

Aplicaciones de Monitoreo de Frecuencia Cardíaca sobre plataformas Open Source: Una revisión sistemática

Heart Rate Monitoring Applications on Open Source Platforms: A Review

DOI: <https://doi.org/10.17981/bilo.2.2.2020.1>

Fecha de Recepción: 28/08/2020. Fecha de Publicación: 07/09/2020

Edgar Barragán-Bustamante

Universidad de la Costa, CUC. Barranquilla (Colombia)
ebarraga2@cuc.edu.co

María Blanco-Ochoa

Universidad de la Costa, CUC. Barranquilla (Colombia)
mblanco21@cuc.edu.co

Cesar Rosales-Iriarte

Universidad de la Costa, CUC. Barranquilla (Colombia)
croales2@cuc.edu.co

Luis Díaz-Charris 

Universidad de la Costa, CUC. Barranquilla (Colombia)
ldiaz28@cuc.edu.co

Para citar este artículo:

E. Barragán Bustamante, M. Blanco Ochoa, C. Rosales Iriarte y L. Díaz Charris “Aplicaciones de Monitoreo de Frecuencia Cardíaca sobre plataformas Open Source: Una revisión sistemática”, BILO, vol. 2, no. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17981/bilo.2.2.2020.1>

Resumen

Introducción: Los desarrollos tecnológicos que se implementan en plataformas de código abierto (Open Source) han crecido considerablemente en la última década, ofreciendo soluciones fáciles de desarrollar, flexibles y de bajo costo. En el caso de las aplicaciones biomédicas desarrolladas sobre plataformas Open Source, el monitoreo de la frecuencia cardíaca es una de las aplicaciones con mayor desarrollo.

Objetivo: en este documento se presenta una revisión sistemática de la literatura, en la que se analizan los desarrollos actuales en Sistemas de Monitoreo de Frecuencia Cardíaca (SMFC) sobre plataformas Open Source. Se identifican los desarrollos más significativos, y las plataformas comúnmente usadas.

Metodología: Se realiza una revisión sistemática de la literatura de tipo Cochrane.

Resultados: Se presentan las tendencias en investigación acerca de los sistemas de monitoreo de frecuencia cardíaca usando plataformas Open Source.

Conclusiones: existe un gran desarrollo de las aplicaciones que implican el monitoreo de la frecuencia cardíaca. Sin embargo, su estudio no está dado por terminado. Puesto que, con la gran cantidad de datos disponibles gracias a esas aplicaciones, es posible aún, profundizar en la implementación de estudios estadísticos.

Palabras clave

Código abierto; frecuencia cardíaca; telemedicina; biomedicina.

Abstract

Introduction: Technological developments that are implemented in open source platforms have grown considerably in the last decade, offering easy-to-develop, flexible and low-cost solutions. In the case of biomedical applications developed on Open Source platforms, heart rate monitoring is one of the most developed applications.

Objective: this document presents a systematic review of the literature, in which current developments in Heart Rate Monitoring Systems (SMFC) on Open Source platforms are analyzed. The most significant developments and commonly used platforms are identified.

Method: A systematic review of the Cochrane-type literature is carried out.

Results: The trends in research about heart rate monitoring systems using Open Source platforms are presented.

Conclusions: there is a great development of applications that involve heart rate monitoring. However, his study is not finished. Since, with the large amount of data available thanks to these applications, it is still possible to deepen the implementation of statistical studies.

Key Words

Open Source; heart rate; E-health; biomedicine.

I. INTRODUCCIÓN

Las plataformas Open Source son tecnologías que proporcionan acceso abierto a componentes de hardware y software para el desarrollo de soluciones o aplicaciones tecnológicas, y permiten la integración de plataformas de diferentes fabricantes. Esta característica, les proporcionan versatilidad, desarrollos más amigables con el usuario, facilidad para el trabajo colaborativo, facilidad de despliegue, agilidad para modificaciones y ajustes, entre otras ventajas [1].

