usuario que consiste en desarrollar sistemas que puedan medir y cuantificar los signos

vitales que son indicadores del estado funcional del paciente [5].

Con la intención de dar respuesta a esta necesidad, algunos autores han monitorizado variables como la temperatura corporal, la frecuencia cardiaca y/o la oxigenación en sangre. Sin embargo, algunas investigaciones han concluido que para determinar el estado de una persona no es aconsejable utilizar la oxigenación en sangre como variable más significativa, siendo más recomendable usarse como indicador auxiliar [6]. Por otro lado, se observa que las temperaturas corporales elevadas coinciden con el aumento de la frecuencia cardiaca [7]. Por lo tanto, del análisis bibliográfico, se concluye que la frecuencia cardiaca es el indicador más relevante para identificar el estado fisiológico de los usuarios, aunque pueda complementarse con otras mediciones.

La frecuencia cardiaca (FC) es la cantidad de veces que el corazón late por minuto. En un adulto sano suele tener entre 60 y 100 latidos por minuto. En deportistas, esta medición puede descender hasta 40 latidos por minuto.

Se puede obtener con un monitor pulmonar y medir el consumo pulmonar de oxígeno [7]. Otra forma es fijando un cinturón pectoral con un sistema de adquisición como el FC PolarH10 [8]. También se puede obtener mediante un medidor de oxígeno de muñeca con una precisión de $\pm 2\%$ [6], con cintas electromecánicas EMFi (Electro-mechanic Films) [9]–[11], con señales de fotoplethismografía (PPG) de corta duración a través de smartphones [12] o con mediciones de electrocardiogramas (ECG) realizadas con dos electrodos colocados en los lados del tórax [13].

La mayoría de estas opciones suponen una carga y responsabilidad para el paciente, ya que hay que ajustarlas con cableado y de manera invasiva en el pecho o la muñeca, lo cual supone un obstáculo mayor dificultad para su uso diario. Por ello, en los últimos años, diferentes grupos de investigación han empezado a utilizar dispositivos como relojes inteligentes [14], [15] o bandas que rodean el pecho para realizar este seguimiento de la manera menos invasiva posible [8].

Los relojes inteligentes, además de ser un elemento de uso cotidiano, permiten la captura de variables fisiológicas como temperatura, oxigenación o frecuencia cardiaca sin provocar incomodidad añadida a la persona. Aun así, la frecuencia con la que obtienen estos datos suele ser bastante pequeña y vienen programados para realizar las mediciones solo durante periodos de actividad física intensa. Además, estos relojes comerciales, no permiten adquirir los datos en tiempo real y guardarlos de forma eficaz en un fichero accesible tanto para el usuario como para el personal sanitario. No obstante, para las personas con movilidad reducida y para sus cuidadores, es de vital importancia conseguir unos buenos históricos de su actividad diaria continua y en tiempo real.

Ante esta situación, en este trabajo se presenta un sistema de adquisición de datos basado en un reloj inteligente que permite medir, monitorizar y guardar los datos de forma continua e inalámbrica en tiempo real. Para ser más exactos, como primer paso de la investigación, este artículo se centra en la monitorización de la frecuencia cardiaca. El sistema propuesto está compuesto por dos aplicaciones, una para el reloj inteligente y otra para el teléfono móvil del usuario. A diferencia de los sistemas comerciales, obtiene los datos de manera continua durante todo el día en tiempo real y los almacena en una base de datos accesible tanto para el usuario como para el personal sanitario. Realizando un seguimiento continuo podrán detectarse los diferentes estados que experimenta la persona a lo largo de todo el día y con ello se pueden detectar malos hábitos y anomalías. Al tratarse de un dispositivo cotidiano, permitirá al usuario acceder directo a los históricos y a las medidas en tiempo real que obtiene el sistema. Además, al estar incorporado en dispositivos de uso cotidiano y no invasivos, su uso no supondría un coste adicional para los usuarios.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2, se describe el desarrollo y diseño del sistema para la monitorización de la frecuencia cardiaca. En la sección 3, se detalla la validación de este software y se realiza un análisis de los resultados. Por último, en la sección 4, se resumen los resultados obtenidos y se enfatiza en las ideas y conclusiones más relevantes.

