

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Tesis

DESARROLLO DE UN SIMULADOR PARA EL ENTRENAMIENTO DE PUNCIÓN DE LA VENA SUBCLAVIA CON REALIDAD MIXTA

Nombre del alumno:	LBM. Mayra Molina Carbajal
Director de tesis:	Dr. Juan Manuel Jacinto Villegas
Codirector de tesis:	Dra. Adriana Herlinda Vilchis Gonzáles
Línea de Acentuación:	Área “Control y Sistemas Dinámicos”
Tutores Adjuntos:	Dr. Otniel Portillo Rodríguez
	MCI. Monserrat Ríos Hernández

Toluca, Estado de México 12 de enero de 2026

Resumen

El cateterismo venoso se define como la instauración de una vía de acceso al sistema venoso mediante la inserción de un catéter. En particular, el cateterismo venoso central (CVC) requiere el acceso directo a una de las venas de gran calibre o al corazón, por lo que se considera un procedimiento complejo. Sin embargo, es ampliamente utilizado en las salas quirúrgicas debido a sus diversas aplicaciones clínicas.

Entre los principales sitios de acceso (la vena yugular interna, la vena subclavia y la vena femoral), la vena subclavia presenta una mayor tasa de complicaciones a causa de las estructuras anatómicas que se encuentran próximas a ella. A pesar de esto, continúa siendo una de las vías más empleadas, ya que ofrece ventajas como una menor incidencia de infecciones. Por esta razón, es importante que los profesionales de la salud encargados de realizar la técnica de cateterismo subclavio cuenten con un entrenamiento adecuado, con el objetivo de evitar complicaciones y garantizar la seguridad del paciente.

En la actualidad existen simuladores físicos y virtuales que pueden contribuir a la práctica del CVC; no obstante, la enseñanza de esta técnica aún se sustenta en la premisa de "ver uno, hacer uno, enseñar uno"; este enfoque limita la experiencia práctica de los profesionales al momento de realizar la punción de venas centrales, asimismo, los simuladores físicos requieren la supervisión de un especialista, mientras que los virtuales ofrecen una retroalimentación táctil limitada. En este contexto, los simuladores basados en realidad mixta se presentan como una alternativa idónea para el entrenamiento en la técnica de punción subclavia, al integrar las ventajas de la simulación física y digital en un mismo entorno.

El presente trabajo expone el proyecto titulado "Desarrollo de un simulador para el entrenamiento de la punción de la vena subclavia con Realidad Mixta", cuyo objetivo general es diseñar y construir un simulador físico y virtual para el entrenamiento médico en la técnica de punción de la vena subclavia, empleando el uso de segmentación de imágenes médicas y programación en Unreal Engine 4 (UE4), así como la validación de su integración parcial en un entorno de realidad mixta mediante los lentes Magic Leap 1 (ML1). Todo ello se lleva a cabo bajo la metodología de diseño centrado en el usuario, con el propósito de ofrecer una herramienta anatómicamente precisa, adaptable y escalable a futuros entornos inmersivos.

Como resultado, se desarrolló un maniquí anatómico correspondiente a la región torácica superior derecha (box-trainer), que reproduce las características físicas de la piel, los huesos y los órganos, además de simular el flujo sanguíneo. Adicionalmente, se implementó un entorno virtual complementario que permite visualizar el funcionamiento del simulador y las instrucciones del procedimiento. Estos resultados cumplen con los objetivos establecidos, así como la meta de ingeniería y proporcionan una base sólida para el desarrollo de un simulador de realidad mixta orientado al entrenamiento médico en cateterismo venoso central, integrando modelos tridimensionales de las estructuras internas del tórax con el modelo físico, logrando así una correspondencia exacta entre ambos entornos.

Índice

Página

1. Introducción **2**
- 1.1. Planteamiento del problema . . . 2
- 1.2. Justificación . . . 4
- 1.3. Meta de Ingeniería . . . 6
- 1.4. Objetivos . . . 6
  - 1.4.1. Objetivo general . . . 6
  - 1.4.2. Objetivos específicos . . . 6
- 1.5. Alcances y Limitaciones . . . 6
  - 1.5.1. Alcances . . . 6
  - 1.5.2. Limitaciones . . . 7

2. Marco Teórico **8**
- 2.1. Anatomía de la vena subclavia . . . 8
- 2.2. Cateterización Venosa Central y Periférica . . . 9
- 2.3. Materiales y dispositivos para CVC. . . . 10
  - 2.3.1. Tipos de catéteres y su clasificación. . . . 12
- 2.4. Métodos de entrenamiento y aprendizaje de cateterización venosa central 14
- 2.5. Realidad Virtual . . . 15
- 2.6. Realidad Aumentada . . . 16
- 2.7. Realidad Mixta . . . 17

3. Estado del Arte **19**
- 3.1. Simuladores Físicos . . . 19
- 3.2. Simuladores Virtuales . . . 25
- 3.3. Simuladores con Realidad Aumentada y Mixta . . . 26
- 3.4. Simuladores con dispositivos hápticos . . . 29
- 3.5. Comparación y análisis de los simuladores . . . 29

4. Marco Metodológico **34**
- 4.1. Obtención de los requisitos de usuario . . . 34
  - 4.1.1. Investigación documental sobre la técnica de cateterización de la vena subclavia . . . 35
  - 4.1.2. Aplicación de encuestas . . . 41
- 4.2. Consideraciones Bioéticas del proyecto . . . 49

5. Desarrollo del box-trainer **52**
- 5.1. Casa de la calidad (QFD) y análisis TRIZ . . . 52
- 5.2. Restricciones y Diseño axiomático . . . 53
- 5.3. Segmentación del modelo anatómico en 3D Slicer . . . 54

6. Construcción del box-trainer **62**
6.1. Modificaciones del Pulmón 65
6.2. Modificaciones del Corazón 66
6.3. Instrumentación del box-trainer 69
6.4. Fabricación de las capas cutáneas del box-trainer 72

7. Integración de la Realidad Aumentada con los lentes ML1 **84**
7.1. Programación del seguimiento de imágenes 84
7.2. Programación del Entorno Virtual con ML1 90

8. Programación del Entorno Virtual **92**
8.1. Resultados y Prueba de funcionamiento 97

9. Conclusiones **99**

10.Trabajo Futuro **101**

Referencias **102**

Anexo 1: Encuesta a médicos **107**

Anexo 2: Consentimiento Informado 2 **110**

Anexo 3: Dictamen del Comité de Ética **112**

Anexo 4: Costo total del prototipo **113**

Anexo 5: Artículo de Investigacón redactado **114**

Anexo 6: Tabla de conversión de gauges a milímetros **115**

Índice de figuras

1. Esquema del sistema cardiovascular 8
2. Anatomía de la vena subclavia 9
3. A) Cateterismo venoso central, B) Cateterismo venoso periférico 10
4. Catéter Estándar 12
5. Triángulo de la realidad virtual (VR) 16
6. Ejemplo de aplicación de la AR en medicina 17
7. Características de MR 18
8. Maniquí Advanced PICC and Central Venous Catheter Training Model 19
9. Maniquí Blue Phantom Gen II Central Line Ultrasound Training Model 20
10. Maniquí Anatomy Lab Central Venous Catheterization US Training Model 21
11. Maniquí TruCVC-Central Venous Catheter Trainer 21
12. Maniquí Simulab CentraLineMan 22
13. Maniquí CVC Insertion Simulator II 22
14. Maniquí Buyamag 23
15. Especialista empleando el modelo 3D con un equipo de ultrasonido . . 24
16. Componentes del simulador 24
17. Modelo final impreso en 3D 25
18. Ambiente virtual para la punción de la vena yugular interna 25
19. UF SCVA simulador. A)Modelo físico, B)Visualización del modelo virtual e interfaz 26
20. Simulador para CVC con MR 27
21. Componentes que integran el sistema PIÑATA 27
22. Phantom con el modelo 3D de los vasos sanguíneos sobrepuestos 28
23. Imagen del participante usando el sistema de visualización para la inserción de un catéter periférico 28
24. Robot háptico para la simulación de cateterización de las venas centrales 29
25. Metodología Propuesta. 34
26. Preparación del paciente. 36
27. Procedimiento general para la punción de la vena subclavia. 37
28. Inserción y Fijación del catéter. 38
29. Gráfica de las respuestas obtenidas en la pregunta 11 del cuestionario. . 45
30. Gráfica de las respuestas obtenidas en la pregunta 13 del cuestionario. . 45
31. Gráfica de las respuestas obtenidas en la pregunta 14 del cuestionario. . 46
32. Gráfica de las respuestas obtenidas en la pregunta 15 del cuestionario. . 46
33. Gráfica de las respuestas obtenidas en la pregunta 23 del cuestionario. . 47
34. Gráfica de las respuestas obtenidas en la pregunta 25 del cuestionario. . 48
35. Gráfica de las respuestas obtenidas en la pregunta 27 del cuestionario. . 48
36. Axiomas propuestos para el diseño del simulador. 54
37. Metodología del diseño y construcción del simulador. 55
38. Renderizado de Volumen. 56

39. Editor de Segmentos. Azul:Umbral, Verde:Pintar, Morado:Borrar, Naranja:Tijeras, Rojo:Islas. 57
40. Modelos finales de la segmentación. 58
41. Modelos finales de la segmentación. 58
42. Modelos finales de los órganos obtenidos en la reconstrucción. 59
43. Modelos finales de los huesos obtenidos en la reconstrucción. 59
44. A) Vista Inferior y B) Vista Superior de la segmentación de la piel, grasa y músculo. 60
45. A) Vista Inferior y B) Vista Superior de la segmentación de la piel. . . 61
46. A) Vista Inferior y B) Vista Superior de la segmentación del tejido adiposo. 61
47. A) Vista Inferior y B) Vista Superior de la segmentación del músculo. . 61
48. Modelos 3D recortados en Autodesk Maya. 62
49. Piezas impresas para el esqueleto del simulador. 63
50. Esqueleto del maniquí armado, A) vista frontal y B) vista trasera. . . . 64
51. Diferentes vistas de la escena en Maya Autodesk con el ensamble de los huesos, órganos, piel, tejido adiposo y músculos. 64
52. Modelos 3D recortados con la posición de los huesos modificada, A) vista frontal y B) vista trasera. 65
53. Piezas para el box-trainer con la nueva posición anatómica. 66
54. Parte superior del pulmón derecho impresa en PLA flexible. 66
55. Esqueleto del simulador armado, A) vista frontal y B) vista trasera. . . 67
56. Parte superior del pulmón derecho con TPU NinjaTek 85A. 67
57. Primera versión del modelo modificado del corazón, A) vista lateral, B) vista inferior. 68
58. Segunda versión del modelo modificado del corazón, A) vista lateral, B) vista inferior. 68
59. Tercera y última versión del modelo modificado del corazón. 69
60. Comparación de la primera versión del corazón (Rojo), con la última versión (Blanco), A)vista lateral, B) vista superior. 70
61. Distintos diseños para las conexiones de las mangueras de Látex, A) vista frontal, B) vista superior. 71
62. Recipientes con las bombas de agua para la simulación de las circulación sanguínea. 71
63. Circuito eléctrico para el funcionamiento de las bombas de agua. 72
64. Versión final de la espalda del simulador físico. 73
65. Box-trainer ensamblado sin las capas cutáneas. 74
66. Moldes para la fabricación de la piel del box-trainer, A) molde dividido, B) molde ensamblado. 75
67. Molde dividido para la extracción de la pieza, A)Paredes del molde, B)Tapa del molde y C)Piel del molde. 76
68. Modelo físisco final de la capa de piel. 78
69. Box-trainer ensamblado. 78
70. Marcadores definidos para el seguimiento 85

71. Seguimiento de una sola imagen. 86
72. Diagrama de la programación del seguimiento de imágenes. 87
73. Simulación para el seguimiento de dos imágenes. 87
74. Simulación para el despliegue de los modelos 3D con una imagen como marcador. 88
75. Marcadores propuestos para el seguimiento de la aguja. 90
76. BluePrint del box-trainer. 93
77. BluePrint correspondiente a las instrucciones de punción de la vena subclavia del juego. 95
78. Escenario final del juego. 96
79. Diagrama en el que se resume la programación del entorno virtual. . . . 97
80. Box-trainer ensamblado sin las capas cutáneas 98
81. Despliegue de los modelos 3D sobre el esqueleto del box-trainer con los lentes ML1 98

Índice de tablas

1. Indicaciones para cateterismo venoso 10
2. Principales tipos de catéteres para terapia intravenosa y sus características 13
3. Tipos de simuladores en la práctica médica 15
4. Características de maniquíes comerciales. 32
5. Características de los principales simuladores basados en VR, AR y MR. 33
6. Datos generales de los participantes de la encuesta. 43
7. Restricciones del box-trainer y el entorno virtual. 54
8. Medidas de las capas cutáneas obtenidas mediante la segmentación . . 60
9. Diagrama Estructural del box-trainer 79
10. Lista de materiales para el desarrollo del box-trainer; H: hueso, S: soporte, P: pulmón, C: corazón, B: bomba, RC: recipiente, Un: conexión, Mc: microcontrolador, Sil: silicón. 81

Lista de acrónimos

- **CVC** Cateterismo Venoso Central.
- **CVP** Cateterismo Venoso Periférico.
- **US** Ultrasonido (por sus siglas en ingles *Ultrasound*).
- **VR** Realidad Virtual (por sus siglas en ingles *Virtual Reality*).
- **AR** Realidad Aumentada (por sus siglas en ingles *Augmented Reality*).
- **MR** Realidad Mixed (por sus siglas en ingles *Mixed Reality*).
- **IJV** Vena Interna Yugular (por sus siglas en ingles *Internal Jugular Vein*).
- **SCV** Vena Subclavia (por sus siglas en ingles *Subclavian Vein*).
- **CT** Tomografía Computarizada (por sus siglas en ingles *Computer Tomography*).
- **UF SCVA** Simulador para el Acceso Venoso Central Subclavio de la Universidad de Florida (por sus siglas en ingles *The University of Florida Subclavian Central Venous Access Simulator*).
- **LM** Marcas Anatómicas (por sus siglas en ingles *Land Marks*).
- **UCI** Unidad de Cuidados Intensivos.
- **PTT** Formadores de Tareas Parciales (por sus siglas en ingles *Part-Task Trainers*).
- **UCD** Diseño Centrado en el Usuario (por sus siglas en ingles *User Centered Disign*).

Unidades

- **ml** mililitros.
- **cm** centímetros.
- **G** Gauges (Ver Anexo 6: Tabla de conversión de gauges a milímetros).
- **Fr** French (equivale a 0.33 milímetros).

1. Introducción

El cateterismo de venas centrales (CVC) es aquel cuyo extremo distal o punta se encuentra posicionada dentro del tercio proximal de una vena de gran calibre o ditrectamente en el corazón; se calcula que este procedimiento médico es requerido por aproximadamente el 8 % de los pacientes hospitalizados [1]. Los sitios de acceso son la vena interna yugular, la vena subclavia y la vena femoral, de las cuales, la vena subclavia es la que tiene una tasa de complicaciones más alta (entre 18-21 %) [2, 3], a causa a las estructuras anatómicas que se encuentran cerca de ella, pero es una de las más empleadas (sólo por detras de la vena yugular interna) debido a las ventajas que tiene la inserción de un catéter en ella, por ejemplo su baja tasa de infección [2].

Para evitar un daño severo (por ejemplo un neumotórax) al paciente los profesionales de la salud a cargo de realizar la punción venosa central, deben de tener el entrenamiento adecuado. A pesar de que con el tiempo se han realizado diversos simuladores tanto físicos (maniquíes) como virtuales (ambientes virtuales), el método tradicional para su aprendizaje continua siendo directamente en el paciente, lo que implica un gran riesgo para este. Con el propósito de cambiar esta situación y darle a los médicos un ambiente adecuado y seguro en el que les sea posible aprender procedimientos delicados como el CVC. En los últimos años se han implementado simuladores de entrenamiento con Realidad Aumentada, Realidad Mixta y Realidad Virtual ya que se ha demostrado que son los adecuados para un entrenamiento completo y apegado a la realidad [**?**, 4]. Sin embargo, en el desarrollo de este tipo de simuladores algunos autores adaptan los maniquies comerciales a un sistema de realidad aumentada, lo que lleva a que este tenga que calibrarse constantemente o que los modelos anatómicos virtuales no correspondan completamente con el maniquí físico, aunado a esto el precio de los maniquies comerciales ronda de 1200-12000 USD [2, 5, 6].

En el presente escrito se expone el proyecto titulado "Desarrollo de un simulador para el entrenamiento de la punción de la vena subclavia con Realidad Mixta", este tiene como objetivo emplear la metodología de diseño centrado en el usuario y la segmentación de imágenes médicas para el desarrollo de una herramienta de entrenamiento de punción de la vena subclavia guiada por marcas anatómicas. Los alcances del proyecto contempla la construcción de un box-trainer y el desarrollo de un ambiente virtual con lo necesario para el aprendizaje de la técnica.

1.1. Planteamiento del problema

La instalación de un CVC es una situación frecuente en las salas quirúrgicas, así como en las Unidades de Cuidados Intensivos (UCI), en los cuales requieren la administración de múltiples soluciones, fármacos, medición precisa de variantes fisiológicas, incluso alimentación parenteral; por otro lado, el método de cateterización de las venas centrales, es un procedimiento delicado ya que requiere acceso directo al corazón, motivo por el cual la técnica de inserción de catéteres debe ser manejada cuidadosamente por el médico que realizará el procedimiento, usualmente el anestesiólogo, internista o

cirujano [1, 7].

Debido a la complejidad del procedimiento de CVC, se le asocia una alta tasa de complicaciones (aproximadamente entre 18-21 %) [2, 3]; se consideraba que el principal motivo de esto era la falta de una guía visual durante la punción e inserción del catéter, por lo cual se implementó el uso del ultrasonido (US) como método de visualización. Si bien su implementación logró disminuir la tasa de complicaciones, motivo por el cual es considerado como el "Gold Standard" para el CVC, no se ha descartado el uso del método punción guiado por marcas anatómicas, debido principalmente a la falta de disponibilidad del equipo de ultrasonido en todos los niveles de atención [1, 7].

A causa de la importancia de CVC, así como sus múltiples aplicaciones y la precisión con la que debe de ser realizada para evitar un daño al paciente, es necesario que los profesionales de la salud que deban efectuar este procedimiento cuenten con experiencia y un correcto entrenamiento en la técnica correspondiente, sin embargo, el método tradicional para su aprendizaje y entrenamiento, continua siendo bajo la premisa de "ver uno, hacer uno, enseñar uno". Esto conlleva a que el médico en entrenamiento tenga una escasa experiencia en la técnica de CVC al momento de realizarla en un paciente real, aumentando con esto la probabilidad de generar un daño al paciente o de posicionar incorrectamente el catéter [4,8], sobre todo cuando se realiza la cateterización mediante la vena subclavia, ya que su localización y acceso es complicado en comparación con la vena yugular interna y la vena femoral, pero brinda muchos beneficios para el paciente, ejemplo de esto es su baja tasa de infección y es posible mantener el catéter por tiempo prolongado. Adicionalmente el abordaje a través de la vena subclavia es asociado con una tasa de complicaciones entre el 13-18 % [2, 7] siendo los médicos en entrenamiento los más propensos a provocar alguna complicación [1, 2, 9].

Actualmente, existen otros métodos para el entrenamiento de CVC a través de simuladores los que se han vuelto una de las opciones preferidas en la enseñanza en medicina [4], ejemplo de esto es la práctica mediante maniquís anatómicos, en el mercado existe una gran variedad de ellos, estos pueden ser de baja o alta fidelidad dependiendo del precio, fabricante y las necesidades de los usuarios, generalmente permiten realizar la punción de la vena, mediante marcas anatómicas o US dependiendo de las preferencias del usuario, en los últimos años los maniquíes admiten la inserción del catéter y la simulación del flujo sanguíneo ya sea de manera mecánica o automática. Sin embargo, a mayor número de funcionalidades, el costo del maniquí tiende a incrementarse, aunado a esto, necesitan de la supervisión de un médico experimentado que guíe la práctica, además, los materiales con los que están hechos se desgastan con el uso continuo, por lo que eventualmente deben reemplazarse [4]. Asimismo, hay simuladores basados en realidad virtual (VR), aumentada (AR) y mixta (MR), pero los simuladores para CVC puramente virtuales brindan una escasa experiencia en el entrenamiento a falta de retroalimentación táctil [4, 10].

Debido a la retroalimentación (visual, auditiva y táctil) necesaria para el aprendizaje en esta técnica, además, de una guía para su ejecución al igual que una evaluación del avance en el entrenamiento, los simuladores basados en AR y MR serían los más adecuados para el entrenamiento médico en CVC; sin embargo, solo 4 simuladores se

han desarrollado y aplicado con este propósito, reportados en la literatura, adicionalmente, los simuladores existentes son definidos como PTT (Part-Task Trainers) [2], o formadores de tareas parciales, esto implica que solo una parte de la técnica general (usualmente la punción de la vena) es practicada, lo que puede llevar a tener deficiencias en el entrenamiento al momento de pasar a una ejecución real. La importancia de tener un entrenamiento apegado a las circunstancias reales que puedan tener los médicos es resaltada en varios estudios [4, 11, 12] ya que esta refuerza su preparación al pasar a una ejecución real teniendo confianza y seguridad, dos aspectos de gran relevancia en medicina.

No obstante, los simuladores basados en MR reportados, como los expuestos en [2,5] emplean maniquíes anatómicos comerciales en su desarrollo; esto provoca que los sistemas tengan que calibrarse constantemente y que los modelos 3D virtuales usados como guía visual puedan no empatar completamente con el modelo físico, adicionalmente se tiene que considerar la adquisición del maniquí empleado en el desarrollo para que el sistema funcione adecuadamente. Con lo expuesto anteriormente se resalta la importancia de desarrollar un simulador físico para entrenamiento y aprendizaje de la técnica de CVC, especialmente enfocado en punción de la vena subclavia ya que es la segunda más empleada (solo por detrás de la vena yugular interna) por las ventajas que tiene, pero también es una de las más complicadas de aprender y realizar [2, 7, 13], el cual pueda ser adaptado a un sistema de entrenamiento con AR y MR sin comprometer su precisión anatómica y que incluya la mayor cantidad de pasos, técnicos y no técnicos, empleados en el proceso de punción subclavia.

1.2. Justificación

Para resaltar la importancia del procedimiento de CVC se conoce que únicamente en Estados Unidos de América se colocan más de 5 millones de catéteres centrales al año y alrededor del 15 % de los pacientes presentan alguna complicación entre las cuales están las mecánicas, trombóticas e infecciosas [1,14]. En México entre el 80 % y 95 % de los pacientes hospitalizados reciben tratamiento por vía intravenosa [15], en el estado de Veracruz en México solo entre los años 2006 al 2009 se instalaron 11,993 catéteres venosos periféricos en el Centro Estatal de Cancerología [16].

Si bien se sabe que la colocación de los CVC mediante US ayuda a disminuir las complicaciones y aumentar la posibilidad de éxito, la desventaja que tiene emplearlo como única guía es la disponibilidad del equipo en todos los niveles de atención médica, además de la interpretación de las imágenes por los médicos en entrenamiento y la coordinación mano-ojo necesaria para realizar la punción e inserción del catéter mientras se observa la pantalla de ultrasonido, adicionalmente en emergencias donde se debe de efectuar de manera rápida, no siempre se cuenta con el equipo de US, situaciones como esta destacan la importancia de tener un entrenamiento adecuado en canalización de venas centrales guiado por marcas anatómicas, ya que si no se logra la canalización después de tres intentos, la probabilidad de que se presenten complicaciones aumenta de 4.3 % hasta 24 % [1, 7, 17]. Otro agravante en situaciones de urgencias

es la falta de entrenamiento de los médicos en punción de venas centrales mediante marcas anatómicas, porque, desde la aplicación del US en dicho procedimiento, se ha enfocado el entrenamiento en su uso dejando de lado el método tradicional, lo que vuelve a los nuevos médicos incapaces de realizar el procedimiento sin el equipo de US [16]. Además, específicamente para la vena subclavia, la clavícula bloquea parcialmente las vistas de dicho vaso sanguíneo, volviendo mas difícil el uso de US para su punción y canalización [2].

En cuanto a los simuladores para entrenamiento médico, se ha demostrado que los médicos que reciben un entrenamiento basado en simulación mejoran sus habilidades comparado con los grupos control o aquellos que realizan prácticas deliberadas, en cuanto a las características de los simuladores tenemos: 1) la retroalimentación, 2) la inmersión dada durante el entrenamiento es uno de los factores de mayor relevancia para realizar una simulación efectiva junto con 3) la fidelidad en el procedimiento practicado y 4) la practica repetida [1, 4], de los múltiples tipos de simuladores para practicar CVC, tanto físicos como virtuales, los simuladores basados en MR pueden cumplir con todos los requisitos enlistados anteriormente, además de tener el potencial para detectar errores durante la práctica, aumentar la dificultad con el avance de las practicas, pueden apoyar en el aprendizaje no supervisado [2, 5]. Sin embargo, reportados en la literatura, solo se encuentran 4 de estos simuladores enfocados en la punción de la vena subclavia, de estos ninguno ha salido al mercado para su adquisición, además se debe considerar que en ellos se emplean maniquíes comerciales, por lo que el sistema se ha adaptado específicamente a estos. En cuanto a los simuladores físicos, se encuentra una gran variedad de ellos en venta, pero su precio puede variar de 1 200 a 12 000 USD, dependiendo de las características de este, asimismo se debe considerar en esta inversión, el mantenimiento y el reemplazo de las piezas desgastadas por la práctica repetida.