El proceso monitoreo de variables biomédicas en pacientes hospitalizados o con alguna condición de enfermedad es el más importante para la prestación de tratamientos adecuados, la identificación del estado de la recuperación o recaída del paciente, el reconocimiento de síntomas de alarma, entre otros [2]. La automatización de este proceso es de vital importancia, y se ha estudiado desde hace aproximadamente cincuenta años, iniciando con el estudio de [3]. Por otro lado, aplicaciones para el monitoreo biomédico en plataformas Open Source es un concepto de las últimas 2 décadas. En este sentido, la comisión europea promueve el uso de las plataformas Open Source a través de la ejecución de actos administrativos y renovaciones de licencia de software libre como se evidencia en [4].

Según un reporte de la Organización Mundial de la Salud (OMS) sobre enfermedades cardiovasculares [5], estas afecciones corresponden al 31% de las causas de muerte registradas en todo el mundo para el 2017. Además, se identifica que las principales causas de estas afecciones son el consumo de tabaco, las dietas malsanas y la obesidad, la inactividad física o el consumo nocivo de alcohol. En ese informe, además, insta a desarrollar estrategias para la prevención y tratamiento de las enfermedades cardiovasculares.

Así mismo, la frecuencia cardiaca es una de las variables biomédicas que más comúnmente son evaluadas para determinar el estado de salud de un paciente, sobre todo cuando presenta afecciones cardiovasculares [6].

De acuerdo con lo anterior, el desarrollo de aplicaciones electrónicas y de software para el monitoreo de la frecuencia cardiaca es una temática de gran relevancia. Lo anterior se conjuga perfectamente con los avances actuales en las tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), en lo que se relaciona con la obtención y tratamiento de grandes cantidades de datos para generar información útil. En este caso, información sobre el estado de salud de una persona.

Por lo tanto, en esta revisión se pretende responder a las siguientes preguntas:

¿Cuál es el estado actual de los desarrollos de aplicaciones para el monitoreo de frecuencia cardiaca sobre aplicaciones Open Source?

¿Cuáles son las plataformas Open Source más empleadas en estas aplicaciones?

¿Cuáles son las tendencias que marcan el desarrollo de estas aplicaciones?

II. METODOLOGÍA

Este trabajo está basado en las evidencias de estudios originales, se emplearon bases de datos de alto rigor científico y se aplicó un método para la definición de criterios de búsqueda y selección de las fuentes de información [7]. Además, se construyó una tabla metaanalítica para facilitar la organización y el análisis de la información de cada documento revisado.

A. *criterios de búsqueda*

El proceso de búsqueda se llevó a cabo en la base datos Scopus, empleando los criterios de búsqueda de acuerdo con las palabras claves de la pregunta planteada para esta revisión: “fuente abierta” y “Frecuencia Cardíaca”. Sin embargo, en la base de datos mencionada, estos criterios debieron aplicarse en el idioma inglés, para obtener mejores resultados: “Open Source”, y “Heart Rate”.

B. *Filtros*

Considerando la relevancia actual de la información a analizar, esta revisión fue limitada a los últimos seis años. Es decir, se tuvieron en cuenta los documentos publicados entre los años 2014 y 2019. A pesar de que los autores del presente documento tienen una licencia institucional de Scopus, existen documentos por los cuales hay que pagar para obtener acceso. Por lo tanto, hubo que descartar estos documentos, teniendo en cuenta sólo documentos de acceso abierto.

C. *Criterios de selección*

Para la selección de artículos, se aplicó como criterio de selección aquellos estudios con aplicaciones de monitoreo de la frecuencia cardíaca sobre plataformas Open Source. Por lo tanto, quedan excluidos aquellas investigaciones que emplean plataformas privadas y en los cuales no se hace referencia al desarrollo, estudio, análisis o implementación de aplicaciones para el monitoreo de la frecuencia cardíaca.

D. *Resultados de la búsqueda*

La búsqueda inicial aportó 117 documentos, de los cuales 79 resultaron de aplicar el primer filtro descrito en la sección 2.1.1. Sin embargo, debido a lo explicado en la misma sección hubo que aplicar el segundo filtro, resultando 20 documentos potenciales a analizar. Luego se procedió a aplicar el proceso de selección de documentos, el cual se especificó en la sección 2.2. Esta selección arrojó como resultado que los 20 documentos son potenciales para revisión. Luego, se procedió a la lectura completa de los documentos y se obtuvo que los 20 se ajustan a los requerimientos de esta revisión sistemática.