2 SISTEMA MONITORIZACIÓN

El sistema de monitorización está compuesto por dos aplicaciones: una aplicación para el reloj inteligente y otra aplicación para el teléfono móvil. Como se puede ver en la Figura 1 el sistema de monitorización funciona a través de una conexión Bluetooth comunicando el reloj inteligente con el teléfono móvil de forma inalámbrica.



Figura 1. Visión general del sistema de monitorización.

A lo largo de todo el día el reloj almacena datos y los muestra para el usuario. Posteriormente, en caso de querer analizarlos o procesarlos estos son extraíbles a una hoja de Excel con solo seleccionar esa opción. Esta puede almacenarse en el propio teléfono o enviarse por email desde la misma aplicación del móvil. Así, al estar todo concentrado en una aplicación sencilla, que consta de cuatro pantallas, se consigue un sistema mucho más accesible para una gran variedad de usuarios.

El software de monitorización desarrollado es compatible con dispositivos Android. En el caso de la aplicación para el reloj inteligente, esta es válida para dispositivos corporales con sistema operativo basado en Android, en concreto Wear OS. Este sistema operativo, a diferencia de otros, permite acceder a los datos primarios de los sensores en tiempo real. De igual manera, la aplicación del teléfono móvil está diseñada para poder ser instalada en cualquier dispositivo móvil que cuente con una versión de Android 10 o superior.

Ambas aplicaciones se han desarrollado en el entorno Android Studio para así poder adaptarse fácilmente a diferentes tipos de relojes y teléfonos móviles que funcionen con el sistema operativo de Android. El lenguaje de programación en el que se ha implementado ha sido Java. A continuación, se realiza una descripción más detallada de las dos aplicaciones desarrolladas incluyendo imágenes.

2.1. Aplicación para reloj inteligente

Para la aplicación del reloj inteligente se ha diseñado una interfaz gráfica (Figura 2). La aplicación determina si el sensor de frecuencia cardiaca está disponible en el dispositivo. Si es así, se accede al sensor, a través de las clases y métodos que proporciona la plataforma Android.

Una vez comprobado que el sensor está disponible, lo siguiente es establecer una conexión Bluetooth con el móvil. El protocolo que se ha utilizado para la conexión Bluetooth tiene la arquitectura servidor-cliente, siendo el reloj el servidor. Este se encarga de crear un hilo de comunicación y se mantiene a la

escucha hasta que le llegue una petición de conexión. Cuando la petición es solicitada y aceptada, se bloquea ese hilo de conexión para que los dos dispositivos puedan realizar la transferencia de datos.



Figura 2. Interfaz de la aplicación del reloj.

Tras establecer la conexión se leen los datos adquiridos por el sensor y se envían hasta que el otro dispositivo cierre la conexión. La frecuencia con la que se envían los datos es de 1s. Además, mientras se esté produciendo la transferencia de datos se imprimen en pantalla los valores de la frecuencia cardíaca en tiempo real, para no perder esa funcionalidad típica de los relojes comerciales.

2.2. Aplicación para teléfono móvil

El objetivo principal de la aplicación del teléfono móvil es la de visualizar y guardar en tiempo real los datos obtenidos a través de una conexión inalámbrica. Asimismo, permite crear una base de datos con el fin de guardar los datos para su posterior procesamiento.

En cuanto al almacenamiento de los datos, se ha creado una Base de Datos en SQLite. Se han diseñado dos tablas: en la primera se almacenan los usuarios y la fecha / hora de registro y en la segunda se almacenan en la misma fila los datos de la frecuencia cardíaca y el usuario al que pertenecen.

Teniendo esto en cuenta, se ha diseñado una aplicación que consta de 4 pantallas (ver la Figura 3). En la primera pantalla se registra el usuario del que se van a recoger los datos y automáticamente se guarda en la base de datos junto con la hora en la que se ha hecho el registro. En el caso de que se introduzca el mismo nombre de usuario saltará un mensaje de error informando de que ese nombre ya está registrado.

