



UNIVERSIDAD MODELO

Escuela de Ingeniería

Ingeniería Biomédica

Ciclo escolar 2023 - 2024

Octavo semestre

Grupo A

Proyectos VIII

Ordinario

Alumna:

Guzmán Uc Ana Paola

Maestro: Ariana Marilyn Sánchez Mutul

Fecha de entrega: 06 de junio de 2024

Tabla de contenidos

I.	Marco teórico	1
II.	Planteamiento Del Problema	4
III.	Hipótesis	5
IV.	Objetivos	6
	a. Objetivo General	6
	b. Objetivos Específicos	6
V.	Materiales Y Métodos	6
VI.	Resultados	12
VII.	Discusión	13
VIII.	Perspectiva a futuro	13
IX.	Referencias	14

Índice de Figuras

Figura 1. Simulador De Cateterismo Cardiaco LF01012U Nasco	2
Figura 2. Mangueras de cristal calibre 20 de 3/16 in de diámetro interno	7
Figura 3. Bomba de agua RS-385 de 6 - 12VDC	7
Figura 4. Electroválvula solenoide direccional 12vdc normalmente cerrada 0.02mpa-0.8mpa	8
Figura 5. Sensor de flujo YF-S201	8
Figura 6. Diseño de distribución de los componentes	9
Figura 7. Módulo relevador para wemos	9
Figura 8. Microcontrolador Arduino Mega	9
Figura 9. Circuito de PVC	10
Figura 10. Reductor ½ in a ¼ in	10
Figura 11. Diseño en MDF de base para el simulador	11
Figura 12. Conexión de módulos relevador	11
Figura 13. Push buttons de control	12
Figura 14. Prototipo final	12

Resumen

El desarrollo de un sistema de hardware avanzado para un simulador de inyecciones de contraste en radiología vascular es crucial para mejorar la formación de los residentes. Este sistema incluye una bomba de distribución de fluidos y un sistema de retroalimentación con sensores de flujo y presión, capaces de simular presiones sanguíneas y ritmos cardíacos realistas. Además, cuenta con un mecanismo para cambiar los fluidos utilizados en cada práctica. Esto proporciona un entorno de entrenamiento completo y realista, permitiendo a los estudiantes practicar en condiciones similares a las de un paciente real sin riesgos, mejorando así sus habilidades y conocimientos en la administración de medios de contraste en las regiones torácicas y abdomino-pélvicas.

Abstract

The development of an advanced hardware system for a contrast injection simulator in vascular radiology is crucial to improving resident training. This system includes a fluid distribution pump and a feedback system with flow and pressure sensors, capable of simulating realistic blood pressures and heart rates. Additionally, it features a mechanism to change the fluids used in each practice. This provides a comprehensive and realistic training environment, allowing students to practice in conditions like those of a real patient without risks, thereby improving their skills and knowledge in administering contrast media in the thoracic and abdomin-pelvic regions.

“DESARROLLO DEL HARDWARE PARA UN SIMULADOR AVANZADO DE LA ZONA TORÁCICA ABDOMINO PELVIANA APLICADO EN LA PRÁCTICA DE INYECCIONES DE CONTRASTE EN RADIOLOGÍA VASCULAR”

Marco teórico

El cateterismo cardiaco es un procedimiento médico fundamental que se utiliza para examinar y tratar diversas afecciones cardíacas. Este procedimiento implica la inserción de un catéter delgado y flexible a través de un vaso sanguíneo, generalmente desde la ingle o el brazo, hasta llegar al corazón, para realizar los procedimientos de cateterismo es necesario el uso de medios de contraste (NIH, 2022).

Según la ACR (2023) los medios de contraste son compuestos químicos, los cuales absorben fuertemente los rayos X, empleados en los procedimientos de diagnóstico para mejorar la visibilidad y claridad de segmentos específicos del cuerpo humano, aumentando la densidad de los vasos y los tejidos, en estudios de imagenología como radiografías, tomografías computarizadas (TAC) y resonancias magnéticas (IRM), el propósito principal del medio de contraste es resaltar estructuras específicas o fluidos dentro del cuerpo, lo que facilita la identificación de anomalías, lesiones o enfermedades. Hay diferentes tipos de medios de contraste utilizados según el tipo de estudio y la técnica de imagenología empleada.