E. *Búsqueda manual*

Debido a las restricciones de acceso mencionadas, se realizó una búsqueda manual para complementar la búsqueda sistemática y el desarrollo explicativo de la misma. Esto se llevó a cabo usando sólo el criterio de búsqueda “heart rate”. De acuerdo con esto, se obtuvieron 10 documentos adicionales que fueron insumo teórico para el desarrollo de esta revisión. También se emplearon páginas web de organizaciones mundiales como la Organización Mundial de la Salud y Physionet.org.

En la Figura 1 se sintetiza el proceso de búsqueda y selección.

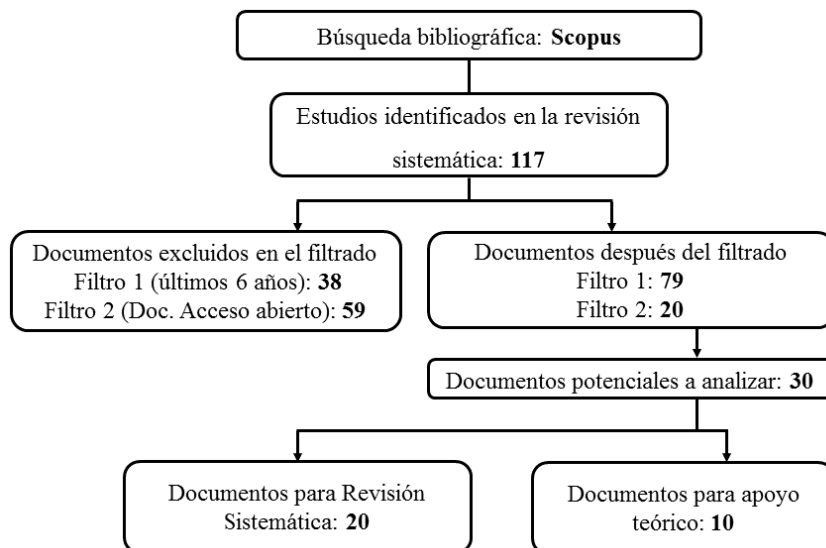


Figura 1. Diagrama de los estudios incluidos. Fuente: Autores.

F. Operacionalización de variables

A continuación, se presenta la operacionalización de las variables analizadas, teniendo en cuenta el objetivo de esta revisión.

Tabla 1. Operacionalización de las variables. Fuente: Autores.

Variable	Dimensiones	Indicadores
Estado actual de aplicaciones de monitoreo de frecuencia cardiaca sobre plataformas Open Source	Plataformas más comunes	Plataformas encontradas en la revisión y número de veces que se repite su uso.
	Tendencias que marcan el desarrollo de estas aplicaciones	- Desarrollos más importantes que marcan una distinción e influyen en los subsiguientes - Población a la que van dirigidas

G. Matriz metaanalítica

La información analizada se estructuró en una matriz metaanalítica, donde se establecieron los siguientes campos: nombre del documento, autores, resumen, palabras claves y la metodología declarada en cada documento. En la misma tabla se especificaron las variables que competen a esta revisión: Plataforma, población a la que van dirigidas, descripción específica del desarrollo. Esta última variable permite la identificación de las tendencias.

III. DISCUSIÓN

A. El monitoreo de la frecuencia cardiaca

La frecuencia cardiaca (FC) se define como el número de contracciones (latidos) que realiza el corazón en un minuto [8]. Normalmente, el monitoreo de la frecuencia cardiaca se lleva a cabo en condiciones específicas del paciente: durante

el reposo, en actividad física y en el sueño. Lo anterior, sumado a otras variables vitales y sintomatologías, permiten al médico hacer un diagnóstico de la salud del paciente [9].

La frecuencia cardiaca es uno de los signos vitales de mayor relevancia para los médicos, puesto que esta se ve afectada por diversos estímulos externos e internos al paciente. Es decir, que es una medida de la vitalidad de una persona [8]. Se han establecido rangos en los que la FC de una persona se considera en estado normal, para situaciones específicas: si la persona está en reposo, en actividades físicas no exigentes, en actividades físicas exigentes y en el sueño. Es generalmente aceptado que la FC de una persona en reposo puede estar entre 60 a 100 latidos por minuto [10]. En actividad física no exigente (por ejemplo, caminando) podría estar entre 100 y 150 latidos por minuto [10]. La FC en el sueño puede alcanzar valores inferiores a 60 latidos por minuto. En actividades físicas exigentes es muy variable y depende del sexo de la persona y puede determinarse a través de la siguiente ecuación: [11], [12].

$$FC_{ejercicio} = 74.8 + 0.76 \times (FC \text{ en descanso}) - 0.27 \times (edad) + 7.3 \times (S) \quad (1)$$

Donde S es una variable que depende del sexo de la persona. Por lo tanto, para hombres, S, toma el valor de 0 y para mujeres toma el valor de 1. Esta ecuación fue tomada de [11].