La segunda pantalla gestiona toda la conexión Bluetooth además de visualizar en tiempo real los valores de frecuencia cardíaca que se van recibiendo. En el caso del móvil, para establecer una conexión

Bluetooth, primero se realiza una búsqueda de los dispositivos que hay disponibles y se imprimen en una lista. De esa lista se selecciona el dispositivo con el que se quiere conectar y de esa manera se finaliza la búsqueda de dispositivos. A continuación, el móvil solicita la petición de conexión para que el reloj la acepte. Una vez establecida la conexión comienza la transferencia de datos, los cuales se imprimen en esa misma pantalla. Internamente, los valores recogidos se van guardando en un array para posteriormente poder graficarlos.

La tercera pantalla permite mostrar los datos transferidos (guardados en el array) en un gráfico, guardarlos en la base de datos, exportar los datos a formato csv y realizar el envío del documento a través del email.

La cuarta y última pantalla, se ha programado y diseñado para realizar búsquedas a través del nombre de usuario e imprimir el gráfico de frecuencias correspondiente a ese usuario junto con la fecha y hora en la que se hizo el registro.

3 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Con el fin de validar la eficacia y robustez del sistema de monitorización desarrollado, se han realizado diferentes ensayos. Para ello, se ha utilizado el reloj inteligente TicWatch Pro 3 [16]. En cuanto a sus características, es un reloj inteligente que cuenta con conexión Bluetooth como sistema de transmisión inalámbrica, cuenta con SO Android y con un conjunto de sensores donde está incluido el sensor de frecuencia cardíaca. Como hardware de adquisición, se ha usado el teléfono móvil Xiaomi 11 Lite 5G [17]. Este teléfono móvil cuenta con una versión de Android 11 instalada de fábrica.

Para comprobar que los datos obtenidos en las monitorizaciones son correctos, se han realizado las pruebas con dos relojes inteligentes diferentes. Por un lado, se ha utilizado la aplicación desarrollada con el TicWatch y, por otro lado, un AppleWatch de séptima generación con su propia aplicación comercial. A pesar de no poder extraer históricos de este último, ni obtener una medición en tiempo real, permite almacenar y visualizar los datos, validando así la aplicación propuesta. Con el objetivo de poder comparar las pruebas realizadas por ambos relojes se han empleado dos métricas comúnmente utilizadas para comparar series temporales: error RMSE (Root mean square error) y error MAE (mean absolute error).

