

Mobile application to measure heart rate: restrictions, barriers and opportunities

Aplicación móvil para medir la frecuencia cardíaca: fiabilidad, barreras y oportunidades

Helio Henry Ramírez-Arévalo¹, Nancy Nubia Caro-Castellanos², Juan David Contreras-Parra³

Resumen: Teniendo en cuenta que la actividad física es de vital importancia en la vida diaria de los estudiantes universitarios, se detalla el desarrollo de una aplicación para determinar la frecuencia cardíaca para dispositivos móviles Android por medio de la cámara y el flash del dispositivo, la cual está disponible para el grupo de investigación Osiris & Bioaxis de la Facultad de Ingeniería de Sistemas y la Facultad de Psicología, para el proyecto Medición de actividad física y adherencia al ejercicio, con el fin de promover la actividad física y la adherencia por parte de los estudiantes de la Universidad el Bosque.

Esta aplicación permite realizar la medición de la frecuencia cardíaca analizando 40 fotogramas por segundo. Se detallaron las posibles limitantes a la hora de la medición de la frecuencia cardíaca con las diferentes versiones y la fiabilidad de la aplicación en comparación con un oxímetro, estableciendo que el medidor desarrollado posee una alta precisión en los

¹ Docente de Ingeniería de Sistemas de la Universidad El Bosque. D.C. Colombia. hramireza@unbosque.edu.co
<https://orcid.org/0000-0001-6420-5687>

² Docente de Psicología de la Universidad El Bosque. D.C. Colombia. caronancy@unbosque.edu.co

³ Estudiante de Ingeniería de Sistemas de la Universidad El Bosque. Bogotá. D.C. Colombia. jdcontreras@unbosque.edu.co

resultados obtenidos y que dependiendo de la versión variara el tiempo que tarda en arrojar el resultado.

Palabras clave: Informática educativa, Medicina deportiva, Salud, Sistema cardiovascular.

Abstract: Considering that physical activity is of vital importance in the daily lives of university students, this article outlines the development of an application for Android mobile devices that determines the user's heart rate using the device's camera and flash. This application has been made available to the Osiris & Bioaxis Research Group, jointly run by the Faculty of Systems Engineering and the Faculty of Psychology, for their project promoting physical activity and exercise adherence for students of Universidad el Bosque by measuring and tracking that activity.

The application allows heart rate measurement by analyzing illuminated images of the user's finger at a rate of forty frames per second. This study examined the possible limitations on the measurement of heart rate in different versions of the application and compared the reliability of the application with that of an oximeter. It was found that the application has high precision in the results obtained; and, depending on the version of the application, the time taken to output the measurement varies.

Keywords: Computer uses in education, Sports medicine, Health, Cardiovascular systems.

1. Introducción

En la sociedad que vivimos experimentamos como la revolución digital ha logrado que los dispositivos electrónicos móviles se conviertan en una parte indispensable en nuestro diario vivir cambiando la forma en que actuamos y pensamos [1], además de que nos ayudan en nuestras actividades diarias ahora permiten tener una atención continua a personas y servir como soporte clínico para la consulta de problemas relacionados con la salud [2]. Motivo por el cual los teléfonos inteligentes cuentan con diversas funcionalidades que nos permiten hacer

la vida más fácil y en el caso del auto cuidado personal no es una excepción por lo que vemos que cada vez más aplicaciones se crean para controlar y tener conocimiento del estado de salud de una manera inmediata y a bajo costo [3], como por ejemplo monitorear nuestra actividad física, medir la frecuencia cardiaca determinar las calorías quemadas y establecer rutinas que orienten a mantener el control de nuestro cuerpo, estas aplicaciones en salud electrónica (e-Health) [4], buscan fortalecer el uso de las TIC en el desarrollo de la salud y por medio de estas permitir que las personas conozcan su estado de salud de manera inmediata, además de esto se busca que cada vez más personas cuenten con alguna cobertura en salud, igualmente son maneras rentables y de bajo costo que amplían el alcance para lugares geográficamente complejos [5].