Medios de contraste según su composición química

- **Medio de Contraste Yodado** (para radiografías y tomografías): Contiene yodo y es especialmente útil para estudios de rayos X y tomografías computarizadas. Se utiliza comúnmente en procedimientos como la angiografía, donde se visualizan los vasos sanguíneos, y la TAC para mejorar la visualización de órganos y tejidos.
- **Medio de Contraste Gadolinio** (para resonancias magnéticas): Este tipo de medio de contraste se utiliza en estudios de IRM para mejorar la imagen de ciertos tejidos y estructuras, como los vasos sanguíneos y el tejido cerebral. No contiene yodo y es una opción segura para pacientes con alergias al yodo.

Sistemas de simulación o phantoms

En la actualidad, se han desarrollado una variedad de sistemas de simulación, mayoritariamente denominados "phantom", con el objetivo de replicar de manera precisa los sistemas del cuerpo humano. Estos avances han brindado a los estudiantes de medicina la oportunidad de llevar a cabo prácticas centradas en la adquisición de conocimientos generales esenciales para su formación. De esta manera, al enfrentarse posteriormente a procedimientos médicos en pacientes reales, cuentan con una valiosa experiencia previa que les permite aplicar sus conocimientos de manera más eficaz y segura (Molina-Martínez, J.L. y et. al. 2012).

Phantoms del sistema vascular

El sistema vascular es uno de los sistemas que se han desarrollado en menor medida, a comparación de otros tipos de procedimientos o partes de la anatomía humana, en el área de simuladores o entrenadores, Guirola y et. al. (2018) en su proyecto “Fabricación y técnicas de punción tipo Seldinger en una fantoma vascular guiado por ecografía” realiza la construcción de una fantoma vascular (cervical - yugulo/carotídeo) con la utilización de gelatina balística al 10% que tiene como objetivo entrenar a los radiólogos sin experiencia para procedimientos intervencionistas en la región cervical de la anatomía vascular, únicamente para conocer la región en la que se debe de ubicar la vena yugular, sin tomar en cuenta las distintas condiciones reales con las que se puede llegar a encontrar con un paciente vivo; por otra parte Traver y et. al. (2017) presenta el desarrollo de un modelo de simulación de la arteria carótida en el entorno de Matlab/Simulink, basándose en sistemas de control con retroalimentación para la construcción de una plataforma de ensayo para robots nadadores, donde al estudiar la dinámica de la arteria carótida izquierda, se realiza una serie de equivalencias entre dominios con los que se obtiene un modelo hidráulico, que emula el comportamiento del sistema cardiovascular en esa zona.



Figura 1. Simulador De Cateterismo Cardiaco LF01012U Nasco. Phantom torácico de paciente para práctica de cateterismo en la yugular, la piel del hombro se quita para dejar ver la musculatura diseccionada y localizar venas, arterias, etcétera. Con

la piel puesta, puede insertar el introductor de aguja. La sensación es realista. Se suministra sangre artificial para confirmar la ubicación del pinchazo cuando sube la “sangre”. (Galería Médica, 2016).

Para desarrollar un sistema de hardware y software, se tiene en cuenta lo mencionado anteriormente. El sistema de hardware trabajará en conjunto con la estructura del sistema vascular y el sistema de control digital. El software, por su parte, se aplicará en un simulador avanzado para la práctica de la inyección de contraste y cateterismo. Este simulador abarcará las zonas torácicas y abdomino-pélvicas, presentando diferentes casos de pacientes según su condición de salud y aplicando diversas presiones mediante un sistema de retroalimentación.

Este enfoque proporcionará a los estudiantes de radiología un mayor conocimiento sin el riesgo de afectar la salud de pacientes vivos o el uso indebido del equipo de rayos X. Reducirá la cantidad de intentos y la duración del procedimiento, aumentando la posibilidad de éxito en la inserción y disminuyendo las complicaciones. Además, mejorará la técnica guiada por puntos de referencia en la superficie cutánea, la cual generalmente se realiza directamente en pacientes vivos. En resumen, esta herramienta de estudio disminuirá significativamente los riesgos involucrados (Pellegrini, S. y et al., 2022).

Composición del Sistema Vascular Torácico, Abdominal y Pélvico:

El sistema vascular que comprende la región torácica, abdominal y pélvica es una red intrincada de vasos sanguíneos que desempeñan un papel esencial en la circulación y suministro de sangre a los órganos vitales en esta área del cuerpo. Esta compleja red vascular incluye arterias, venas y capilares que se distribuyen estratégicamente para facilitar el transporte eficiente de la sangre y mantener la homeostasis.

