

DISEÑO DE UN SIMULADOR 3D INTERACTIVO DE CONTRACCIÓN Y RELAJACIÓN CARDÍACA DE ALTA FIDELIDAD PARA LA FORMACIÓN SANITARIA

Jorge Alejandro Chávez-Gómez¹, María Fernanda Monterrubio-Antonio¹, Itzel del Carmen Cabrera-Rodríguez¹, Gabriel Rivero-Gómez¹, Emiliano Martínez-Vargas¹, Mario Tadeo Caballero-Córdova¹

¹Universidad Modelo. Campus Mérida. Calle 38 No. 337, Fraccionamiento San Ramón Norte, C.P. 97117, Mérida, Yucatán, México.

Autor de correspondencia: 15233676@modelo.edu.mx (María Fernanda Monterrubio-Antonio)

RESUMEN

La presencia de dificultades para integrar la teoría y la práctica en la educación del sector salud es un problema crítico, dado que podría afectar la preparación efectiva de los estudiantes y su futura aplicación en el campo laboral. Por ello se busca desarrollar un simulador cardíaco para mejorar la experiencia de aprendizaje y apoyar la enseñanza del funcionamiento cardíaco. El prototipo propuesto simula los latidos cardíacos en sus diferentes estados: basal, taquicardia y bradicardia, mediante un modelo 3D cubierto por piel sintética hecha a base de látex, impulsado por servomotores que cumplen la función de representar los latidos del corazón. Éstos son controlados mediante una interfaz gráfica que muestra las distintas opciones con las que el usuario podrá interactuar (Alinier et al., 2022).

Palabras clave: Simulador, pulso cardiaco, educación universitaria.

ABSTRACT

The presence of difficulties in integrating theory and practice in health sector education is a critical problem, since it could affect the effective preparation of students and their future application in the labor field. For this reason, it seeks to develop a cardiac simulator to improve the learning experience and support the teaching of cardiac functioning. The proposed prototype simulates heartbeats in their different rates: basal state, tachycardia and bradycardia, through a 3D modelo covered by a latex-based synthetic material, driven by servo motors that represent the heartbeats. These are controlled by a graphic interface that shows the different opciones that the user can interact with (Alinier et al., 2022).

Keywords: Simulator, heartbeat, university education.

INTRODUCCIÓN

En la medicina, la enseñanza suele tener algunas dificultades, ya sea en lo teórico o en lo práctico, por lo que la tecnología aporta grandes beneficios en dicho ámbito, mismos que se señalan en la investigación realizada por Bienstock J y Hever A. (2022) sobre el uso y evolución del entrenamiento médico con ayuda de la simulación. En esta, el Instituto de Medicina de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos afirma que, en los últimos 30 años, la simulación ha sido importante para mejorar la atención en el paciente, asegurando un mejor diagnóstico en los casos clínicos tanto a nivel individual como en equipo. Además, se ha evitado entre el 60% y 90% de las

muerdes prevenibles por errores médicos. Por ende, el aprendizaje estratégico es importante para consolidar de manera óptima los conocimientos clínicos y de los sistemas del cuerpo humano. De igual forma, es importante destacar el papel que juega la metacognición en este proceso, ya que permite que los estudiantes desarrollen una habilidad y comprensión profunda de los conocimientos médicos. En cuanto a los profesores, además de impartir los conocimientos teóricos de un área disciplinar, tienen la tarea de brindar al estudiante las herramientas necesarias para que éste adquiera destrezas y habilidades para desempeñarse adecuadamente en su quehacer profesional (Molina J., 2024).

En la actualidad, los simuladores médicos que pueden representar situaciones clínicas, patologías, sistemas o aparatos biológicos se han hecho más presentes en centros de educación médica (Contreras Y, et al. 2018). Dicho despliegue se debe a la necesidad de formar de manera más efectiva al personal del área de la salud para hacer frente a las nuevas enfermedades y exigencias de la población. Ejemplo de ello, es el aumento de casos de cardiopatías tales como la insuficiencia cardíaca abordada en el artículo realizado por Al Younis S. M., Hadjileontiadis L. J., et al. (2023), en el cual se tratan los diferentes métodos tecnológicos ya sea de interacción o simulación para el correcto y temprano diagnóstico de dicha patología.

