

Physical-Interactive Cardiac Flow Simulator: A Potential Tool for Learning Cardiac Hemodynamics

José Gabriel Moncada Amador, Eng.¹; Yaro Josué Cáceres Teruel, M. Sc¹

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Honduras
jose.moncada24@unitec.edu, yaro.caceres@unitec.edu

Abstract— *Cardiac hemodynamics describes the behavior of blood flow and pressure within the cardiovascular system, constituting a central pillar in professional training for understanding cardiac mechanics and for the diagnosis of cardiac conditions in the clinical field. However, its understanding is limited by the complexity of the phenomenon and the limited accessibility to practical simulation and training tools. This work presents the development of a preliminary prototype of a physical–interactive cardiac flow simulator, designed as a low-cost educational tool for teaching cardiac physiology and pathophysiology by recreating essential hemodynamic aspects for the study of these phenomena. The methodology was structured in three stages: identification of relevant hemodynamic variables; design and integration of the physical, electronic, and control systems; and preliminary validation through expert evaluation, in addition to a pilot study with medical students. The results demonstrated high usability and adequate functional fidelity of the prototype, highlighting its usefulness in the educational field and the possibility of expanding its scope due to its design and structure. It is concluded that the simulator is technically viable and has the potential to strengthen the learning of complex hemodynamic concepts.*

Index Terms— *Cardiac hemodynamics, cardiovascular system, medical simulator, pathophysiology, physiological variables*

Simulador de Flujo Cardíaco Físico-Interactivo: Una Herramienta Potencial para el Aprendizaje de la Hemodinámica Cardíaca

José Gabriel Moncada Amador, Eng.¹, Yaro Josué Cáceres Teruel, M. Sc¹

¹ Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC, Honduras
jose.moncada24@unitec.edu, yaro.caceres@unitec.edu

Resumen—La hemodinámica cardíaca describe el comportamiento del flujo y presión sanguínea dentro del sistema cardiovascular, constituyendo un eje central en la formación profesional para el entendimiento de la mecánica del corazón y para el diagnóstico de afecciones cardíacas en el campo clínico. No obstante, su comprensión se ve limitada por la complejidad del fenómeno y la escasa accesibilidad a herramientas prácticas de simulación y entrenamiento. Este trabajo presenta el desarrollo de un prototipo preliminar de un simulador físico-interactivo de flujo cardíaco, diseñado como una herramienta didáctica de bajo costo para la enseñanza de la fisiología y fisiopatología cardíaca recreando aspectos hemodinámicos esenciales para el estudio de estos fenómenos. La metodología se estructuró en tres etapas: identificación de variables hemodinámicas relevantes, diseño e integración del sistema físico, electrónico y de control. Así como validaciones preliminares mediante evaluación por expertos, además de una prueba piloto con estudiantes de la carrera de medicina. Los resultados mostraron una alta usabilidad y adecuada fidelidad funcional del prototipo, destacando su utilidad en el campo de la enseñanza y la posibilidad de ampliar su alcance por su diseño y estructura. Concluyendo que el simulador es técnicamente viable y tiene potencial para fortalecer el aprendizaje de conceptos hemodinámicos complejos.

Palabras clave—Fisiopatología, hemodinámica cardíaca, simulador médico, sistema cardiovascular, variables fisiológicas

I. INTRODUCCIÓN

Casi 20 millones de vidas fueron cobradas en 2022 por las enfermedades cardiovasculares (ECV), de las cuales según [1] 85% se debieron a infartos y accidentes cerebrovasculares. La mayoría de estas muertes ocurren en países de ingresos bajos y medios, pudiendo muchas prevenirse abordando factores de riesgo como la obesidad, tabaquismo y la inactividad física. Como consecuencia de estas condiciones, países en vías de desarrollo como Honduras registran altos índices de mortalidad y morbilidad ante las ECV. En 2019, estas afecciones causaron 291.7 defunciones por 100,000 habitantes ubicando a Honduras como cuarto en la lista de países ordenados por carga de las ECVs [2].

Dada la elevada incidencia de enfermedades cardiovasculares (ECV), se subraya la importancia de la cardiología como herramienta para la formación y práctica médica. Al enfocarse en la comprensión y detección de patologías, esta disciplina facilita la prevención y el manejo de tales trastornos, reforzando la capacidad de los profesionales para enfrentar los desafíos que estas enfermedades representan. [3]. En este contexto, los simuladores médicos, tanto físicos como computacionales,

permiten recrear escenarios clínicos realistas, facilitando la práctica segura y la transferencia del conocimiento teórico a lo práctico [4]. Los modelos físicos destacan en la representación de escenarios patológicos, mientras que los computacionales ofrecen personalización y mayor interactividad. Sin embargo, ambos presentan limitaciones: aspectos específicos de la fisiología, como la hemodinámica cardíaca, no siempre se representan con precisión, y el elevado costo y complejidad de los simuladores limita su accesibilidad.

El presente desarrollo describe un simulador físico-interactivo de flujo cardíaco de bajo costo, orientado a la enseñanza de la fisiología y fisiopatología cardiovascular. A partir de las variables hemodinámicas clave identificadas, se diseñó y construyó el prototipo. Finalmente, se realizaron validaciones preliminares orientadas a evaluar su funcionamiento y su utilidad educativa de manera exploratoria.