- **Arterias:** Las arterias transportan sangre oxigenada desde el corazón hacia los diferentes tejidos y órganos. En esta región, destacan arterias de gran relevancia, como la aorta torácica y abdominal, que se ramifican en arterias más pequeñas para suministrar sangre a estructuras específicas.
- **Venas:** Las venas, por otro lado, son responsables de llevar la sangre desoxigenada de vuelta al corazón. Las venas cava superior e inferior recopilan la sangre de la región torácica, abdominal y pélvica para ser dirigida al atrio derecho del corazón.
- **Capilares:** Los capilares son vasos sanguíneos diminutos que conectan las arterias y venas, permitiendo el intercambio de nutrientes y desechos a nivel celular en los tejidos.

Valores Hemodinámicos en los Vasos Sanguíneos

Para comprender mejor los valores hemodinámicos en los vasos sanguíneos, es fundamental conocer los principales parámetros que se miden y cómo estos afectan el funcionamiento del sistema cardiovascular. Los valores hemodinámicos son de suma importancia para controlar el flujo y la presión sanguínea, aspectos esenciales para el correcto funcionamiento del sistema.

- Flujo sanguíneo: volumen de sangre que pasa por una sección del vaso por unidad de tiempo, varía según la demanda metabólica de los tejidos. En la región torácica, abdominal y pélvica. Está adaptado para satisfacer las necesidades de órganos vitales como el hígado, riñones y órganos reproductivos.
- Presión sanguínea: es la fuerza ejercida por la sangre contra las paredes de los vasos sanguíneos. En esta región, la presión arterial se mantiene en rangos específicos para garantizar un suministro constante de sangre a los órganos, evitando variaciones perjudiciales.
- Resistencia vascular: determinada por el diámetro de los vasos sanguíneos, influye en la facilidad con la que la sangre fluye a través de ellos. La resistencia es esencial para regular el flujo sanguíneo y mantener la presión arterial dentro de límites saludables.
- Viscosidad sanguínea: Se refiere a la resistencia que presenta la sangre al fluir a través de los vasos sanguíneos. En términos más simples, es la medida de la "espesura" o "pegajosidad" de la sangre. Es influenciada por varios factores, incluyendo la cantidad de glóbulos rojos en la sangre y la presencia de proteínas y otras sustancias en el plasma. La viscosidad de la sangre normal (μ) es de aproximadamente 3.5×10^{-2} P o de 3.5×10^{-3} Pa-s (Pascal/seg) [$1 \text{ poise(P)} = 1 \text{ dina/s/cm}^2$ equivale a 10 pascales-seg (Pa-s)] (Ciancaglini, C. 2004).

Planteamiento del Problema

Los dispositivos de simulación de pacientes representan una herramienta fundamental en la formación de estudiantes de medicina al presentar escenarios clínicos. Sin embargo, la oferta de simuladores específicos para la práctica del cateterismo es limitada, ya que la mayoría se enfoca en prácticas generales sin la inclusión de casos reales, como ocurre en simuladores de parto o situaciones de urgencia. Esta carencia dificulta la visualización de escenarios auténticos, como aquellos que se presentan en pacientes vivos con condiciones de presión arterial alta o baja.

En el ámbito de la radiología, la utilización de medios de contraste para una visualización más precisa de los órganos implica riesgos, como dolores en las zonas de inyección y la posibilidad de extravasación del medio de contraste. Los efectos secundarios incluyen molestias, dolor, ardor, parestesias y sensaciones desagradables en el sitio de inyección, así como disminución de la

movilidad en la extremidad afectada, entre otros. La aplicación incorrecta de estos materiales puede llevar a errores durante su colocación, especialmente cuando los profesionales de radiología carecen de práctica en escenarios diversos.

Con el objetivo de mejorar la formación de los profesionales de la salud, en particular en radiología, se destaca la complejidad de las inyecciones vasculares de contraste, que demandan habilidades técnicas y no técnicas. La introducción de simuladores avanzados se presenta como una solución para incrementar la seguridad del paciente y reducir errores médicos. La simulación en el ámbito de la salud consiste en situar al estudiante en contextos que imiten aspectos de la realidad, proporcionando condiciones seguras y controladas para practicar y desarrollar habilidades. La simulación clínica ha experimentado un notable crecimiento como herramienta docente en las ciencias de la salud, ofreciendo a profesionales y estudiantes la oportunidad de adquirir habilidades clínicas antes del contacto directo con pacientes reales, promoviendo así la seguridad en la realización de procedimientos.