Si hablamos del principal órgano del sistema cardiovascular, nos referimos al corazón. Existen distintas patologías relacionadas a este órgano, y estas son catalogadas como las más mortíferas, debido a que cada año 17.3 millones de personas fallecen a nivel mundial a causa de una cardiopatía (Góngora, M., 2021). Estos datos han propiciado el desarrollo de nuevas técnicas científicas, métodos de análisis y diversos procedimientos con el propósito de encontrar soluciones óptimas. El aprender estas técnicas para diagnosticar cualquier patología o reconocer el funcionamiento real y correcto de cualquier órgano permitirá un mejor aprendizaje o diagnóstico, lo que conducirá a un mejor desarrollo del personal médico.

El aprendizaje entre práctica y teoría favorece tanto al docente como al estudiante, siendo los simuladores las herramientas que permiten dicha integración, en un ambiente real, pero controlado. Tal y como lo son los corazones biónicos y simuladores cardíacos, ejemplo de ello es el dispositivo creado por el Dr. Eric. s. (2018) que permite la asistencia ventricular en pacientes con insuficiencia cardíaca avanzada y el simulador de Zhang, X, et, al., (2019), que brinda una visualización óptima de la anatomía humana por medio de un visualizador 3D, ofrecen a los estudiantes y profesionales de la salud la oportunidad de adquirir experiencia sin poner en riesgo a pacientes reales. Sin embargo, dichos simuladores no representan con exactitud las funciones fisiológicas en una situación clínica o sistema biológico. Así mismo, las instituciones hospitalarias y educativas de nivel medio/superior tienen ciertas limitaciones en cuanto a la adquisición de modelos o simuladores anatómicos

de alta fidelidad que permitan profundizar en tejidos, órganos o sistemas fundamentales. Esto se debe principalmente a la falta de presupuesto destinado a estos equipos y a la relación costo-efectividad que dificulta el adquirir dicha tecnología.

En respuesta a dicha problemática, se propone el desarrollo de un simulador cardíaco tetracameral que represente la contracción y relajación del corazón, haciendo uso de servomotores para la simulación de los latidos cardíacos e impresión 3D para las cavidades cardíacas (aurículas y ventrículos), dicho simulador será programado mediante Arduino y con un módulo Bluetooth junto con una aplicación móvil permitirá la interacción con el usuario y especificar el tiempo deseado de simulación. Esto con el propósito de ofrecer una herramienta que mejore la experiencia de aprendizaje y facilite la transmisión de los conocimientos que respeten al funcionamiento del músculo cardíaco.

MATERIAL Y MÉTODOS

Diseño de mecanismo.

Se diseñó un boceto del mecanismo 3D en el programa de diseño y modelado Fusion 360, el cual consiste en tres servomotores y 16 piezas individuales con distintas formas y medidas las cuales, en conjunto, forman el modelo final del corazón, con medidas de 10x8 cm. Posteriormente, se realizaron las respectivas impresiones y la unión de los servomotores con el resto de las piezas impresas. El mecanismo mencionado fue inspirado en un prototipo creado por Will Cogley (2020).

Desarrollo de software

Para poder simular los diferentes estados cardíacos se estableció un ritmo de tiempo para cada uno de los servomotores, con secuencias distintas para cada uno de los estados. Efectuando los diferentes modos de acuerdo a un carácter establecido que es leído a través de un controlador (Arduino nano); dependiendo de dicho carácter se realiza una función específica.

En cuanto a la interfaz gráfica, se realizó con Python. Ésta simula una aplicación interactiva que permite la conexión bluetooth del prototipo a la computadora, evitando la conexión directa. Dicha interfaz permite

visualizar de las tres posibles opciones a simular: estado basal, taquicardia y bradicardia, acceder a información de cada una de las mismas y a la simulación de sus respectivas ondas de ECG. Mediante una comunicación serial con Arduino, se envía un carácter de acuerdo a cada modo, el Arduino se encarga de leerlo y de efectuar el funcionamiento deseado del mecanismo.