El presente artículo se organiza en varias secciones. La sección II presenta el sustento teórico, ofreciendo una síntesis conceptual de los principios de hemodinámica cardíaca y su relación con la fisiología y fisiopatología cardiovascular. La sección III describe las metodologías empleadas en el desarrollo y validación del simulador físico-interactivo, incluyendo la identificación de variables hemodinámicas clave, el diseño del prototipo y las pruebas preliminares de funcionamiento y usabilidad. Finalmente, la sección IV expone los resultados obtenidos, analiza la fidelidad funcional y educativa del prototipo, y discute su potencial como herramienta de enseñanza que acerque la teoría a la práctica clínica.

II. SUSTENTO TEÓRICO

A. Estado del Arte

Se realizó una revisión literaria de diversos artículos y documentos científicos los cuales se encuentra enfocados en el diseño de prototipos de corazón artificial o de ciertas partes de este, buscando replicar su función y flujo hemodinámico con fines académicos o clínicos simulando diversos escenarios como lo son las cardiopatías.

Como resultado de la revisión, se encontró literatura que evidencia el desarrollo de los simuladores médicos como herramientas de alta utilidad para la enseñanza en el área de la salud, particularmente en un campo tan complejo como la cardiología. En este contexto, la revisión se centró en el análisis de simuladores de dinámica cardíaca y flujo hemodinámico, así

TABLE I
RESUMEN DE LOS TEMAS DE INTERES EN LA REVISIÓN LITERARIA

Tema de Interes	Resumen
Simuladores/Modelos Cardíacos [5], [6]	Existen diferentes tipos de simuladores médicos o biomédicos dependiendo del objeto de estudio o del enfoque que se le desea dar, simuladores complejos para representación de patologías, validación de analizadores, pruebas de calidad de prótesis entre otros estudios.
Sensores y Actuadores [7], [5], [8], [9]	Los simuladores cardiovasculares emplean principalmente sensores de presión y flujo para la medición de variables hemodinámicas, aunque también se ha demostrado la eficacia de sensores ultrasónicos. Asimismo, integran sistemas de bombeo y motores para la inyección controlada de fluido a presión.
Microcontroladores y Sistemas de Control [10], [11]	Hay tanto aplicaciones de sistemas de control más análogos para las partes de la inyección de fluidos en los simuladores. Por el otro lado, la programación es una buena alternativa donde para la creación de prototipos de bajo costo, microcontroladores como Arduino y ESP32 son viables.
Simulación de Cardiopatías [12], [9], [6]	Para la simulación de cardiopatías los autores de los modelos referenciados hacían uso de alteraciones tanto físicas como en los parámetros de función mediante programación.
Aplicaciones Clínicas y Académicas [7], [13], [14], [6], [15]	Estos modelos en ocasiones se usan para validar analizadores de dispositivos de diagnóstico, para pruebas de resistencia y calidad de prótesis valvulares para ser aplicadas. En el campo académico se ha demostrado una mejor adherencia a los aprendizajes por la interacción con estos.

como en la forma en que se integran componentes tecnológicos como sensores, actuadores y microcontroladores para su desarrollo. De manera conjunta, estos elementos permiten recrear tanto la fisiología como la fisiopatología cardíaca.

Posteriormente, una vez abordado el componente técnico de la temática, se examinó el impacto de estas herramientas en el ámbito clínico y, de forma más relevante, en el contexto académico, evaluando su funcionalidad como apoyo para que los estudiantes del área de la salud pongan en práctica y refuercen sus conocimientos teóricos. La tabla I muestra de manera resumida los hallazgos obtenidos de los 11 artículos consultados.

B. El principio hemodinámico en el ciclo cardíaco

La hemodinámica describe los principios que regulan el flujo sanguíneo en el sistema cardiovascular, donde la presión y la resistencia determinan el desplazamiento de la sangre a través del corazón y los vasos [16]. Durante el ciclo cardíaco, las variaciones cíclicas de presión permiten el flujo a favor de gradientes de presión, favoreciendo el llenado ventricular en diástole y la eyección hacia las arterias durante la sístole [16], [17].

El volumen de las cavidades y la resistencia al flujo, principalmente por las válvulas, regulan las fases del ciclo cardíaco: diástole ventricular, contracción isovolumétrica, eyección ventricular y relajación isovolumétrica [16], [17]. El gasto cardíaco, determinado por el volumen sistólico y la frecuencia cardíaca, se modula mediante la ley de Frank-Starling, la contractilidad, la precarga y la poscarga, garantizando un funcionamiento cardiovascular eficiente [17].

C. Trastornos cardiovasculares y patrones hemodinámicos

Las enfermedades cardiovasculares comprenden trastornos del corazón y del sistema vascular, cuya comprensión permite identificar cómo las variables hemodinámicas se alteran bajo condiciones patológicas [18], [19]. Estas alteraciones, aunque clínicamente relevantes, adquieren importancia en el contexto de la simulación, ya que pueden recrearse, estando asociadas a cambios en presión, volumen y flujo sanguíneo, lo que permite modelar fenómenos fisiopatológicos.

Entre las principales patologías se incluyen las arritmias, que alteran la frecuencia y regularidad del ciclo cardíaco, pudiendo reducir el gasto cardíaco cuando la alteración es sostenida. Agregada a esta, también se encuentra la insuficiencia cardíaca, caracterizada por disfunción sistólica o diastólica, reducción del volumen e incremento de las presiones intracardíacas. Otras de igual importancia son las cardiopatías valvulares, que afectan el flujo sanguíneo debido a estenosis o insuficiencia de las válvulas, modificando gradientes de presión y volumen durante el ciclo cardíaco. Finalmente, pero no menos importante, la cardiopatía isquémica, asociada a aterosclerosis coronaria, que limita el flujo de oxígeno al miocardio y puede provocar angina o infarto. Estas condiciones generan alteraciones hemodinámicas significativas, constituyendo la base para la recreación de fenómenos fisiopatológicos en simuladores educativos [18], [19].