Sin embargo, la FC cambia de persona a persona, puesto que, no sólo depende de la actividad física. Existen otros factores que actúan sobre esta variable como el estado físico, el estado mental, las condiciones climáticas, enfermedades y el estado de ánimo [13].

B. El monitoreo de la frecuencia cardiaca con plataformas OpenSource

Las plataformas Open Source son un puente para el desarrollo de soluciones o aplicaciones en diferentes áreas de la ciencia y la tecnología. Para el caso de la bioingeniería, se constituye como un fuerte aliado, puesto que a partir de ellas se han generado una gran cantidad de aplicaciones que buscan facilitar el seguimiento y diagnóstico de la salud de las personas. En este sentido, tecnologías como la Telemedicina, y el monitoreo Biomédico han sido resultado de la continua investigación y desarrollo de soluciones a partir de estas plataformas [6], [13], [14].

Típicamente, el monitoreo de la FC es llevado en los centros médicos a través de equipos especializados. Sin embargo, actualmente existen desarrollos tecnológicos que permiten este monitoreo de forma portable y remota [8], [15], [16]. Estos desarrollos han permitido que se realice un monitoreo continuo sin necesidad de internar al paciente. Se han podido construir bases de datos (data sets) [14] con información de la frecuencia cardiaca y electrocardiografía, relacionándola con las actividades diarias de una persona y las condiciones ambientales [17].

Según la revisión sistemática llevada a cabo existen tendencias que marcan el desarrollo del monitoreo de la FC implementado en plataformas Open Source:

- Monitoreo simple
- Monitoreo para análisis estadístico y simulaciones
- Monitoreo en Fetos
- Sistemas vestibles o portables

Estas tendencias se relacionan todas entre sí. Es decir, estudios en la tendencia 1 puede tener también un componente de la tendencia 2 y 3 o de todas.

C. El monitoreo simple

Dentro de las tendencias de monitoreo simple, se encuentran desarrollos nacientes de ambientes educativos, que diseñan componentes básicos de un sistema de monitoreo de FC, entre estos: circuitos para la obtención de señales del corazón, plataformas web para la visualización de la información, diseño de filtros para mejora en la calidad de las señales del corazón [18], [19].

En esta misma tendencia, también existen aplicaciones para usos netamente médicos y de cobertura de los servicios de salud como sistemas de bajo costo para el monitoreo remoto en poblaciones alejadas y de escasos recursos económicos como en [20].

Otro de los usos netamente médicos son aplicaciones de monitoreo continuo para el seguimiento de pacientes con enfermedades crónicas como diabetes, estrés pos traumático, trastornos del sueño, entre otras [21], [22], [17], [23].

D. Monitoreo para análisis estadístico y simulaciones

Otra de las tendencias que marca el desarrollo de aplicaciones para el monitoreo de la frecuencia cardíaca y sus relacionadas, como lo son la electrocardiografía, la frecuencia respiratoria, la temperatura corporal y las condiciones ambientales [17]. Es el monitoreo para la alimentación de bases de datos de organizaciones internacionales y plataformas como Physionet.org [24]. Estas bases de datos o “data sets” contienen información sobre el monitoreo de frecuencia cardíaca en todo el mundo.

Esta es una de las mayores tendencias, debido a que los datos que contienen dichas plataformas, sirven de insumo para investigaciones médicas, que se adelantan a partir de la implementación de herramientas estadísticas para determinar diversidad de patrones de comportamiento según la población de estudio, determinación de factores de riesgo, determinación de patrones para la detección temprana de complicaciones cardiovasculares, entre otras [8], [14], [25], [26], [27], [28], [29], [30].

Este campo es uno de los más amplio, debido a la variedad de posibilidades y líneas de investigación que abre, al considerar distintas problemáticas: desde el análisis en fetos hasta el análisis en animales [31], [32], [33], [15], [34].