Con respecto a la medición del ritmo cardíaco que es importante en el avance de las nuevas tecnologías nos traen igualmente para e-Health los dispositivos para realizar el monitoreo inalámbrico que nos permiten conocer nuestra frecuencia cardiaca realizando un seguimiento continuo de nuestra actividad física [6], vemos como estas tecnologías son costosas lo que limitan la expansión además que estas aplicaciones deben permitir un soporte automatizado para la toma de decisiones en cuestiones de salud [7], es decir en muchas ocasiones identificar por ejemplo arritmias cardiacas o generar un concepto médico debe ser bajo la responsabilidad del proveedor del servicio, sin embargo falta más investigación de las tecnologías e-Health porque no hay estudios macros, estos estudios solo se están desarrollando en contextos pequeños, además se debe realizar análisis costo efectividad, igualmente se requiere un adecuado manejo de los datos que se extraen de estos dispositivos la seguridad de estos datos debe ser una prioridad en todos los casos [8].

Actualmente los índices de actividad física en población joven son muy bajos como lo demuestran los estudios, hay una fuerte evidencia que demuestra que la población joven poco se ocupa de realizar alguna actividad física y que se debe intervenir en las etapas tempranas

para incentivar que los jóvenes a corta edad inicien alguna actividad física, sin embargo no se revelan resultados consistentes que demuestren que funciona y como lo hicieron, por ende es importante contar con evidencia sin limitaciones metodológicas que permita adoptar un modelo que permita la intervención para reducir el comportamiento sedentario, se demuestra que las intervenciones en los contextos escolares con el apoyo de los padres reduciendo el tiempo que pasan en las pantallas puede ayudar a reducir las tendencias sedentarias como lo muestra esta revisión [9] [10].

Buscando que la población estudiantil realice alguna actividad física la Universidad el Bosque y su grupo de investigación OSIRIS & Bioaxis de la Facultad de Ingeniería de Sistemas y Psicología de la Salud, Deporte y Clínica de la Facultad de Psicología, con el fin de promover la actividad física y la adherencia a la actividad física por parte de los estudiantes de la Universidad el Bosque, busca crear una aplicación que permita a los estudiantes iniciar alguna actividad física y crear adherencia al ejercicio por la variable que se determinó denominada motivación al logro. El proyecto ya cuenta con una versión 1 desarrollada por un equipo de desarrollo anterior la cual permite realizar la medición de dos tipos de actividad física caminar/correr o andar en bicicleta, sin embargo, para la fase dos del proyecto que es la que se describe en este artículo se requiere realizar la medición de la frecuencia cardiaca que no se desarrolló añadiéndola como un nuevo módulo la cual nos permitirá determinar el esfuerzo que se realice durante la actividad realizada. Es bien conocido que actualmente existen en el mercado diversas aplicaciones gratuitas tanto para dispositivos Android como para IOS que permiten obtener la frecuencia cardiaca en latidos por minuto (bpm) con una aproximación o exactitud en la medición muy apropiada, sin embargo el limitante que se tiene con estas aplicaciones es que no se puede tener acceso a los datos que se generen de las mediciones realizadas y en aras de tener una aplicación ajustada a las necesidades del proyecto se desarrolla

el medidor de frecuencia cardiaca con el fin que permita tener acceso libre a los datos que se generen por el uso de estas y así mismo tomar decisiones con respecto a estos.

2. Antecedentes

2.1 Principios básicos

A continuación, se describen unos principios básicos que permitirán establecer un punto de partida contextual y que facilitaron la toma de decisiones en el desarrollo de la aplicación móvil, esto con el fin de establecer la mejor forma de realizar la medición de la frecuencia cardiaca.