Piel sintética

En el programa Fusion 360 se realizó un modelo 3D de la anatomía del corazón de 22x12cm, el cual permitió tener un punto de partida para hacer el molde anatómicamente correcto del corazón humano. Dicho molde fue elaborado con una mezcla de alginato y agua, la cual cubrió el modelo 3D hasta que éste secó. Después, se cortó el molde en dos partes iguales, para poder sacar la figura.

Una vez que el molde quedó listo, se vertió látex líquido sobre este, se quitó el exceso y se dejó reposar hasta que el látex secara, formando así una primera capa, el proceso de secado se aceleró con una secadora. El proceso se repitió diez veces para conseguir el grosor requerido.

Carcasa

Se realizó un diseño de una estructura con la función de mostrador, similar a una vitrina para el prototipo. Se realizó con madera MDF y acrílico de 3mm de grosor. Consta de una base de 30x30cm con una altura de 15cm, y una vitrina de acrílico de 30x30cm con altura de 25cm. Dicho diseño permite la visualización del simulador del movimiento cardíaco, de la misma manera, se diseñó en fusión 360 el soporte para el corazón de 15x15cm, cuenta con dos pequeñas estructuras verticales para el anclaje de este mismo, evitando que se obstruya el mecanismo.



Diagrama 1. Funcionamiento del dispositivo

RESULTADOS

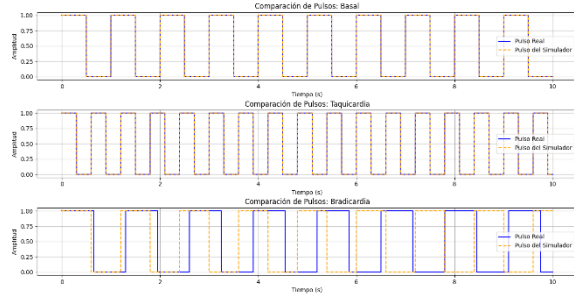
El dispositivo simula los distintos estados de los latidos cardíacos por medio de un modelo 3D de un corazón. Este es controlado por medio de una interfaz que, de igual forma, brinda simulaciones ECG e información respecto a cada uno de los estados y representados por el dispositivo. De tal manera que promueve un mejor entendimiento de este.

Se evaluó el tiempo de respuesta de los distintos estados de pulso cardíaco del simulador mediante diversas pruebas, con el fin de apreciar las diferencias entre cada uno, su exactitud, el tiempo de respuesta de la interfaz, entre otros parámetros.



Figura 1. a) vista superior del mecanismo, b) vista lateral del mecanismo, c) vista anterior del mecanismo

Exactitud del simulador



Gráfica 1. La tabla demuestra la comparación de exactitud de tiempo entre los pulsos de un corazón real y el simulador, partiendo de los tiempos obtenidos de cada uno de ellos en frecuencias (Bpm) específicas e iguales.

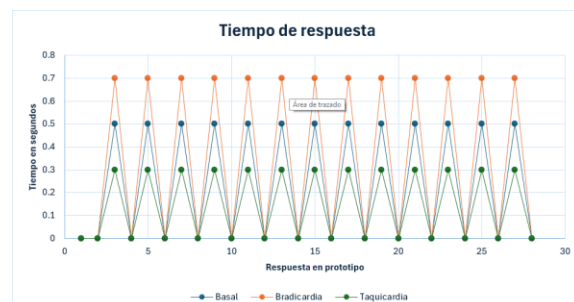
Interacción de la interfaz

Se evaluó la interacción del usuario con la interfaz, evaluando los aspectos entre su fácil uso, entendimiento de la información transmitida para diferenciar no solo el tiempo de pulso, si no a su vez la diferenciación de ondas cardiacas.