Por otro lado, en un estudio presentado en Suzuki,et al. [18] un grupo de radiólogos puncionaron la vena yugular interna y la vena subclavia bajo tres condiciones; empleando el método guiado por ultrasonido (US), el método guiado por AR, y empleando ambos métodos simultáneamente (US + AR). En la conclusión del estudio los autores mencionan que hubo mejores resultados en la punción de la vena subclavia utilizando los dos métodos propuestos el de AR y por otro lado el de AR + US en comparación con el método solo guiado por US. Consecuentemente, se demuestra la mejoría del entrenamiento mediante AR sobre el entrenamiento con US.

Como se puede observar, el uso de simuladores basados en MR como la mejor opción para el entrenamiento de CVC en médicos inexpertos, ya que permiten un entorno de aprendizaje seguro tanto para el médico como para el paciente; ayuda a los médicos en la adquisición de conocimientos y confianza antes de pasar a un entorno real, además de aumentar su interés y entusiasmo durante el entrenamiento [19, 20], razones que remarcan nuevamente la importancia de que los simuladores cumplan con la características enlistadas anteriormente teniendo los elementos físicos y virtuales que las garanticen así como el procedimiento completo para la técnica de punción de la vena subclavia.

1.3. Meta de Ingeniería

Desarrollar un simulador físico-virtual para el entrenamiento de la punción de la vena subclavia, compuesto por un maniquí anatómico de la parte superior derecha del torso (box-trainer) y un entorno virtual, obtenidos mediante segmentación de imágenes médicas, validado parcialmente en realidad mixta con los lentes Magic Leap 1 (ML1), con la finalidad de demostrar su factibilidad y proyectar su integración a tecnologías inmersivas futuras.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar y construir un simulador físico-virtual para el entrenamiento de la técnica de punción de la vena subclavia, empleando segmentación de imágenes médicas y programación en Unreal Engine, validando su integración parcial en MR usando los lentes ML1, con el fin de proporcionar una herramienta anatómica precisa y adaptable a futuros entornos inmersivos.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar una metodología para el desarrollo del simulador físico y el mundo virtual.
- Obtener los requerimientos de los especialistas en la salud y especificaciones clínicas para el diseño del escenario virtual y la caja de entrenamiento.
- Definir los requisitos para el entorno virtual y la caja de entrenamiento.
- Definir los requisitos y dimensiones del box-trainer.
- Enfocar la construcción de la caja de entrenamiento para su aplicación en un simulador de realidad mixta.
- Diseñar y construir la caja de entrenamiento.
- Diseñar y programar el entorno virtual.
- Integrar y validar el maniquí anatómico con el ambiente virtual empleando los lentes de realidad aumentada ML1.

1.5. Alcances y Limitaciones

1.5.1. Alcances

- Obtención de los requerimientos de los profesionales de la salud encargados de realizar la punción de la vena subclavia para el diseño del simulador.

- Construcción de una caja de entrenamiento con base a los requerimientos de los especialistas de la salud.
- Se plantea la programación de un ambiente virtual que simule un entorno de práctica presente en la CVC.
- Se enfocará el diseño de la caja de entrenamiento para la posterior adición de unos lentes de realidad aumentada o mixta y un ambiente virtual con el fin de crear un simulador de entrenamiento basado en la realidad mixta.

1.5.2. Limitaciones

- Se tiene un número limitado de participantes disponibles para la obtención de los requisitos de usuario.
- La interacción con el entorno virtual es a traves del teclado de la computadora.
- No se incluye la detección de errores en la práctica simulada en el entorno virtual.
- El entorno virtual se limita a hacer una demostración del posible funcionamiento del simulador de realidad mixta para la práctica de la punción de la vena subclavia una vez que sean agregados lentes de realidad aumentada o mixta.
- La empresa Magic Leap dejó de brindarle soporte técnico al software para desarrollo en ML1, terminando con esto la vida útil del dispositivo a inicios del año 2025, por lo que se tuvo tiempo limitado para programar el entorno virtual en los lentes ML1.

2. Marco Teórico

2.1. Anatomía de la vena subclavia

El sistema cardiovascular (Ver Figura 1) se compone por el corazón (bombea la sangre a todo el cuerpo) y vasos sanguíneos (arterias, venas y capilares), su circuito sanguíneo comienza con la recolección de la sangre oxigenada que sale del corazón por arterias de paredes gruesas, las cuales la pasan a arteriolas que se encargan de llevarla a los capilares, los cuales llevan a cabo el intercambio de oxígeno, nutrientes y la eliminación de desechos. La sangre resultante del intercambio retorna al corazón por medio de vénulas y venas (principalmente vena cava inferior y superior) [21].

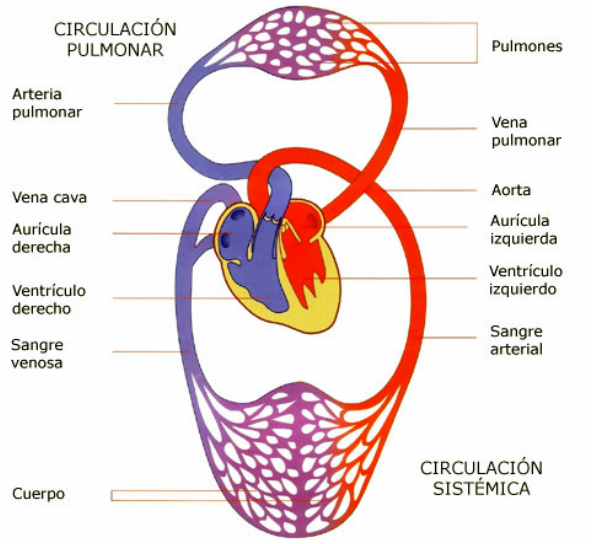


Figura 1: Esquema del sistema circulatorio [22].

La vena axilar se sitúa distalmente en el lado anteromedial de la arteria axilar y en su parte terminal es anteroinferior a ésta. Esta vena se conforma de la unión de las venas: satélite de la arteria braquial y basílica en el borde inferior del redondo mayor [21, 23].

Las descripciones anatómicas dividen la vena axilar con respecto a las tres porciones de la arteria axilar. Por lo que, su extremo inicial distal es la tercera porción, mientras que su extremo terminal proximal es la primera porción. La primera porción de la vena axilar termina en el borde lateral de la primera costilla y comienza la vena subclavia.

La vena subclavia, presenta un calibre de 1 a 2 cm, es la continuación de la vena auxiliar (Ver Figura 2), recibe la sangre del brazo y de la vena yugular externa de la cabeza y el cuello. Es una vena voluminosa de paredes delgadas situada anteriormente con respecto a la arteria subclavia. Describe una curva ascendente a partir del borde externo de la primera costilla, por detrás del tercio medio de la clavícula, y el borde interno del escaleno anterior se une con la yugular interna. Estas vías venosas forman parte del tronco braquiocefálico, ambas después de realizar su recorrido llegan a la vena

cava superior con el objetivo de transportar la sangre a la cámara del corazón (aurícula derecha) que recibe la sangre desoxigenada (Ver Figura 1) [21, 24].

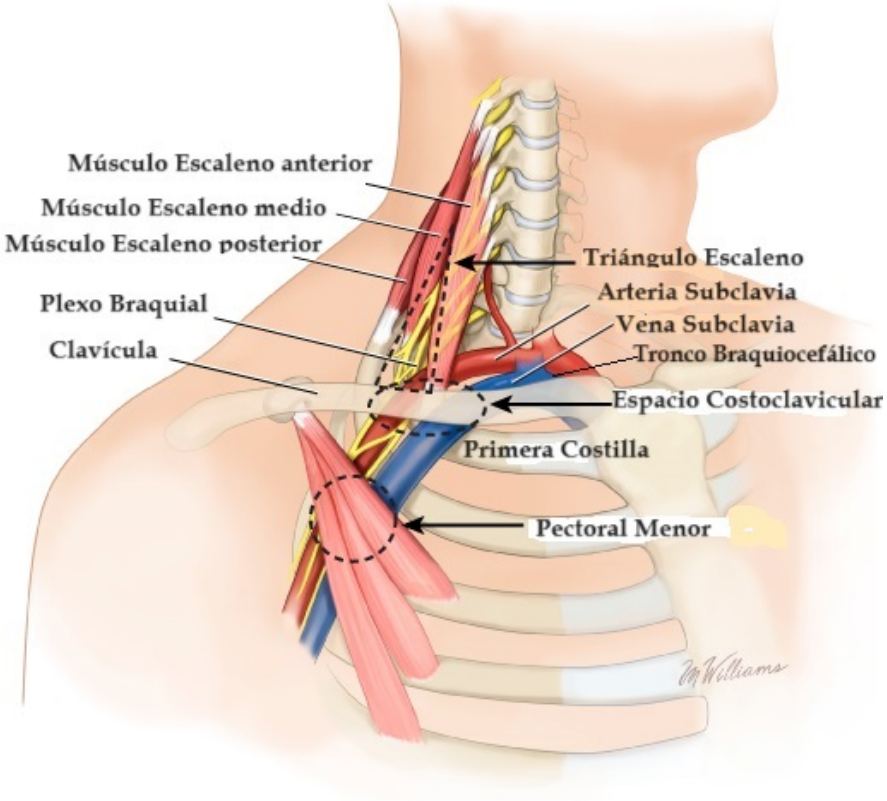


Figura 2: Anatomía de la vena subclavia, editada de [25].

2.2. Cateterización Venosa Central y Periférica

El cateterismo venoso se define como la instauración de una vía de acceso al sistema venoso mediante un catéter. Se diferencia de la venopunción común (proceso de colocar una aguja en alguna vena) en que requiere precauciones adicionales para asegurar que el catéter permanezca en su lugar y sea funcional por el tiempo requerido. Entre estas precauciones se incluyen el elegir una vena adecuada, usar el catéter apropiado y cuidar el catéter para prevenir su desalojo o infiltración de líquido [26].

Existe una gran variedad de catéteres para uso endovenoso que difieren en el material de que están hechos, calibre y longitud. Con base en el tipo de catéter que se inserte, la vena seleccionada y a su uso, se puede hablar de dos tipos de cateterismo venoso; el cateterismo venoso periférico (CVP) y el cateterismo venoso central (CVC) (Ver Figura 3).

En la Tabla 1 se resumen las indicaciones para cateterismos venosos; debido a la posibilidad de extravasación de líquido o de un flujo de volumen inadecuado; los catéteres

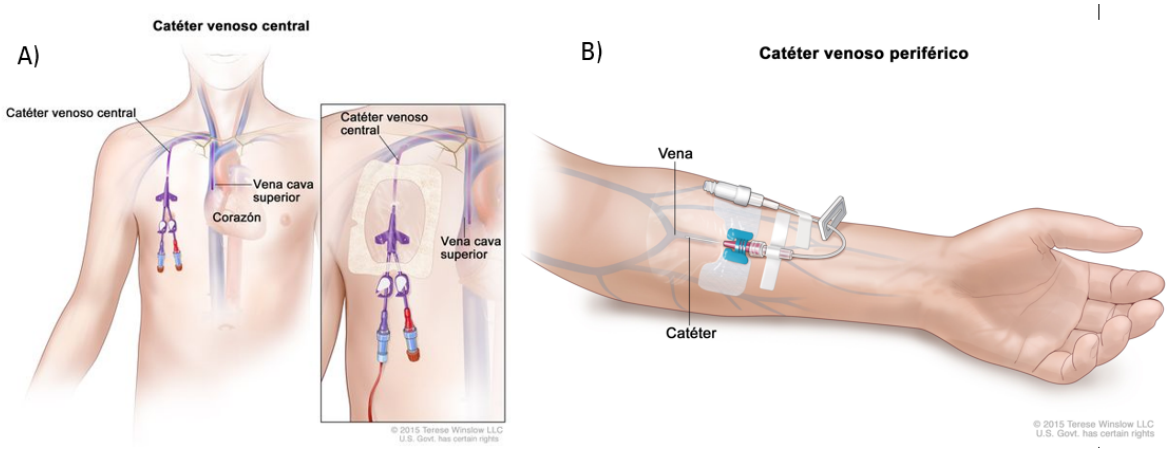


Figura 3: A) Cateterismo venoso central, B) Cateterismo venoso periférico, editada de [27].

Tabla 1: Indicaciones para cateterismo venoso, editada de [26].

Periférico	**Central**
Administración de medicamentos	Infusión intravenosa prolongada
Administración de líquidos	Medición de la presión venosa central (PVC)o función cardiaca y reanimación de emergencia
Administración de nutrición	Exploración radiológica
Transfusión de sangre	Administración de soluciones hipertónicas (nutrición parenteral) y fármacos (debutamina, dopamina)
Flebotomía (incisión en una vena para evacuar una cierta cantidad de sangre)	Intervenciones: filtro de vena cava, marcapasos, colocación de stent y trombólisis venosa

venosos no deben colocarse en venas periféricas de una extremidad en la cual hay edema masivo, quemaduras, lesiones traumáticas, esclerosis (proceso de endurecimiento de un tejido, como consecuencia de diferentes procesos patológicos), flebitis (inflamación de las venas que suele ir acompañada de la formación de coágulos de sangre en su interior) o trombosis (formación de un coágulo de sangre en el interior de un vaso sanguíneo o en el corazón) [26, 28].

2.3. Materiales y dispositivos para CVC.

La mayoría de los pacientes hospitalizados recibe tratamiento intravenoso ya sea continuo o intermitente, a causa de esto es importante que los profesionales de la salud encargados de realizar estos procedimientos (generalmente médicos y enfermeras) aprendan correctamente la forma de realizar la punción venosa.

No hay un material médico ideal para el CVC, todos tienen ventajas y desventajas, y para elegirlo se debe considerar [29]:

- Edad del paciente.
- Movilidad.
- Tiempo que se mantendrá instalado.
- Estructura particular de las venas del paciente.
- Tipo de punción que se va a realizar.
- Indicaciones del tratamiento intravenoso.

Sin embargo, de manera general para la colocación de un catéter venoso central se requiere del siguiente material [1]:

- Gorro.
- Tapabocas o mascarilla.
- Gafas o careta.
- Guantes estériles.
- Bata estéril.
- Campos estériles.
- Clorhexidina al 2 % con alcohol al 70 % o yodopovidona al 10 %.
- Gasas estériles.
- Lidocaína al 1 % o al 2 % sin epinefrina 10 ml.
- Jeringa entre 5-10 ml (luer lock).
- Aguja de 1 a 1.5 pulgadas 18 G[1] para envasar la lidocaína.
- Agujas de 1.5 pulgadas 25 G o 27 G para aplicar el anestésico local.
- Equipo de venoclisis.
- Solución salina 0.9 % 100 ml.
- Sutura de seda 3-0 o 2-0 con aguja recta o curva.
- Porta aguja.
- Apósito transparente de 10 cm por 12 cm.
- Kits de CVC, aunque existen diversos en el mercado, por lo general tienen los siguientes elementos:
    - Catéter venoso central, radiopaco, mono lumen, bi lumen o tri lumen.
    - Guía de alambre con marcas. La guía para el catéter 7 Fr [2] es de 0.81 mm de diámetro, con una longitud mucho mayor a la del catéter y con punta suave en forma de J. La guía suele venir enrollada en un tambor plástico para manipularla con facilidad.
    - Aguja introductora de calibre 18 G o 20 G por 6.35 cm.
    - Jeringa luer-slip de 5 ml.
    - Bisturí con hoja número 11.
    - Dilatador de tejido: 1 Fr mayor que la guía.
    - Mariposas sujetadoras para catéter.

[1] Gauges (G) unidad de medida de diámetro para catéteres cortos y agujas.
[2] French (Fr) unidad de medida de diámetro para catéteres de media/larga duración.

2.3.1. Tipos de catéteres y su clasificación.

Un catéter es un instrumento generalmente largo, tubular, delgado, flexible y de diferentes materiales (goma, plástico, metal, entre otros), sus partes básicas se muestran en la Figura 4. Adicionalmente, éste se utiliza en diversas aplicaciones de la medicina, por ejemplo, en cirugías, procedimientos mínimamente invasivos, administración de medicamentos, colocación de marcapasos, etc. [1, 26].



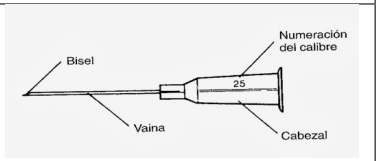
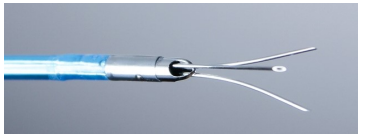
Figura 4: Catéter Estándar [30].

Los catéteres se pueden clasificar de acuerdo con su forma, tamaño, y diseño, tal como se puede observar en la Tabla 2.

Por otro lado, también se resalta el grosor o calibre del catéter, que es inversamente proporcional al diámetro de la aguja, es decir, a menos numeración del catéter mayor grosor. En la Tabla 2 se mencionan ventajas y dessventajas que deben de considerarse en la elección del calibre y tipo de catéter, sin embargo, también deben de considerarse los siguientes aspectos:

- Edad del paciente.
- Calibre de las venas, de 1-2 cm dependiendo del paciente.
- Número de líneas que se instalaran.
- Velocidad de infusión, particularmente si el estado hemodinámico del paciente es anómalo.
- Tiempo que se mantendrá instalado el catéter, número de días, semanas o meses dependiendo del tipo de catéter y el proposito de este.
- Uso al que se destinará, por ejemplo infusion parenteral.

Tabla 2: Principales tipos de catéteres para terapia intravenosa y sus características, obtenida de [29].

Equipo	Características	Ventajas y desventajas	Figura [1]
Aguja recta estéril	-Bisel corto -Calibres 18, 19 a 30 G	-El bisel corto evita la punción de la pared posterior de la vena conforme penetra la aguja -El metal tiende a no irritar la vena, pero puede dañarla o perforarla si el paciente se mueve, podría provocarse una infiltración	
Miniset o agujas con "alas"de mariposa y aletas plásticas fijas, Canula en forma de "paloma"	-Par de "alas"de plástico unidas al eje de la aguja -Longitud entre 1.5 y 3 cm. Calibres: 21, 23 y 25 G	-Las "alas"facilitan el manejo durante la introducción. Además de que se mantienen planas sobre la piel y aseguran la fijación -Útiles para venas frágiles o móviles	
Catéter intravenoso dentro de la aguja	-Catéter de teflón o vialón, se pasa por el interior de la aguja, que sirve de camisa Al retirarla, el catéter se queda dentro de la vena -Calibre 14 a 24 G -Longitud de la aguja: 3-5 cm -Longitud del catéter: 20-29 cm -El equipo incluye una cubierta para conservar la esterilidad del catéter	-Útil cuando la terapia intravenosa dura varios días -Movilidad máxima del paciente con menos probabilidad de lesión o perforación de la vena -Posible fuente de infiltración que conduce a flebitis	
Catéter intravenoso sobre la aguja	-Diseñado para la introducción o extracción de líquidos o dispositivos dentro o desde el sistema vascular periférico -Calibre: entre 14 y 24 G -Longitud: 2 a 20 cm	-Para venas tortuosas (torcidas, hinchadas y dilatadas) -Probabilidad de que el borde afilado de la aguja dañe el catéter y se rompa en la vena, convirtiéndose en un émbolo	

2.4. Métodos de entrenamiento y aprendizaje de cateterización venosa central

El cateterismo venoso central es uno de los procedimientos más comunes que se realizan en el ámbito hospitalario por una gama de profesionales de la salud con un amplio espectro de niveles de habilidad, por lo cual requiere entrenamiento. De la efectividad de este entrenamiento dependerá la probabilidad de causar alguna complicación o daño en la salud del paciente, por esta razón es de suma importancia contar con un adecuado entrenamiento antes de ejecutar un procedimiento delicado en un paciente real. Debido a esto y a la prioridad de la seguridad del paciente en el área de la salud, se han desarrollado varios métodos de entrenamiento para los médicos, los cuales se enlistan a continuación [1, 4, 7]:

1. Entrenamiento tradicional: se trata de las prácticas tradicionales, estas se realizan directamente en un paciente, bajo la premisa de "ver uno, hacer uno y enseñar uno", lo que implica que los estudiantes solo conocen el procedimiento de manera teórica previo a realizarla. Esta técnica tiene ventajas como el grado de fidelidad en el entrenamiento y la retroalimentación recibida, sin embargo, su principal desventaja es que se compromete la salud y seguridad del paciente.

2. Simuladores: los simuladores hacen referencia a métodos de entrenamiento que no involucran directamente a un paciente real, sino que asemejan a uno a través de un medio físico o virtual. En la Tabla 3 se enlistan los tipos de simuladores que existen para la realización de prácticas médicas.

Debido al entorno seguro de entrenamiento que brindan tanto para el paciente como para los médicos, los simuladores se han vuelto el método preferido para el aprendizaje y entrenamiento médico, debido a esto en varias universidades se han creado laboratorios o áreas de simulación en las cuales los estudiantes entrenan antes de pasar al ambiente hospitalario, por otro lado, la practica tradicional aun es ampliamente usada, ya que no todas las universidades cuentan con dichos laboratorios, o en caso de que los tengan no están disponibles para el entrenamiento de todos los procedimientos médicos delicados o no cuentan con suficiente equipo para el entrenamiento de todos los estudiantes, además su mantenimiento suele ser costoso y difícil [1, 4].

Tabla 3: Tipos de simuladores en la práctica médica, editada de [4].

Tipo de simulador	**Ventajas**	**Desventajas**
Maniquís y Phantoms	-Existen modelos de alta fidelidad -Son compatibles con ultrasonido -Fácilmente adaptables a un simulador hibrido	-La alta fidelidad no está garantizada en todos los modelos disponibles -A menudo, no se puede dilatar ni cortar sin dañar permanentemente el modelo
Tejido no humano	-Compatible con ultrasonido. -Poseen fidelidad más alta comparada con algunos maniquís comerciales	-Potencial exposición a bacterias por carne cruda -Solo funcionan para una práctica
Cadáveres	-Alta fidelidad -Potencialmente compatibles con ultrasonido	-Poca disponibilidad -Prácticas limitadas por dilemas éticos
Realidad Virtual	-Retroalimentación durante la práctica -Fácilmente accesible para los alumnos -Entorno de práctica seguro tanto para los pacientes como para los alumnos	-Baja fidelidad en los modelos puramente virtuales -Limitada compatibilidad con ultrasonido -Requiere entrenamiento en la tecnología que emplea

2.5. Realidad Virtual

La realidad virtual (VR por su nombre en inglés *Virtual Reality*) se define como un conjunto de escenas y objetos de apariencia real que crean un entorno virtual, generado por computadora, proporcionándole al usuario la sensación de estar inmerso en él. Las tres características fundamentales que definen la VR (Ver Figura 5) frente a las animaciones 3D tradicionales son [34, 35]:

1. Interacción en tiempo real: permite la libertad de movimiento en el escenario.
2. Inmersión en el entorno: se pierde el contacto con la realidad exterior (solo se perciben los estímulos del mundo virtual).
3. Interacción con los elementos del entorno: el usuario puede interactuar y modificar los objetos del ambiente virtual a través de dispositivos de entrada (joysticks, guantes, mouse, etc.).

Dependiendo del tipo de interfaz o hardware empleado en la visualización interactiva, se podría clasificar o dividir los sistemas de VR en [34]:

- Sistema Desktop de Realidad Virtual: en este se muestra una imagen 2D o 3D en un monitor o casco; el usuario ve la dicha imagen en primera persona, ejemplo de esto son los videojuegos para PC's.
- VR en segunda persona: en este el usuario es un integrante visible del mundo virtual, ya que su imagen se encuentra proyectada en un fondo o ambiente.
- Sistema de telepresencia: aquí se integran camaras, dispositivos táctiles y de retroalimentación, los cuales estan ligados a elementos de control remoto que permite la manipulación de robots que se encuentran en una ubicación remota.



Figura 5: Triángulo de la realidad virtual (VR) [34].

- Sistemas de inmersión de realidad virtual: en este se sumerge al usuario en el mundo virtual, empleando sistemas con sensores de posición y movimiento, con esto se brinda la sensación al usuario de formar parte del mundo virtual.

2.6. Realidad Aumentada

La realidad aumentada (AR por su nombre en inglés *Augmented Reality*) tiene el objetivo de potenciar los cinco sentidos del ser humano (vista, oído, olfato, tacto y gusto) donde la información del mundo real es complementada por el mundo virtual. El termino AR abarca las tecnologías que permiten la incorporación en tiempo real de imágenes e información generados virtualmente, sobre el mundo real (ver Figura 6). Creando un entorno en el que la información y los objetos virtuales se unen con los reales [36–39].

Para que el proceso de realidad aumentada sea posible es necesario [36]:

- Un dispositivo que tome o capture las imágenes reales que observan los usuarios, por ejemplo una cámara, como las que se encuentran presentes en los teléfonos móviles o computadoras portátiles.

- Un dispositivo de visualización en el cual se proyecta la combinación de las imágenes reales con las virtuales, por ejemplo, un monitor, un teléfono móvil o de una consola de videojuegos.