D. Simuladores y modelos médicos

La simulación médica consiste en ubicar a estudiantes y profesionales en contextos que imitan aspectos de la realidad, generando situaciones o problemas que deberán enfrentar en el ámbito médico-clínico. [20]. Por su parte, los modelos anatómicos son reproducciones 3D de huesos y órganos de tamaño real, utilizadas principalmente para la práctica de la identificación de estructuras.

En el caso de los simuladores, se busca un diseño fiel al fisiológica hemodinámica real. Para ello, se consideran estándares como los de la International Nursing Association for Clinical Simulation and Learning (INACSL), organización dedicada a mejorar la seguridad del paciente mediante la excelencia en la simulación [21].

Estos simuladores emplean diversas tecnologías, incluyendo sensores y actuadores, que permiten recrear escenarios clínicos mediante programación y configuraciones de hardware. Estudios como Sánchez (2021) [22] muestran resultados positivos, indicando que el 94% de 58 médicos evaluados consideraron que estas herramientas mejoran el aprendizaje en cardiología y salud en general.

III. METODOLOGÍA

El presente trabajo hizo uso de diversas herramientas metodológicas, desde técnicas cuantitativas y cualitativas, uniendo revisiones sistemáticas, recolección de información de expertos, selección multicriterio de componentes para la creación del simulador y demás herramientas para el diseño del prototipo y las validaciones mediante evaluaciones de usabilidad. La figura 1 muestra la ejecución secuencial de las metodologías aplicadas con el propósito de asegurar la coherencia entre los objetivos planteados y los resultados obtenidos.

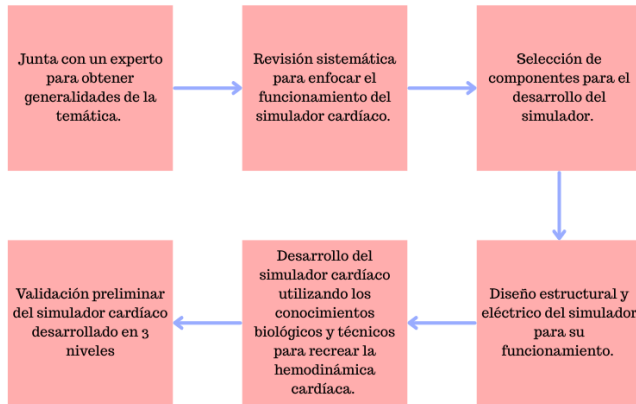


Fig. 1. Secuencia de metodología de estudio y validación preliminar

En una primera etapa y en relación con la recreación de la hemodinámica cardíaca, el enfoque se centró en la identificación de las variables fisiológicas clave que definen el comportamiento del flujo sanguíneo y sus alteraciones ante distintas patologías, considerando su relevancia diagnóstica. Para ello, se realizaron revisiones técnicas con profesionales médicos con especialidad en cardiología interna, quien apoyó en la identificación de dichas variables y aportó una visión integral de la fisiología y fisiopatología cardiovascular.

Aunque estas variables se encuentran ampliamente documentadas en la literatura especializada [18], [19], [23], [24], se realizó una revisión literaria sistemática a través de la aplicación del método PRISMA, con el objetivo de fortalecer el sustento teórico y consolidar los criterios de selección bajo un marco metodológico estructurado. Esta revisión se desarrolló mediante un proceso de cuatro etapas, permitiendo depurar y seleccionar un conjunto definido de fuentes que sirvieron como base para la estructuración de los resultados finales [25].

En términos de la selección de los componentes y materiales empleados en el diseño del simulador cardíaco se aplicó la metodología ELECTRE, un método de decisión multicriterio basado en la comparación y sobreclasificación de alternativas. En este proceso se definieron criterios ponderados según el contexto del proyecto, evaluando el desempeño de cada alternativa con el fin de seleccionar los componentes más

adecuados para la simulación propuesta [26], [27]. Seguidamente, el diseño y desarrollo del prototipo se llevó a cabo mediante una metodología de prototipado rápido, haciendo uso de técnicas de modelado e impresión 3D, corte por láser y fresado CNC, apoyadas por herramientas de diseño como SOLIDWORKS para el modelado mecánico y Fritzing para el diseño del sistema eléctrico [28].

Respecto a la estructuración del software, este se realizó en el entorno de Arduino IDE, haciendo uso del principio DRY, el cual promueve la reutilización de código y la reducción de redundancias, mejorando la coherencia, legibilidad y facilidad de mantenimiento del sistema [29]. Este principio se integró dentro del marco de desarrollo definido por el V-Model, el cual permitió una clara definición de responsabilidades, así como la correspondencia entre las etapas de desarrollo y las pruebas de verificación y validación, garantizando la coherencia entre los requerimientos del sistema y su implementación [30].

Finalmente, la validación preliminar del simulador se realizó en tres niveles, incluyendo docentes profesionales del área de la salud, estudiantes y un experto clínico. Con los docentes se aplicaron las metodologías DELPHI y System Usability Scale, mientras que con los estudiantes se empleó únicamente el cuestionario SUS. El experto participó mediante entrevistas y cuestionarios aplicados a lo largo del desarrollo del proyecto, permitiendo una validación cualitativa continua. La metodología DELPHI se utilizó para obtener consenso experto y criterios de alta confiabilidad sobre la factibilidad y fidelidad del simulador [31], [32], mientras que la metodología SUS permitió recopilar datos cuantitativos sobre la usabilidad del sistema mediante un cuestionario estandarizado de diez ítems evaluados con escala de Likert [33]. Las entrevistas con el experto complementaron este proceso, enfocándose en la evaluación de la fidelidad del simulador y su potencial aplicación dentro del ámbito didáctico [34].