2.1.2 Fotopletismografía

La fotopletismografía (PPG) que es un término que se introdujo por primera vez en la década de 1940, derivada de la pletismografía. La pletismografía es un concepto que se basa en el principio de que la sangre absorbe más la luz que los tejidos circundantes [11], para capturar la medida se debe calcular la reflectancia de la variación en la absorción de luz debido a los cambios volumétricos de la presión del volumen sanguíneo. La señal PPG se genera por la reflectancia de la luz ambiental que se dispersa a través de la capa de piel, la capa celular y los capilares, debido a la propagación de la luz a lo largo de los vasos sanguíneos generan la señal PPG. Estos conceptos se usan para medir la frecuencia cardíaca que permite conocer el estado físico de una persona, como lo describen en la siguiente revisión exhaustiva que se hace a la fotopletismografía [12].

Buscando ejemplificar cómo funciona la forma de onda fotopletismográfica se describe como una fuente de luz en un lado del tejido y un detector de luz en el otro. Se debe sostener una mano frente a una luz brillante y mirar el resplandor rojo crea un PPG en su forma más simple y accesible. Si los ojos fueran un poco más sensibles, se podía ver de manera sutil el

oscurecimiento de tu mano con cada latido del corazón, así mismo podemos ver también que la onda que se captura es incomprensible y bastante compleja [13] .

2.1.3 Fotopleletismografía de contacto

La fotopleletismografía de contacto que consiste en la medición del ritmo cardíaco se puede realizar capturando la señal PPG colocando un dedo sobre el lente de la cámara, para medir los cambios de color debido a los cambios en el volumen de sangre de la punta de los dedos [14]. Además se identifica que este método en comparación con un electrocardiograma (ECG) es altamente eficaz teniendo una aproximación por encima del 95% [15]. Se realiza una figura ilustrativa del funcionamiento de la PPG de contacto que consiste en colocar un dedo en la cámara que posee el teléfono. La cámara se coloca directamente sobre la piel y el flash incorporado proporciona la fuente de luz necesaria en el rango visible para la reflexión de las células sanguíneas como lo podemos ver en la Figura 1.



Figura 1. Fotopleletismografía de contacto

Fuente: elaboración propia.

La fotopleletismografía de contacto resulta ser la practica más acertada para la medición del ritmo cardíaco, según el estudio realizado a 40 participantes donde se realizaron 631 mediciones de la yema del dedo y 626 medidas de PPG facial, se logró demostrar que la estimación de PPG de la frecuencia cardiaca en reposo desde la punta de los dedos y la cara demostró una precisión muy alta inferior al 1%, además se pudo establecer que a la hora de realizar alguna actividad física la fotopleletismografía a distancia es un poco menos precisa a la hora de hacer ejercicio por los cambios físicos que presenta la persona como el sonrojo o la respiración agitada lo que ocasiona que no se capture bien la imagen y la medición sea menos precisa [14].

Adicionalmente un estudio comparativo demostró que la efectividad de las aplicaciones móviles en la medición de la frecuencia cardiaca usando PPG, donde se establece que es alta la fiabilidad de los resultados en comparación con un ECG, pero señala que es un compromiso conjunto entre los profesionales de la salud y los usuarios de las aplicaciones adicionalmente que se deben hacer más trabajo de campo con diferentes poblaciones y en diferentes condiciones ya que los estudios encontrados además que los realizan profesionales de la salud se hacen en ambientes controlados lo que influye en los resultados obtenidos [16].

Así mismo un estudio para la aplicación “iPhysioMeter” que se desarrolló para para ejecutarse en teléfonos inteligentes iPhone 4s en adelante, se determinó que es importante el tiempo que el usuario debe mantener el dedo sobre la cámara, el cual no debe ser inferior a 6 segundos como mínimo para esta aplicación, ya que la frecuencia cardiaca se calcula a partir de los intervalos pico a pico en la onda de pulso. Una limitación importante que se presenta con esta aplicación es que en el evento que suceda un déficit de pulso ocasionado por una arritmia cardiaca la aplicación tomara datos errados comparados con un ECG [17].