Por lo que la necesidad de desarrollar un simulador avanzado específico para la práctica de inyecciones de contraste en radiología vascular se fundamenta en la mejora de la formación en salud y la garantía de la seguridad del paciente. A pesar de existir simuladores como el Simulador de cateterismo cardiaco LF01012U Nasco (Figura 1), que reproduce el sistema vascular torácico centrado en venas y arterias centrales, estos no abordan las condiciones de presión arterial, limitando la diversidad de situaciones simuladas.

La implementación de simuladores avanzados con un sistema de control que reproduzca condiciones de presión normales, bajas y altas es esencial para mejorar la formación en radiología vascular. Este enfoque no solo facilita la práctica de inyecciones de contraste en diversos escenarios, sino que también contribuye a la seguridad del paciente al reducir la probabilidad de errores o complicaciones durante la realización de procedimientos médicos.

Hipótesis

El sistema de hardware, compuesto por una bomba de distribución del fluido simulador de sangre y un sistema de retroalimentación con un sensor de flujo, constituye la base de un simulador avanzado para la práctica de inyecciones de contraste en radiología vascular. Este sistema es capaz de simular las presiones sanguíneas y el ritmo cardíaco, proporcionando un entorno de entrenamiento completo y realista. Además, cuenta con un sistema para realizar cambios de los fluidos de sangre utilizados en cada práctica, lo que enriquece la formación práctica de los residentes de radiología al permitirles administrar medios de contraste en el sistema vascular de las regiones torácicas y abdomino-pélvicas.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un sistema de hardware compuesto de bombas de distribución del fluido simulador de sangre y un sistema de retroalimentación de sensores de flujo que sea capaz de simular las presiones sanguíneas y el ritmo cardíaco, con el propósito de enriquecer la formación práctica de los residentes de radiología en la administración de medios de contraste en el sistema vascular de las regiones torácicas y abdomeno pelviana.

Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un sistema de hardware que sea capaz de replicar con precisión las presiones sanguíneas normales y patológicas en las regiones torácicas y abdomeno pelviana, para proporcionar un entorno de entrenamiento completo y realista.
- Integrar sensores y dispositivos de retroalimentación en el hardware simulador para permitir el monitoreo y la evaluación en tiempo real del desempeño de los residentes durante la práctica de inyecciones de contraste.
- Realizar un sistema capaz de desechar los restos de líquidos de simulación de sangre contaminados con medio de contraste y suministrar más del mismo, pero limpios para próximas pruebas.
- Implementar un sistema de control que permita ajustar y personalizar las condiciones de simulación, como la frecuencia cardíaca, la presión arterial y las variables anatómicas, para adaptarse a las necesidades de formación de los residentes.

Materiales y Métodos

- Determinación de valores de las variables.

En el cuerpo humano existen parámetros, la sangre y los diámetros de los vasos sanguíneos, establecidos los cuales son muy importantes para el desarrollo del hardware, los cuales varían según el paciente. La viscosidad de la sangre normal (η) es de aproximadamente $3,5 \times 10^{-2}$ Pa (Ciancaglini, C., 2004) y los vasos sanguíneos en promedio cuentan con un diámetro de 4 mm, se determina la viscosidad del líquido que contendrá el simulador y los diámetros a utilizar, ya que de esta forma se tienen los valores generales y que se encuentren en la mayoría de la población.

- Componentes que conforman el hardware.

En primera instancia se está trabajando con vasos sanguíneos, por lo que se determina que el primer componente a utilizar son mangueras de cristal calibre 20, ya que el diámetro de estos es de aproximadamente 4 mm se consideran los valores de los distintos tamaños del catálogo de Plaxco (2020) y se determina que se necesitan las mangueras de 5/32 in las cuales no se encontraron en el mercado por lo que se sustituyeron por mangueras de 3/16 in (Figura 2).



Figura 2. Mangueras de cristal calibre 20 de 3/16 in de diámetro interno. Utilizadas para transporte y descargue de líquidos, fluidos nobles, gases, aire y aceites (Plaxco, 2020).

La bomba de agua es el segundo elemento más importante ya que se encarga de distribuir la simulación de sangre por medio de los vasos sanguíneos simulados por las mangueras de cristal calibre 20, considerando que en condiciones normales el gasto cardíaco medio es de 5-6 L/min (Homeister J.W., & Kelly K.L., 2021) en este proyecto para cumplir el propósito de imitar este gasto cardíaco la bomba de agua RS-385 de 6 - 12VDC (Figura 3) es la que se va a utilizar ya que cuenta con un rango de uso de 1 – 5 l/min.