IV. RESULTADOS ANÁLISIS

A. Revisión literaria sistemática

Para la determinación de las variables fisiológicas más relevantes que intervienen en la hemodinámica cardíaca, así como las diferencias entre su comportamiento en condiciones normales y patológicas, se realizó como eje principal una revisión sistemática de la literatura siguiendo las fases de la metodología PRISMA (Figura 2). De manera complementaria, se contó con la experiencia de un médico especialista en cardiología, quien aportó criterios clínicos para contrastar y validar las variables identificadas. Este enfoque permitió asegurar la coherencia entre la evidencia científica disponible y su aplicabilidad en el contexto del simulador desarrollado.

Específicamente, la consulta con el médico especialista permitió orientar la estructuración del apartado teórico-clínico, particularmente en la selección y priorización de patologías y variables fisiológicas relevantes. Este intercambio aportó criterios sobre la severidad, el origen de las afecciones cardiovasculares y la factibilidad de su recreación en un entorno de simulación, así como la identificación de las variables de mayor interés desde el punto de vista hemodinámico.

Por parte de la aplicación de la metodología PRISMA, se inició con una búsqueda en las bases de datos ScienceDirect y PubMed. La búsqueda sistemática se realizó mediante operadores booleanos empleando la siguiente secuencia: (((“Cardiac hemodynamics” OR “Cardiac blood flow” OR “Cardiac physiology”) AND (pressure OR volume OR resistance OR velocity)) NOT (pediatric OR neonatal OR infant OR newborn OR animal OR veterinary)). Tras la definición de los criterios de inclusión y exclusión, se procedió al filtrado, búsqueda manual y redacción de los resultados.

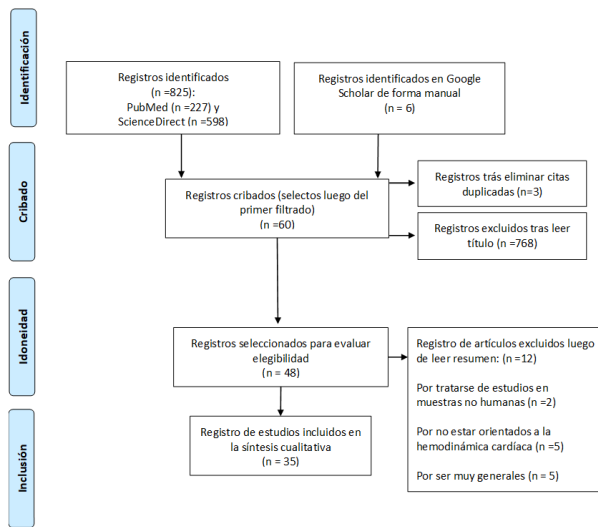


Fig. 2. Diagrama de flujo PRISMA en cuatro niveles

El análisis de los 35 documentos seleccionados evidenció una recurrencia consistente de variables como presión, volumen, velocidad y resistencia, descritas como determinantes del comportamiento hemodinámico tanto en condiciones normales como patológicas. Estos hallazgos coincidieron con la literatura didáctica y clínica, donde las alteraciones hemodinámicas se explican principalmente a través de incrementos o disminuciones de estas variables, así como cambios asociados en la geometría cardíaca. Con base en la convergencia entre la evidencia científica y el criterio experto, se estableció que el volumen y la resistencia constituyen las variables fisiológicas más adecuadas para su recreación en el simulador, debido a su relevancia conceptual y a la factibilidad de representarlas de forma visual en una fase preliminar del desarrollo.

B. Selección de componentes para el simulador

La aplicación del método ELECTRE permitió la evaluación de distintos materiales y componentes. En general, se consideraron criterios de resistencia al agua, durabilidad, costo y facilidad de manufactura. Para la estructura principal, se seleccionó el acrílico como material estructural, debido a su adecuada resistencia al agua, durabilidad y facilidad de trabajo.

En el proceso de selección de sensores destinados a la medición del nivel de fluido, se analizaron sensores capacitivos (modelos WS-03 y XKC-Y25) y un sensor ultrasónico HC-SR04, considerando su precisión, capacidad de medición a

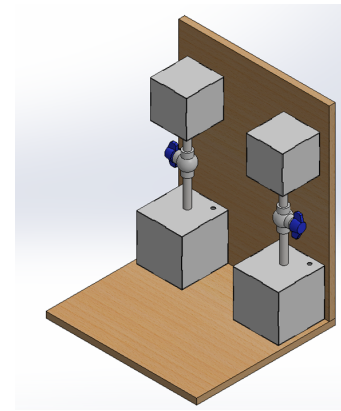


Fig. 3. Diseño 3D del simulador cardíaco hecho en SOLIDWORKS

través de un espesor definido, costo, tiempo de respuesta y robustez ambiental. A partir de esta comparación, se seleccionó el sensor capacitivo WS-03 por su bajo costo y adecuada capacidad de medición para el rango de operación del simulador.