2.1.3 fotopleletismografía sin contacto o fotopleletismografía remota

La fotopleletismografía remota consiste en medir la frecuencia cardíaca sin contacto con la piel solo con el uso de imágenes de vídeo. Este método consiste en determinar el flujo rítmico de la sangre arterial, denominado pulso del volumen sanguíneo que produce variaciones periódicas en el color de la piel estas variaciones luego se cuantifican en una señal temporal para el análisis, el problema que se encuentra es de las mediciones de La fotopleletismografía remota (RPPG) consiste en la separación de señal en el que se supone que el pulso cardíaco rítmico, que aparece como variaciones en el color de la piel, se mezcla linealmente con las huellas temporales de los datos de color de las cámaras [18]. Se usan bases de datos con mediciones y vídeos de ritmo cardíaco para determinar el ritmo cardíaco y presenta una limitación del movimiento es decir que no se puede calcular la señal de ritmo cardíaco en estado físico [19].

Así mismo un estudio reciente demuestra una de las más grandes limitaciones que presenta la RPPG indica que cualquier movimiento leve podría mover un área relativamente oscura dentro y fuera de las regiones de interés que está capturando por que los métodos de detección del rostro pueden tener errores al rastrear los movimientos, adicional a esto la postura que se toma en frente de la cámara juega un rol fundamental en la calidad de la medición y una iluminación más uniforme o las locaciones variadas de iluminación pueden afectar las mediciones adicionalmente la cámara debe tener una buena resolución para mejorar el promedio de píxeles capturados [20].

3. Metodología de la Propuesta

En esta sección se discute el sistema de monitoreo de frecuencia cardíaca propuesto, teniendo en cuenta las investigación realizadas que permitieron establecer que en aras de seleccionar el mejor método que permitiera medir la frecuencia cardíaca se seleccionó la fotopleletismografía de contacto por que según los estudios analizados esta es la forma más efectiva de realizar la medición con dispositivos móviles, adaptándose mejor a las necesidades del proyecto, este el

punto de partida para iniciar el desarrollo del software. Se define el diagrama de componentes ver Figura 2.

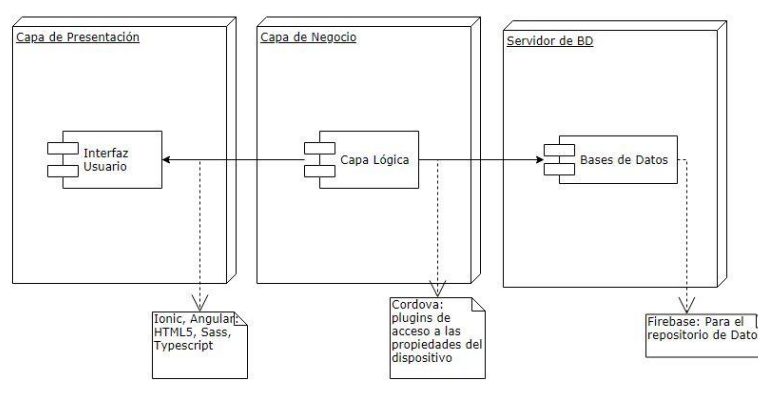


Figura 2. Diagrama de componentes

Fuente: elaboración propia.

El medidor desarrollado es una aplicación fácil de usar donde por medio de la cámara y el flash del dispositivo móvil se establecerá la frecuencia cardiaca. La aplicación se desarrolló con el framework Ionic usando HTML5, Sass, Type Script para la capa visual, esto porque Ionic maneja una curva rápida de aprendizaje y permite el desarrollo multiplataforma. La capa lógica funciona gracias a un plugin llamado heartbeat-cordova-plugin desarrollado por la empresa LiteKey ubicada en San Francisco Estados Unidos, para realizar la medición del ritmo cardiaco, este es de licencia libre y se encuentra disponible en Github permitiendo realizar la toma de la frecuencia cardiaca con el flash y la cámara del dispositivo. Se realizaron modificaciones para analizar más fotogramas por segundo lo que permite tener una mayor precisión en la medición y que la medición se obtenga más rápido. Por último, para la persistencia de los datos se manejó con la base de datos de Google Firebase y los datos de la gráfica se están almacenando en local storage del dispositivo se tiene en cuenta solo los últimos 6 valores y los siguientes se van eliminando en forma de pila, lo que permite que la aplicación no ocupe mucho espacio en el dispositivo.