Figura 3. Bomba de agua RS-385 de 6 - 12VDC. Cuando bombea líquidos este dispositivo trabaja silenciosamente y puede utilizarse para expulsar aire, aunque el sonido que emite aumenta considerablemente (Electrónica Thido, 2021).

Para poder realizar el llenado y vaciado del sistema después de cada práctica para poder contar con material de simulación nuevo se deberán usar unas válvulas (Figura 4) que sirven

para el vaciado del sistema en los casos necesarios, dichas válvulas se encuentran en esta cerrado mientras se mantengan inactivas y una vez introducidos los 12V de alimentación se activarán permitiendo el paso del fluido.



Figura 4. Electroválvula solenoide direccional 12vdc normalmente cerrada 0.02mpa-0.8mpa. Controla el flujo de fluido utilizando el flujo de electrones. La válvula tiene una disposición de junta en el interior. El líquido sólo puede fluir en una dirección (AG Electrónica, 2023).

El sensor de flujo se encarga de verificar que se esté simulando lo más posible el flujo sanguíneo, este estaría funcionando como un sistema de retroalimentación para poder asegurarse del control correcto, al comparar los sensores de flujo YF-S201, FS300A, FS400A y sus características (Naylamp Mechatronics SAC, 2023) se considera que el más apto para el proyecto es el sensor de flujo YF-S201 (Figura 5) ya que mide de 1 – 60 l/min y cuenta con una entrada de $\frac{1}{2}$ in la cual es igual a la de las válvulas que se utilizarán.



Figura 5. Sensor de flujo YF-S201. Tiene tres cables para su conexión, rojo y negro para la alimentación y amarillo para la salida de los pulsos. La salida de pulsos es una onda cuadrada cuya frecuencia es proporcional al caudal. El factor de conversión de frecuencia (Hz) a caudal (l/min) varía entre modelos y depende de la presión, densidad e incluso del mismo caudal (Naylamp Mechatronics SAC, 2023).

- Diseño de circuito.

Ya teniendo en consideración todos los elementos que conformarán el circuito se realiza un primer diseño de como estarán distribuidos en el simulador (Figura 6) y como se interconectarán entre ellos.

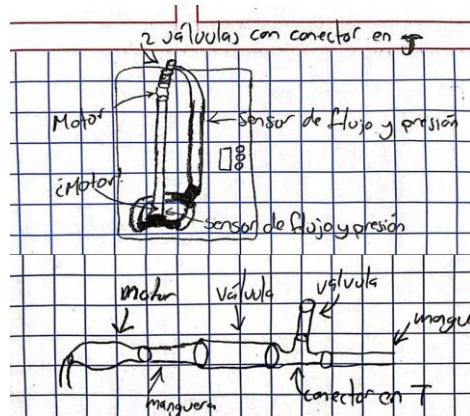


Figura 6. Diseño de distribución de los componentes. Se puede observar un primer diseño a mano de como estarán distribuidas las mangueras, bomba, sensor y válvulas en el simulador.

- Integración de componentes y circuito.

Para realizar la interrupción al momento del llenado y el vaciado, además de la determinación de inicio de censado para simulación se considera que se necesita de relevadores para controlar el paso de voltaje en los momentos necesarios, por lo que se integra al circuito el módulo relevador para wemos (Figura 7), el cual se controla con 5 volts del Arduino Mega (Figura 8), el cual será el microcontrolador para utilizar durante este proyecto.



Figura 7. Módulo relevador para wemos. Permite controlar dispositivos eléctricos que funcionan con un voltaje de CA de hasta 250 VCA o 30 VCD (AG Electrónica, 2019).



Figura 8. Microcontrolador Arduino Mega. Tiene 54 pines de entrada/salidas digitales (de los cuales 15 se pueden usar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), un oscilador de cristal de

16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para soportar el microcontrolador (Arduino, 2020).

Se determina que para poder realizar el llenado y vaciado del simulador de sistema vascular, se deberán poner un circuito de PVC (Figura 9) para poder desaguar e introducir por ellos y las válvulas se colocan antes en el caso de introducción y después en el caso de desagüe para poder tapar la circulación. De igual forma se integraron unos reductores de $\frac{1}{2}$ in a $\frac{1}{4}$ in (Figura 10) los cuales sirven para poder realizar la conexión de las mangueras con las válvulas y sensores y la bomba con todo el circuito por medio de las mangueras de cristal.



Figura 9. Circuito de PVC. Realizado con tapas, conectores hembra y macho y tuvo PVC de $\frac{1}{2}$ in para permitir el desagüe por medio de las tapas superiores de la T.