Para el sistema de control, se evaluaron los microcontroladores Arduino Nano, Arduino UNO y ESP32, tomando en cuenta la facilidad de programación, compatibilidad con los componentes, consumo energético y tamaño físico. El Arduino Nano fue seleccionado debido a su bajo costo, simplicidad de programación y dimensiones reducidas, lo que representó una ventaja para la integración del sistema. Finalmente, para el accionamiento del fluido entre las cámaras, se evaluaron bombas de corriente continua considerando su capacidad de bombeo, potencia, elevación de fluido, voltaje de operación y costo. Como resultado, se seleccionó la bomba modelo JT-DC3W, al presentar un desempeño adecuado para las condiciones de operación del simulador y una relación costo-beneficio favorable. Adicionalmente, se incorporaron componentes complementarios para la integración del sistema, tales como tubería y válvulas de PVC de 1/2" para la interconexión entre cámaras y la recreación de válvulas cardíacas, así como módulos de relé, una fuente de alimentación externa y borneras para garantizar una distribución eléctrica segura y estable.

C. Diseño y desarrollo del simulador

Para el diseño estructural del simulador se utilizó la herramienta de diseño asistido por computadora (CAD) SolidWorks, con la cual se crearon todos los componentes necesarios para la estructuración del simulador, así como el montaje de las cámaras, sus uniones y la distribución de los componentes eléctricos (Figura 3). Para el diseño del sistema eléctrico, se empleó la herramienta Fritzing, elaborando el diagrama eléctrico del simulador de acuerdo con las funcionalidades esperadas y siguiendo la secuencia de activación de cada componente.

Las cámaras de acrílico se diseñaron utilizando RDWorks, el cual permite ajustar parámetros de velocidad y potencia para realizar cortes láser. Las configuraciones ingresadas para el corte fueron de 15 mm/s a una potencia de 85%. Habiendo

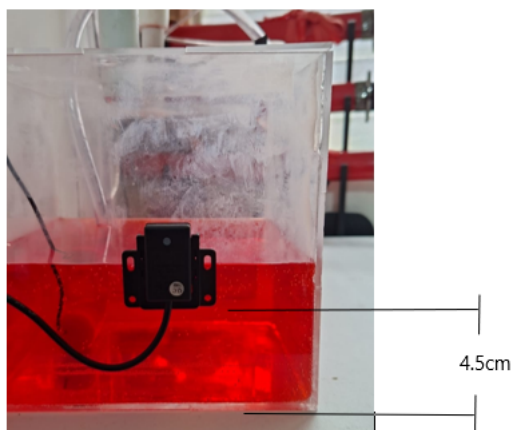


Fig. 4. Colocación de los sensores capacitivos

terminado el corte de las cámaras se ensamblaron y unieron mediante los tubos de PVC, habiendo entre cada cámara una válvula de bola de PVC.

Para la colocación de los sensores de nivel de fluido en las cámaras, se tomó a consideración la cantidad de volumen que se puede almacenar en las cámaras superiores (1670 ml) y cuanto logra pasar al ventrículo considerando el volumen residual entre cámaras llegando así a ubicar los sensores capacitivos a 4.5 cm de la base de la cámara. (Figura 4).

D. Recreación de patologías

Se logró simular 5 diferentes patologías. A continuación se detalla cada una de ellas y como se logró realizar la simulación tomando en cuenta la naturaleza de los componentes y estructura del prototipo:

1) *Cardiopatía valvular*: Específicamente la regurgitación mitral leve. Se simula mediante el uso de una manguera de menor diámetro que retorna volumen entre el ventrículo y la aurícula izquierdos.

2) *Estenosis valvular*: siendo recreada por la apertura incompleta o parcial de las válvulas entre cámaras.

3) *Arritmias*: al desincronizar la activación de los sensores con sus respectivas bombas se logra recrear las complicaciones de contracción de las cámaras con la apertura de válvulas y cambio en el volumen de fluido entre las cámaras.

4) *Aterosclerosis*: se recreó ingresando un objeto de menor tamaño en la manguera, lo cual simula la presencia de placas de grasa en la arteria pulmonar obstruyendo el paso de sangre.

5) *Paro cardíaco*: se logró a través de la interrupción de la alimentación del circuito. Es importante destacar que aunque no es una patología propiamente, esta puede surgir como consecuencia directa de la aterosclerosis.

E. Validaciones preliminares con profesionales médicos

El primer paso del proceso completo de validación preliminar fue poner a prueba el prototipo con profesionales médicos, expertos en el área de simulación. El proceso se llevó a cabo a primera validación fue la llevada a cabo con tres docentes del área de salud, esta comenzó conversando sobre el uso de

los simuladores como herramientas didácticas, para dar paso a la demostración del simulador desarrollado. Una vez realizada la demostración del funcionamiento, así como dar un contexto del proyecto, su alcance y finalidad.

Los docentes brindaron su retroalimentación en consenso concluyendo que el simulador es una herramienta útil y factible de utilizar, sin embargo, se debe trabajar más en su aspecto estético para cubrir también el apartado anatómico del corazón para facilitar el aprendizaje del estudiante. Posteriormente se aplicó el cuestionario SUS donde la puntuación final fue de 70 puntos categorizando el proyecto con una buena usabilidad según los criterios de evaluación de la metodología.

La evaluación con los estudiantes (figura 5) se realizó inicialmente mediante una prueba diagnóstica, en la cual se esperaba que los participantes identificaran cinco escenarios patológicos simulables en el proyecto únicamente a partir de la observación del comportamiento del flujo.