- Un dispositivo de procesamiento o varios de ellos que trabajen en conjunto, con el propósito de procesar la información del mundo real y generar la información virtual para combinarla.

- Un marcador que active la AR, por ejemplo, GPS, código QR, entre otros. Este último actualmente incluido en cualquier dispositivo móvil, computadoras, algunas cámaras y lentes de realidad virtual.

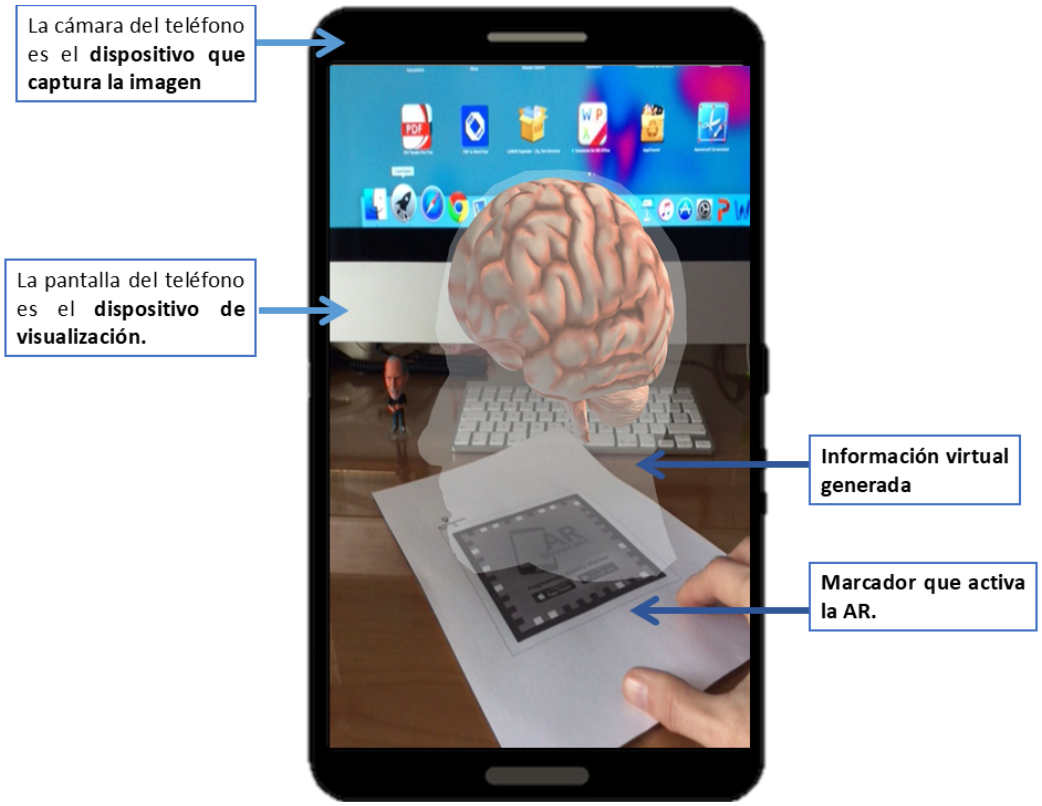


Figura 6: Ejemplo de aplicación de la AR en medicina, editada de: [40].

La AR consta de los siguientes niveles [37]:

- Nivel 0: Consiste en marcadores en el mundo físico. Los activadores en este nivel son los códigos QR (Quick Response) que vinculan con sitios web.
- Nivel 1: AR basada en marcadores de referencia, estos consisten en un patrón único, el cual al ser escaneado permite a la cámara reconocer y mostrar, el o los objetos virtuales ligados a dicho marcador.
- Nivel 2: AR sin marcadores. Los activadores son objetos presentes en el entorno, imágenes predeterminadas o localizaciones GPS.
- Nivel 3: Visión Aumentada. La AR es incorporada en lentes, con el propósito de desplegar en estos la información disponible para los usuarios, también permiten el acceso a internet mediante ordenes de voz.

2.7. Realidad Mixta

La realidad mixta (MR por sus siglas en inglés *Mixed Reality*), es una combinación entre realidad virtual y aumentada, se define como espacios (predominantemente

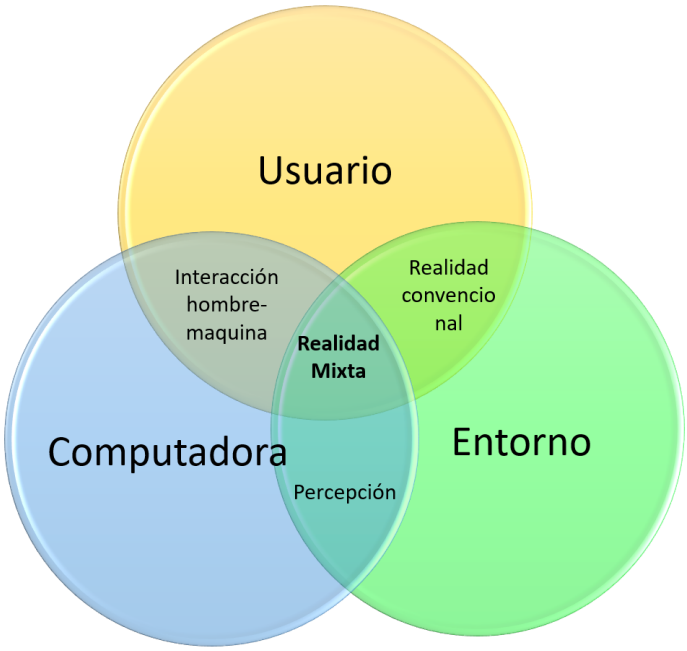


Figura 7: Características de MR, editada de [42].

virtuales), en donde los objetos o personas del mundo real se integran dinámicamente en mundos virtuales (se generan nuevos entornos), donde los objetos físicos y digitales interactúan en tiempo real (Ver Figura 7) [38, 41].

Las principales características de la tecnología MR son tres [41]:

- Combinación de ámbitos reales y virtuales.
- Es interactiva y en tiempo real.
- Se puede registrar en tres dimensiones.

Su funcionamiento se basa en lo siguiente:

- Mundo Virtual: se realiza un registro en tiempo real y en imágenes tridimensionales, para ingresarlo al mundo virtual, donde se puede visualizar mediante una interfaz de computadora.

- Mundo Real: utilizando una cámara de vídeo o cámara web, se crea una interfaz con marcas (suelen ser impresiones en blanco y negro colocadas sobre un soporte rígido) a la que responde la computadora. El código que genera las imágenes virtuales corresponderá a la información que capta la cámara de la interfaz, y se pueden situar según sea la posición y rotación de las marcas.

3. Estado del Arte

En los últimos años la formación y aprendizaje de técnicas quirúrgicas basadas en simulación se ha convertido en una herramienta reconocida en la educación médica, sobre todo en técnicas como la cateterización de venas centrales, debido a la complejidad del procedimiento y la precisión con la que debe de ser realizado para evitar un daño al paciente durante su ejecución, a continuación, se presentan algunos de estos simuladores en el siguiente orden: 1) simuladores físicos, 2) simuladores virtuales, 3) simuladores con AR y MR, y 4) simuladores con dispositivos hápticos.

3.1. Simuladores Físicos

"Advanced PICC and Central Venous Catheter Training Model"de la empresa Dr. Wong [43] (Ver Figura 8) es un maniquí, altamente realista, de acuerdo con la descripción del fabricante, de torso y miembro superior derecho de un adulto masculino, esta diseñado para la formación en procedimientos de CVP y manejo de catéteres venosos centrales. Posee retroalimentación táctil, ya que tiene estructura y textura similar a la humana, ayuda en la adquisición de habilidades de los profesionales en medicina en un entorno seguro, controlado y reproducible.

Cuenta con estructuras anatómicas para la ubicación de sitios de punción como la escotadura esternal, el músculo esternocleidomastoideo, la clavícula y costillas, al igual contiene mangueras que emulan vasos sanguíneos que son: la vena cava superior, la vena yugular interna, la arteria carótida, la vena subclavia, la vena cefálica, la vena basílica y la vena cubital media. El maniquí se encuentra en la posición estándar para el procedimiento, la cual consiste en decúbito dorsal con la cabeza inclinada hacia la izquierda. Este modelo ofrece la posibilidad de realizar la punción y la inserción de catéteres, además que es posible el remplazo de las piezas una vez que han sido desgastadas y es posible la simulación del flujo sanguíneo.

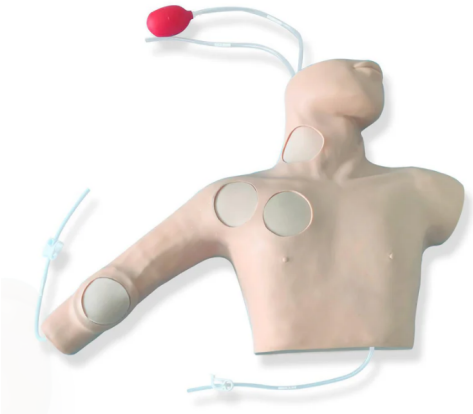


Figura 8: Maniquí Advanced PICC and Central Venous Catheter Training Model [43].

El simulador “Blue Phantom Gen II Central Line Ultrasound Training Model” [44] (Ver Figura 9) es un maniquí realista, de acuerdo con la descripción del fabricante, de la parte superior del tórax y el cuello, para la práctica de las técnicas de CVC mediante ultrasonido y por marcas anatómicas, construido empleando la tecnología de modelado LifeCast (técnica artistica para crear un molde tridimensional detallado de una parte del cuerpo humano basado en una persona viva) [44], las marcas anatómicas externas e internas estan basadas en imágenes digitales del cuerpo humano; está compuesto de un material autorreparable (el tejido simulado SimulexUS, patentado por la empresa Blue Phantom) el cual soporta un uso intensivo, minimizando con ello la necesidad de remplazar piezas. Con este modelo es posible realizar la colocación completa del catéter de vías centrales en la vena yugular interna y subclavia, esto incluye agujas, guías, dilatadores y catéteres, además la pulsación arterial se puede simular mediante la pera de goma manual o la bomba automatizada, contiene líquidos de color azul y rojo que tienen el propósito de diferenciar la sangre venosa de la arterial para brindarle una retroalimentación inmediata a los usuarios durante la punción, de esta manera sabrán si han puncionado la vena o la arteria.



Figura 9: Maniquí Blue Phantom Gen II Central Line Ultrasound Training Model [44].

El simulador “Anatomy Lab Central Venous Catheterization US Training Model” [45] (Ver Figura 10) reproduce a un adulto masculino desde el lóbulo de la oreja hasta el ombligo, con la cabeza inclinada hacia un lado; empleado para la práctica de venopunción y la colocación de catéteres centrales guiadas por ultrasonido. Incluye puntos de referencia como el brazo derecho, la clavícula, las costillas, el músculo esternocleidomastoideo y la articulación esternoclavicular. El módulo de cateterización venosa central es transparente, lo que permite visualizar claramente el recorrido y la relación adyacente de los vasos sanguíneos; además en este modelo es posible sentir la sensación de “pop”,

cuando la punción vascular es exitosa, y se puede simular el flujo sanguíneo venoso; todos los módulos de punción son reemplazables.

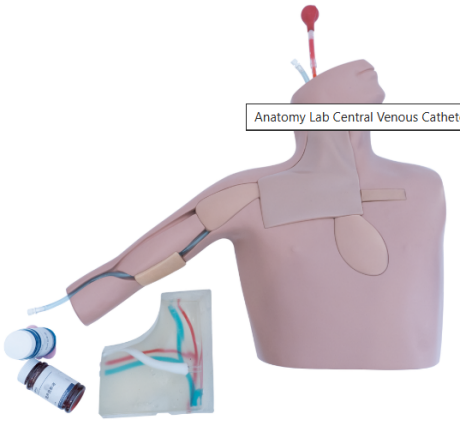


Figura 10: Maniquí Anatomy Lab Central Venous Catheterization US Training Model [45].

El modelo "TruCVC-Central Venous Catheter Trainer" [46] (Ver Figura 11) simula la parte superior derecha del torso y cabeza de un adulto, que permite la práctica de la inserción de catéteres venosos mediante guía ecográfica, presentando una anatomía vascular correcta y realista para el desarrollo de habilidades en la técnica de punción, la manipulación de guías y la colocación de catéteres. Posee una base reclinable que permite el posicionamiento del modelo según sea requerido, aunado a esto permite la simulación del flujo sanguíneo mediante una bomba de activación manual. Las características anatómicas que incluye son la clavícula, el manubrio del esternón, la primera costilla y el músculo esternocleidomastoideo.

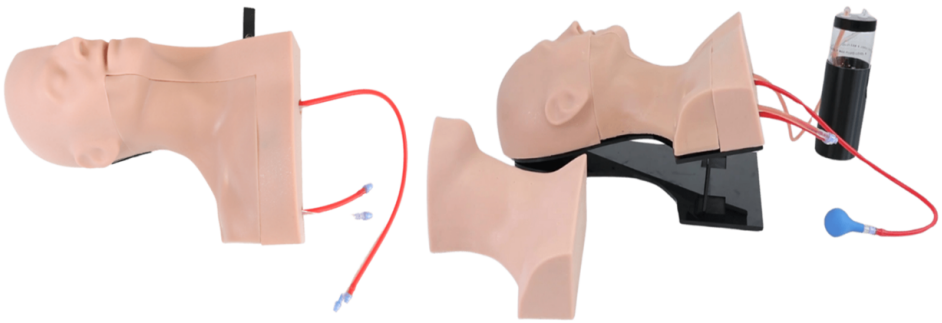


Figura 11: Maniquí TruCVC-Central Venous Catheter Trainer [46].

Uno de los simuladores más completos es "Simulab CentraLineMan/CentraLineWear (incluyendo Deluxe Package)" [47] (Ver Figura 12) ya que este modelo simula la parte superior del torso y cuello de un adulto para el entrenamiento del cateterismo venoso central mediante ultrasonido, es posible la realización de punciones, así como del

cateterismo completo. Posee todos los puntos de referencia anatómicos relevantes, y la simulación del flujo sanguíneo con un regulador que permite ajustar la compresión venosa y simular escenarios de baja presión, fluido de dos colores para la diferenciación de la sangre venosa y arterial.

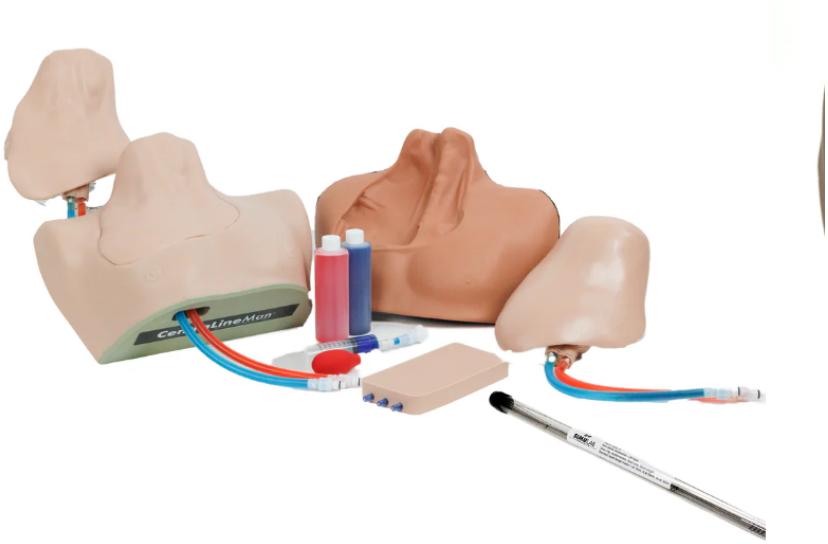


Figura 12: Maniquí Simulab CentraLineMan [47].

Otro de los modelos presentes en el mercado es el simulador "CVC Insertion Simulator II" [48], este simulador de la parte derecha del torso y el cuello, diseñado para el entrenamiento de los procedimientos de cateterización venosa central por ultrasonido y marcas anatómicas. Incluye tres almohadillas de punción emblemáticas con bifurcaciones venosas anatómicamente correctas que simula complicaciones mecánicas como neumotórax, mal alojamiento y punción arterial, también tiene un bloque anatómico transparente para la compresión anatómica y la manipulación de la guía (Ver Figura 13).



Figura 13: Maniquí CVC Insertion Simulator II [48].

El modelo "Buyamag: Venous Vascular Access Catheterization Simulator" [49] es

un simulador de canulación de cateterismo venoso central, consiste en un tórax masculino montado sobre un caballete plegable, diseñado para la práctica de colocación de catéteres venosos centrales (Ver Figura 14). Posee conexiones para catéter subclavio izquierdo y derecho que se pueden enjuagar con agua, hecho de espuma de poliuretano ligera y revestida, la cual puede lavarse con agua y jabón o pintarse con antisépticos.



Figura 14: Maniquí Buyamag [49].

En cuanto a los simuladores físicos reportados en articulos de investigación se encuentra el expuesto por Tanwani et al. [3] quienes presentan un modelo impreso en 3D novedoso, de bajo costo y alta fidelidad para el acceso a la vena Subclavia (Ver Figura 15), junto con un programa de estudios complementario, este último se compone de un material para la preparación del acceso vascular subclavio por ultrasonido (US), seguido de una exposición presencial centrada en el uso de US y el manejo de complicaciones, finalizando con una sesión práctica con voluntarios que realizaron la punción vascular mediante US en el modelo 3D anteriormente mencionado. El modelo 3D de alta fidelidad incluye la vena y arteria subclavia con estructuras de referencia adicionales, que son el pulmón, la clavícula, el manubrio del esternón y la primera costilla, se fabricó con material apto para ecografía. Se concluye que el estudio que han desarrollado junto con el modelo 3D, cuyo objetivo es la mejora de las habilidades en la canulación de la vena subclavia, ha sido creado y validado con éxito, sin embargo, aún se realizaran pruebas de seguimiento que continuarán con su evaluación.

Liu et al. [50] en el 2023 presenta un modelo para el entrenamiento de CVC guiado por ultrasonido elaborado con una pieza de carne de cerdo y dos catéteres de látex llenos de agua pigmentada (azul para la vena y roja para la arteria) (ver Figura 16). Para su construcción, primeramente, se perforaron dos túneles a través de la carne de cerdo y se insertaron los catéteres en ellos. En segundo lugar, se conectó el dispositivo de infusión

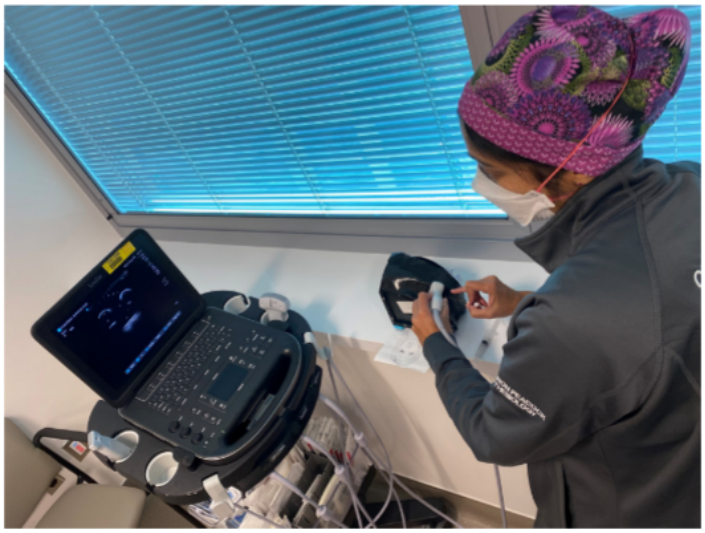


Figura 15: Especialista empleando el modelo 3D con un equipo de ultrasonido [3].

y los extremos proximales de los catéteres, que simulan los vasos sanguíneos, con los extremos distales, luego se añade el agua pigmentada. El propósito de este modelo es su uso para la práctica de la punción de la IJV por medio de ultrasonido.



Figura 16: Componentes del simulador [50].

Por otro lado Raffaele et al. [51] en el 2023 presenta un modelo realista impreso en 3D para el entrenamiento de la CVP guiado por ecografía en pacientes pediátricos (ver Figura 17), las imágenes por tomografía computarizada (CT) empleadas para la elaboración del modelo fueron tomadas del brazo izquierdo de una niña de 8 años de edad. La reconstrucción virtual de dichas imágenes (incluidos huesos, venas y arterias) se realizó mediante un proceso de segmentación semiautomático. Este modelo permite la emulación realista de imágenes por ultrasonido, asimismo, gracias al material con el que está realizado, permite ejecutar más de 200 punciones antes de que sea necesario

sustituir el material.



Figura 17: Modelo final impreso en 3D [51].

3.2. Simuladores Virtuales

Dentro de los simuladores virtuales, tenemos a Gonzalez et al. [10] en el 2022 presenta un prototipo de realidad virtual de baja fidelidad para el entrenamiento de la CVC, específicamente para el entrenamiento de la punción de la vena interna yugular (ver Figura 18). Este simulador consiste en un ambiente virtual, desarrollado en Unity, que simula una sala de operaciones y un paciente; en el ambiente virtual se incluye la simulación de todos los equipos necesarios para el procedimiento de CVC, una bandeja de herramientas, donde se presentan todos los materiales necesarios para la punción y se le permite al usuario seleccionarlos durante la simulación, también incluye una pantalla donde se muestran preguntas sobre los pasos del procedimiento y una pantalla donde se muestra el número de respuestas correctas e incorrectas de los usuarios durante la simulación.

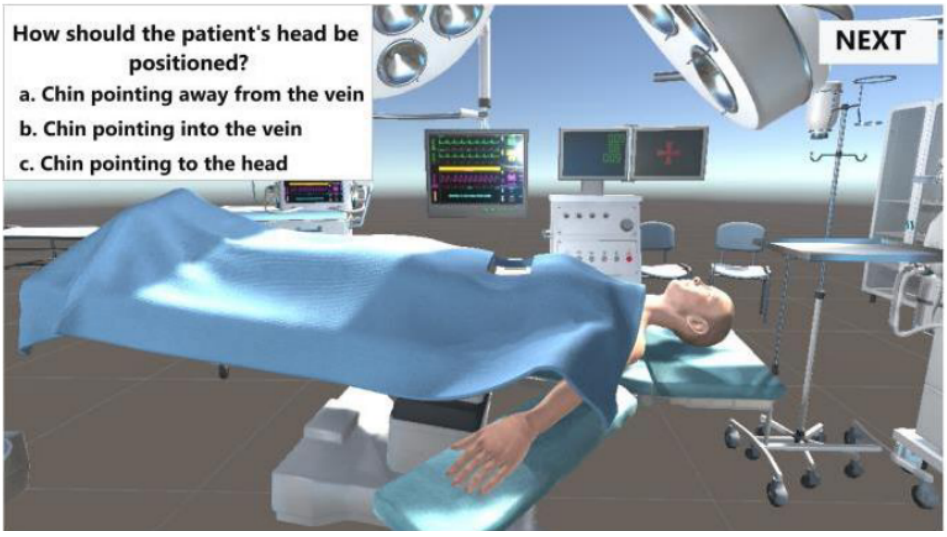


Figura 18: Ambiente virtual para la punción de la vena yugular interna [10].

3.3. Simuladores con Realidad Aumentada y Mixta

El simulador de la Universidad de Florida UF SCVA, presentado por Robinson et al. [2] en el 2014, es un simulador de realidad mixta para el entrenamiento de la punción de la vena subclavia (ver Figura 19), es uno de los primeros reportados en la literatura que emplea la realidad mixta para el aprendizaje de esta técnica. Los componentes físicos del simulador consisten en una estructura esquelética con puntos de referencia óseos, piel y tórax. Los elementos virtuales que integra un modelo virtual en 3D de los huesos, venas y órganos del cuello y tórax y una interfaz de usuario, ambas desplegada en un monitor. Finalmente tiene integrada una cámara que sigue la trayectoria de la aguja con la que se realiza la punción. La retroalimentación que tiene este sistema consiste en una serie de alertas auditivas que anuncian al usuario si la punción se realizó de manera inadecuada.

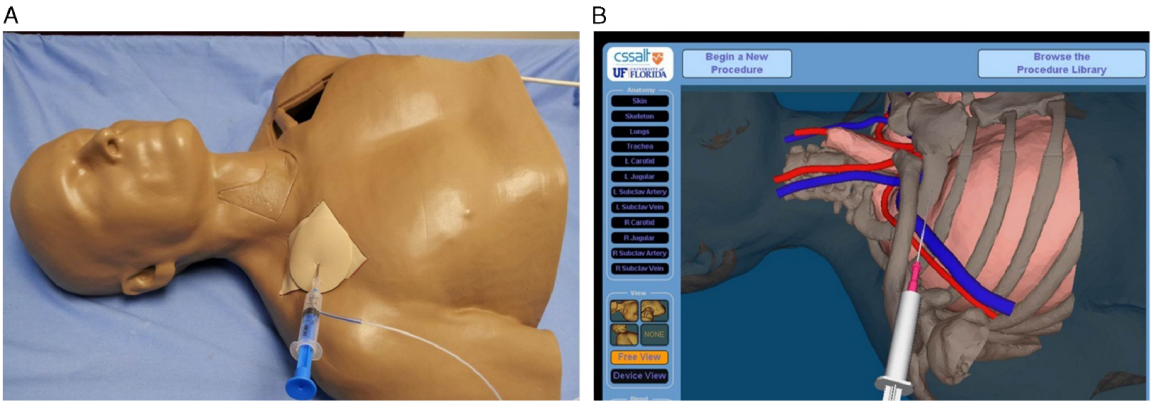


Figura 19: UF SCVA simulador. A)Modelo físico, B)Visualización del modelo virtual e interfaz [2].