Figura 10. Reductor $\frac{1}{2}$ in a $\frac{1}{4}$ in. Permite unir todo el circuito con los componentes de mayor tamaño con las mangueras de $\frac{3}{16}$ in (Amazon, 2019).

- Diseño de base.

Se realiza un corte laser en una plancha de MDF de un diseño PNG de un torso para poder colocar el sistema, además se le realizan perforaciones para poder colocar todos los componentes y fijarlos.



Figura 11. Diseño en MDF de base para el simulador. Este torso fue cortado en el centro de innovación de la universidad, utilizando un sistema de control del equipo de corte laser para dibujar la silueta en el MDF.

- Puesta en marcha.

Se realiza la conexión de los módulos relevador con la bomba, las válvulas y el sensor de flujo en una placa perforada colocando en un extremo el negativo y positivo de la batería externa de 12 V que servirá de alimentación para estos componentes y en el otro los 5V y el GND de Arduino donde podremos conectar el controlador del módulo de relevador, ya que se necesita de 5V para activarlo y poder utilizarlo como método interrupción para el control del simulador (Figura 12).

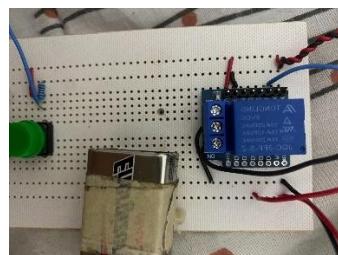


Figura 12. Conexión de módulos relevador. Se coloca el módulo y se realizan las conexiones pertinentes.

Adicionado a esto colocamos 3 push buttons (Figura 13) los cuales controlaran respectivamente lo siguiente:

Azul: Realiza el llenado del simulador con el fluido para poder realizar la simulación.

Negro: Realiza el desagüe del sistema.

Verde: Pone en marcha el simulador para censar y realizar el sistema vascular.

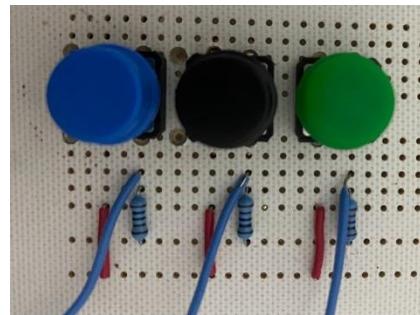


Figura 13. Push buttons de control. Estos push buttons se conectan a Arduino por medio del cable azul para enviar la señal de HIGH o LOW, ese mismo extremo se conecta por medio de una resistencia de 1K a GND y el otro extremo a 5V.

Resultados

Los resultados obtenidos del desarrollo del simulador avanzado de hardware mostraron que se logró programar tres botones que permiten realizar funciones críticas para la práctica de inyecciones de contraste. Estos botones controlan el vaciado del simulador, el llenado y el monitoreo continuo del flujo. Los sensores integrados proporcionaron datos en tiempo real sobre el flujo de los fluidos, permitiendo un monitoreo preciso del desempeño de los estudiantes. La inclusión del mecanismo de cambio de fluidos facilitó la reutilización del simulador sin contaminación cruzada, asegurando prácticas seguras y eficientes. En general, el simulador demostró ser una herramienta valiosa para la formación en radiología vascular, mejorando las competencias técnicas de los residentes.

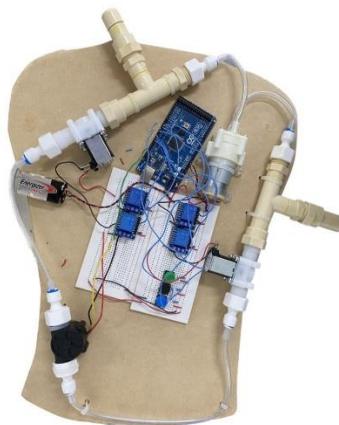


Figura 14. Prototipo final. Podemos observar el hardware del simulador ya finalizado conformado por la bomba, las válvulas, el sensor de flujo y todo el circuito de control.

Discusión

La implementación de un simulador avanzado de hardware para la práctica de inyecciones de contraste en radiología vascular representa un avance significativo en la educación médica. La capacidad de este sistema para simular condiciones realistas del sistema vascular proporciona una plataforma de entrenamiento que refleja con precisión los desafíos encontrados en la práctica clínica. Este nivel de realismo es crucial para preparar a los estudiantes para procedimientos en pacientes reales, minimizando los riesgos asociados con la falta de experiencia.