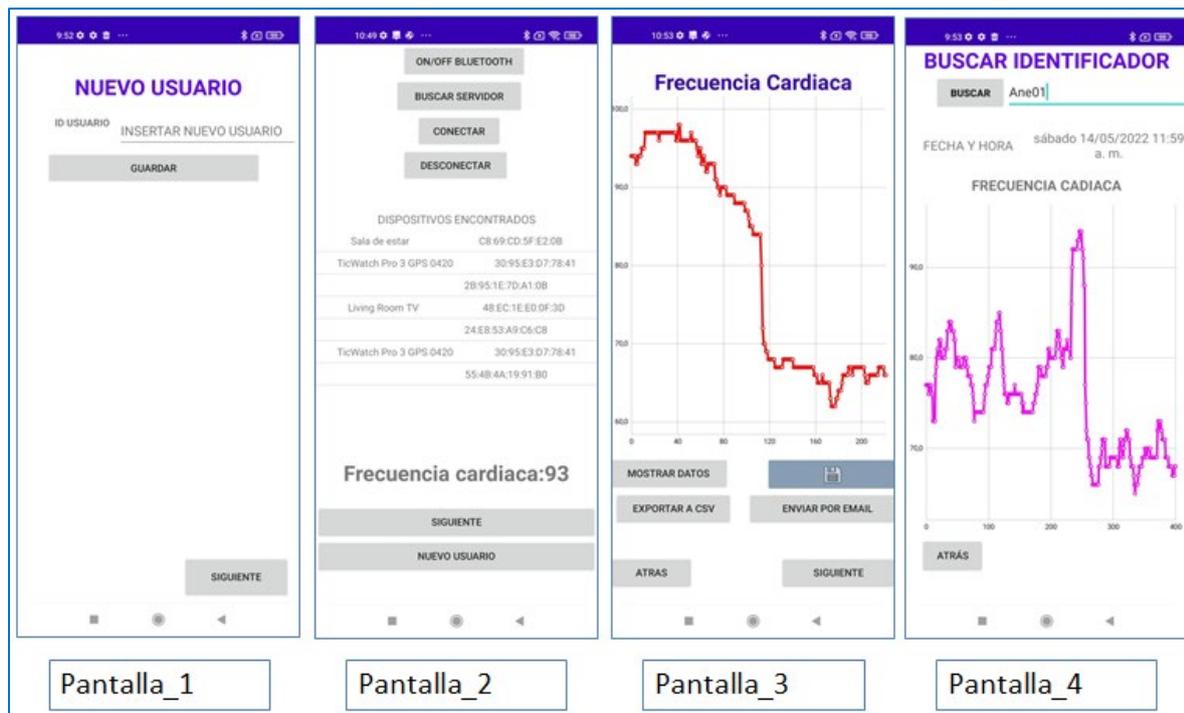


Figura 3. Las 4 pantallas que componen la aplicación móvil: Pantalla_1. Registro del usuario, Pantalla_2. Gestión de la conexión inalámbrica, Pantalla_3. Monitorización, Pantalla_4. Búsqueda de históricos.

Se han realizado varias pruebas en las que el individuo ha permanecido en sedestación como posición inicial, seguido de una prueba de esfuerzo (franja limitada por las rayas discontinuas verdes, desde el segundo 260 al segundo 340, en la Figura 4) y finalmente vuelta a la posición de inicio para su recuperación.

Los resultados obtenidos (ver Figura 4) muestran cómo los valores recogidos por el Applewatch son similares a los capturados por el TicWatch a través de la aplicación diseñada. Los errores RMSE y MAE logrados al comparar ambas evoluciones temporales son 7.17 y 4.34, respectivamente. Cabe mencionar que la frecuencia de obtención de los datos a través del Applewatch era de 5 segundos frente a la frecuencia de obtención de 1 segundo de la aplicación de monitorización en tiempo real. Además, el sistema desarrollado almacena los datos de manera continua y no solo en la actividad deportiva.

Una vez validado que la medición es adecuada y con índice de error aceptable, se ha querido probar la aplicación para personas con movilidad reducida ya que la mayoría de los relojes comerciales están diseñados para la monitorización de la actividad deportiva. En estos ensayos, se ha comprobado con el TicWatch que la aplicación captura y almacena datos de forma adecuada. Los ensayos han consistido en monitorizar a una persona en silla de ruedas.

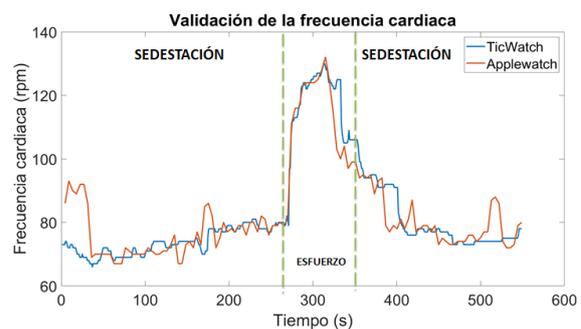


Figura 3. Resultados de la prueba de validación.

Para que la prueba sea más real, la monitorización se ha realizado en la calle, pasando por diferentes tramos, cuestas y zonas de obras. Se diferencian 4 zonas diferentes en la monitorización que se muestra en la Figura 5. La primera de ellas se trata de una zona de cuesta con pendiente ascendente, la segunda una zona de cuesta descendente, la tercera una zona del embaldosado propio de Bilbao y la cuarta y última, una zona de obras. En esa misma figura se puede ver cómo los valores de las frecuencias obtenidas oscilan entre los 65 y 95 rpm. Valores que concuerdan con lo que afirma la teoría, puesto que los valores de la frecuencia cardiaca de una persona en reposo suelen estar entre los 60 y 100 latidos por minuto.