4. Modo de Uso

Se establecieron las funcionalidades principales del actor principal como se observa en el diagrama de casos de uso general que se estableció para la aplicación móvil, en el cual se muestran las diferentes funcionalidades con los que cuenta el medidor como podemos ver en la Figura 3.

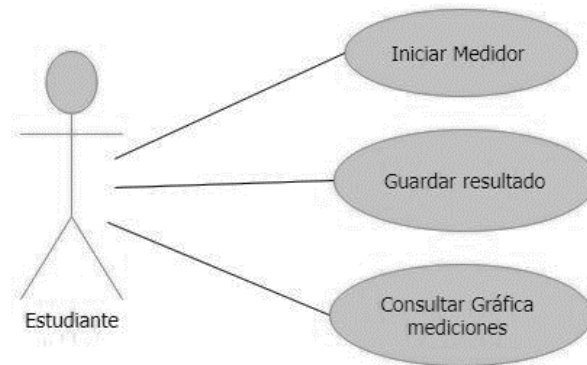


Figura 3. Diagrama de casos de uso

Fuente: elaboración propia.

Al iniciar la aplicación se podrán realizar los pasos que se observan en el diagrama de secuencia inmediatamente al ingresar al módulo del medidor se podrá observar el primer layout ver Figura 4.



Figura 4. Layout 1 aplicación móvil

Fuente: elaboración propia.

En donde se obtendrá la información acerca de cómo usar el medidor y dos botones, los cuales son iniciar el medidor y consultar la gráfica de las mediciones realizadas al seleccionar la opción para iniciar el medidor desplegara el segundo layout 2 ver Figura 5.



Figura 5. Layout 2 aplicación móvil

Fuente: elaboración propia.

En la segunda vista se activara el flash del dispositivo y se iniciara a realizar el análisis de 40 fotogramas en 10 segundos según la versión dispositivo variara el tiempo que tarda en realizar la medición, esta vista cuenta con dos botones uno para regresar a realizar otra medición y el siguiente para ingresar a consultar las mediciones realizadas como se puede ver en este tercer layout ver Figura 6, por último se puede revisar cuales han sido las ultimas 5 frecuencias cardiacas en el gráfico el cual le asigna la hora y el día cuando se realizó la medición.



Figura 6. Layout 3 aplicación móvil

Fuente: elaboración propia.

5. Pruebas Realizadas

Las diferentes pruebas que se le realizaron a la aplicación en cuanto al funcionamiento en las versiones de Android disponibles en el mercado, desde donde se analizara el funcionamiento con respecto al tiempo que tarda el dispositivo en arrojar la medición además de esto, se realizaron pruebas con un oxímetro de pulso para determinar la fiabilidad de las mediciones realizadas esto con el fin de elaborar una comparación con las demás aplicaciones disponibles y determinar el porcentaje de error que posee el medidor.

Como se puede observar en la Figura 7, se establecieron las versiones de Android con las cuales se hicieron las pruebas del software adicional en cada prueba se calculó el tiempo que tarda la aplicación en arrojar el resultado desde que el usuario inicia a realizar la medición.