Aunque no se logró implementar un control de presiones detallado, el sistema permite el vaciado, llenado y monitoreo continuo del flujo mediante tres botones programados. Esta funcionalidad básica es suficiente para simular escenarios esenciales de práctica, permitiendo a los estudiantes familiarizarse con el manejo de fluidos y la dinámica de inyección de contraste.

El sistema de retroalimentación con sensores de flujo proporciona datos en tiempo real que son esenciales para el aprendizaje y la evaluación del desempeño. Esto facilita una educación más interactiva y centrada en el estudiante, donde los errores pueden ser corregidos de inmediato y las técnicas mejoradas continuamente.

Además, el mecanismo de cambio de fluidos garantiza que cada sesión de práctica sea higiénica y segura, eliminando el riesgo de contaminación cruzada y permitiendo múltiples usos del simulador sin comprometer la calidad del entrenamiento. Esto no solo mejora la eficiencia del entrenamiento, sino que también es un factor económico importante al reducir la necesidad de materiales desechables. En comparación con otros sistemas de simulación, como el Simulador De Cateterismo Cardiaco LF01012U Nasco (Galería Médica, 2016), nuestro sistema ofrece una simulación más realista gracias al sistema de flujo implementado. Mientras que otros simuladores pueden centrarse en la inserción de catéteres, nuestro enfoque en la simulación del flujo sanguíneo y el monitoreo en tiempo real proporciona una experiencia de entrenamiento más completa y cercana a la realidad clínica.

La discusión de los resultados destaca la importancia de un enfoque integrado que combine hardware avanzado con capacidades de retroalimentación detallada para crear un entorno de aprendizaje óptimo. El éxito del simulador en recrear condiciones básicas del sistema vascular y en proporcionar una formación práctica efectiva sugiere que su uso podría extenderse a otras áreas de la medicina donde se requiera la simulación de condiciones específicas del paciente. El simulador avanzado desarrollado no solo cumple con los objetivos iniciales del proyecto, sino que también tiene el potencial de transformar la educación en radiología vascular, proporcionando a los estudiantes una herramienta de aprendizaje robusta y realista que mejora significativamente sus habilidades clínicas y su preparación para enfrentar situaciones reales en el entorno médico.

Perspectivas a futuro

Se espera mejorar el sistema de hardware del simulador avanzado mediante la implementación de un control detallado del fluido. Esto permitirá la simulación de distintos escenarios clínicos, adaptando las condiciones hemodinámicas de manera precisa para reflejar variaciones en la presión sanguínea y el ritmo cardíaco según las necesidades del entrenamiento. De igual forma, se planea incorporar una pantalla integrada al dispositivo, que permitirá visualizar en tiempo real los datos de los sensores y la programación del simulador sin la necesidad de utilizar una laptop. Esta mejora hará el sistema más autónomo y accesible, facilitando su uso en diversos entornos de entrenamiento.

Otro paso importante es la introducción del sistema en un simulador completo, que incluya una representación anatómica realista del cuerpo humano. Este simulador avanzado permitirá la práctica en un entorno más cercano a la realidad clínica, utilizando fluidos más viscosos para replicar con mayor fidelidad las propiedades de la sangre humana. La combinación de estas mejoras proporcionará a los estudiantes una experiencia de aprendizaje más completa y efectiva, preparándolos mejor para situaciones reales en el ámbito de la radiología vascular.

Referencias

- ACR. (2023). ACR Manual on Contrast Media. *ACR*. ISBN: 978-1-55903-012-0.
- AG Electrónica. (2019). OKY3011-0: Módulo relevador para wemos. <https://agelectronica.lat/pdfs/textos/O/OKY3011-0.PDF>
- AG Electrónica. (2023). Electroválvula solenoide direccional 12vdc normalmente cerrada 0.02mpa-0.8mpa. <https://agelectronica.lat/pdfs/textos/9/997.PDF>
- Aísa, P. J. S., Pérez, M. P. P., López, V. A., Peleado, A. P., & Montero, I. J. F. (2002). Cateterismo cardíaco y procedimientos intervencionistas. Clínica E Investigación En Arteriosclerosis, 14(3), 156-165. [https://doi.org/10.1016/s0214-9168\(02\)78847-5](https://doi.org/10.1016/s0214-9168(02)78847-5)
- Amazon. (2019). 6pcs 1/4 de tubo OD a 1/2 conector hembra en conector rápido para precio de ósmosis inversa de filtro de agua. <https://www.amazon.com.mx/Mumusuki-Conector-Hembra-ósmosis-inversa/dp/B07VV3R8K3>
- Arduino. (2020). Arduino Mega 2560 Rev3. <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>