Por otro lado, estas mismas bases de datos son utilizadas también para el diseño de simuladores y generadores del comportamiento de frecuencia cardíaca. Estos simuladores, en la mayoría de los casos presentan una similitud con el comportamiento natural de un 95% al 99%, lo cual los hace útiles en ambientes educativos y de investigación en el área de aprendizaje autónomo y pruebas en las que usar seres humanos es antiético [9], [13], [35].

E. Monitoreo en Fetos

Una de las principales dificultades para el monitoreo de la frecuencia cardíaca en fetos es la interferencia de los signos de la madre. En este caso, las frecuencias cardíacas de madre e hijo se superponen, por lo tanto, los estudios se enfocan en la separación de dichas frecuencias, lo cual es posible a través de la implementación de filtros digitales con circuitos electrónicos o con softwares [9], [15], [31], [25], [32], [33].

F. Sistemas vestibles o portables

Las aplicaciones vestibles o portables corresponden transversalmente a todas las ya mencionadas anteriormente. Es decir, la tendencia más fuerte de todas las aplicaciones desarrolladas, cada una con su enfoque: Monitoreo simple, monitoreo para análisis estadístico y simulaciones, monitoreo en Fetos. Todas tienen un componente de portabilidad para los dispositivos de monitoreo. Esto se debe a que para las investigaciones, es de vital importancia el análisis del comportamiento de la frecuencia cardíaca en la cotidianidad de los pacientes, y no sólo en situaciones intrahospitalaria [36]. Así como también, proporcionar cobertura a lugares remotos [20], [37].

G. Comportamiento de las tendencias

A continuación, se presenta una gráfica que muestra el comportamiento de las tendencias analizadas en la presente revisión:

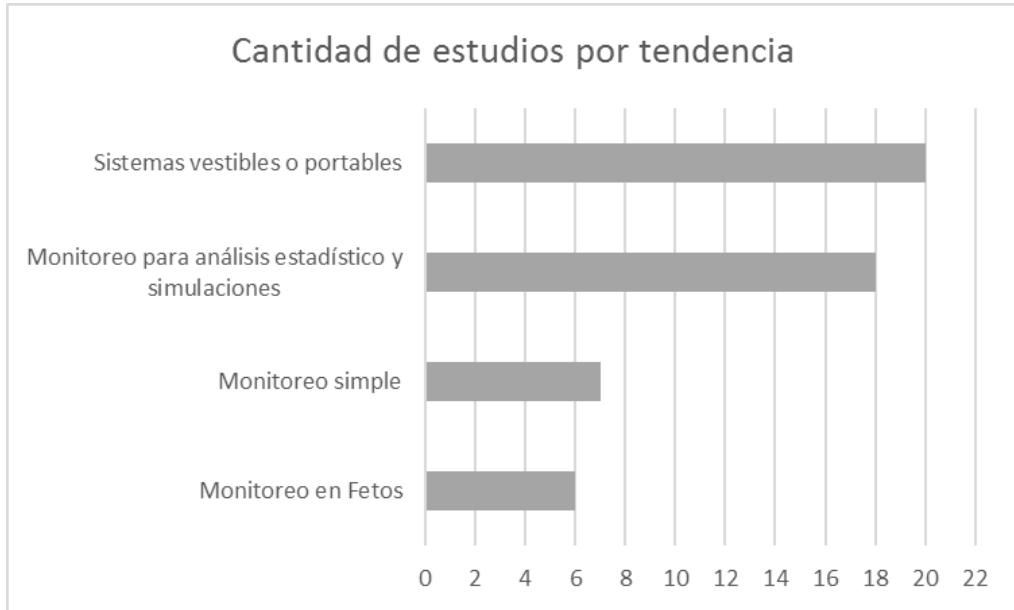


Figura 2. Cantidad de estudios por tendencia analizados en la presente revisión. Fuente: Autores.

H. Plataformas Open Source para el monitoreo de la frecuencia cardiaca

A continuación, se presenta una gráfica que muestra el comportamiento de las plataformas de desarrollo Open Source más comunes, que se analizaron en la presente revisión:

Este gráfico se entiende como la cantidad de veces que es empleada la plataforma en el global de los estudios analizados. Se aclara que un estudio puede incluir el uso de una o más plataformas.