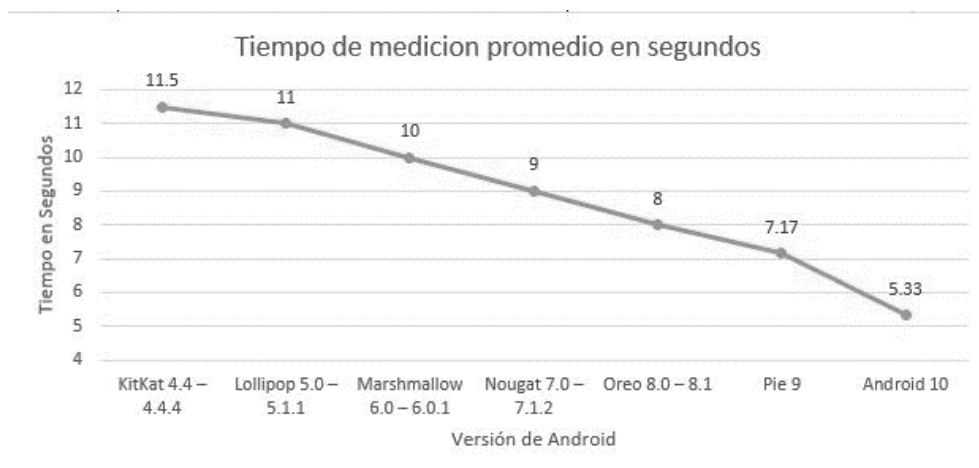


Figura 7. Tiempo de medición

Fuente: elaboración propia.

Para esta segunda prueba se realizó la comparación de las medidas con un oxímetro de pulso y con la medida que se estableció en los diferentes dispositivos arrojando los siguientes valores como se observan en la Figura 8.



Figura 8. Mediciones realizadas en comparación con un oxímetro

Fuente: elaboración propia

6. Resultados

Con respecto a la variabilidad del tiempo en que tarda la aplicación en arrojar el resultado se realizaron un total de 30 pruebas con diferentes dispositivos y diferentes usuarios, donde se pudo evidenciar que el tiempo que tarda el medidor en arrojar el resultado después de realizar la medida varía según la versión del software donde se esté realizando la medición en comparación de la versión de Android 4.4 a la versión de Android 10 tarda aproximadamente el doble, sin embargo el tiempo de la medida es apropiado comparado con otras aplicaciones disponibles en la tienda de aplicaciones en Play Store por lo cual se puede decir que en tiempo la medición es apropiada con respecto al tiempo que tarda el realizar la medición. Con respecto a los errores que se han determinado en las aplicaciones móviles se realizó la siguiente investigación para poder establecer una comparación con las medidas realizadas con la aplicación: según un estudio donde evalúan la confiabilidad de las aplicaciones móviles con sistema operativo Android, en comparación con el pulso radial y un oxímetro de pulso portátil, se concluye que existe una correlación con un oxímetro de pulso y las aplicaciones móviles

indicando que pueden servir de instrumentos válidos para determinar la frecuencia cardíaca en personas adultas teniendo una alta fiabilidad estando en un 97.2% [21].

Además el siguiente estudio realizado en el 2017 demuestra que al realizar la comparación de 4 aplicaciones, para PPG de contacto se utilizaron las siguientes aplicaciones: Instant Heart Rate, Heart Fitness, usada para PPG sin contacto, Whats My Heart Rate y Cardiio, estas aplicaciones solo disponibles para sistema operativo IOS, demostraron que la precisión de la frecuencia cardíaca medida por las aplicaciones en comparación con el ECG son: Instant Heart Rate 83%, , Heart Fitness 96%, Whats My Heart Rate 62%, Cardiio 61%, Pulse Oximetry 92%. Donde se evidencia las diferencias considerables entre las aplicaciones probadas y se expone que las mediciones de PPG sin contacto tuvieron un rendimiento significativamente más bajo en comparación con las mediciones basadas en la yema del dedo PPG de contacto [14].

Como se puede ver en la Figura 8 , se realizaron 30 pruebas validando que las personas realizaran la medición de manera adecuada esto quiere decir que el dedo índice estuviera de manera correcta alineado con la cámara y el flash del celular, se descartaron las pruebas donde la medida no fue correcta por diversos factores de movimiento o de que la medida no fuera acertada, todas las pruebas se realizaron en reposo no se realizaron pruebas durante o después de realizar algún ejercicio físico, estas medidas se establecieron de manera simultánea entre la aplicación y el oxímetro de pulso y los valores se llevaron a una base de datos para su posterior análisis. Dando como conclusión un error absoluto de 6% y un error relativo del 12% esto quiere decir que la aproximación del medidor tiene un error muy bajo con respecto a las aplicaciones actuales en el mercado lo que puede indicarnos que el medidor desarrollado es bastante acertado y que está calculando las mediciones con una proximidad apropiada a los intereses de la investigación.