- CENETEC. (2006). Sistema de fluoroscopia. Recuperado de: http://www.cenetec.salud.gob.mx/descargas/biomedica/guias_tecnologicas/39gt_fluoroscopia.pdf
- Ciancaglini, C. (2004). Hidrodinamia de la circulación vascular periférica normal y patológica, 6, 43- 61. ISSN 1409-4142.
- Cisterna, F. J. G., González, S. V. R., Anjel, J. P. P., Pizarro, C. R. R., & Garín, I. Á. H. (2020). Medios de contraste intravascular en tomografía computada y resonancia magnética: lo que el clínico necesita saber. *ARS Medica*, 45(1), 57-66. <https://doi.org/10.11565/arsmed.v45i1.1625>
- Electrónica Thido. (2021). Bomba de agua RS-385 de 6 - 12VDC. <https://electronicathido.com/detallesProducto.php?id=V0wzWjM5dVZJMTFBZDlFdzkxL3Zpdz09>
- Galería Médica. (2016). Simulador De Cateterismo Cardiaco Lf01012u Nasco. Recuperado de: <https://galeriamedica.mx/producto/simulador-de-cateterismo-cardiaco-lf01012u-nasco/>
- Guirola-Ortíz, J.A.y et. al. (2018). Fabricación y técnicas de punción tipo Seldinger en una fantoma vascular guiado por ecografía. Scribd. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/563036005/52-Presentacion-Electronica-Educativa-99-1-10- 20181120>
- Homeister J.W., & Kelly K.L. (2021). Sistema cardiovascular. Reisner H.M.(Ed.), *Patología. Un estudio de caso moderno*, 2e. McGraw-Hill Education. <https://accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?bookid=3096§ionid=258856868>
- Kokac, M. (2021). Agentes de contraste radiográfico y reacciones al contraste. Manual Mereck. Recuperado de: <https://www.merckmanuals.com/es-us/professional/temas-especiales/principios-de-estudios-por-la-imagen-radiol%C3%B3gicas/agentes-de-contraste-radiogr%C3%A1fico-y-reacciones-al-contraste>
- Miret, T.P. (2020). Inyección De Medios De Contraste A Través De Catéter Venoso Central. Vygon. Recuperado de: <https://campusvygon.com/medios-de-contraste-cvc/>
- Molina-Martínez, J.L. y et. al. (2012). Los simuladores y los modelos experimentales en el desarrollo de habilidades quirúrgicas en el proceso de enseñanza aprendizaje de las Ciencias de la Salud, 13, 1- 23. ISSN 1695-7504.
- Naylamp Mechatronics SAC. (2023). Tutorial sensor de flujo de agua. https://naylampmechatronics.com/blog/47_tutorial-sensor-de-flujo-de-agua.html

- NIH. (2022). Cateterismo cardiaco. Recuperado de: <https://www.nhlbi.nih.gov/es/salud/cateterismo-cardiaco>
- Pellegrini, S. y et. al. (2022). Experiencia en el uso de ultrasonido en cateterismo venoso central (yugular-femoral) en pacientes pediátricos en una unidad de cuidados intensivos, 120, 167-173. ISSN 0325-0075.
- Plaxco. (2020). Ficha técnica de manguera de cristal. <https://plaxco.com.co/wp-content/uploads/2020/10/Ficha-Tecnica-Manguera-Cristal.pdf>
- Polo, T. (2021). Inyección de medios de contraste a través de catéter venoso central. Recuperado de: <https://campusvygon.com/wp-content/uploads/2021/03/Inyeccion-de-medios-de-contraste-a-traves-de-cateter-venoso-central.pdf>
- Swan, H. J. C., Ganz, W., Forrester, J. S., Marcus, H. S., Diamond, G. A., & Chonette, D. W. (1970). Catheterization of the Heart in Man with Use of a Flow-Directed Balloon-Tipped Catheter. *The New England Journal Of Medicine*, 283(9), 447-451. <https://doi.org/10.1056/nejm197008272830902>
- Traver-Becerra, J.E. y et. al. (2017). Simulador cardiovascular para ensayo de robots de navegación autónoma, 37, 633-640. ISBN 978-84-16664-74-0.
- Varela, C. y et. al. (2015). Extravasación de medios de contraste intravenosos: Lo que todo radiólogo debe saber, 21, 151-157. ISSN 0717-9308.