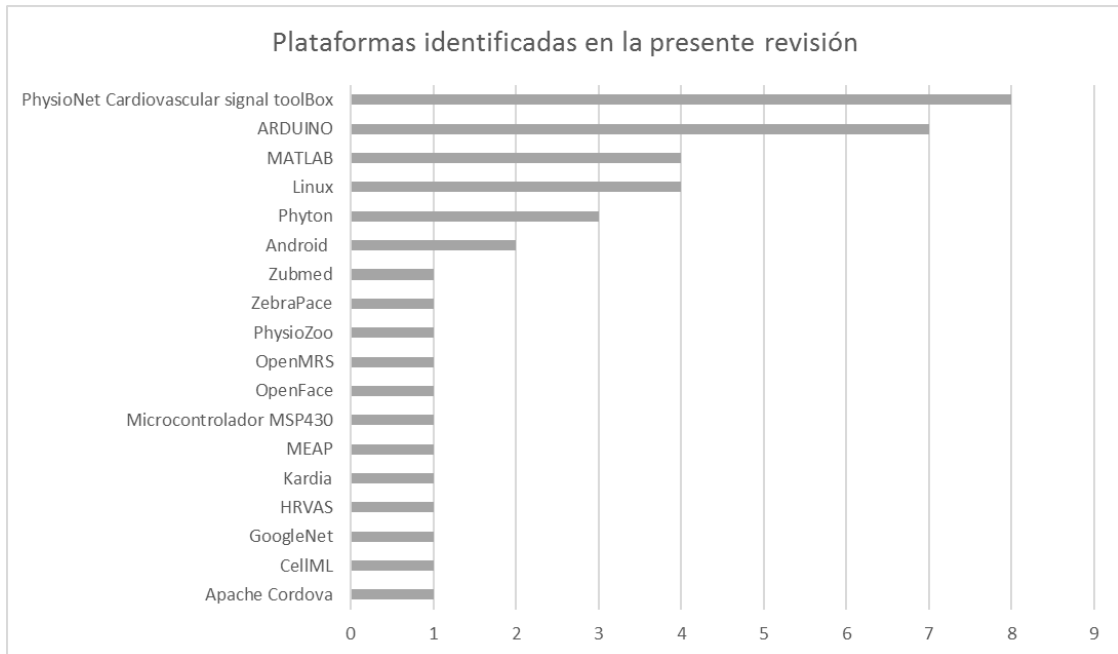


Figura 3. Plataformas más comunes identificadas. Fuente: Autores.

IV. CONCLUSIONES

De acuerdo con la revisión realizada, existen 4 tendencias que marcan el desarrollo de las aplicaciones para el monitoreo de la frecuencia cardíaca. Estas son: Monitoreo simple, monitoreo para análisis estadístico y simulaciones, monitoreo en fetos, sistemas vestibles o portables.

Las plataformas comúnmente empleadas para el desarrollo de aplicaciones para el monitoreo de frecuencia cardíaca son: Arduino, Matlab, Linux, Python y Android. Esto puede deberse a la generalización de su uso en otras aplicaciones y la enseñanza de su uso en las instituciones educativas.

Lo anterior permite identificar que existe un gran desarrollo de las aplicaciones que implican el monitoreo de la frecuencia cardíaca. Sin embargo, su estudio no está dado por terminado. Puesto que, con la gran cantidad de datos disponibles gracias a esas aplicaciones, es posible aún, profundizar en la implementación de estudios estadísticos a través de tecnologías como el Machine Learning, Data Analysis, Redes Neuronales, entre otras tecnologías del análisis de información y estadística.

V. FINANCIAMIENTO

Artículo de revisión de la literatura científica, derivado del Diplomado en producción científica e investigativa, Desarrollado en la Universidad de la Costa. Año de inicio: 2019, año de finalización: 2019. Programa de Ingeniería Electrónica.