7. Conclusiones

A pesar de la cantidad de aplicaciones disponibles hoy en día no es sencillo encontrar una aplicación que sea adaptable a una población y a un entorno específico además que estos datos estén disponibles para que se tomen decisiones con respecto a los mismos. Debido a las diferentes aplicaciones en el mercado es posible que cada persona o grupo de personas trabaje con diferentes aplicaciones lo que hace aún más difícil el acceso a los datos por lo cual el proyecto es una alternativa viable para calcular la frecuencia cardíaca de una manera acertada, y con respecto a los datos estimar el esfuerzo que se está realizando durante la actividad física. El sistema es intuitivo y permite que se realice la medición de una manera muy sencilla, en las observaciones realizadas no se tuvo que establecer ninguna clase de manual para que los usuarios realizaran la medición o hicieran la consulta de las mediciones almacenadas, todos lo hicieron de manera intuitiva.

Una de las principales utilidades de esta aplicación se encuentra en poder realizar un análisis de los datos obtenidos de los diferentes usuarios y poder determinar el nivel de esfuerzo que realizan, además el medidor brinda una opción para los estudiantes que deseen monitorear la frecuencia cardíaca de una manera simple manteniendo persistencia en sus mediciones.

8. Trabajo a futuro

El trabajo a futuro es llevar el desarrollo a los dispositivos con sistema operativo IOS, aunque la aplicación está desarrollada de manera híbrida en esta versión no se realizó la prueba en dispositivos IOS, esto por falta de infraestructura tecnológica, sin embargo, queda disponible el código fuente para crear la aplicación en este sistema operativo. Con esto se podría llegar a más usuarios y tener un mayor impacto.

Referencias

- [1] S. K.-E. Gan, "The history and future of scientific phone apps and mobile devices," *Sci. Phone Apps Mob. Devices*, vol. 4, no. 1, p. 2, 2018. <https://doi.org/10.1186/s41070-018-0022-8>
- [2] Y. J. Park and D. D. Shin, "Contextualizing privacy on health-related use of information technology," *Comput. Human Behav.*, vol. 105, p. 106204, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.106204>
- [3] S. Becker, T. Miron-Shatz, N. Schumacher, J. Krocza, C. Diamantidis, and U.-V. Albrecht, "mHealth 2.0: Experiences, Possibilities, and Perspectives," *JMIR mHealth uHealth*, vol. 2, no. 2, p. e24, 2014. <https://doi.org/10.2196/mhealth.3328>
- [4] T. de Wilt, A. Versluis, A. Goedhart, E. Talboom-Kamp, and S. van Delft, "General practitioners attitude towards the use of eHealth and online testing in primary care," *Clin. eHealth*, vol. 3, pp. 16-22, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ceh.2020.02.002>
- [5] B. Ebenso et al., "Impact of using eHealth tools to extend health services to rural areas of Nigeria: Protocol for a mixed-method, non-randomised cluster trial," *BMJ Open*, vol. 8, no. 10, 2018. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2018-022174>
- [6] J. I. Baile, R. Palomo Santos, and M. J. González Calderón, "¿Es necesario educar en e-health? Conclusiones a partir de las valoraciones de un grupo de estudiantes universitarios," 2017.
- [7] P. Cerrato and J. Halamka, "Chapter Two - Innovations in mHealth, Part 2: Electronic Health Record-Linked Apps, Remote Patient Monitoring, and the Internet of Things," P. Cerrato and J. B. T.-T. T. P. of M. M. Halamka, Eds. Academic Press, 2019, pp. 17-40. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814923-2.00002-7>
- [8] J. A. Walsh 3rd, E. J. Topol, and S. R. Steinhubl, "Novel wireless devices for cardiac monitoring," *Circulation*, vol. 130, no. 7, pp. 573-581, Aug. 2014. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.114.009024>
- [9] P. C. dos Santos, V. C. Barbosa Filho, J. A. da Silva, A. da S. Bandeira, G. Minatto, and K. S. da Silva, "What Works in Sedentary Behavior Interventions for Youth: A Review of Reviews," *Adolesc. Res. Rev.*, vol. 4, no. 3, pp. 267-292, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40894-018-0105-4>
- [10] S. J. H. Biddle, I. Petrolini, and N. Pearson, "Interventions designed to reduce sedentary behaviours in young people: a review of reviews," *Br. J. Sports Med.*, vol. 48, no. 3, pp. 182-186, 2014. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-093078>
- [11] D. Castaneda, A. Esparza, M. Ghamari, C. Soltanpur, and H. Nazeran, "A review on wearable photoplethysmography sensors and their potential future applications in health care," *Int. J. Biosens. Bioelectron.*, vol. 4, no. 4, pp. 195-202, 2018. <https://doi.org/10.15406/ijbsbe.2018.04.00125>