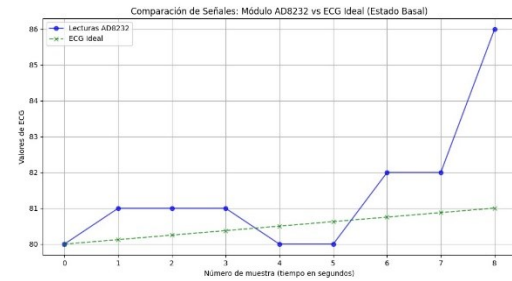
Figura 2. Interfaz gráfica

Tiempo de respuesta de la interfaz



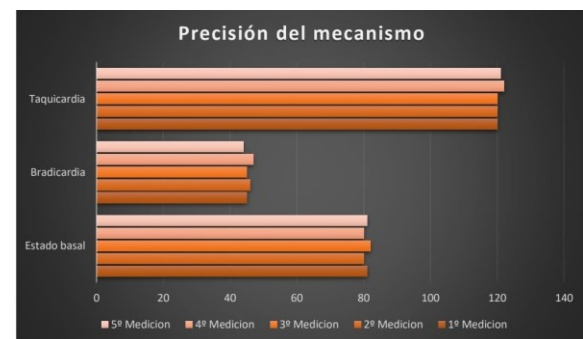
Gráfica 2. La realización de la gráfica se realiza con base al tiempo que se demora la señal del prototipo, es decir, la interacción del usuario con la interfaz y el tiempo que tarda cuando presiona algún modo de pulso cardiaco, es el tiempo que aparece en la gráfica lo que demorará en ejecutarse en el prototipo.

Exactitud del ECG



Gráfica 3. Comparativa entre las lecturas en un estado basal de un ECG ideal con un rango propuesto y los valores obtenidos por el Módulo AD8232 en un ambiente controlado y de reposo en un periodo de 8 segundos.

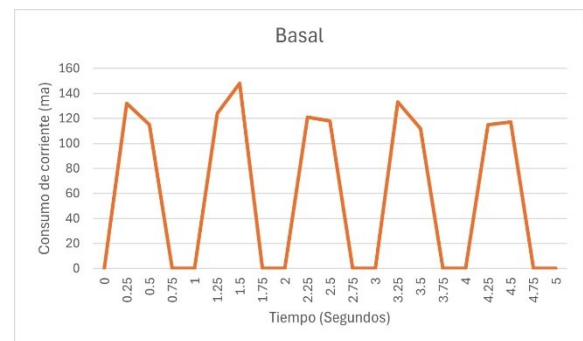
Precisión del mecanismo



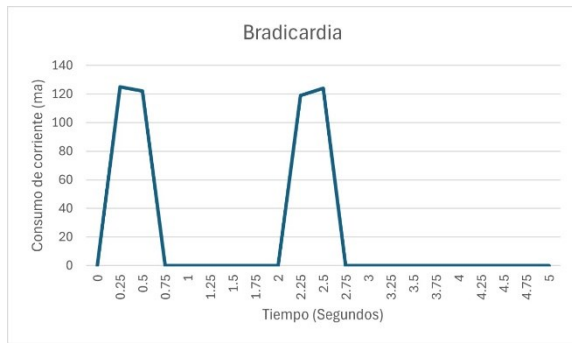
Gráfica 4. Comparación de valores de lpm en sus diferentes estados obtenidos en las pruebas realizadas al mecanismo (servomotores) del simulador para en la replicación de los movimientos cardiacos.

Consumo de corriente del simulador

Para determinar la eficiencia de los servomotores y comprobar si él dispositivo trabaja en óptimas condiciones se propuso medir el consumo energético de los motores en cada estado simulando las condiciones fisiológicas correspondientes.



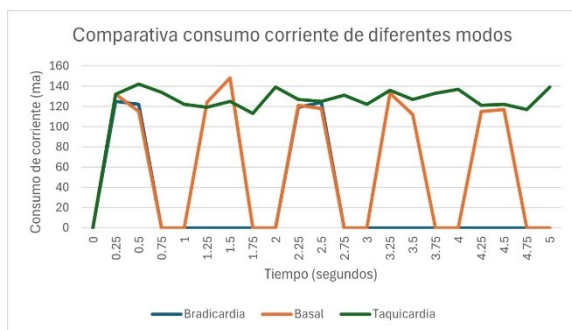
Gráfica 5. Corriente consumida en mA por cada servomotor en el estado basal del simulador.



Gráfica 6. Corriente consumida en mA por cada servomotor en el estado de bradicardia del simulador.



Gráfica 7. Corriente consumida en mA por cada servomotor en el estado de taquicardia del simulador.