REFERENCIAS

- [1] J. A. Merlo Vega, *Ecosistemas del acceso abierto*, 1era ed. Salamanca, España: Aquí La Fuente, 2018.
- [2] C. Park and B. Lee, "Real-time estimation of respiratory rate from a photoplethysmogram using an adaptive lattice notch filter," *Biomed. Eng. Online*, vol. 13, no. 1, 2014.
- [3] L. L. Hamilton, "An instant heart rate monitor.," *J. Appl. Physiol.*, vol. 24, no. 4, pp. 585–587, 1968.
- [4] Comisión Europea, "EUR-Lex - 32017D0863 - ES - EUR-Lex," 2017. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?qid=1562189303314&uri=CELEX:32017D0863>. [Accessed: 03-Jul-2019].
- [5] OMS, "Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC)," 2017. [Online]. Available: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)). [Accessed: 03-Jul-2019].
- [6] S. Shafi, S. Harish, S. Tej, and P. Raj, "An efficient and low cost real time heart rate monitoring and alerting system using virtual instrumentation," *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 325–328, 2019.
- [7] J. P. Gisbert, "¿ Cómo realizar , evaluar y utilizar revisiones sistemáticas y metaanálisis ?," vol. 27, no. 3, pp. 129–149, 2004.
- [8] A. Page, T. Soyata, J.-P. Couderc, and M. Aktas, "An open source ECG clock generator for visualization of long-term cardiac monitoring data," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 2704–2714, 2015.
- [9] J.-C. Edelmann, D. Mair, D. Ziesel, M. Burtscher, and T. Ussmueller, "An ECG simulator with a novel ECG profile for physiological signals," *J. Med. Eng. Technol.*, vol. 42, no. 7, pp. 501–509, 2018.
- [10] C. Funck-Brentano *et al.*, "Evaluation of the effects on the QT-interval of 4 artemisinin-based combination therapies with a correction-free and heart rate-free method," *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, 2019.
- [11] M. Siahkoughian and D. Khodadadi, "Narita target heart rate equation underestimates the predicted adequate exercise level in sedentary young boys," *Asian J. Sports Med.*, vol. 4, no. 3, pp. 175–180, 2013.
- [12] Z. S. Ciccone, O. A. Sinelnikov, and M. R. Esco, "Age-predicted maximal heart rate equations are inaccurate for use in youth male soccer players," *Pediatr. Exerc. Sci.*, vol. 30, no. 4, pp. 495–499, 2018.
- [13] I. García-Magariño and I. Plaza, "ABS-MindHeart: An agent based simulator of the influence of mindfulness programs on heart rate variability," *J. Comput. Sci.*, vol. 19, pp. 11–20, 2017.
- [14] A. N. Vest *et al.*, "An open source benchmarked toolbox for cardiovascular waveform and interval analysis," *Physiol. Meas.*, vol. 39, no. 10, 2018.
- [15] M. Varanini, G. Tartarisco, L. Billeci, A. Macerata, G. Pioggia, and R. Balocchi, "An efficient unsupervised fetal QRS complex detection from abdominal maternal ECG," *Physiol. Meas.*, vol. 35, no. 8, pp. 1607–1619, 2014.
- [16] P. M. Pinto Silva and J. P. Silva Cunha, "SenseMyHeart: A cloud service and API for wearable heart monitors," in *37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC 2015*, 2015, vol. 2015-Novem, pp. 4986–4989.