Sappenfield et al. [6] en el 2019, se emplea un simulador de realidad mixta (ver Figura20) para la práctica, aprendizaje, enseñanza, y análisis del acceso venosos central mediante los abordajes yugular interno, infraclavicular y axilar con y sin guía ecográfica (ultrasonido). Este simulador consta de un maniquí anatómico basado en imágenes por tomografía computarizada de una persona y su correspondiente modelo virtual 3D de las partes anatómicas que conforman el cuello y la parte superior del tórax. Además, incluye instrumentos portátiles: aguja, sonda de ultrasonido y cámara para la manipulación, seguimiento y registro con resolución submilimétrica mediante sensores magnéticos en miniatura de los seis grados de libertad del sistema. Un algoritmo de puntuación automatizado y un sistema de repetición permite el auto informe de la sesión, en el que se reporta el número y la gravedad de las complicaciones generadas.

Mendes, et al. [5] en el 2020 expone el sistema PIÑATA (Pinpoint Insertion of intravenous Needles via Augmented reality Training Assistannce) (ver Figura 21), un simulador basado en AR para el entrenamiento de cateterización venosa central, consta de un maniquí de la parte superior del torso y cuello, un modelo virtual 3D de las

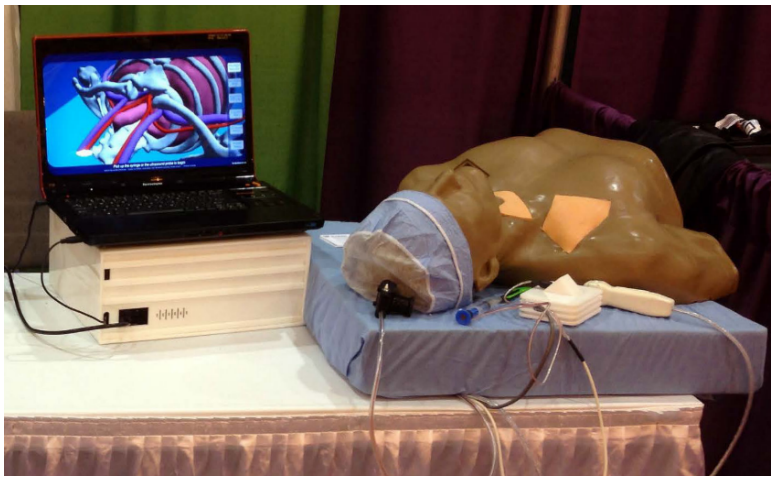


Figura 20: Simulador para CVC con MR descrito en [6]

venas centrales y una aguja empleada en punción venosa central con un marcador, el cual permite su reconocimiento por la aplicación virtual desarrollada en Unity 3D y un marcador de posición para el maniquí en forma de L, además como dispositivo de despliegue de los componentes virtuales, emplea un smartphone colocado en unos lentes de la marca Aryzon (fabricados por la empresa Aryzon en paises bajos, Holanda). Este sistema tiene la particularidad de medir el ángulo y profundidad de inserción de la aguja.



Figura 21: Componentes que integran el sistema PIÑATA [5].

Suzuki, et al. [18] en el 2021 presenta un simulador de AR para cateterización de las venas centrales, empleando un maniquí Phantom, con una vena yugular interna y una vena subclavia elaboradas de resina y tubos blandos, además de una clavícula detectable debajo de la piel (ver Figura 22). Sus elementos virtuales constan de un modelo 3D de las venas y arterias involucradas en la punción, segmentadas de imágenes

por tomografía computarizada en el software Blender e integradas a una aplicación de AR mediante la plataforma de Unity, misma que se despliega en los lentes de realidad aumentada HoloLens de Microsoft y en una Tablet.

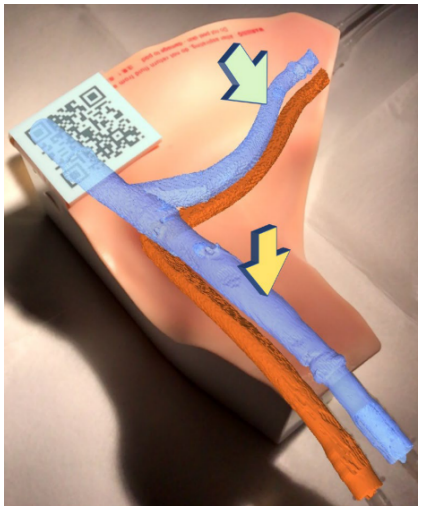


Figura 22: Phantom con el modelo 3D de los vasos sanguíneos sobrepuestos [18].

Rochlen. L, et al. [52] en el 2022 describe un sistema de realidad mixta para entrenamiento en la inserción de catéteres intravenosos periféricos (ver Figura 23), empleando un maniquí de un brazo, y los lentes de AR HoloLens, los cuales tienen la función de permitir al usuario visualizar las características anatómicas internas superpuestas en un maniquí a través de imágenes generadas por computadora. El programa y los modelos 3D empleados fueron desarrollados con el entorno de programación Unity 3D en conjunto con ArtToolKit.

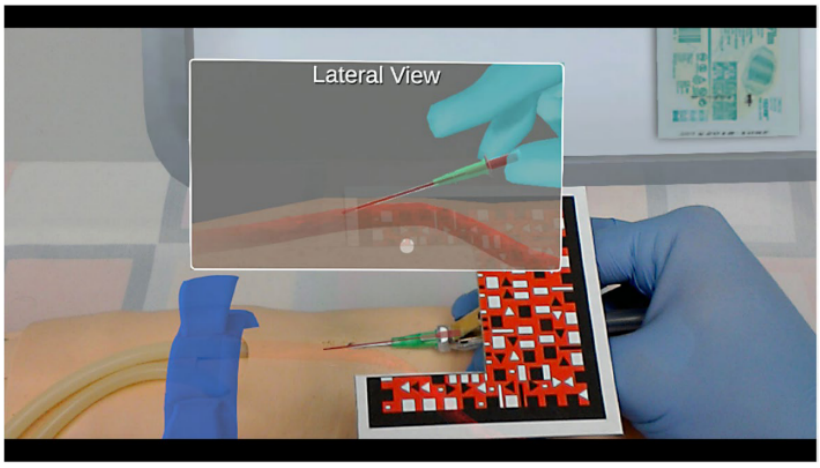


Figura 23: Imagen del participante usando el sistema de visualización para la inserción de un catéter periférico [52].

3.4. Simuladores con dispositivos hápticos

Pepley, et al. [53] en el 2017 describen un simulador Robótico háptico para la cateterización de las venas centrales (ver Figura24). El simulador utiliza un dispositivo háptico llamado Geomagic Touch X y el cual cuenta con un efector final simulando una jeringa, mediante este dispositivo se proporciona una fuerza de retroalimentación que es generada proporcionalmente a la inserción lineal de la aguja. Además, la imagen virtual del ultrasonido permite la visualización de: la arteria carótida, la vena yugular interna derecha y la posición de la aguja en tiempo real. Finalmente, se compone de una interfaz de usuario la cual muestra los resultados obtenidos durante el entrenamiento como la ejecución correcta de la técnica de punción y la ubicación adecuada de la aguja.

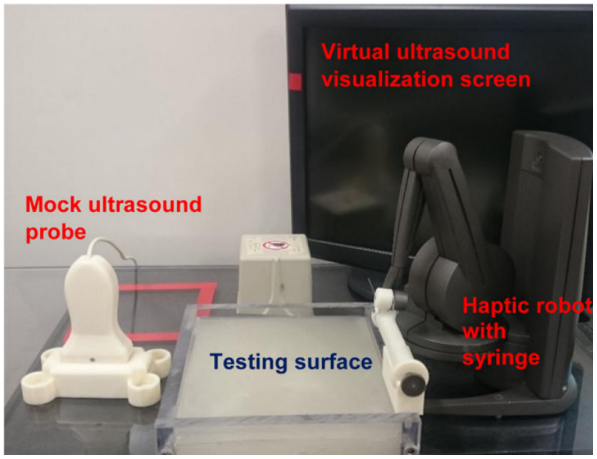


Figura 24: Robot háptico para la simulación de cateterización de las venas centrales [53]

3.5. Comparación y análisis de los simuladores

En la Tabla 4 se exponen algunas de las características de los maniquíes disponibles en el mercado presentados en la sección 3.1, aquí se puede apreciar que cinco de los siete maniquíes han sido enfocados a el aprendizaje de la técnica de cateterización de venas centrales guiada por US, además de que simulan el flujo sanguíneo de manera mecánica y no todos simulan los órganos internos de la sección del torso, ya que solo tienen un espacio vacío en el lugar donde debería estar el pulmón, aunado a esto su precio en el mercado ronda los 1,250 a 12,000 USD dependiendo de los accesorios, materiales y funcionalidades que incluyen. Aunque los simuladores físicos como estos son los favoritos en el entrenamiento médico, ya que son los que están disponibles en el mercado para su adquisición, el aprendizaje con estos necesita de la supervisión de un experto y es necesario el remplazo del material en algún momento, así mismo no se conoce el número de universidades u hospitales tienen disponible maniquíes para el aprendizaje de sus alumnos.

Por otra parte, una ventaja que actualmente poseen los maniquíes es su potencial para formar parte de un simulador híbrido (basado en AR o MR), agregando elementos virtuales que puedan complementar tanto la práctica como al simulador, dando la posibilidad de crear un simulador de entrenamiento que permita el aprendizaje autónomo, al brindar guías y detección de errores para el aprendizaje, ejemplo de esto es el trabajo expuesto en [5] en el que se usa el maniquí Sistema CentraLineMan®al cual le adaptan un sistema virtual mediante marcadores, y un teléfono móvil, sin embrago, cuándo se hace esto no se puede asegurar la precisión en la correspondencia de los elementos virtuales con el maniquí, de la misma forma tienen la desventaja de no poder asegurar la fidelidad anatómica de los modelos 3D de los vasos sanguíneos, así como de cualquier otra estructura que sea agregada a este; así mismo estos sistemas pueden llegar a requerir de constante calibración manual para que coincida el mundo virtual y el físico, lo que puede lleva a que se tenga un error en la posición de estos, perdiendo precisión en la práctica. Otro punto que considerar en estos sistemas híbridos con maniquíes comerciales es el hecho de que los sistemas virtuales estarán adaptados a un tipo específico de maniquí, haciendo necesaria la adquisición de dicho maniquí para el uso del sistema.

En la Tabla 5 se muestran algunos simuladores basados en VR, AR y MR, que poseen características de interés para el desarrollo del presente proyecto. En éstos simuladores se puede notar lo siguiente: 1) en [5,10,12,18] se enfocan en el entrenamiento de punción de la vena yugular interna, debido a que es el punto de acceso central más empleado en la práctica médica; 2) en [10, 12, 18] se enfocan en el método de acceso mediante ultrasonido, a causa de que este ha disminuido la tasa de complicaciones desde que comenzó su uso hace más de 35 años [7], si bien es cierto que el uso de US como guía visual aumenta las probabilidades de un abordaje exitoso, no puede descartarse la técnica de abordaje por marcas anatómicas ya que el equipo no está siempre disponible como por ejemplo en situaciones de emergencia [1]; 3) éstos simuladores proporcionan retroalimentación visual; 4) en [5,12,18] los modelos 3D que implementan solo muestran las venas centrales de interés (IJV y SCV), dejando de lado estructuras anatómicas importantes que deben de considerarse durante el método de intervención, como lo son la clavícula, la arteria subclavia y el pulmón; 5) en [2, 5, 12, 18] se enfocan en el entrenamiento de habilidades técnicas, como lo es la inserción de la aguja, con lo cual se tiene un entrenamiento incompleto del método de punción de venas centrales, ya que se omiten pasos importantes para procedimiento al pasar a un ambiente real como la delimitación y desinfección del sitio de acceso.

Así mismo, cabe destacar que solamente el sistema presentado en [5] señala el sitio y profundidad de punción, al igual que los grados de inclinación de la aguja, pero tiene la limitación de que el sistema debe de calibrarse constantemente, a causa de que emplearon un maniquí comercial y los lentes de realidad aumentada que emplean (Aryzon) son incómodos para los usuarios, además debido a la ubicación y tamaño de los marcadores pasivos empleados se crea una oclusión de los objetos del mundo virtual. Por otra parte el sistema expuesto en [2] que emplea MR a través de un monitor, es uno de los más completos en cuanto a entrenamiento de CVC y detección de errores,

sin embargo, a los médicos les dificultaba observar el monitor durante el entrenamiento, adicionalmente emplea un seguimiento magnético para rastrear la posición de la aguja en todo momento, mediante el cual se obtiene la interacción de los elementos físicos del simulador con los virtuales, sin embargo, es necesario que el sensor magnético se encuentre conectado al equipo de cómputo en todo momento, esto limita la libertad de movimiento de la aguja y del médico. Otro aspecto relevante de los dos sistemas abordados anteriormente es que son los únicos que se basan en el método de acceso guiado por marcas anatómicas.

A pesar de que estos últimos dos simuladores poseen una técnica de entrenamiento más completa debido a la medición de variables de interés para el aprendizaje de la técnica y a la retroalimentación visual y táctil que se le brinda al usuario, aún les falta integrar características de interés para el aprendizaje completo y autónomo de la técnica de punción subclavia, como el abordaje de aspectos técnicos y no técnicos del procedimiento, el conocimiento de las estructuras anatómicas cercanas al sitio de punción, la identificación de los puntos de referencia anatómicos, así como las instrucciones para su localización y el posicionamiento de las manos para llevar a cabo la localización y punción de la vena. Cabe destacar también la importancia de asegurar la precisión anatómica tanto de los elementos físicos como virtuales del simulador, así como la correspondencia de sus dimensiones, con esto se tendría una guía visual confiable durante la práctica; considerando lo anterior se puede notar que los simuladores basados en MR y AR son los más adecuados ya que tienen el potencial necesario para abarcar todas las características y necesidades mencionadas.

Tabla 4: Características de maniquíes comerciales.

Nombre del maniquí	**Advanced PICC and CVC model [45]**	**Blue Phantom Gen II [44]**	**Anatomy Lab US Model [45]**	**TruCVC [46]**	**SimuLab [47]**	**Buyamag Chest Model [49]**	**CVC Insertion Sim II [48]**
Enfocado en la vena subclavia	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Uso de US	N.E.[b]	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Uso de marcas anatómicas	Sí	Sí	N.E.	Sí	N.E.	N.E.	Sí
Puntos de referencia anatómicos	Sí	Sí	N.E.	Sí	Sí	N.E.	Sí
Simulación de flujo sanguíneo	Mecánico	Mecánico y automático	Mecánico	Mecánico	Mecánico y automático	N.E.	N.E.
Simulación del pulmón	No	No	No	Sí	Sí	No	Sí
Remplazo de material	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Empresa fabricante	Dr. Wong Anatomy	CAE Healthcare/ Blue Phantom	Anatomy Lab/ 3B Scientific	TruCorp Ltd.	Simulab Corporation	Buyamag Inc.	KYOTO KAGAKU CO.
Precio	2,057 USD	3,305-8,260 USD	2,645 USD	5,000-12,000 USD aprox.	N.E.	1,250 USD	N.E.

[b] N.E: No se especifica esta información del producto en la página web de los proveedores.

Tabla 5: Características de los principales simuladores basados en VR, AR y MR.

Año **Autor** **Simulador**	**2014** **Robinson, et al.** **UF-SCVA mixed simulator** **[2]**	**2017** **Pepley, et al.** **DHRT** **[12]**	**2020** **Mendes, et al.** **PIÑATA** **[5]**	**2021** **Suzuki, et al.** **ARS para evaluación de CVCT** **[18]**	**2022** **González, et al.** **Prototipo de VR de baja fidelidad para CVCT** **[10]**
Vena de inserción	SCV[a]	IJV	IJV y SCV	IJV y SCV	IJV
Tipo de Simulador	MR	VR	AR	AR	VR
Dispositivo visual	Monitor	Monitor	Casco de AR (Aryzon)	Casco de AR (HoloLens)	Monitor
Interacción con Maniquí Anatómico	SI	NO	SI	SI	NO
Implentación de dispositivos hápticos	NO	SI	NO	NO	NO
Tipo de Retroalimentación	Auditiva y Visual	Visual	Visual	Visual	Visual
Técnica	LM	US	LM	US	US
Proporciona una evaluación o reporte al finalizar la sesión	SI	SI	NO	NO	SI
Señala el punto de inserción	NO	NO	SI	NO	NO
Muestra el ángulo de la aguja	NO	NO	SI	NO	NO
Muestra la profundidad de la aguja	SI	SI	SI	NO	NO
Interacción precisa a nivel anatómico	NO	SI	NO	SI	NO
Habilidades técnicas	SI	SI	SI	SI	NO
Habilidades no técnicas	NO	NO	NO	NO	SI
Intrucciones al realizar la practica	NO	NO	NO	NO	SI

[a] SCV: vena subclavia, IJV: vena yugular interna, MR: realidad mixta, AR: realidad aumentada, VR: realidad virtual, LM: marcas anatómicas, US: ultrasonido.

4. Marco Metodológico

En esta sección se describe la metodología del proyecto propuesto y el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio. En la Figura 25 se resumen de manera general los pasos que comprende la metodología propuesta.

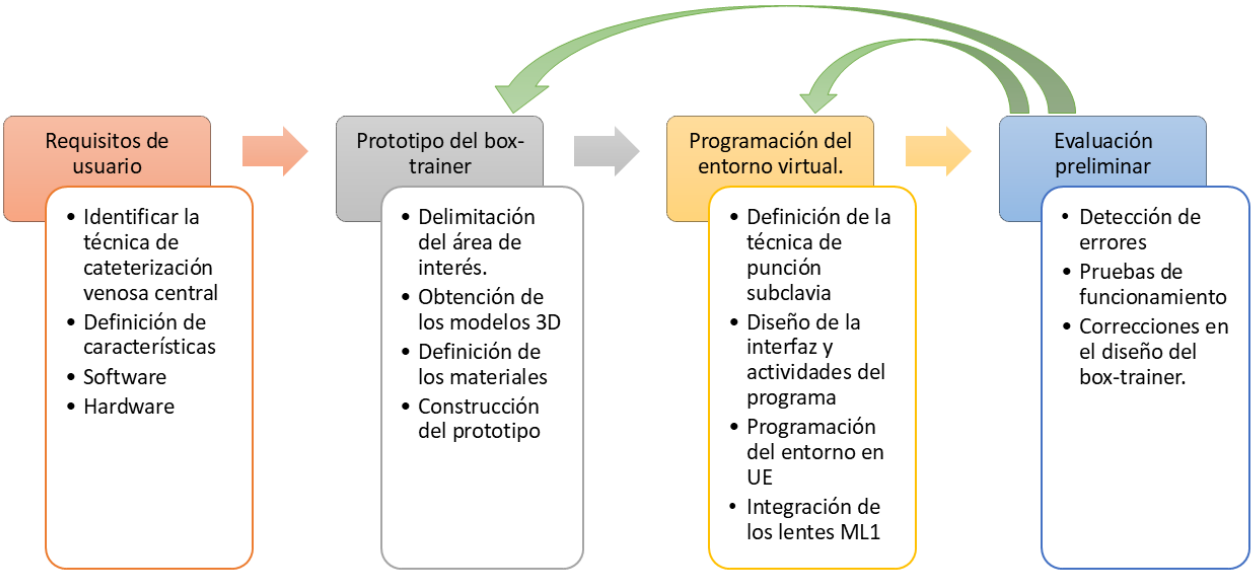


Figura 25: Metodología Propuesta.

4.1. Obtención de los requisitos de usuario

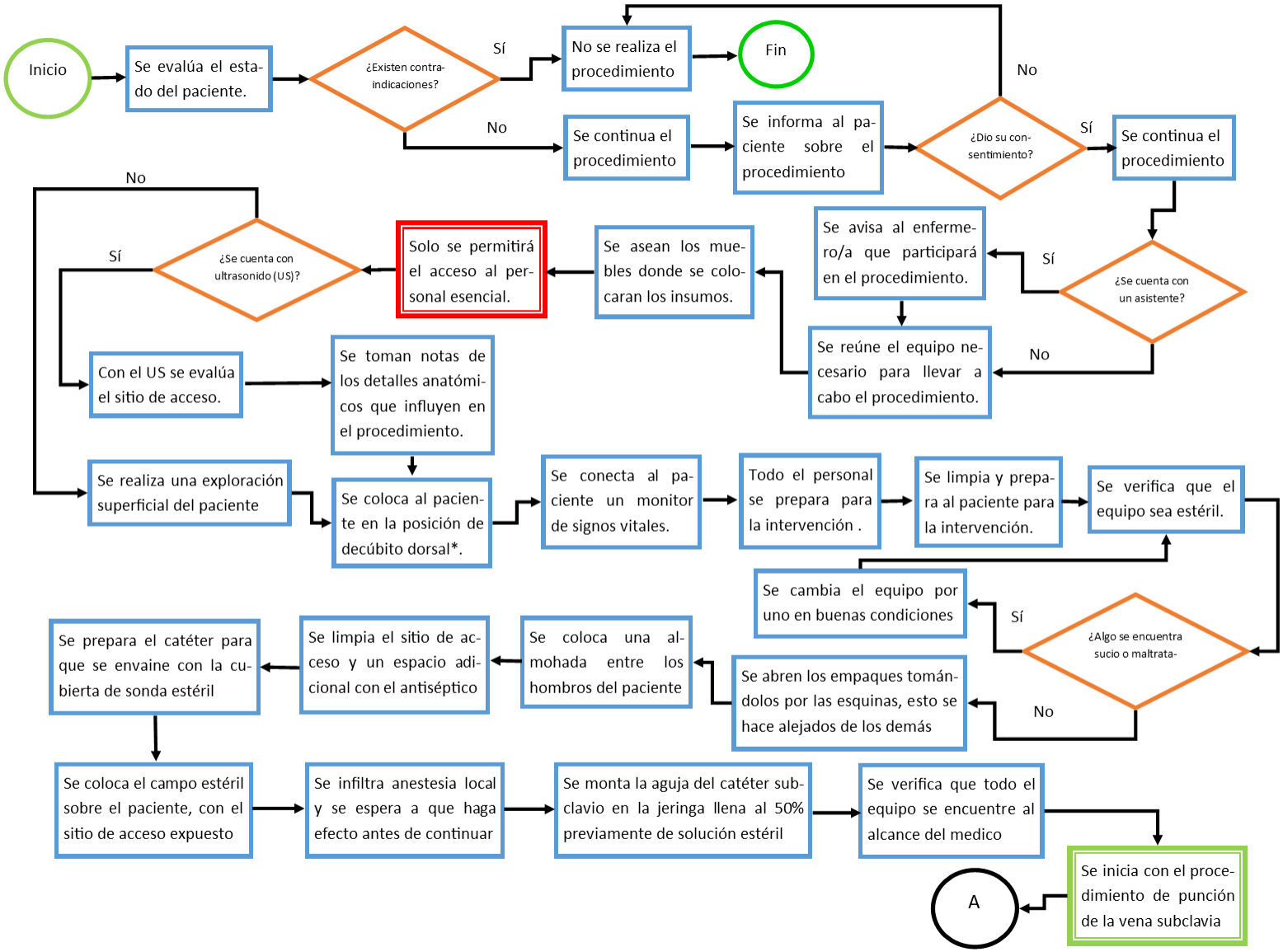
Aproximadamente, 1 de cada 10 pacientes hospitalizados presentan una lesión, esto asociado con eventos adversos que podrían provocar la muerte o una discapacidad permanente en los pacientes, por esta razón la práctica mediante simulación se convierte en una herramienta para la educación en el área de la salud, de esta manera es posible lograr una atención médica segura [1], ya que es importante considerar los aspectos que requiere un simulador para ayudar en la educación (supervisada y autónoma), por ello en esta sección se mencionan los requisitos que se han obtenido para el diseño del box-trainer y el entorno virtual planteado en el presente proyecto.

La definición de estos requisitos fue mediante una investigación documental de la técnica de cateterización de venas centrales, específicamente de la vena subclavia, las características importantes para los simuladores en el área médica, y encuestas, impresas y virtuales, aplicadas a profesionales de la salud. A continuación, se describen cada una de estas fases, así como los requisitos obtenidos en las mismas.

4.1.1. Investigación documental sobre la técnica de cateterización de la vena subclavia

Para comenzar con la obtención de los requisitos de usuario, se realizó una investigación bibliográfica de la técnica de cateterización de la vena subclavia, en libros y manuales de medicina y de técnicas quirúrgicas básicas, en la Biblioteca de la Facultad de Medicina de la UAEMex, sin embargo, mediante esta consulta se observó primeramente que cada autor tiene su propia manera de describir el procedimiento, por esta razón se complementó la descripción del procedimiento usando a los autores más recientes y tomando de base la técnica de cateterización de Seldinger [26, 29], derivado de esto se obtuvieron los esquemas mostrados en las Figuras 26, 27 y 28. En el Esquema 1 se describe el procedimiento de preparación para la intervención, en el Esquema 2 se describe el procedimiento general de punción de la vena subclavia, finalmente en el Esquema 3 se describe el procedimiento de inserción del catéter en la vena y la fijación de este al paciente.