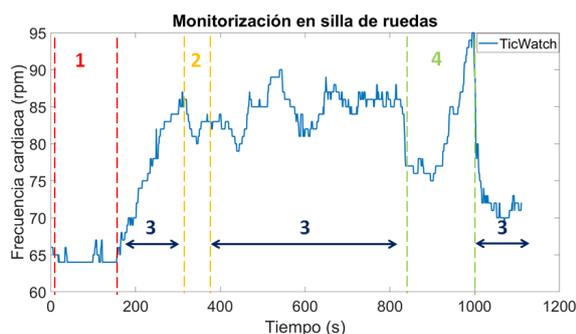


Figura 5. Monitorización de persona en silla de ruedas por las calles de Bilbao: (1) Pendiente ascendente, (2) Cuesta descendente, (3) Embaldosado, (4) Zona de obras.

Durante las monitorizaciones no ha habido ningún momento de desconexión entre los dos dispositivos y no ha habido pérdida de datos. En esta última monitorización (Figura 5), se han grabado 18 minutos y se han recogido 1110 muestras.

El reloj ha tenido una buena aceptación por parte del individuo al que se monitoriza, no ha causado ninguna molestia y su utilización, tanto del propio reloj como de la aplicación ha sido sencilla.

4 CONCLUSIONES

A la vista del aumento de personas con movilidad reducida y la necesidad de realizar una correcta evaluación y monitorización de su estado de salud, recientemente, se propone utilizar dispositivos vestibles como relojes inteligentes para realizar monitorizaciones no invasivas. Por ello, se observa la importancia de contribuir con un software adaptable a una gran variedad de dispositivos de uso cotidiano.

En este contexto, se ha desarrollado un sistema de monitorización compuesto por dos aplicaciones software, una para un reloj inteligente y la otra para un teléfono móvil. Estas aplicaciones permiten monitorizar en tiempo real y de manera no invasiva e inalámbrica la frecuencia cardíaca del individuo y almacenar esos datos en una base de datos.

Los diferentes ensayos de validación realizados han demostrado que las aplicaciones monitorizan de manera efectiva en tiempo real, mejorando con creces la frecuencia de muestreo y continuidad de medición de otros relojes comerciales. Además, se muestra en todo momento en la pantalla del teléfono móvil el valor de la frecuencia cardíaca a la vez que se almacena en una base de datos.

A diferencia de otras aplicaciones que solo permiten monitorizar la frecuencia cardíaca, el sistema de monitorización diseñado permitirá en un futuro adquirir más datos (otras variables auxiliares que complementen las mediciones de la frecuencia

cardíaca como son la temperatura corporal, la oxigenación en sangre o la presión arterial) de manera que permitirá monitorizar con alto grado de detalle el estado de salud de personas con movilidad reducida en su vida diaria.

A futuro, esta aplicación podría ser útil en el sector sanitario puesto que la creación de una base de datos en tiempo real puede contribuir al desarrollo de sensores virtuales que ayuden al personal sanitario. La monitorización del estado del paciente en su actividad diaria, puede aportar información útil para definir los tratamientos futuros para la prevención del empeoramiento de diferentes enfermedades.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por: FEDER/Ministerio de Ciencia e Innovación - Agencia Estatal de Investigación/Proyecto PID2020-112667RB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, la Universidad del País Vasco UPV/EHU (GIU19/045) y el Gobierno Vasco (Grupos: Ref. IT1726-22 y contratos predoctorales PRE-2021-1-0001 y PRE-2021-1-0214)

English summary

HEART RATE MONITORING USING NONINVASIVE TECHNOLOGY FOR PEOPLE WITH REDUCED MOBILITY

Abstract

The monitoring of physiological variables in people with reduced mobility is of essential for a correct evaluation of their functional state. In this work we present a monitoring system based on a smart watch that allows the user's heart rate to be monitored and stored in real time. The proposed system consists of two applications, one for the smart watch and one for the user's mobile phone. To validate the system, different tests have been carried out with the TicWatch Pro 3 smartwatch and the Xiaomi 11 Lite 5G mobile phone. The results show adequate, continuous, and real-time measurements, improving the current commercial offer.

Keywords: Monitoring; Heart rate; Smartwatch; Reduced mobility.