Fig. 5. Evaluación del prototipo con estudiantes

Estos escenarios correspondían a las patologías seleccionadas para la simulación. Como se muestra en la Figura 6, el 88% de los escenarios fueron identificados correctamente; el 12% restante correspondió principalmente a errores en la identificación del escenario de arritmias, el cual, debido a la naturaleza de la condición, tendió a confundirse con otras patologías, por lo que se consideró como una identificación fallida.

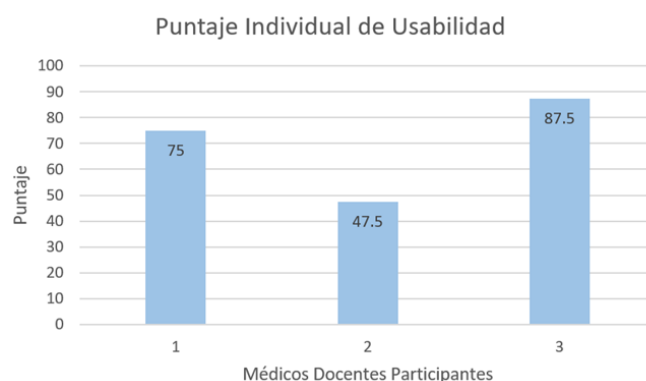


Fig. 6. Puntaje individual de usabilidad para estudiantes

Posteriormente, una vez aplicada la prueba diagnóstica, el cuestionario SUS aplicado a los estudiantes arrojó un puntaje de 88 puntos, lo que clasifica al simulador, desde la perspectiva del usuario, como una herramienta con una usabilidad superior a lo esperado.

Finalmente, la validación realizada con el experto generó observaciones coherentes con las previamente señaladas por los docentes. El especialista consideró adecuado tanto el enfoque del simulador como la forma en que se recrean las patologías; no obstante, indicó oportunidades de mejora en el apartado estético y la conveniencia, de ser posible, de incorporar la medición de presiones en el sistema. A partir de esta retroalimentación, se realizaron ajustes en el diseño estético-funcional del simulador, explorando distintos diseños y materiales para la representación anatómica simplificada de estructuras como venas, pulmones y el arco aórtico, como se muestra en la Figura 7.

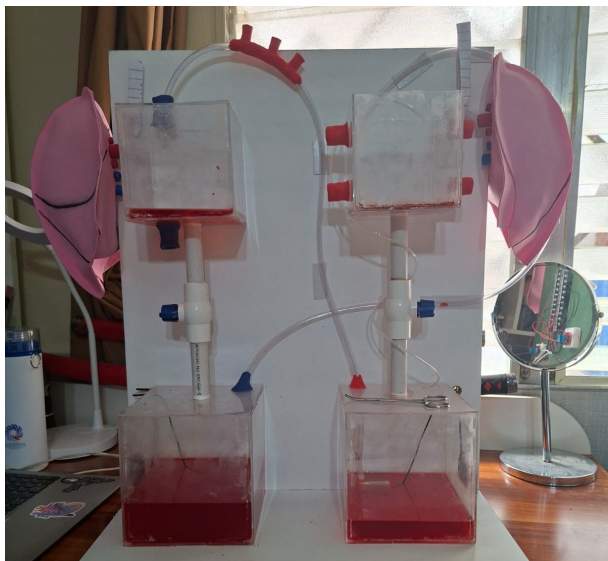


Fig. 7. Simulador cardíaco físico-interactivo preliminar post-validaciones

V. CONCLUSIONES

La identificación de las variables fisiológicas que definen la hemodinámica cardíaca permitió establecer que la presión, el volumen, la velocidad y la resistencia son elementos fundamentales para la comprensión del flujo sanguíneo y el diagnóstico de las enfermedades cardiovasculares. Esta identificación se basó en una revisión sistemática bajo las directrices PRISMA, complementada con información de textos académicos y el criterio de un cardiólogo especialista en medicina interna, aportando sustento teórico y clínico al análisis hemodinámico.

A partir de estos fundamentos, se establecieron los requerimientos estructurales y tecnológicos necesarios para el diseño y desarrollo de un simulador físico-interactivo de flujo cardíaco, integrando un microcontrolador Arduino Nano, sensores para la medición de fluido y bombas sumergibles. Durante este proceso, la selección de componentes presentó en

algunos casos empates técnicos, lo que evidenció la existencia de múltiples alternativas viables y condicionó las decisiones de diseño adoptadas.

Como resultado, se desarrolló un prototipo preliminar funcional capaz de recrear variables hemodinámicas como el volumen y la resistencia a lo largo del ciclo cardíaco, incorporando un circuito eléctrico completamente operativo. No obstante, la metodología de diseño empleada limitó la anticipación de fallas durante la etapa de desarrollo, lo que representa una oportunidad de mejora para iteraciones futuras del simulador.

El simulador desarrollado permitió la recreación de distintos escenarios hemodinámicos y patologías cardiovasculares, incluyendo insuficiencia y estenosis valvular, arritmias y aterosclerosis. Sin embargo, no todas las patologías lograron representarse de forma plenamente funcional, dado que la flexibilidad del sistema se vio restringida al depender principalmente de ajustes a nivel de hardware.

Finalmente, las validaciones realizadas evidenciaron un alto grado de fidelidad del simulador, de acuerdo con la valoración de los docentes y del experto consultado. Asimismo, se observó una alta usabilidad, tanto desde la perspectiva de los docentes, quienes manifestaron poder emplear el simulador con facilidad, como de los estudiantes, quienes demostraron la capacidad de aplicar sus conocimientos mediante el uso de la herramienta.