Esquema 1: Preparación previa al procedimiento para la cateterización mediante la vena subclavia



* Decúbito dorsal: posición corporal boca arriba, generalmente en un plano paralelo al suelo.

Figura 26: Preparación del paciente.

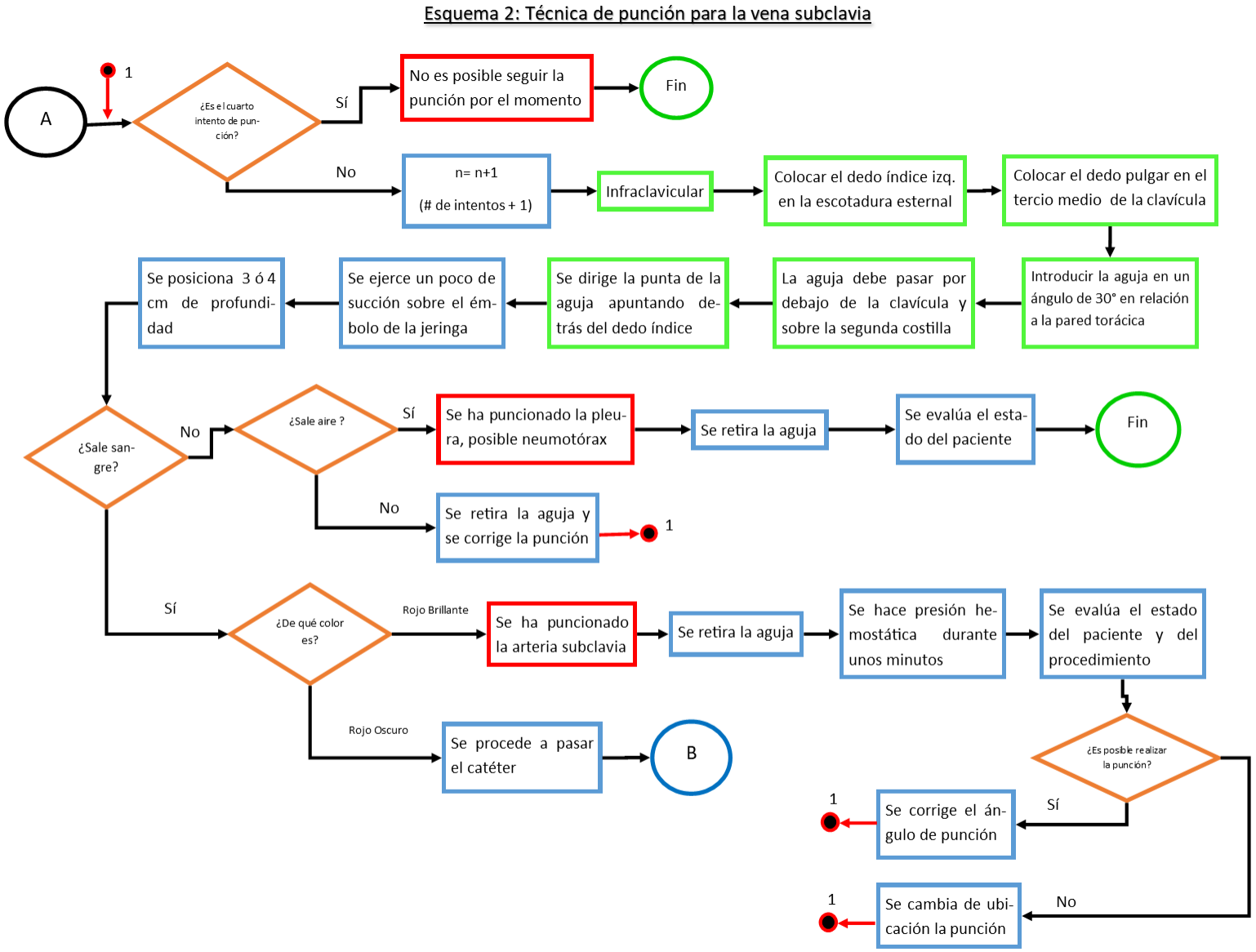


Figura 27: Procedimiento general para la punción de la vena subclavia.

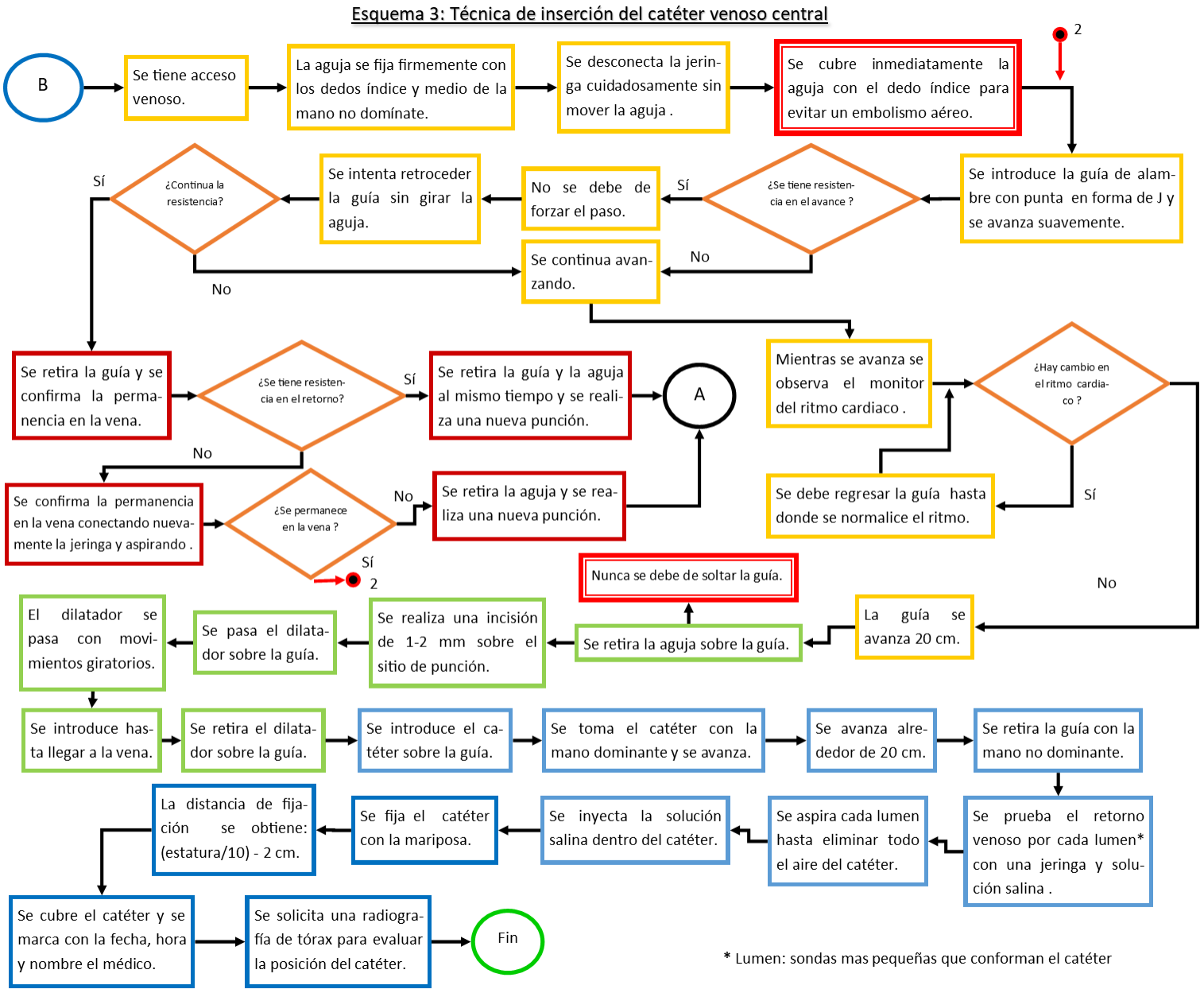


Figura 28: Inserción y Fijación del catéter.

Con el objetivo de verificar que el procedimiento desglosado en los diagramas sea correcto, se solicitó ayuda a profesionales de la salud que llevaran a cabo la técnica de punción de venas centrales, se obtuvo el apoyo de 2 médicos (un médico anestesiólogo y un médico cirujano encargado del laboratorio de habilidades clínicas de la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma del Estado de México) con experiencia en punción de venas centrales, esto se determinó mediante los criterios mostrados en [18], donde se refieren a médicos novatos como aquellos que han realizado menos de 10 punciones subclavias y a médicos capacitados a aquellos que han realizado más de 10 o más de 100 punciones centrales, esto se refuerza en [2] donde se comenta que los profesores que habían participado en su estudio habían realizado más de 25 procedimientos de cateterización subclavia, adicionalmente se intenta contactar a médicos que tengan experiencia en la enseñanza de la técnica de punción subclavia, ya que ellos pueden apoyarnos a identificar las características para el aprendizaje y evaluación de la técnica. A ellos se les pidió que revisaran la información de los diagramas y brindaran retroalimentación basándose en sus conocimientos y experiencia, si se abarcaba en ellos el procedimiento completo; realizaron observaciones de pasos que ya no eran empleados en la práctica actual de CVC y que se agregarán otros a la secuencia para que estuviera completa, las correcciones fueron realizadas en los diagramas mostrados en las Figuras 26, 27 y 28.

Ahora considerando que el proyecto planteado solo abarca la simulación de la técnica de punción infraclavicular de la vena subclavia mediante marcas anatómicas, no se incluirán todos los pasos descritos en los esquemas, ya que no se llega hasta la inserción del catéter, se descartan los pasos mostrados en el diagrama de la Figura 28, en cuanto a los pasos del diagrama de la Figura 26 con apoyo del Dr. Pereda (medico encargado del laboratorio de habilidades clínicas de la FM de la UAEMex.) se identificaron los pasos esenciales que deben de realizar los médicos antes del procedimiento de punción, posteriormente del diagrama de la Figura 27 correspondientes al proceso de punción de la vena, se abarcaron la mayoría, únicamente excluyendo aquellos que involucraran eventos adversos o complicaciones del procedimiento (como neumotórax, punción de la arteria o repetir la punción) ya que estos se usan para la evaluación de la técnica, un aspecto que no es abarcado en este proyecto. Las instrucciones resultantes de esto se enlistan a continuación:

1. Evalúa el estado actual del paciente.
2. Verifica que no existan contra indicaciones del procedimiento en el paciente.
3. Informa al paciente sobre el procedimiento.
4. Si ha dado su consentimiento, continúa.
5. Verifica que tienes el equipo necesario para llevar a cabo el procedimiento.
6. Asea los muebles donde se colocarán los materiales.
7. Limpia y prepara al paciente para la intervención.
8. Verifica que el equipo sea estéril
9. Limpia el sitio de acceso y un espacio adicional con el antiséptico.
10. Coloca el campo estéril sobre el paciente, con el sitio de acceso expuesto.

11. Infiltra anestesia local y espera a que haga efecto antes de continuar.
12. Inicia el proceso de punción de la vena subclavia
13. Realizar el proceso de punción infraclavicular por marcas anatómicas.
14. Localiza la escotadura esternal.
15. Localiza la clavícula y divídela en tres secciones.
16. Localiza la segunda costilla.
17. Coloca el dedo índice izquierdo en la escotadura esternal.
18. Coloca el dedo pulgar en el tercio medio de la clavícula.
19. Sin mover los dedos de la mano izquierda, introduce la aguja en un ángulo de 30° en relación con la pared torácica.
20. La aguja debe pasar por debajo de la clavícula y sobre la segunda costilla, por debajo de la posición del pulgar.
21. Dirige la punta de la aguja apuntando detrás del dedo índice.
22. Ejerce un poco de succión sobre el émbolo de la jeringa.
23. Posiciona a 3 cm de profundidad.
24. Ejerce un poco de succión sobre el émbolo de la aguja
25. Asegurate de que el color corresponda con la sangre venosa

A partir del paso 12 se necesita una mayor retroalimentación del simulador, ya que se comienza la identificación de los puntos de referencia anatómicos, la localización de la vena, y se aumenta el riesgo de provocar algún evento adverso. La práctica debe terminar cuando se ha puncionado correctamente la vena, y si se evaluara la técnica también debe de considerarse terminada la práctica cuando se ha causado un evento adverso grave o se ha intentado el abordaje 4 veces.

En referencia a los simuladores para entrenamiento médicos, de acuerdo con los autores de [4] y [1], las características que llevan a un aprendizaje más efectivo son:

1. La retroalimentación, para la práctica de punción subclavia debe ser visual, con las guías para la localización de la vena y táctil para la inserción de la aguja.
2. La práctica repetida, debe de poder repetirse la práctica las veces que sean necesarias para su aprendizaje, esto lo determina el médico que esté enseñando el procedimiento y el alumno.
3. Múltiples estrategias de aprendizaje.
4. Variabilidad clínica.
5. Ambiente controlado, esto se refiere a un ambiente seguro donde puedan practicar, detectar y corregir errores sin dañar a un paciente.
6. Aprendizaje individualizado.
7. La inmersión dada durante el entrenamiento.
8. La fidelidad en el procedimiento practicado.

Por otra parte, analizando las características de los maniquíes anatómicos presentes en el mercado, al igual que varios simuladores físicos, basados en realidad virtual, aumentada y mixta reportados en la literatura, que se exponen en la sección 3, se obtuvieron los siguientes requerimientos para el diseño y construcción del box-trainer.

1. Piel y tejido realista al tacto.
2. Retroalimentación táctil.
3. Respuesta en tiempo real.
4. Interacción simultánea con un objeto físico y una simulación virtual.
5. Una herramienta para interactuar con el maniquí anatómico.
6. Modelo virtual de la anatomía interna.
7. Visualización instantánea del modelo virtual en el maniquí.
8. Piezas reemplazables.
9. Material multipunción.
10. Puntos de referencia anatómicos.
11. Un rastreador para registrar la actividad durante la práctica.
12. Análisis, registro y valoración de la técnica del usuario.
13. Modelos físicos modulares intercambiables.

Todos los aspectos enumerados son considerados para el diseño del prototipo del simulador.

4.1.2. Aplicación de encuestas

Con el propósito de complementar la investigación documental realizada e identificar aspectos relevantes en la educación de la técnica de punción, como los errores comunes durante el entrenamiento, se aplicaron cuestionarios impresos y digitales a médicos de diversas especialidades, este material fue desarrollado con apoyo del Dr. Pereda, la retroalimentación que él brindó durante la revisión de la investigación documental sobre la técnica de punción subclavia llevó al planteamiento de las preguntas y el cuestionario fue revisado por él hasta que se obtuvo su aprobación para la aplicación.

Teniendo en cuenta que el procedimiento de CVC es considerado una técnica básica en cirugía, así mismo que tiene diversas aplicaciones empleadas en diferentes áreas médicas, el cuestionario se aplicó a médicos de distintas especialidades, en la tabla 6 se muestran las características de los participantes; otro aspecto a resaltar es que en la bibliografía no se reporta una cantidad de tiempo o punciones específica con la que se determina que se ha aprendido la técnica, aunado a esto la bibliografía actual aborda mayormente la técnica de punción por medio de ultrasonido, recomendando la ejecución de esta sobre la técnica por marcas anatómicas, lo que contrastaba con las opiniones emitidas por los médicos que se consultó en el planteamiento del proyecto.

Por lo mencionado anteriormente el cuestionario (ver 10Anexo 1) está dividido en tres partes: la primera aborda la experiencia de los médicos y el empleo de ambas técnicas de CVC (US y marcas anatómicas); en la segunda parte se aborda la experiencia de los médicos aprendiendo la técnica de cateterización y finalmente la tercera parte aborda la experiencia de los participantes enseñando la técnica a médicos inexpertos.

Para determinar el número de participantes se tomó como base el estudio [20] en que se reporta el uso de un cuestionario como una herramienta para la obtención de los requisitos de usuario, en este se reporta que se aplicaron nueve cuestionarios, por otro lado, en [5] se reporta haber realizado un taller para un grupo de 20 médicos residentes

de anestesiología el cual tenía el propósito de obtener las necesidades de los usuarios; con base en estos dos proyectos que tenían el objetivo de desarrollar simuladores de entrenamiento médico se estableció obtener de 9 a 20 participantes que respondan el cuestionario.

Se aplicaron un total de 18 cuestionarios, de estos 9 fueron contestados en formato digital y 9 en formato impreso, 4 cuestionarios digitales fueron anulados debido a que los médicos que los respondieron no habían llevado a cabo la canalización de la vena subclavia, todos tenían la especialidad en Ginecología y Obstetricia, por lo tanto se tienen 14 respuestas válidas en el análisis, 12 pertenecen a Medicina Interna, uno a Medicina General y uno a Cardiología.

Tabla 6: Datos generales de los participantes de la encuesta.

No. de participante	**Formato del cuestionario**	**Ciudad**	**Especialidad médica**	**Experiencia en punción subclavia**	**Años de experiencia en punción subclavia**	**No. de catéteres instalados**	**Experiencia enseñando CVC**
1	Digital	Toluca	Ginecología y Obstetricia	No	N.A	N.A	N.A
2	Digital	Toluca	Ginecología y Obstetricia	No	N.A	N.A	N.A
3	Digital	Toluca	Ginecología y Obstetricia	No	N.A	N.A	N.A
4	Digital	Toluca	Ginecología y Obstetricia	No	N.A	N.A	N.A
5	Digital	Toluca	Medicina Interna	Sí	20	100	Sí
6	Digital	Toluca	Medicina Interna	Sí	4	10	Sí
7	Digital	Toluca	Medicina Interna	Sí	más de 35	más de 300	Sí
8	Digital	Toluca	Medicina General	Sí	10	10	No
9	Digital	Toluca	Cardiología	Sí	1	1000	Sí
10	Físico	Toluca	Medicina Interna	Sí	4	10 a 15	No
11	Físico	Toluca	Medicina Interna	Sí	4	10 a 15	No
12	Físico	Toluca	Medicina Interna	Sí	2	6	No
13	Físico	Toluca	Medicina Interna	Sí	2	6	No
14	Físico	Toluca	Medicina Interna	Sí	más de 30	más de 300	Sí
15	Físico	Toluca	Medicina Interna	Sí	3	NR	Sí
16	Físico	Toluca	Medicina Interna	Sí	3	NR	Sí
17	Físico	Toluca	Medicina Interna	Sí	3	10	No
18	Físico	Toluca	Medicina Interna	Sí	3	10	No

N.A: No aplica. N.R: No respondió.

Los 14 médicos reportaron realizar esta canalización en hospitales de segundo nivel, 3 de ellos reportaron también su ejecución en el tercer nivel de atención. Con respecto a la técnica que emplean para realizarla, se encontró que 4 emplean únicamente la técnica guiada por marcas anatómicas y 10 emplean ambas técnicas, de estos 8 usan con mayor frecuencia la técnica guiada por marcas anatómicas y solo 2 emplean la técnica guiada por ultrasonido. En cuanto a la disponibilidad del equipo de ultrasonido, 4 reportan tener el equipo disponible en todo momento y 9 reportan no tenerlo disponible, uno se abstuvo de contestar.

En relación con la experiencia de los participantes, 6 de ellos reportaron haber realizado 10 canulaciones durante su carrera, 2 reportaron 15, 2 reportaron 6, 2 reportaron más de 300 canulaciones, uno reportó 100 y uno reportó 1000 canulaciones, acerca de los años de experiencia, 7 de ellos contestaron tener entre 1 y 3 años ejecutando la técnica, 3 de ellos dijeron tener 4 años de experiencia, uno reportó tener 10 años de experiencia, uno reportó tener 20 años de experiencia y 2 reportaron tener más de 30 años de experiencia.

Pasando a las actividades que se emplean para el aprendizaje de la técnica de canalización, se obtuvieron 2 votos en Revisión Literaria, 6 en Uso de Material Audiovisual, 3 en Observar la punción y cateterización de la vena subclavia en pacientes y 8 en práctica identificando el sitio de punción mediante marcas anatómicas. En cuanto a los errores comunes durante el aprendizaje de la técnica (ver Figura 29), 9 coincidieron que el error más común es provocar un Neumotórax debido a una mala técnica de canalización, 4 reportaron la mala técnica de canalización, 3 reportan la lesión vascular, 2 reportaron la canalización fallida, 2 el Hemotórax, 1 reportó la punción de la arteria, 1 el distraerse durante la canalización y 1 la contaminación del área.

Con referencia al tiempo de práctica de los participantes antes de realizar la canalización de la vena subclavia en pacientes, 4 reportaron haber practicado solo una vez antes de pasar a un paciente, 3 reportaron haber practicado 1 mes, 2 reportaron practicar 1 año, 1 reportó practicar 2 veces, 1 reportó que practicó 1 semana, 1 reportó haber practicado más de 1 mes y 1 dijo no haber practicado y que aprendió a realizar la técnica sobre la marcha.

En una escala del 1 al 10, donde 1 es muy mal y 10 es muy bien, uno de ellos calificó su desempeño con 4, 3 tuvieron la calificación de 4, 3 se calificaron con 7, 3 con 8, 3 con 9 y solo uno se calificó con 10 (ver Figura 30). Posteriormente, se obtuvo la respuesta de que 7 de los encuestados consideraron haber tenido la preparación suficiente para realizar la canalización en un paciente y 7 consideraron no haberla tenido (ver Figura 31).

De los 7 médicos que consideraron no haber tenido la preparación suficiente, 4 concordaron en que agregarían la práctica con maniquíes para el entrenamiento en esta técnica, 3 consideraron agregar la práctica en simuladores, 1 agregaría la práctica en cadáveres y 2 se abstuvieron de responder la pregunta (ver Figura 32).

En cuanto a los aspectos evaluados por el médico a cargo en el entrenamiento, 9 coincidieron en la ubicación del sitio de punción mediante marcas anatómicas, 4 coincidieron en el ángulo de inserción, 3 en la profundidad de inserción, 1 en el tiempo

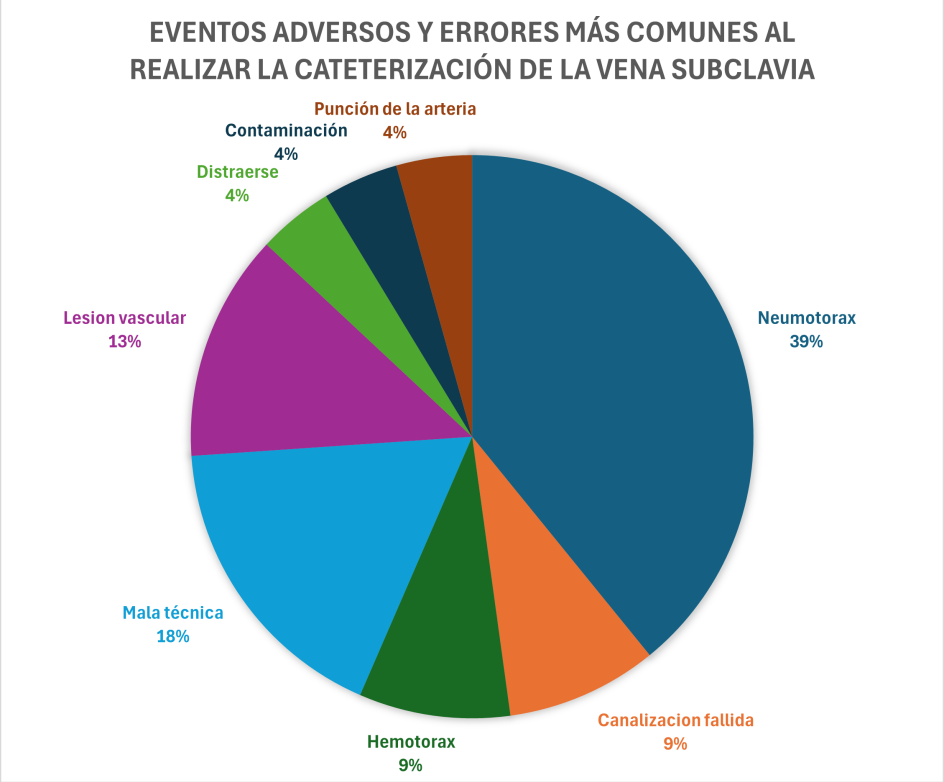


Figura 29: Gráfica de las respuestas obtenidas en la pregunta 11 del cuestionario.