- [12] M. A. Hassan et al., "Heart rate estimation using facial video: A review," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 38, pp. 346-360, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2017.07.004>
- [13] A. A. Alian and K. H. Shelley, "Photoplethysmography," *Best Pract. Res. Clin. Anaesthesiol.*, vol. 28, no. 4, pp. 395-406, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.bpa.2014.08.006>
- [14] B. P. Yan et al., "Resting and Postexercise Heart Rate Detection from Fingertip and Facial Photoplethysmography Using a Smartphone Camera: A Validation Study," *JMIR Mhealth Uhealth*, vol. 5, no. 3, p. e33, 2017. <https://doi.org/10.2196/mhealth.7275>
- [15] F. Guede-Fernández, V. Ferrer-Mileo, M. Mateu-Mateus, J. Ramos-Castro, M. Á. García-González, and M. Fernández-Chimeno, "A photoplethysmography smartphone-based method for heart rate variability assessment: device model and breathing influences," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 57, p. 101717, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.101717>
- [16] Í. Tayfur and M. A. Afacan, "Reliability of smartphone measurements of vital parameters: A prospective study using a reference method," *Am. J. Emerg. Med.*, vol. 37, no. 8, pp. 1527-1530, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2019.03.021>
- [17] K. Matsumura and T. Yamakoshi, "iPhysioMeter: A new approach for measuring heart rate and normalized pulse volume using only a smartphone," *Behav. Res. Methods*, vol. 45, no. 4, pp. 1272-1278, 2013. <https://doi.org/10.3758/s13428-012-0312-z>
- [18] W. Wang, A. C. den Brinker, and G. de Haan, "Single-Element Remote-PPG," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 66, no. 7, pp. 2032-2043, 2019. <https://doi.org/10.1109/TBME.2018.2882396>
- [19] R. Macwan, Y. Benezeth, and A. Mansouri, "Heart rate estimation using remote photoplethysmography with multi-objective optimization," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 49, pp. 24-33, Mar. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2018.10.012>
- [20] M. A. Hassan, A. S. Malik, D. Fofi, B. Karasfi, and F. Meriaudeau, "Towards health monitoring using remote heart rate measurement using digital camera: A feasibility study," *Measurement*, vol. 149, p. 106804, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.07.032>
- [21] M. E. Losa-Iglesias, R. Becerro-de-Bengoa-Vallejo, and K. R. Becerro-de-Bengoa-Losa, "Reliability and concurrent validity of a peripheral pulse oximeter and health-app system for the quantification of heart rate in healthy adults," *Health Informatics J.*, vol. 22, no. 2, pp. 151-159, 2016. <https://doi.org/10.1177/1460458214540909>