- [17] F. B. A. Schneider, A. S. de Melo, R. V. Andreão, and R. F. Dalvi, "Alternative class III distributed polysomnography system," *Res. Biomed. Eng.*, vol. 34, no. 2, pp. 127–137, 2018.
- [18] J. Gonzalez, E. Galvis, and C. Velandia, "Implementation of real-time filter using an open-source platform oriented to R-wave detection," in *21st Symposium on Signal Processing, Images and Artificial Vision, STSIVA 2016*, 2016.
- [19] A. Lichtman, R. Uzsák, M. Svetlák, and P. Fuchs, "A smart electrocardiogram monitoring system on android," in *2018 International Conference on New Trends in Signal Processing, NTSP 2018*, 2018, pp. 94–98.
- [20] G. D. Clifford *et al.*, "A scalable mHealth system for noncommunicable disease management," in *4th IEEE Global Humanitarian Technology Conference, GHTC 2014*, 2014, pp. 41–48.
- [21] B. B. Rekha, A. Kandaswamy, and V. M. Mitha, "Embedded realization of a real time Heart Rate Variability logger for at-home sleep studies," in *2015 IEEE Workshop on Computational Intelligence: Theories, Applications and Future Directions, WCI 2015*, 2016.
- [22] M. Cieslak *et al.*, "Quantifying rapid changes in cardiovascular state with a moving ensemble average," *Psychophysiology*, vol. 55, no. 4, 2018.
- [23] J. R. Balbin *et al.*, "Development of scientific system for assessment of post-traumatic stress disorder patients using physiological sensors and feature extraction for emotional state analysis," in *9th IEEE International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management, HNICEM 2017*, 2018, vol. 2018-Janua, pp. 1–6.
- [24] PhysioNet.org, "PhysioNet." [Online]. Available: <https://physionet.org/>. [Accessed: 05-Jul-2019].
- [25] R. Abbas, A. J. Hussain, D. Al-Jumeily, T. Baker, and A. Khattak, "Classification of Foetal Distress and Hypoxia Using Machine Learning Approaches," *14th International Conference on Intelligent Computing, ICIC 2018*, vol. 10956 LNAI. Springer Verlag, Department of Computer Science, Liverpool John Moores University, Liverpool, L33AF, United Kingdom, pp. 767–776, 2018.
- [26] L. Wang and X. Zhou, "Detection of congestive heart failure based on LSTM-based deep network via short-term RR intervals," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 7, 2019.
- [27] N. Vila Blanco, L. Rodríguez-Liñares, P. Cuesta, M. J. Lado, A. J. Méndez, and X. A. Vila, "gVARVI: A graphical software tool for the acquisition of the heart rate in response to external stimuli," *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 132, pp. 197–205, 2016.
- [28] J. Wang, W. Chen, and G. Hou, "Parallel computing method for HRV time-domain based on GPU," *15th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing, ICA3PP 2015*, vol. 9529. Springer Verlag, School of Software Technology, Dalian University of Technology, Economic and Technological Development Zone, Dalian, 116600, China, pp. 434–443, 2015.
- [29] S. K. Nair, H. Kasturiwale, and S. N. Kale, "Quantification of heart rate variability for health analysis," in *International Conference and Workshop on Electronics and Telecommunication Engineering, ICWET 2016*, 2016, vol. 2016, no. CP700, pp. 178–183.
- [30] J. Gierałowski, K. Ciuchciński, I. Grzegorzcyk, K. Košna, M. Soliński, and P. Podziemski, "RS slope detection algorithm for extraction of heart rate from noisy, multimodal recordings," *Physiol. Meas.*, vol. 36, no. 8, pp. 1743–1761, 2015.
- [31] J. Behar, A. Johnson, G. D. Clifford, and J. Oster, "A comparison of single channel fetal ecg extraction methods," *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 42, no. 6, pp. 1340–1353, 2014.
- [32] J. Behar, F. Andreotti, S. Zaunseder, Q. Li, J. Oster, and G. D. Clifford, "An ECG simulator for generating maternal-foetal activity mixtures on abdominal ECG recordings," *Physiol. Meas.*, vol. 35, no. 8, pp. 1537–1550, 2014.
- [33] F. Andreotti, F. Graser, H. Malberg, and S. Zaunseder, "Non-invasive Fetal ECG Signal Quality Assessment for Multichannel Heart Rate Estimation," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 64, no. 12, pp. 2793–2802, 2017.
- [34] J. A. Behar *et al.*, "PhysioZoo: A novel open access platform for heart rate variability analysis of mammalian electrocardiographic data," *Front. Physiol.*, vol. 9, no. OCT, 2018.
- [35] D. Yu, D. Du, H. Yang, and Y. Tu, "Parallel computing simulation of electrical excitation and conduction in the 3D human heart," in *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC 2014*, 2014, pp. 4315–4319.
- [36] M. S. Mahmud, H. Fang, and H. Wang, "An Integrated Wearable Sensor for Unobtrusive Continuous Measurement of Autonomic Nervous System," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 1, pp. 1104–1113, 2019.
- [37] L. Stanciu and A. Mucioniu, "Multifunctional portable equipment for medical and biometric applications," in *5th IEEE International Conference on E-Health and Bioengineering, EHB 2015*, 2016.
- [38] A. Sánchez Comas, A. Troncoso Palacio, S. Troncoso Mendoza, and D. Neira Rodado, "Application of taguchi experimental design for identification of factors influence over 3D printing time with fused deposition modeling," *IJMSOR*, vol. 1, no. 1, pp. 43–48, 2016.