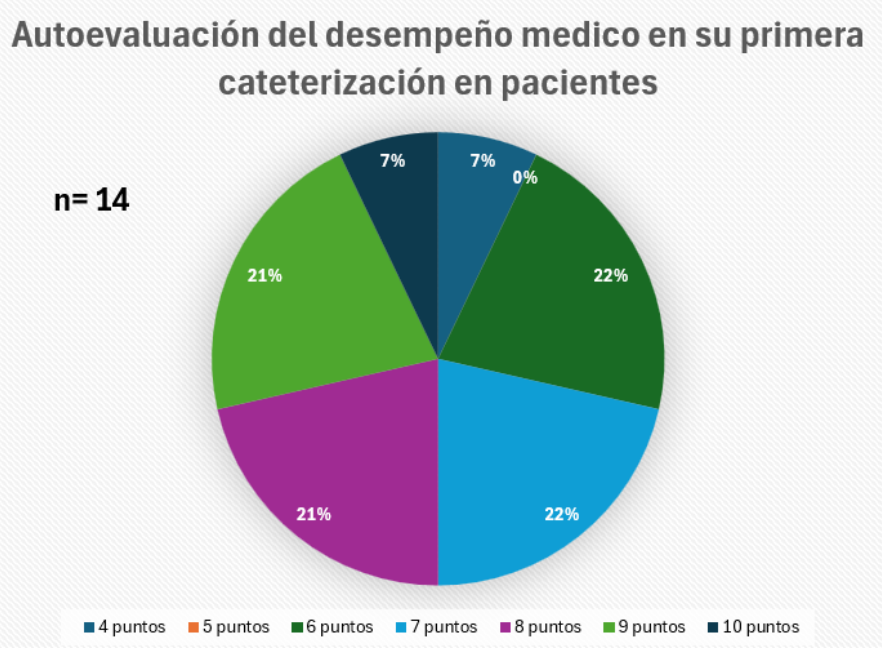


Figura 30: Gráfica de las respuestas obtenidas en la pregunta 13 del cuestionario.

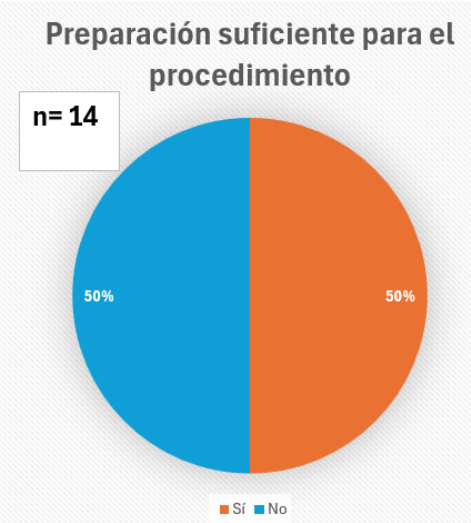


Figura 31: Gráfica de las respuestas obtenidas en la pregunta 14 del cuestionario.

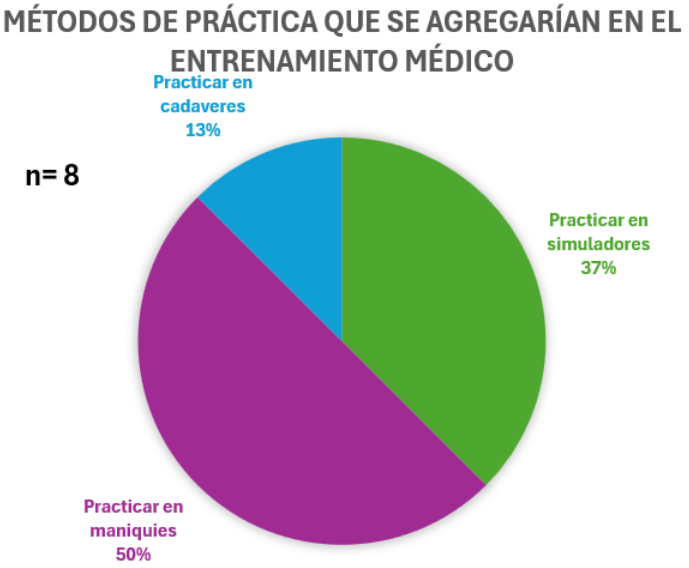


Figura 32: Gráfica de las respuestas obtenidas en la pregunta 15 del cuestionario.

de ejecución y uno no optó por las opciones en listadas, agregando el aspecto del éxito en la canalización.

En el uso de maniquíes para el entrenamiento en la cateterización, solo 2 médicos reportaron haber empleado maniquíes, de estos ambos reportaron haber realizado la punción de la vena subclavia y uno haber realizado la inserción del catéter, el mismo reportó que si le ayudó el uso del maniquí en su entrenamiento. Ninguno de los médicos encuestados reportó haber empleado un simulador de realidad virtual, aumentada o mixta durante su formación.

A su vez, la enseñanza de la técnica de cateterización de la vena subclavia, 7 de los

médicos encuestados respondieron tener experiencia en esta área, los cuales reportaron que las dificultades en el aprendizaje de la técnica son: la falta de conocimiento de la anatomía (3), los estudiantes tiene miedo (2), la técnica que aplican (2), poca atención por parte de los estudiantes (1), confianza excesiva (1), las variantes del cuerpo humano (1) y el tener un maniquí adecuado (1) (ver Figura 33). Las actividades o herramientas que emplean en la enseñanza de la técnica de cateterización, 2 reportaron enseñar directo en los pacientes, 2 emplean el ultrasonido, 1 reportó realizar una explicación detallada del procedimiento, 1 reportó que es necesario el conocimiento de la técnica y anatomía, y 1 reportó emplear maniquíes.

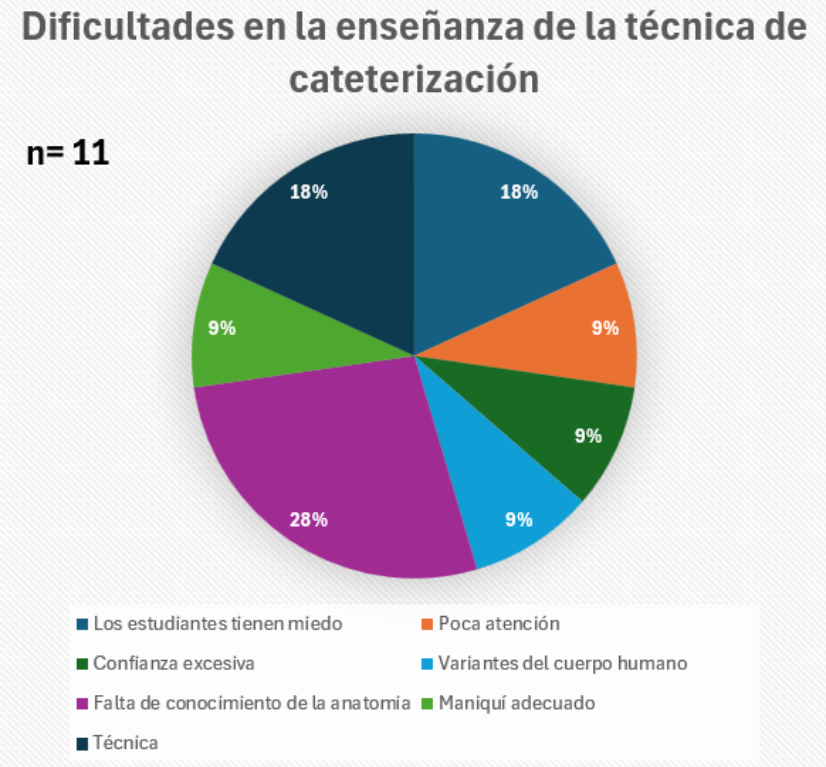


Figura 33: Gráfica de las respuestas obtenidas en la pregunta 23 del cuestionario.

Para determinar que un estudiante es capaz de realizar la cateterización de la vena subclavia en un paciente, 4 reportaron que lo hacen mediante el conocimiento de la técnica y de la anatomía, 2 reportaron hacerlo mediante la canalización exitosa de la vena, 1 realiza una evaluación completa sobre la técnica mediante preguntas y casos planteados a los estudiantes, 1 reportó que lo determinan mediante la actitud de los estudiantes (ver Figura 34). Con respecto a los aspectos que evalúan en sus estudiantes al momento de realizar la canalización son: el conocimiento sobre lo técnica y el equipo a emplear (7), la asepsia antes y durante la ejecución (3), el conocimiento de la anatomía (2), el tiempo de ejecución (2), la profundidad de la punción (1), el éxito en la canalización (1) y el respeto y consideración al paciente (1).

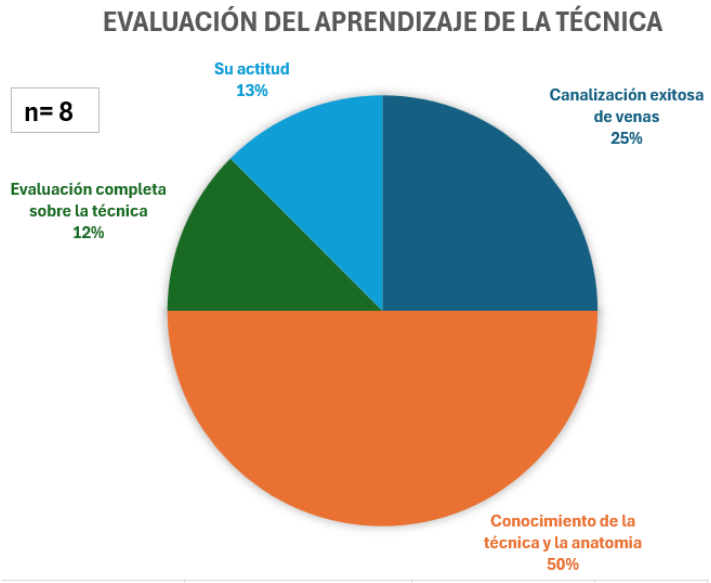


Figura 34: Gráfica de las respuestas obtenidas en la pregunta 25 del cuestionario.

Por último, para determinar que un estudiante es capaz de realizar la canalización de la vena subclavia sin supervisión, consideran los siguientes aspectos: Han colocado 2 a 3 catéteres correctamente (2), han colocado 5 o más catéteres al primer intento (3), buena técnica de canalización (3), respeto al paciente y estar atento al procedimiento (2) y el éxito en la canalización (ver Figura 35).

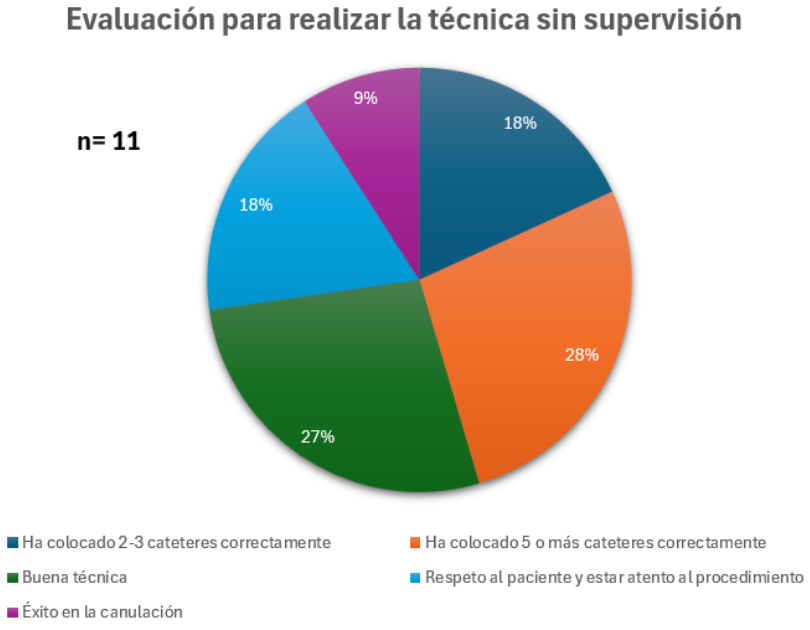


Figura 35: Gráfica de las respuestas obtenidas en la pregunta 27 del cuestionario.

En esta sección respondieron también 4 médicos, los cuales dijeron no tener experiencia en la enseñanza de la técnica de cateterización de la vena subclavia, pero que consideraban que las dificultades en su enseñanza son: la profundidad en la punción (2), la correcta identificación de sitios de punción (2) y las complicaciones frecuentes (1). En el caso de las herramientas empleadas en la enseñanza de la técnica, respondieron que es necesario el ultrasonido, los simuladores y los pacientes despiertos.

Pasando ahora en los aspectos que determinan que un estudiante es capaz de ejecutar la técnica en un paciente, opinaron que es el poder realizar la punción sin complicaciones (2) y la práctica y el conocimiento de la técnica (1). Durante la ejecución de la técnica en el paciente, los aspectos que les evalúan son: el conocimiento de la técnica y el equipo a emplear (2), el conocimiento de la anatomía (2) y la asepsia (2). Finalmente, para determinar qué son capaces de realizar la cateterización sin supervisión, opinan que si ya han realizado 20 o más catéteres correctamente (1), o si lo pueden poner al primer intento (2).

Por consiguiente, se concluye que el procedimiento de CVC se lleva a cabo en el segundo y tercer nivel de atención médica; a pesar de lo reportado en la literatura, en los hospitales mexicanos se continúa usando el método de cateterización por marcas anatómicas, ya que la mayoría (10 de los 14 participantes) de los participantes reportan no tener el equipo de US disponible para guiarse durante el procedimiento, adicionalmente 12 de los 14 participantes revelaron emplear con más frecuencia la técnica de cateterización por marcas anatómicas.

Con respecto a las actividades empleadas para aprender el procedimiento, la mayoría reporta usar material audiovisual (6 participantes) y practicar identificando el sitio de punción mediante marcas anatómicas (8 participantes), por lo cual es necesaria la retroalimentación táctil del simulador, para que los médicos tengan la preparación correcta; así se resalta la importancia de que el box-trainer sea anatómicamente preciso.

De la misma forma en el diseño del simulador se debe de considerar la retroalimentación visual y táctil para la ubicación del sitio de punción, medir el ángulo y la profundidad de la inserción de la aguja, además de medir el tiempo que le tome al usuario completar la tarea y el número de intentos exitosos, ya que todos estos aspectos fueron mencionados por los participantes en el aprendizaje de la técnica.

Se debe mencionar también que el diseño del simulador debe de ser sencillo e intuitivo para que a los usuarios no se les dificulte aprender a usarlo, pero es igualmente importante que capte su atención y lo guíe en el procedimiento de punción.

4.2. Consideraciones Bioéticas del proyecto

La bioética es un área importante de la ética aplicada, que implica la reflexión, el debate y la creación de normas y políticas públicas con el objetivo de gestionar y resolver conflictos en situaciones sociales, especialmente en las ciencias de la vida y las prácticas e investigaciones médicas que impactan la salud. La bioética es esencial para resolver los problemas éticos que puedan surgir en cualquier situación sanitaria, así como en las relaciones entre profesionales sanitarios, pacientes, familias y la sociedad

en su conjunto [54, 55].

El proyecto se enfoca en el entrenamiento de la técnica de cateterización mediante marcas anatómicas y de acuerdo con lo obtenido mediante la aplicación de las encuestas, es importante que el box-trainer a implementar sea preciso anatómicamente, para ayudar en el aprendizaje de la técnica en la identificación de los puntos de referencia anatómicos mediante la palpación; por esta razón para la construcción del box-trainer así como de la obtención de los modelos anatómicos que se van a proyectar como guía visual del entrenamiento, se opto por la segmentación de imágenes adquiridas por tomografía computarizada de un paciente real, mediante el software libre 3D Slicer. Las imágenes de tomografía para la construcción del box-trainer deben de contener los pulmones, el corazón con la vena y arteria subclavia visibles, las costillas (al menos las primeras cuatro), el esternón y una o ambas clavículas.

Existen bases de datos en internet con estudios de tomografía, sin embargo, no se encontraron unos estudios adecuados para ellos, a causa de que la mayoría de los estudios tomográficos del tórax no incluyen la imagen de las clavículas porque no son estructuras de interés. Por esta razón sé amplio la búsqueda, invitando a las personas conocidas de los integrantes del proyecto, preguntándoles si alguno de ellos tenía algún estudio de tomografía, sin importar el tiempo de antigüedad, con las estructuras mencionadas anteriormente, uno de ellos respondió afirmativamente a la pregunta, verbalmente se le explicó en que consistía el proyecto y la manera en la que sus estudios serían empleados, finalizando con la pregunta de si aceptaba donar sus estudios para fines del proyecto, aceptó donarlos y al momento de entregarnos los estudios en un disco CD, se le solicitó que firmara un consentimiento para el uso de sus estudios; se obtuvieron estudios por tomografía computarizada de una persona del sexo femenino, 48 años de edad al momento de realizar los estudios y 150 cm de estatura.

Debido a que se estaban recolectando y almacenando datos de una persona, se tomaron en cuenta las consideraciones necesarias para la recolección y almacenamiento de datos de un paciente en investigación, como el uso de estos para finalidades meramente académicas, la confidencialidad de los datos para todas las personas externas a la investigación, sobre todo los datos de identificación del participante y la aprobación de este para el uso de su información mediante la redacción y firma de un consentimiento informado.

Para esta parte se consultó la pauta 12 de las Pautas éticas internacionales para la investigación relacionadas con la salud con seres humanos de la CIOMS [56], a causa de que no se recolecto información sensible del participante, tampoco se le expuso a ningún riesgo o daño físico y su participación se limito a la donación de los estudios de tomografía, no se consideraron todos los aspectos mencionados en esta pauta, solo aquellos que están directamente relacionados con esta situación, como la redacción del consentimiento informado y el informar continuamente al paciente sobre el trabajo y productos que se obtengan de sus estudios.

La redacción del consentimiento informado, además de considerar lo mencionado en la pauta 12 de la CIOMS [56], se basa en la Guía nacional para la integración y el funcionamiento de los Comités de Ética en Investigación, Anexo 5 [57], en este se

establece que el documento debe informar sobre el objetivo de la investigación, en que consiste la participación del sujeto, una descripción detallada de la manera en que será empleada su información, los beneficios y riesgos de participar en la investigación, los compromisos de los investigadores, la duración del estudio y el tiempo que serán almacenados sus datos, y finalmente la posibilidad de que el participante nos retire el consentimiento de usar su información en cualquier momento.

En esta sección se sometió una solicitud al comité de Ética de la Facultad de Medicina de la UAEMex con número de registro *CONBIOETICA-15-CEI-002-20210531* para que revisara y aprobara la metodología, el trabajo realizado, el consentimiento informado redactado y la información de los estudios que se emplean en el proyecto, con la finalidad de tener la aprobación y asegurar la protección de los datos del paciente (Anexo 2: Consentimiento Informado 2)obteniendo el número de registro *006.2025*(ver Anexo 3: Dictamen del Comité de Ética).

5. Desarrollo del box-trainer

Esta sección comprende el diseño tanto del ambiente virtual, en el entorno para desarrollo de videojuegos Unreal Engine, así como el diseño y la construcción del box-trainer.

5.1. Casa de la calidad (QFD) y análisis TRIZ

La casa de la calidad es una técnica que ayuda a asegurar la calidad en la creación de productos, para esto se emplean distintas matrices [58], la que se emplea separa en primer lugar las exigencias del cliente de la aplicación técnica y las características del producto.

En la definición de la casa de la calidad para el box-trainer, se emplearon los requerimientos del cliente, los que fueron definidos a través de las características en común presentes en los maniquís comerciales y los simuladores presentados en el estado del arte 3 , enlistados a continuación:

1. Piel y tejido realista al tacto.
2. Respuesta en tiempo real, inferior a 20 milisegundos [**?**].
3. Piezas reemplazables.
4. Anatómicamente Preciso.
5. Ligero, peso igual o menor a 12.7 kg [44].
6. Material multipunción, preferiblemente material autosellable.
7. Puntos de referencia anatómico: clavícula, escotadura esternal, primera y segunda costilla.
8. Portátil, debe poder moverse de un lugar a otro sin dificultades o pocas.
9. Intuitivo .

En cuanto a los requerimientos funcionales, se definieron los siguientes:

1. Retroalimentación táctil.
2. Sin conexión.
3. Interacción simultánea con elementos físicos y virtuales.
4. Una herramienta para interactuar con el modelo físico.
5. Modelos virtuales de la anatomía interna.
6. Visualización del modelo virtual en el maniquí.
7. Modelo físico de cuerpo completo o parcial.
8. Componentes anatómicos importantes.
9. Rastreador para registrar la actividad.
10. Análisis, registro y valoración de la técnica del usuario.

El método TRIZ es un sistema de herramientas de resolución de problemas desarrollada en Rusia en los años 40 por el ingeniero Genrich Altshuller. TRIZ significa Teoría de la Resolución de Problemas Inventivos y se basa en la premisa de que existen

patrones repetitivos en la solución de problemas y que, al identificar estos patrones, se pueden aplicar a otros problemas similares para encontrar soluciones más innovadoras y efectivas [59, 60].

TRIZ se basa en el estudio de los modelos de evolución de patentes y en un estudio integrado del análisis de cómo se han resuelto diferentes tipos de problemas, aportando con esto 40 principios inventivos. Altshuller clasificó cada descubrimiento o innovación que encontró en una patente como propio de un nivel de inventiva, y determinó la existencia de cinco niveles [60]. La matriz de contradicciones es parte de la metodología TRIZ que permite determinar los principios de inventiva cuando se identifica una contradicción técnica en el problema.

De acuerdo con el método TRIZ el box-trainer para entrenamiento médico de la punción de la vena subclavia, debe de ser lo suficientemente ligero para ser transportado, pero resistente para que los médicos puedan palpar las marcas anatómicas y prácticar en él, para lo que la matriz de Altshuller sugiere emplear los principios: 28 "Mechanics substitution", 27 "Cheap short-living objects", y 40 "Composite materials".

Por otro lado, el dispositivo debe de ser fiable pero fácil de operar por lo que su control no debe de ser muy complejo sino más bien debe de ser intuitivo, para esta contradicción se recomiendan los principios: 13 "Other way around", 35 "Physical or chemical properties" y 1 "Segmentation". Finalmente, el dispositivo debe de ser reparable pero no muy complejo ni en su composición como en su control, en este caso se sugieren los principios de: 35 "Physical or chemical properties", 1 "Segmentation", 13 "Other way around" y 11 "Beforehand cushioning".

5.2. Restricciones y Diseño axiomático

Las restricciones de un proyecto de diseño corresponden a las limitaciones y requisitos que lo definen, como el presupuesto, el sitio, los códigos, etc. En el caso del presente sistema consistente en un dispositivo para simular la técnica de punción de la vena subclavia, compuesto por un box-trainer y un ambiente virtual, las restricciones encontradas se muestran en la Tabla 7.

El diseño axiomático es una forma de planear sistemas que usa métodos en forma de matrices para convertir las necesidades de los clientes en requisitos, parámetros de diseño y variables de proceso. En general, los requisitos funcionales se relacionan directamente con los parámetros de diseño [61]. La finalidad de este es crear una cultura científica en el área del diseño mediante un enfoque lógico en la creación de nuevos productos o servicios, con la intención de minimizar errores y mejorar la eficiencia en el proceso de diseño [62]. Principalmente, este diseño se fundamenta en dos axiomas: el de independencia (este mantiene la independencia de los requisitos funcionales) y el de información (el cual minimiza el contenido de información del diseño), ambos principios pueden aplicarse a distintos procesos de diseño y, a partir de ellos, se pueden obtener teoremas que funcionan como reglas para casos específicos [61, 62].

Para el box-trainer y el ambiente virtual, el diseño axiomático propuesto se muestra en la Figura 36 y en la Figura 37.

Tabla 7: Restricciones del box-trainer y el entorno virtual.

Restricciones externas	Restricciones internas
Exclusivo para uso médico	Estructuras internas de PLA
Uso para entrenamiento	Degaste del material con el uso frecuente
Uso para educación	Representación parcial del cuerpo del paciente
Necesidad de un espacio específico para su uso	Entrenamiento para únicamente una vía de acceso central
Fuente de alimentación para el sistema eléctrico del box-trainer	
El entorno virtual sólo se usa en computadora.	



Figura 36: Axiomas propuestos para el diseño del simulador.

5.3. Segmentación del modelo anatómico en 3D Slicer

Para iniciar con el desarrollo del prototipo, primeramente se obtienen los modelos anatómicos en 3D que serán empleados tanto en el ambiente virtual como en la cons-

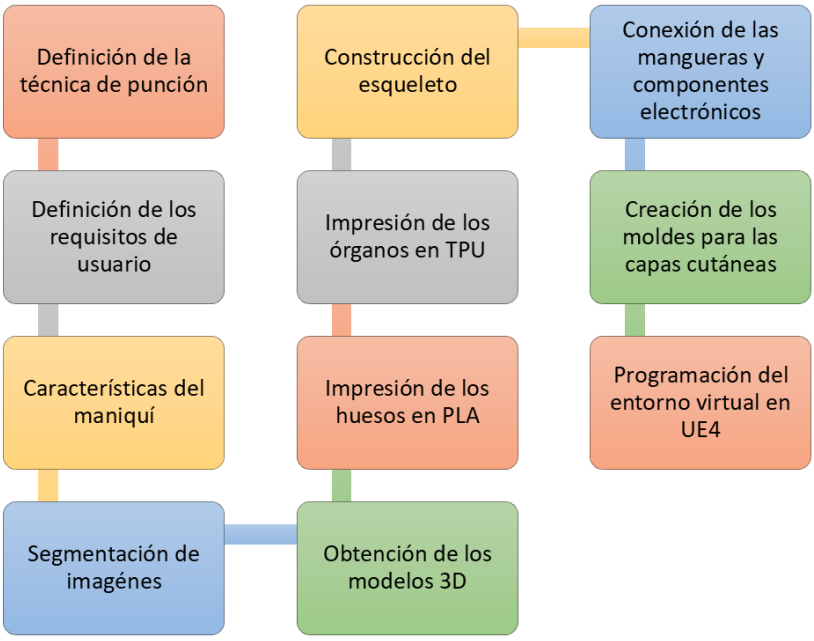


Figura 37: Metodología del diseño y construcción del simulador.

trucción del box-trainer, para lograr una simulación realista, se opto por obtenerlos mediante un proceso de segmentación de imágenes médicas a través del software de 3D Slicer.