Gráfica 8. Comparativa de la corriente consumida en mA por cada motor en los diferentes estados que el dispositivo puede simular.

Comparación anatómica de la piel sintética

Se evaluó la correcta anatomía del recubrimiento hecho de látex comparándolo con un corazón de verdad, verificando las cavidades durante su uso de la simulación y en reposo.

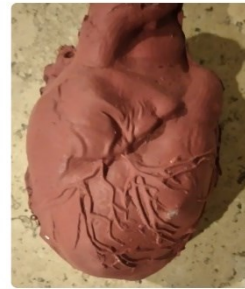


Figura 3. Corazón de látex

Esquema del circuito

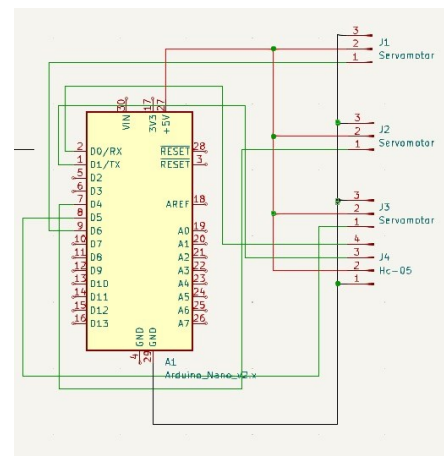


Figura 4. Esquema de circuito del prototipo: Conexiones con Arduino, motores y módulo bluetooth

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permitieron comprobar los objetivos planteados. El simulador 3D permite visualizar el movimiento del músculo cardíaco, mientras que la interfaz grafica el electrocardiograma y proporciona información respecto a lo que se está representando, en cualquiera de los modos de uso (basal, taquicardia y bradicardia). Al tener esta triple función, el prototipo ofrece beneficios educativos que no ofrece ningún simulador de su clase.

Dentro de nuestras perspectivas para el proyecto está la implementación de control Bluetooth del simulador desde un dispositivo móvil, una cuarta opción dentro del menú de la interfaz que permita representar el movimiento y ECG de un usuario en tiempo real.

Consideramos que, con estas mejoras, el prototipo será una herramienta eficaz para los alumnos y estudiantes del área sanitaria, en su desempeño académico.

Industry, Biomedicine, and Art, 2(1).
<https://doi.org/10.1186/s42492-019-0019-4>

Will Cogley (2020). '3D Printed Animatronic Heart Development Process'. Publicado el 14 de enero de 2020 en YouTube. <https://youtu.be/8-jlu4yoHm0>

REFERENCIAS

Alinier, G., Oriot, D., & otros. (2022). Simulation-based education: Deceiving learners with good intent. *Advances in Simulation*, 7(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s41077-022-00211-7>

Bienstock, J., & Heuer, A. (2022). A review on the evolution of simulation-based training to help build a safer future. *Medicine*, 101(25), e29503. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000029503>

Molina, J, Choez, A, Figueroa, M, & Cañarte, M. (2024). Modelo didáctico basado en técnicas de estudio: un análisis en estudiantes de enfermería del Ecuador. En *Preimpresiones SciELO* . DOI: 10.1590

Contreras Olive, Y., Reyes Fournier, M., Nates Reyes, A. B., & Pérez Arbolay, M. D. (2018). Los simuladores como medios de enseñanza en la docencia médica. *Revista cubana de medicina militar*, 47(2), 0–0. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0138-65572018000200010

Al Younis, S. M., Hadjileontiadis, L. J., Stefanini, C., & Khandoker, A. H. (2023). Non-invasive technologies for heart failure, systolic and diastolic dysfunction modeling: a scoping review. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1261022>

Góngora, M. (2020). Un gran paso en la medicina actual. *Juventud y Ciencia Solidaria: El Camino de la Investigación*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23620>

Cardiff Metropolitan University, & Stöhr, E. J. (2019). Bionic women and men: Heart failure and an artificial heart pump. *Research features*, 131, 72–77. <https://doi.org/10.26904/rf-125-7277>

Zhang, X., Yang, J., Chen, N., Zhang, S., Xu, Y., & Tan, L. (2019). Modeling and simulation of an anatomy teaching system. *Visual Computing for*