REFERENCIAS

- [1] WHO, "Cardiovascular diseases (CVDs)," 2025. [Online]. Available: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds))
- [2] OPS, "La Carga de Enfermedades Cardiovasculares - OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud," 2021. [Online]. Available: <https://www.paho.org/es/enlace/carga-enfermedades-cardiovasculares>
- [3] E. E. Montalvan Sanchez, S. A. Urrutia, A. A. Rodriguez, G. Duarte, A. Murillo, R. Rivera, A. A. Paredes Henriquez, D. M. Montalvan Sanchez, E. Ordoñez, D. A. Norwood, L. B. Dominguez, R. L. Dominguez, K. Torres, E. M. Reyes Fajardo, and C. A. Godoy, "Cardiovascular risk assessment in the resource limited setting of Western Honduras: An epidemiological perspective," *International Journal of Cardiology. Heart & Vasculture*, vol. 27, p. 100476, Feb. 2020. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7154315/>
- [4] M. Alvarado, M. Lawley, and Y. Li, "Healthcare simulation tutorial: Methods, challenges, and opportunities," in *2016 Winter Simulation Conference (WSC)*, Dec. 2016, pp. 236–247, iSSN: 1558-4305. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7822092>
- [5] L. Christerson, P. Frieberg, T. Lala, J. Töger, P. Liuba, J. Revstedt, H. Isaksson, and N. Hakacova, "Multi-Modal in Vitro Experiments Mimicking the Flow Through a Mitral Heart Valve Phantom," *Cardiovascular Engineering and Technology*, vol. 15, no. 5, pp. 572–583, Oct. 2024.
- [6] M. Wisotzki, A. Mair, P. Schlett, B. Lindner, M. Oberhardt, and S. Bernhard, "In Vitro Major Arterial Cardiovascular Simulator to Generate Benchmark Data Sets for In Silico Model Validation," *Data*, vol. 7, no. 11, p. 145, Nov. 2022, publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2306-5729/7/11/145>
- [7] O. Bazan and J. P. Ortiz, "Experimental Validation of a Cardiac Simulator for in vitro Evaluation of Prosthetic Heart Valves," *Brazilian Journal of Cardiovascular Surgery*, vol. 31, no. 2, pp. 151–157, 2016. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5062730/>
- [8] T. Kim, J. Kim, and E. Kim, "Ultrasonic Sensor-based Water Leveling for Three-dimensional Water Phantom: Prototype Development," *Journal of Medical Physics*, vol. 49, no. 3, pp. 387–393, 2024. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11548072/>