La segmentación se realizó en el software 3D Slicer versión 5.6.1 en español, con imágenes de Tomografía Computarizada contrastada de Tórax, en formato **DICOM** de alta resolución (212 cortes, tamaño de imagen de 512 x 512 y un espaciado de imagen de 0.58 mm) obtenidas por un equipo Phillips de tecnología helicoidal.

La segmentación de imágenes inicia cargando los datos DICOM, con la opción **"Añadir datos DICOM"** del menú de inicio del software. Debido a que los datos que se emplearon contenían tres tipos de estudios diferentes realizados al paciente, CT simple, CT contrastada, CT arterial, se seleccionaron los estudios de tomografía simple, ya que son los que contienen las imágenes de todas las estructuras anatómicas presentes en el área torácica, en esta sección se tiene en cuenta que los estudios de tomografía fueron donados en formato DICOM, lo que implica que aún contienen los datos de identificación del paciente, para la protección de estos datos, deben ser extraídos, por ello en la sección de **"Datos Cargados"** se da clic derecho sobre el nombre del paciente, se selecciona la opción "renombrarz se cambia el nombre por el seudónimo "Sujeto 1". En la misma sección, se de clic derecho sobre los archivos de la fase simple de las imágenes tomografícas, se elige la opción "exportar a archivoz se selecciona el tipo de archivo Nrrd, con esto quedan eliminados todos los datos de identificación del paciente en las imágenes, a partir de ahora las imágenes serán empleadas en este formato.

Una vez que se importaron las imágenes de las vistas coronal, sagital y axial en la interfaz principal del software, se pasa al módulo de **"Renderizado de Volumen"**

para tener una primera visualización de la reconstrucción en 3D de las imágenes con ayuda de los filtros (Figura 38) que este contiene, además de identificar y delimitar el área de interés (ROI) para el recorte de las imágenes.

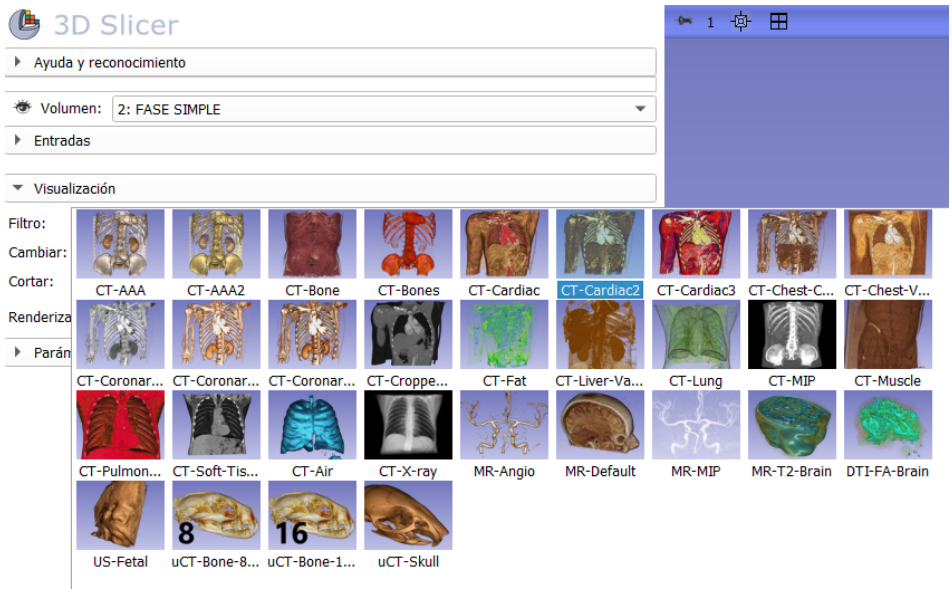


Figura 38: Renderizado de Volumen.

Ya que se identificó el área de interés para la segmentación, se pasa al módulo **"Conversores"** y después en **"Cortar Volumen"** en el cual se aplica en recorte de la ROI seleccionado anteriormente.

Posteriormente se selecciona el módulo **"Editor de Segmentos"** (Figura 39) para comenzar con la obtención del modelo 3D. El primer paso consiste en modificar el contraste de las imágenes hasta que se resalten las estructuras que se desean extraer, posteriormente se agrega un nuevo segmento, con esto se activan las opciones de edición. El segundo paso es seleccionar y aplicar un **umbral** que resalte la estructura que se va a extraer en ese segmento por ejemplo el corazón, a continuación, se selecciona la opción **"Mostrar3D"** esta acción mostrará el modelo 3D de las estructuras de la imagen que entren en el umbral seleccionado, con lo cual es posible que otras estructuras aparte de la de interés sean reconstruidas, por esta razón debe de limpiarse el modelo hasta que estas sean eliminadas, una herramienta muy útil para comenzar es la herramienta de **"Islas"** ya que esta elimina todos los fragmentos pequeños del modelo y conserva todos los modelos de gran tamaño, una forma para que esta herramienta funcione mejor, aislando el modelo de interés de todas las demás estructuras con la herramienta de **"Tijeras"**.

Para terminar con la limpieza se pintan las partes faltantes del modelo, al igual que se borran los detalles incensarios, debido a que se desea una mejor precisión en la reconstrucción del modelo, este último paso se debe de aplicar a cada imagen (cada corte) en cada una de las vistas.

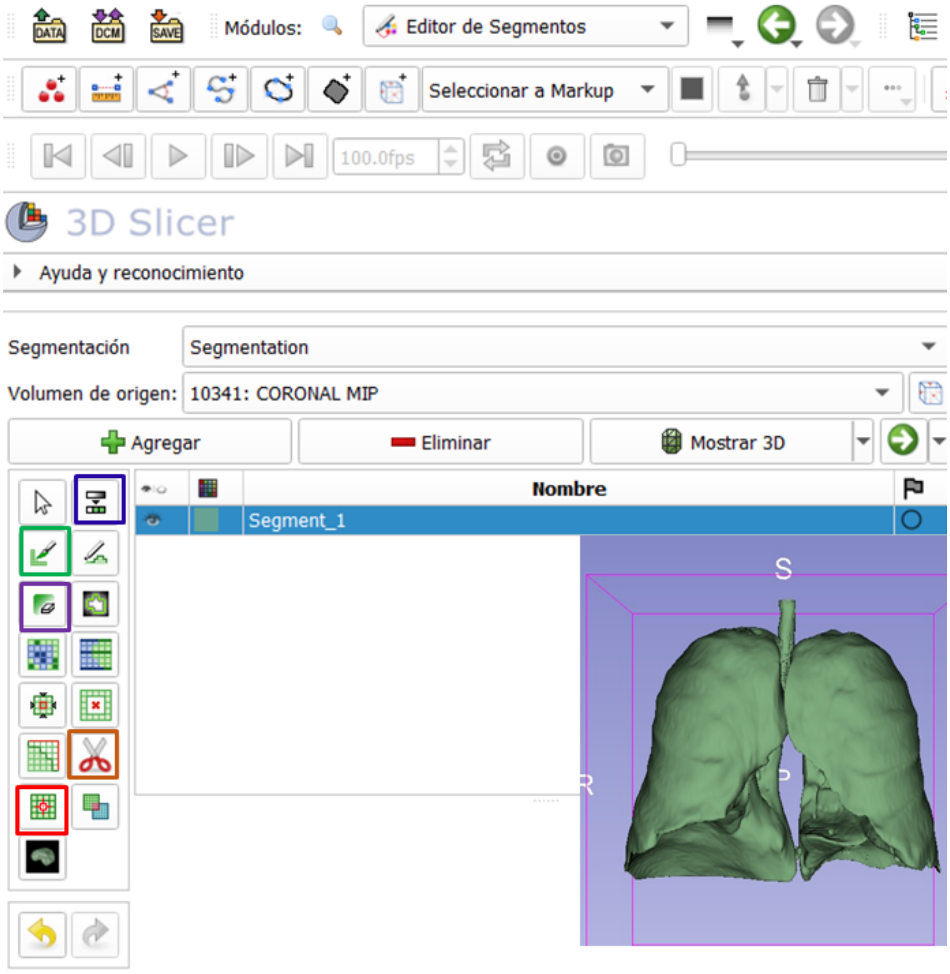
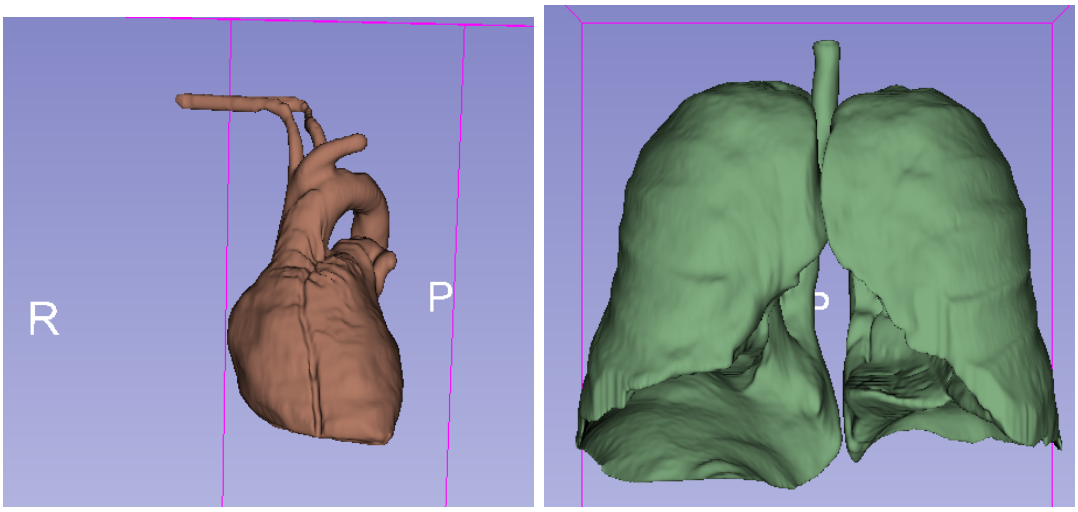


Figura 39: Editor de Segmentos. Azul:Umbral, Verde:Pintar, Morado:Borrar, Naranja:Tijeras, Rojo:Islas.

El procedimiento de segmentación y limpieza se repite para cada estructura anatómica que se desea extraer, que son: el corazón, los pulmones, las costillas, las clavículas y las escápulas. Las imágenes de las segmentaciones resultantes se muestran en las Figuras 40 y 41.

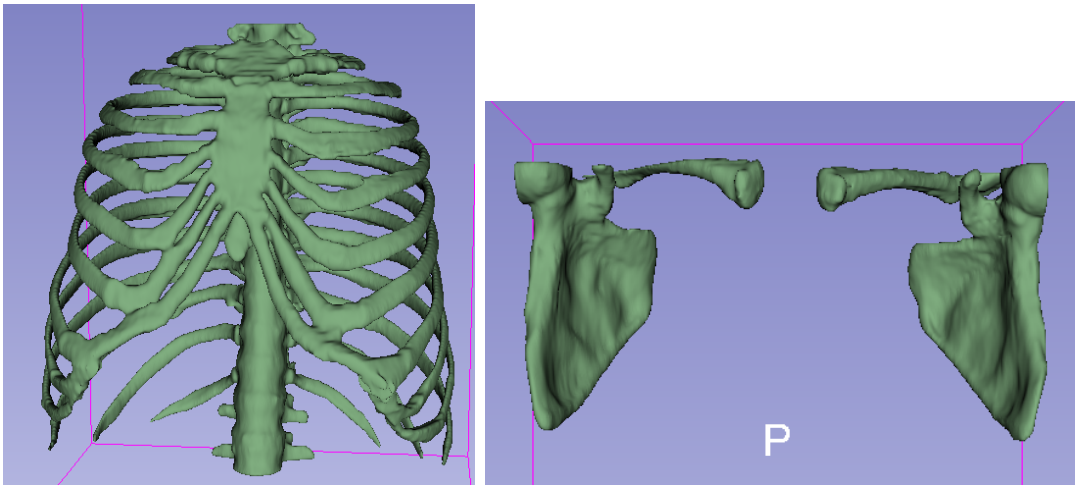
Los modelos obtenidos de la segmentación son exportados en formato ".obj", para ser incluidos en el ambiente de UE, sin embargo a causa de que los modelos se obtuvieron de imágenes anatómicas de un paciente real, los detalles como las formas y texturas de los modelos son muy precisos, lo cual hace que su tamaño y posterior despliegue necesite la mayoría de los recursos computacionales disponibles, por esta razón, se realizó la limpieza o adecuación de los modelos en el software Maya de Autodesk con apoyo del Licenciado en desarrollo de videojuegos José R. Ávila Vilchis (Lic.JRAV).

En este software, para la limpieza, lo primero que se hizo para cada modelo fue reducir la cantidad de los polígonos que los formaban sin perder los detalles relevantes



(a) Modelo final del corazón. (b) Modelo final de los pulmones.

Figura 40: Modelos finales de la segmentación.

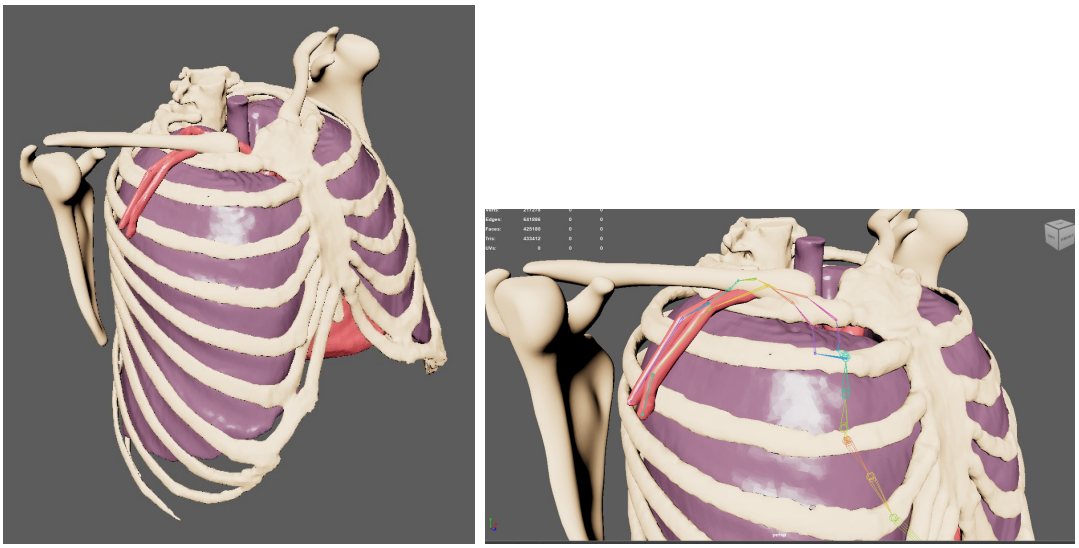


(a) Modelo final de las costillas. (b) Modelo final de las escápulas y clavículas.

Figura 41: Modelos finales de la segmentación.

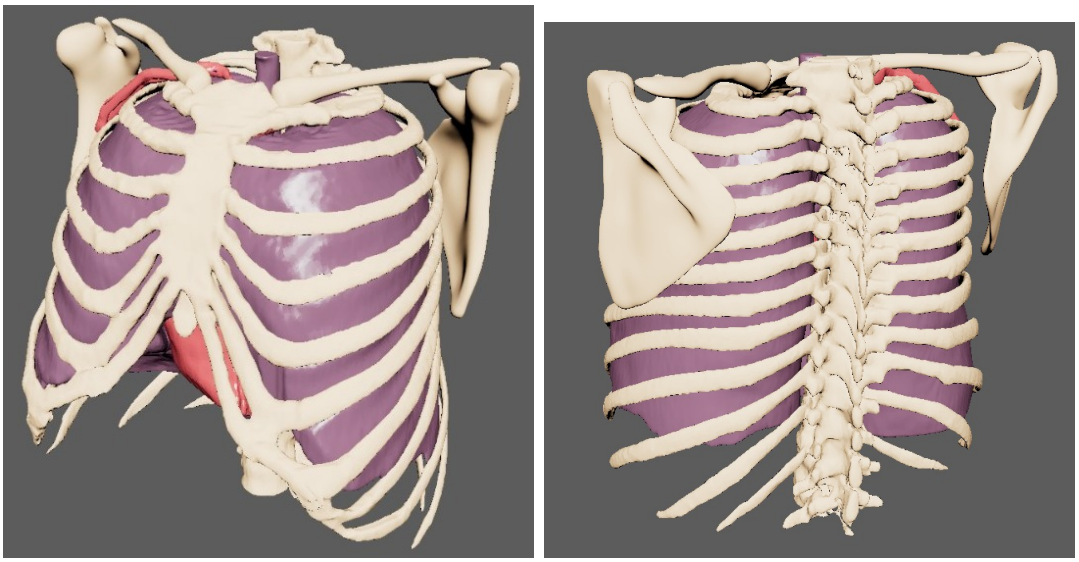
de las estructuras, después se realizó la reconstrucción de las estructuras faltantes como las clavículas, posteriormente se acomodaron las estructuras de manera que quedaran simétricas de ambos lados. Se corrigió la trayectoria de la vena y arteria subclavia, debido a que al tomar las imágenes de tórax se le solicitó al paciente colocar la mano derecha por detrás de la cabeza y elevar el brazo izquierdo, por ellos las costillas, y clavículas se ven ligeramente desfasadas hacia arriba. Por último se colocaron texturas y color a los modelos de manera que adquieran un aspecto aproximado al de los huesos y órganos del cuerpo en las Figuras 42 y 43 se muestran los modelos resultantes.

El siguiente paso es obtener los modelos 3D de los segmentos de la piel, el tejido



(a) Modelo final. (b) Vena Subclavia.

Figura 42: Modelos finales de los órganos obtenidos en la reconstrucción.



(a) Vista frontal del modelo final. (b) Vista posterior del modelo final.

Figura 43: Modelos finales de los huesos obtenidos en la reconstrucción.

adiposo y los músculos del tórax (ver Figuras 44, 45, 46, 47), con el objetivo de obtener las medidas del grosor (ver Tabla 8) y longitud de cada una de las capas anteriormente mencionadas, medidas que serán empleadas posteriormente en la construcción del box-trainer.

Esta segmentación se realizó siguiendo los mismos pasos mencionados anteriormente, sin embargo en esta ocasión la limpieza de los modelos en Maya sólo consistió en reducir

Tabla 8: Medidas de las capas cutáneas obtenidas mediante la segmentación

Capa o Estructura	Medida del grosor
Piel	3.125 mm
Subcutánea	3.334 mm
Grasa	37.18 mm en el busto
	17.5 mm en el esternón
Músculo	7.544 mm en el esternón
	20.96 mm al inicio de la clavícula
	60.05 mm en medio de la clavícula

el número de polígonos que formaban su malla y realizar la retopología, no se hicieron mas cambios ya que estos modelos no serán empleados en el mundo virtual y únicamente tiene la finalidad de servir de referencia para la construcción de las mismas capas en el simulador.

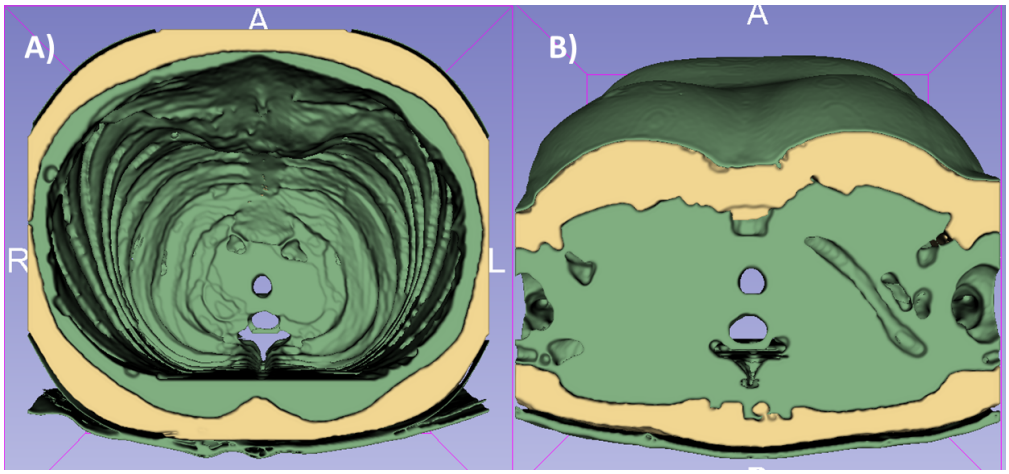


Figura 44: A) Vista Inferior y B) Vista Superior de la segmentación de la piel, grasa y músculo.

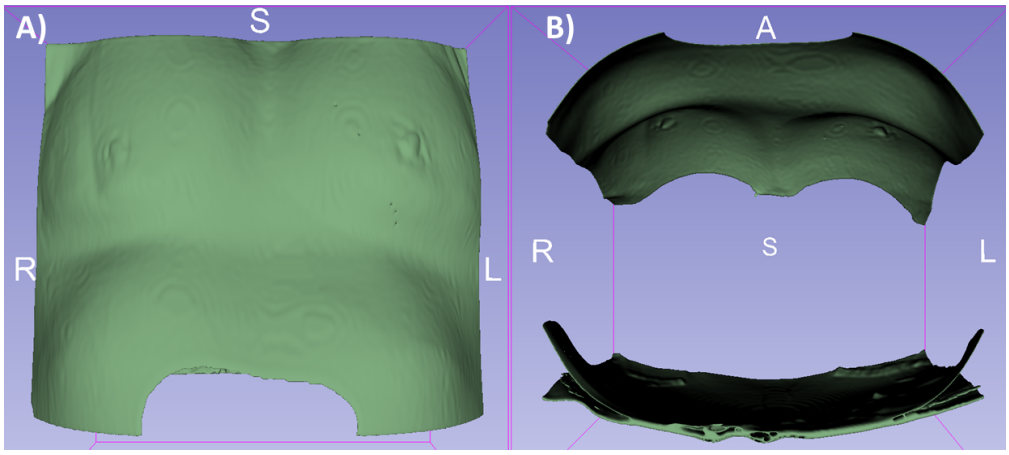


Figura 45: A) Vista Inferior y B) Vista Superior de la segmentación de la piel.

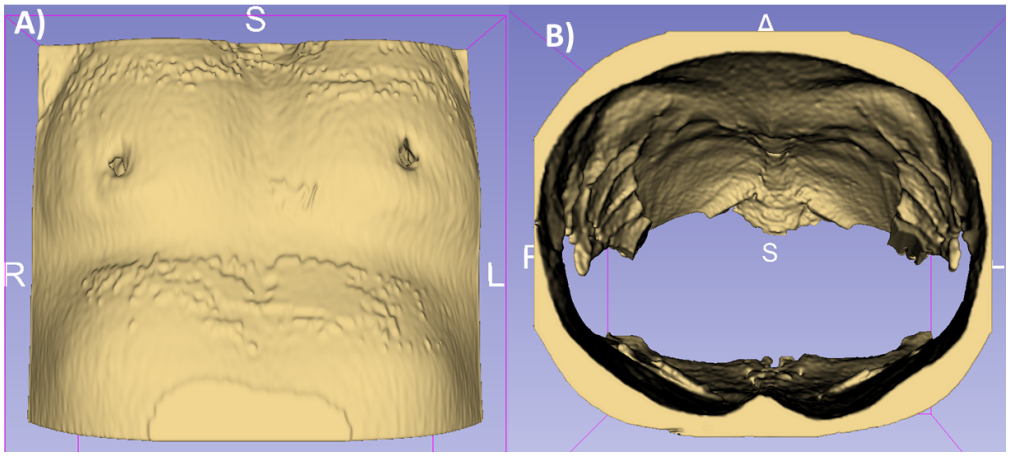


Figura 46: A) Vista Inferior y B) Vista Superior de la segmentación del tejido adiposo.

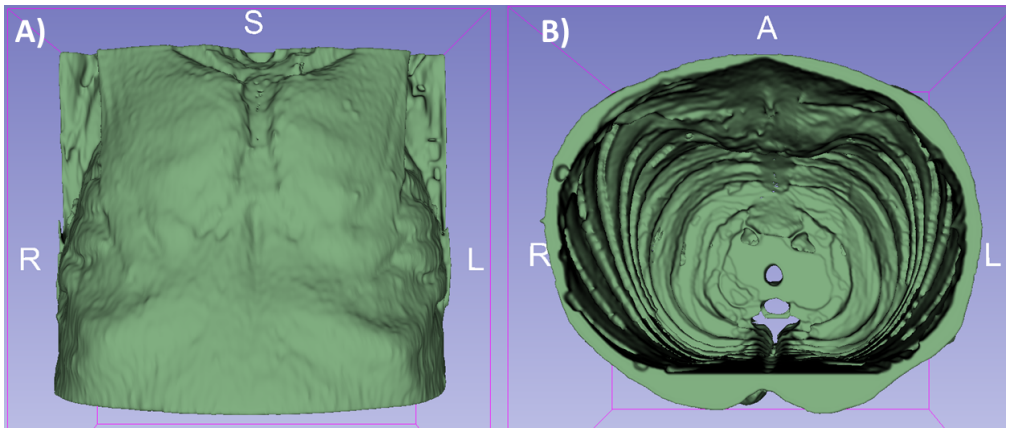


Figura 47: A) Vista Inferior y B) Vista Superior de la segmentación del músculo.