Referencias

- [1] ElDiarioes, “100.000 personas con movilidad reducida en España no salen nunca de casa por no tener ascensor o ayuda.” 2019.
- [2] J. di Tocco et al., “A Wearable System Based on Flexible Sensors for Unobtrusive Respiratory Monitoring in Occupational Settings,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 13, pp. 14369–14378, Jul. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3036443.
- [3] F. Yu, A. Bilberg, E. Stenager, C. Rabotti, B. Zhang, and M. Mischi, “A wireless body measurement system to study fatigue in multiple sclerosis,” *Physiological Measurement*, vol. 33, no. 12, pp. 2033–2048, 2012, doi: 10.1088/0967-3334/33/12/2033.
- [4] H. F. Satizabal, A. Grillon, G. Picasso, A. Upegui, G. Millet, and A. Perez-Uribe, “ActiDote – A wireless sensor-based system for self-tracking activity levels among manual wheelchair users,” *EAI Endorsed Transactions on Pervasive Health and Technology*, vol. 3, no. 11, p. 152896, Jul. 2017, doi: 10.4108/EAI.18-7-2017.152896.
- [5] S. P. Penagos and E. de Urgencias, “Control de signos vitales”.
- [6] D. E. Arias, E. J. Pino, P. Aqueveque, and D. W. Curtis, “Data Collection Capabilities of a New Non-Invasive Monitoring System for Patients with Advanced Multiple Sclerosis.”
- [7] S. J. A. Majerus, J. Ukwela, J. Lerchbacker, K. M. Bogie, and M. Kristi Henzel, “Development of Foot Displacement Detection Algorithm for Power Wheelchair Footplate Pressure and Positioning; Development of Foot Displacement Detection Algorithm for Power Wheelchair Footplate Pressure and Positioning,” 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), 2021, doi: 10.1109/EMBC46164.2021.9630709.
- [8] Organización Mundial de la Salud, “Discapacidad y salud.” 2021. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/disability-and-health>.
- [9] B. Drust, P. Rasmussen, M. Mohr, B. Nielsen, and L. Nybo, “Elevations in core and muscle temperature impairs repeated sprint performance,” 2005.
- [10] W. ben Mortenson, L. Demers, P. W. Rushton, C. Auger, F. Routhier, and W. C. Miller, “Exploratory Validation of a Multidimensional Power Wheelchair Outcomes Toolkit,” *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 96, no. 12, pp. 2184–2193, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.apmr.2015.08.430.
- [11] D. Jing, S. Zhang, and Z. Guo, “Fatigue driving detection method for low-voltage and hypoxia plateau area: A physiological characteristic analysis approach,” *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 148–158, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.IJTST.2020.01.002.
- [12] Y. Yue, D. Liu, S. Fu, and X. Zhou, “Heart Rate and Heart Rate Variability as Classification Features for Mental Fatigue Using Short-Term PPG Signals Via Smartphones Instead of ECG Recordings,” 2021 13th International Conference on Communication Software and Networks, ICCSN 2021, pp. 370–376, Jun. 2021, doi: 10.1109/ICCSN52437.2021.9463614.
- [13] G. Prigent et al., “Indirect estimation of breathing rate from heart rate monitoring system during running,” *Sensors*, vol. 21, no. 16, Aug. 2021, doi: 10.3390/S21165651.
- [14] Organización Mundial de la Salud, “Informe mundial sobre la discapacidad.” Malta, 2011.
- [15] “TicWatch Pro 3 GPS smartwatch - Go Beyond Limits.” <https://www.mobvoi.com/us/pages/ticwatchpro3gps> (accessed Jun. 23, 2022).
- [16] D. E. Arias, E. J. Pino, P. Aqueveque, and D. W. Curtis, “Unobtrusive Support System for Prevention of Dangerous Health Conditions in Wheelchair Users,” *Mobile Information Systems*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/4568241.
- [17] “Xiaomi 11 Lite 5G NE | Xiaomi España | Mi.com.” <https://www.mi.com/es/xiaomi-11-lite-5g-ne/> (accessed Jun. 23, 2022).



© 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC-BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed>)