- [9] R. Pasledni, M. Kozarski, J. K. Mizerski, M. Darowski, P. Okrzeja, and K. Zieliński, "The hybrid (physical-computational) cardiovascular simulator to study valvular diseases," *Journal of Biomechanics*, vol. 170, p. 112173, Jun. 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021929024002513>
- [10] T. Delgerkhaan, Q. Wei, J. Jung, S. Lee, G. Na, B. Kim, I.-C. Kim, and H. Park, "Development of a Low-Cost Multi-Physiological Signal Simulation System for Multimodal Wearable Device Calibration," *Technologies*, vol. 13, no. 6, p. 239, Jun. 2025, publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7080/13/6/239>
- [11] D. P. Vélez, "Diseño de un dispositivo wearable para el monitoreo de la oxigenación y ritmo cardiaco," *Memorias del Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica*, vol. 7, no. 1, pp. 485–492, Oct. 2020. [Online]. Available: <https://memoriascnib.mx/index.php/memorias/article/view/801>
- [12] J. Cui, W. Jiang, J. Su, J. Zhang, Y. Yu, and Y. Ding, "Microfluidic-to-macrofluidic: A simple in vitro model of atherosclerosis induced by fluidic stimulation," *Biomicrofluidics*, vol. 17, no. 4, p. 044106, Aug. 2023. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10468215/>
- [13] Q. Fischer, Y. Sbissa, P. Nhan, J. Adjedj, F. Picard, A. Mignon, and O. Varenne, "Use of Simulator-Based Teaching to Improve Medical Students' Knowledge and Competencies: Randomized Controlled Trial," *Journal of Medical Internet Research*, vol. 20, no. 9, p. e9634, Sep. 2018, company: Journal of Medical Internet Research Distributor: Journal of Medical Internet Research Institution: Journal of Medical Internet Research Label: Journal of Medical Internet Research Publisher: JMIR Publications Inc., Toronto, Canada. [Online]. Available: <https://www.jmir.org/2018/9/e261>
- [14] C. Romero-Martínez, L. A. Zúñiga-Avilés, G. M. Cruz-Martínez, J. J. Reyes-Lagos, J. Zagoya-López, and E. Bárcenas-García, "Cardiac Simulator Technologies and Design for Medical Education and Auscultation Training: A Systematic Review," *Bioengineering*, vol. 12, no. 7, p. 731, Jul. 2025, publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2306-5354/12/7/731>
- [15] F. Tazi, A. Nandakumar, J. Dykstra, P. Rajivan, and S. Das, "SoK: Analyzing Privacy and Security of Healthcare Data from the User Perspective," *ACM Trans. Comput. Healthcare*, vol. 5, no. 2, pp. 11:1–11:31, Apr. 2024. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3650116>
- [16] J. D. Pollock, I. V. Murray, S. J. Bordes, and A. N. Makaryus, "Physiology, Cardiovascular Hemodynamics," in *StatPearls [Internet]*. StatPearls Publishing, Mar. 2023. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/books/NBK470310/>
- [17] Kenneth S. Saladin, *Anatomía y fisiología. La unidad entre forma y función.*, 6th ed. McGraw Hill Education, 2013. [Online]. Available: <https://somepomed.org/somepomed/pdf/3er-CNPM/Kenneth-Saladin-Anatomía-y-Fisiología-La-unidad-entre-la-forma-y-la-funcion.pdf>
- [18] Gary D. Hammer; Stephen J. McPhee, *Fisiopatología de la Enfermedad. Una introducción a la medicina clínica*, septima ed. McGraw Hill Education, 2015.
- [19] Guzmán, F. Javier, *Introducción a la Medicina Clínica. Fisiopatología y Semiología*, 2010.
- [20] A. Dávila-Cervantes, "Simulación en Educación Médica," *Investigación en Educación Médica*, vol. 3, no. 10, pp. 100–105, Apr. 2014, publisher: Elsevier. [Online]. Available: <http://www.elsevier.es/es-revista-investigacion-educacion-medica-343-articulo-simulacion-educacion-medica-S2007505714727334>
- [21] P. I. Watts, D. S. McDermott, G. Alinier, M. Charnetski, J. Ludlow, E. Horsley, C. Meakim, and P. A. Nawathe, "Healthcare Simulation Standards of Best Practice™ Simulation Design," *Clinical Simulation In Nursing*, vol. 58, pp. 14–21, Sep. 2021, publisher: Elsevier. [Online]. Available: [https://www.nursingsimulation.org/article/S1876-1399\(21\)00096-7/fulltext](https://www.nursingsimulation.org/article/S1876-1399(21)00096-7/fulltext)
- [22] U. Sánchez-Vásquez, A. B. Daniel-Guerrero, E. Méndez-Gutiérrez, S. Morales-López, I. I. Tovar-Lozano, M. A. Martínez-Rodríguez, I. E. Uribe-Campos, U. Sánchez-Vásquez, A. B. Daniel-Guerrero, E. Méndez-Gutiérrez, S. Morales-López, I. I. Tovar-Lozano, M. A. Martínez-Rodríguez, and I. E. Uribe-Campos, "Diseño, elaboración y validación de un simulador realista y de bajo costo para exploración cardíaca," *Gaceta médica de México*, vol. 157, no. 1, pp. 25–29, Feb. 2021, publisher: Academia Nacional de Medicina de México A.C. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0016-38132021000100025&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [23] Tinsley R. Harrison, Anthony S. Fauci, J. Larry Jameson, Dennis L. Kasper, Stephen L. Hauser, Dan L. Longo, and Joseph Loscalzo, *Principios de Medicina Interna*, decimo novena edición ed. McGraw Hill Education, 2016, vol. 2. [Online]. Available: <https://biblioteca.ucuena.edu.ec/digital/files/original/2a77b54e1b1d5edf8ebe5a6b83b97fdeff329009.pdf>
- [24] Eugene Braunwald, Robert O. Bonow, Peter Libby, and Gordon F. Tomaselli, *Tratado de Cardiología*, undécima edición ed., 2019.
- [25] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, L. Shamseer, J. M. Tetzlaff, E. A. Akl, S. E. Brennan, R. Chou, J. Glanville, J. M. Grimshaw, A. Hróbjartsson, M. M. Lalu, T. Li, E. W. Loder, E. Mayo-Wilson, S. McDonald, L. A. McGuinness, L. A. Stewart, J. Thomas, A. C. Tricco, V. A. Welch, P. Whiting, and D. Moher, "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews," Mar. 2021, publisher: British Medical Journal Publishing Group Section: Research Methods & Reporting. [Online]. Available: <https://www.bmj.com/content/372/bmj.n71>
- [26] H. Taherdoost and M. Madanchian, "A Comprehensive Overview of the ELECTRE Method in Multi Criteria Decision-Making," *Journal of Management Science & Engineering Research*, vol. 6, Jun. 2023.
- [27] —, "Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts," *Encyclopedia*, vol. 3, no. 1, pp. 77–87, Mar. 2023, publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2673-8392/3/1/6>
- [28] ESDESIGN, "¿Qué es el prototipado rápido y cuáles son las tecnologías más usadas?" Jul. 2024. [Online]. Available: <https://www.esdesignbarcelona.com/actualidad/disenio-producto/que-es-el-prototipado-rapido-y-cuales-son-las-tecnologias-mas-usadas>
- [29] TechTarget, "What is DRY principle? | Definition from TechTarget," 2025. [Online]. Available: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/DRY-principle>
- [30] Peter R.N. Childs, *Mechanical Design Engineering Handbook*, segunda edición ed., 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/monograph/pii/B9780081023679000019>
- [31] M. Cruz Ramírez and J. A. Rúa Vásquez, "Surgimiento y desarrollo del método Delphi: una perspectiva cuantitativa," *Biblios*, no. 71, pp. 90–107, Apr. 2018, publisher: Los autores. [Online]. Available: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1562-47302018000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [32] iep, "¿Qué es el método Delphi? - Blog IEP," Feb. 2020. [Online]. Available: <https://iep.edu.es/que-es-metodo-delphi/>
- [33] M. Soegaard, "System Usability Scale for Data-Driven UX," Nov. 2024. [Online]. Available: <https://www.interaction-design.org/literature/article/system-usability-scale>
- [34] A. B. Hamilton and E. P. Finley, "Qualitative methods in implementation research: An introduction," *Psychiatry Research*, vol. 280, p. 112516, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165178119307917>