6. Construcción del box-trainer

Esta sección del proyecto comprende el diseño y construcción del box-trainer anatómico que constituye el simulador físico para el entramiento de punción.

Se optó por construir únicamente la parte superior derecha del tórax, debido a que esta es el área de interés para el entrenamiento de la técnica, si bien la cateterización de la vena subclavia puede realizarse tanto en el lado izquierdo como en el derecho, la bibliografía y los médicos recomiendan realizar la intervención en la vena subclavia derecha del paciente, debido a que es más cómodo tanto para ellos como para el paciente y es menor el riesgo de generar un evento adverso [13, 63, 64].

Lo primero que se realizó fue el corte de los modelos 3D del tórax, este corte se limitó al área de interés para el procedimiento, por ello se dejo completo el manubrio del esternón al igual que la escotadura esternal, debido a que son puntos de referencia anatómicos importantes en la localización de la vena subclavia, misma razón por la que se dejo completa la clavícula derecha y las primeras 4 costillas del lado derecho.

El corte de los modelos 3D delimitado por los criterios anteriores, se realizó en el software Autodesk Maya 2024. Las estructuras fueron separadas de acuerdo a su división anatómica, a excepción del esternón, dado que es una de las estructuras de soporte del esqueleto además de uno de los puntos de referencia, se opto por dejarlo unido a la primera costilla y a la primera vertebra torácica.

Luego de realizar los cortes se agregaron orificios y eslabones que servirán para armar el esqueleto una vez impreso (ver Figura 48), finalmente las diferentes piezas fueron exportadas en archivos con extensión STL. Los cambios descritos en los modelos 3D en Audesk Maya fueron hechos con el apoyo del Lic.JRAV.

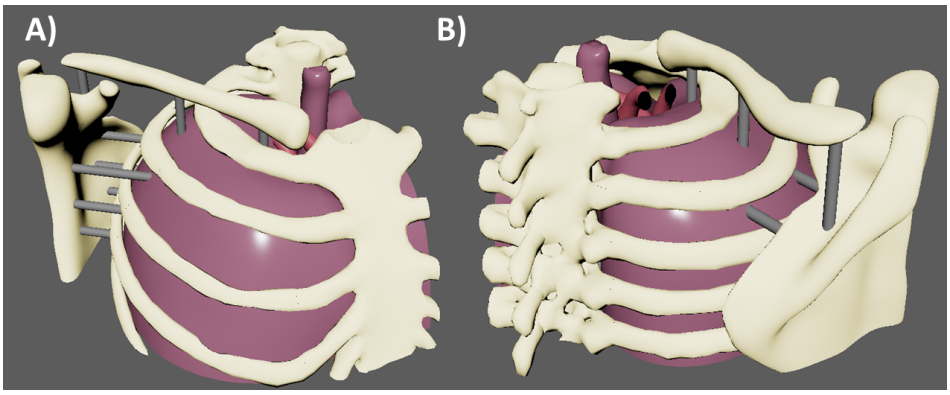


Figura 48: Modelos 3D recortados en Autodesk Maya.

Se procedio a imprimir los modelos 3D generando los archivos STL en la impresora 3D Creality K1 Max, con filamento Creality Hyper PLA rojo,en esta versión del esqueleto no se considera la medida de rigidez de del hueso humano ya que no es necesario emular de forma precisa esta característica, solo se requiere que las piezas sean sólidas con la rigidez suficiente para que se puedan percibir mediante el tacto al momento de palpar el box-trainer de la misma forma en la que se realizaría en un paciente, para lo

cual no se aplica fuerza, otro motivo es que se tiene el objetivo de crear un maniquí anatómicamente preciso y con impresión 3D se puede obtener las piezas del esqueleto de las mismas dimensiones que los modelos obtenidos de los estudios tomográficos, con lo que se asegura que están a escala de una persona real, otra razón por la que se optó por la impresión 3D es porque en estudios reportados en el estado del arte (Tanwani et al. [3], Raffaele et al. [51] y Sappenfield et al. [6]) se emplea esta misma técnica para la construcción de maniquíes o box-trainer para entrenamiento médico. Los huesos fueron impresos con un 50 % de relleno, 4 lineas para la pared, temperatura de impresión de 230°, velocidad de impresión de 300 mm/s y soportes normales, cabe mencionar que antes de imprimir los modelos, todos fueron analizados en el software Mesh Mixer, con la finalidad de comprobar que la estructura y la malla estuviera completamente cerrada y no tuviera caras ocultas, ya que de ser así las aberturas serán interpretadas por el software de la impresora 3D como cortes o geometrías separadas. Las piezas impresas del box-trainer se muestran en la Figura 49.

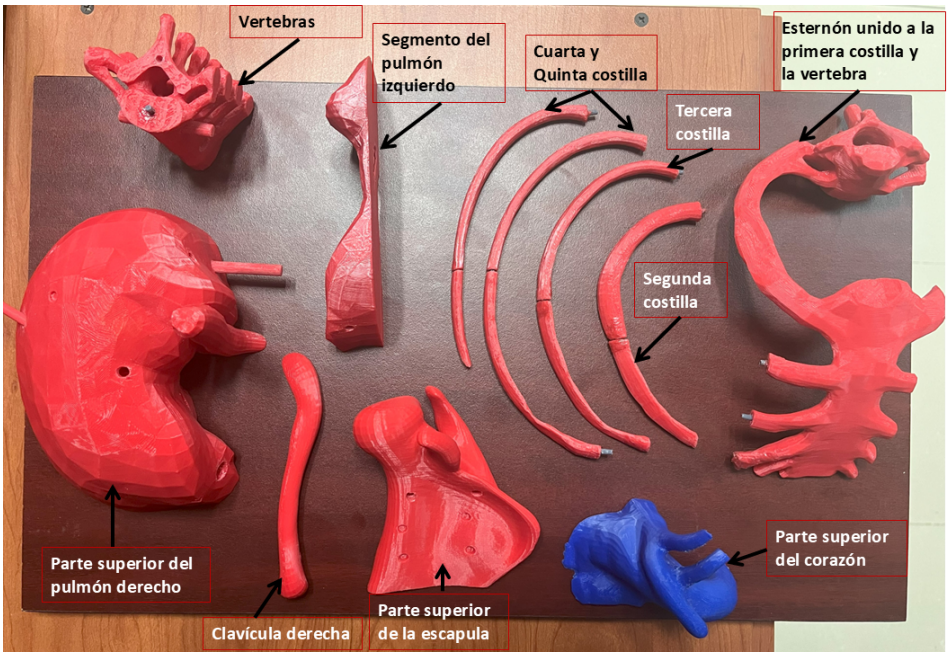


Figura 49: Piezas impresas para el esqueleto del simulador.

Se tuvieron que adecuar las piezas y reconstruir ciertas secciones de las mismas para que fuera posible ensamblarlas, el resultado final se muestra en la Figura 50. Posteriormente se cortaron los modelos de la piel, tejido adiposo y músculo al tamaño de los modelos para impresión, con la intensión de obtener los moldes para fabricar estas capas con silicona, en la Figura 51 se muestra el resultado de este corte.

Después de la construcción del modelo físico se detectaron varios aspectos que tenían de mejorarse, comenzando con la postura anatómica en la que fueron obtenidos los modelos 3D de los huesos, a causa de que los estudios de tomografía empleados en la segmentación de imágenes fueron obtenidos para visualizar el corazón y los pulmones,

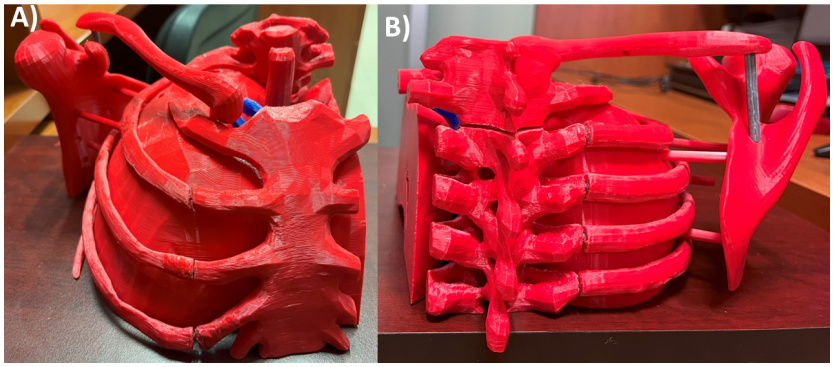


Figura 50: Esqueleto del maniquí armado, A) vista frontal y B) vista trasera.

el paciente tenia los brazos elevados al momento de capturar las imágenes, por lo cual los huesos y músculos se encuentran en esta posición, no obstante para realizar la cateterización de la vena subclavia es necesario que el paciente este con los brazos a los costados, por consiguiente se tuvo que cambiar la posición de los huesos (ver Figura 52), otro cambio que se consideró fue el aumento en el tamaño de los eslabones de unión de las piezas, ya que los primeros son muy pequeños y no soportan el peso de la estructura, también se modificó el corazón para agregar tubos y uniones en las cuales se conectaran las mangueras de látex que simularán la vena y arteria subclavia.

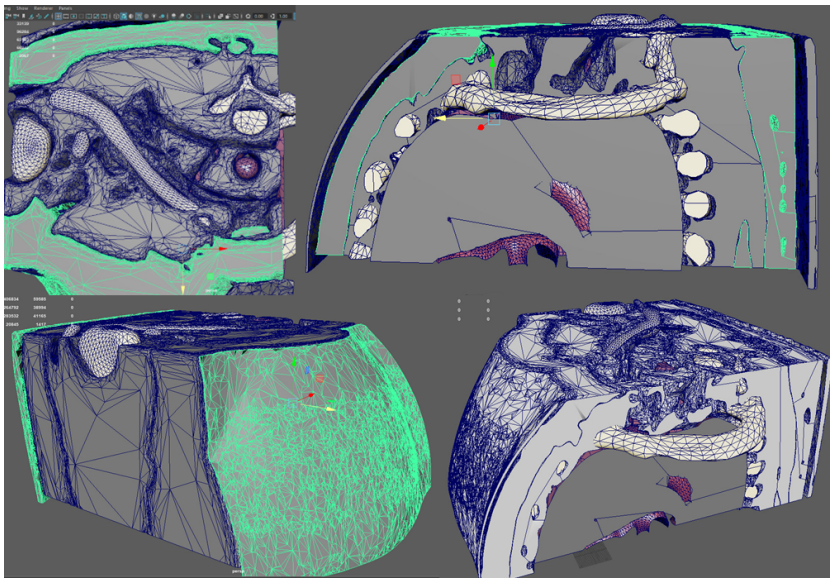


Figura 51: Diferentes vistas de la escena en Maya Autodesk con el ensamble de los huesos, órganos, piel, tejido adiposo y músculos.

Los cambios más significantes que se realizaron en la estructura del simulador corresponden al corazón y al pulmón, estas se describen a continuación.

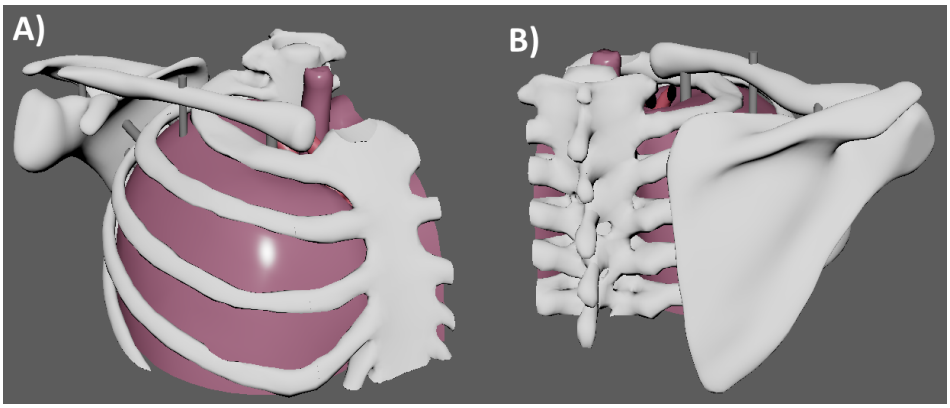


Figura 52: Modelos 3D recortados con la posición de los huesos modificada, A) vista frontal y B) vista trasera.

6.1. Modificaciones del Pulmón

El cambio que se hizo con respecto al primer modelo, fue la división del pulmón en dos partes, una superior y una inferior, para que la parte superior de este sea impresa en un material suave y flexible, con la finalidad de que al momento de realizar el entrenamiento este proporcione una retroalimentación táctil similar a la de un pulmón real. En cuanto a la impresión de las nuevas piezas se emplearon los mismos parámetros de impresión mencionados anteriormente y para la misma impresora, los materiales empleados fueron PLA genérico (ver Figura 53) para la parte inferior del pulmón y PLA flexible (FPLA) para la parte superior (ver Figura 54). Se imprimió sin relleno, a una velocidad de 28 mm/s, a 190° de impresión en una impresora Creality Ender 5 S1. En la Figura 55 se muestra el resultado final del ensamble.

A pesar de que la pieza resultante posee una estructura flexible, aún conservaba un poco de rigidez, por esta razón se realizó una segunda impresión de esta pieza pero esta vez en material TPU NinjaTek 85A, el cual es más suave y flexible; por otra parte imprimir con este material requirió un proceso especial, ya que debido a que es muy flexible, el rollo de material llega tener una consistencia pegajosa lo cual dificulta a las impresoras jalar del material al momento de imprimir, a causa de esto, debe de ponerse a secar el material por 24 horas, después debe de estirarse y volverse a enrollar, con esto se termina de despegar el filamento, otro punto a considerar es que una vez que el filamento se coloca en la impresora, este debe de quedar directo al extrusor, para que se tenga poca o nula resistencia al pasar el material. La pieza se imprimió en la impresora Creality Ender 5 S1, con los parámetros: 1) Velocidad de impresión de 18 mm/s, 2) Temperatura de extrusor 225°C, 3) Temperatura de la cama en 60°C, 4) Altura de capa de 0.2, 5) Ancho de linea de 0.4, 6) 3 Capas de la pared y 7) Relleno de 5 %; en la Figura 56 se el resultado final de la impresión; esta pieza es mas suave y flexible que el pulmón impreso con PLA Flexible, con lo que es posible que se asemeje al pulmón real, debido a esto se elije esta pieza para la versión final del box-trainer.

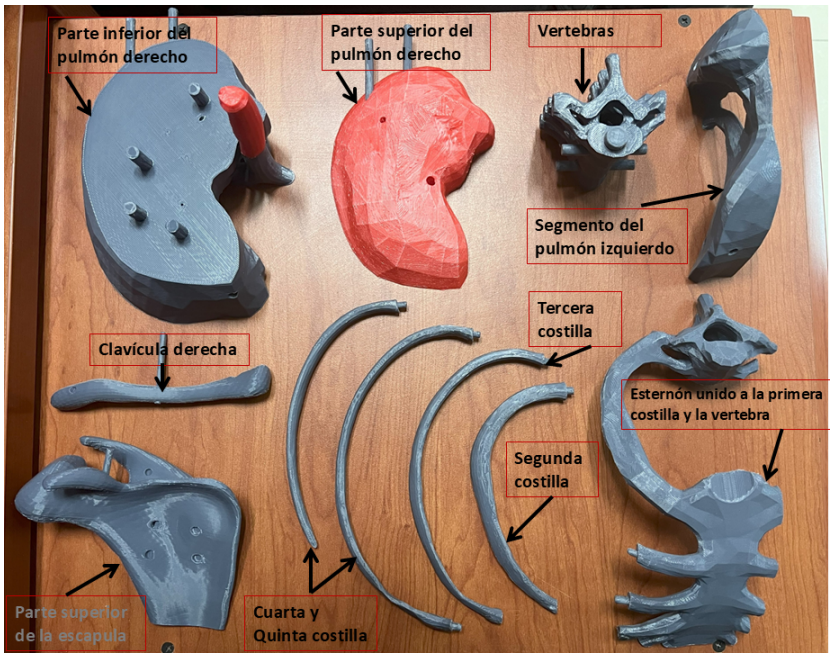


Figura 53: Piezas para el box-trainer con la nueva posición anatómica.

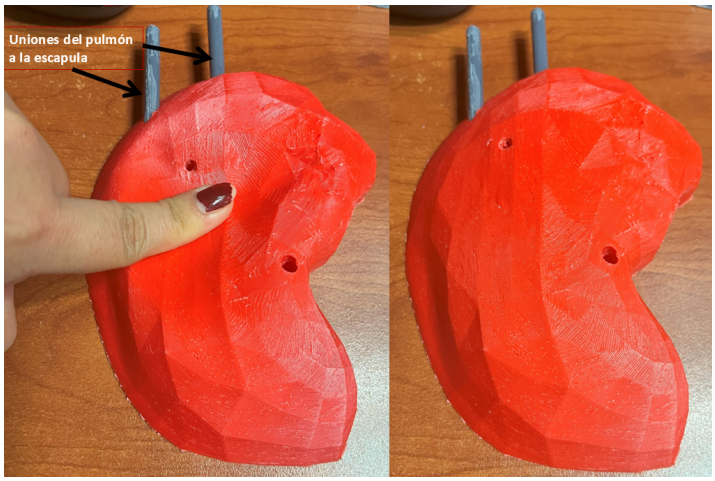


Figura 54: Parte superior del pulmón derecho impresa en PLA flexible.

6.2. Modificaciones del Corazón

Uno de los cambios que se planteó para el modelo fue el agregar tuberías al corazón del modelo, específicamente en la parte de la arteria y la vena subclavia, con el propósito de conectar mangueras de látex y pasar agua para simular la circulación sanguínea. En el primer intento que se realizó, fue agregar las tuberías en Maya de Autodesk directamente en el modelo virtual del corazón recortado, pero debido a que la geometría del modelo es muy compleja e irregular, esta se corrompe cuando se intentan hacer modificaciones sobre el modelo (ver Figura 57 las caras negras), lo que imposibilita imprimir el modelo;

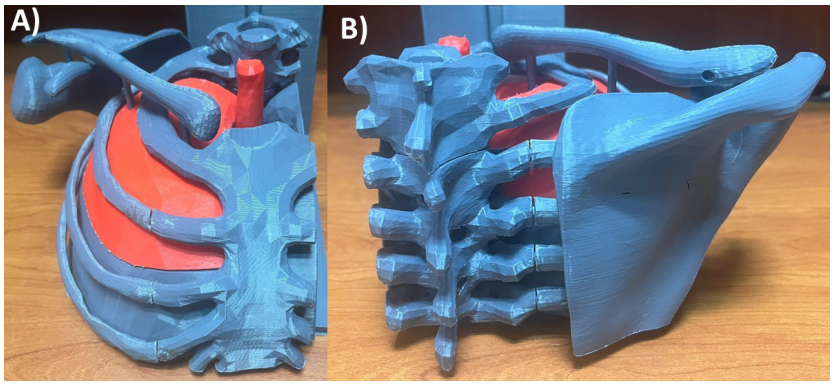


Figura 55: Esqueleto del simulador armado, A) vista frontal y B) vista trasera.



Figura 56: Parte superior del pulmón derecho con TPU NinjaTek 85A.

se hicieron las correcciones correspondientes usando operaciones como “Extruir”, y pegar cada uno de los vértices de manera individual del corazón con las tuberías, el resultado se muestra en la Figura 58. No obstante al momento de imprimir la pieza modificada, el grosor de las tuberías y sus uniones al corazón no era suficiente para darle soporte a la estructura, lo cual las hizo frágiles, rompiéndose al primer intento de conectar las mangueras de látex.

En vista de esta situación, se optó por aumentar los orificios de la vena y arteria subclavia, de esta forma se podría pasar las mangueras de látex a través de ellas, sin embargo se debe ser cuidadoso con esto ya que esta modificación no debe de alterar el tamaño del corazón para conservar la fidelidad anatómica y que este siga ensamblándose en el modelo, por ello para ampliar estos orificios se tenia que disminuir la pared interior del modelo y no modificar la pared exterior, para lograr esto se fue disminuyendo esta pared a través de operaciones booleanas en Maya Autodesk, así se mantiene la estructura del corazón y no se corrompe la geometría, no obstante llega un punto en el que la geometría de los dos modelos ya no coincide y las operaciones booleanas ya no se llevan acabo adecuadamente, lo que hizo que se descartara este método para la

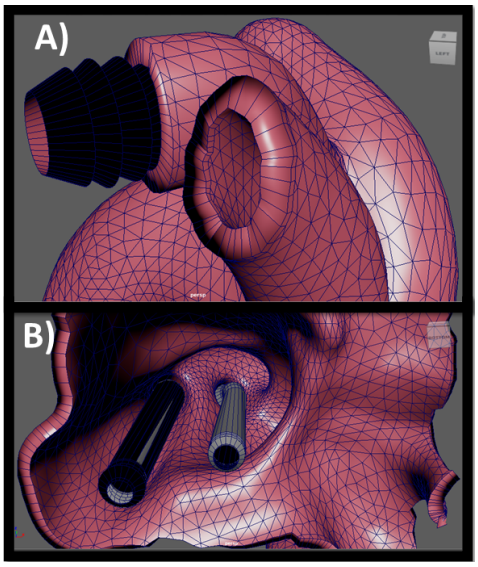


Figura 57: Primera versión del modelo modificado del corazón, A) vista lateral, B) vista inferior.

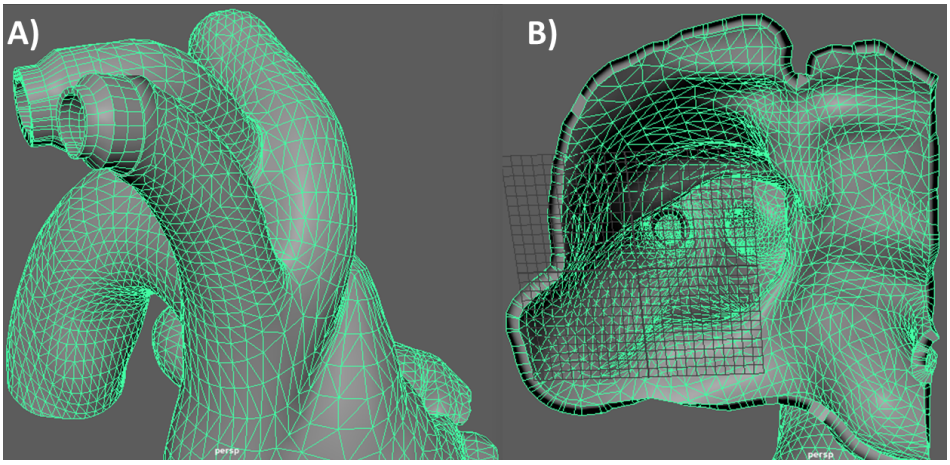


Figura 58: Segunda versión del modelo modificado del corazón, A) vista lateral, B) vista inferior.

ampliación de los orificios de las venas.

La siguiente prueba que se realizó fue tomar el modelo del corazón original, darle una extrucción de 2.5 mm, se separaron las capas superior e inferior eliminando todos los polígonos que las rodeaban y cerraban la geometría, se elimino la capa interior y de la capa superior se realizó una extrucción negativa de 1 mm, de esta forma se le dio ese espesor al modelo, se invirtió la normal del modelo, ya que gracias a la extrucción negativa esta quedo por dentro del modelo; ademas debido a la geometría irregular del corazón se generaron caras ocultas, por lo que posteriormente se realizó una limpieza del modelo en la que estas caras fueron eliminadas, se aplicó un suavizado sobre la geometría

que se empalmaba, excepto en la parte de los vasos sanguíneos, en estos se eliminó la geometría interpuesta de manera manual y se cerraron los orificios extruyendo las caras cercanas y conectándolos; con este ultimo método se obtuvo un resultado favorable.

La impresión final de la pieza se hizo con los mismos parámetros de todas las piezas del modelo y el material fue PLA genérico; una vez impreso se comprobó que las mangueras de látex pasaran a través de los orificios sin resistencia, y se ensambló la pieza en el modelo final del box-trainer.

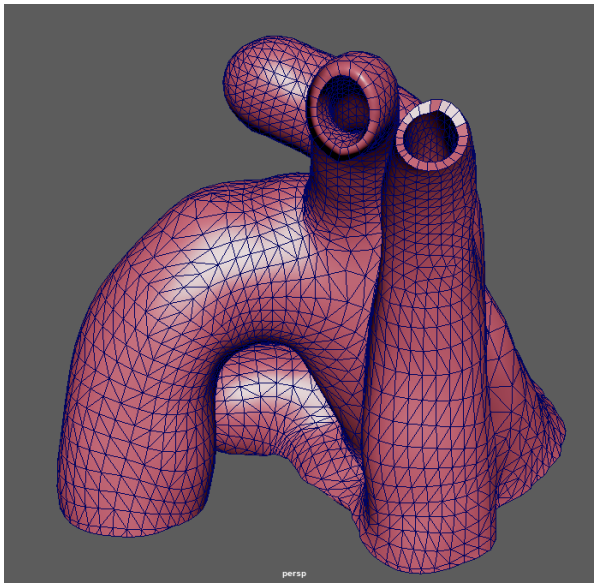


Figura 59: Tercera y última versión del modelo modificado del corazón.

6.3. Instrumentación del box-trainer

Al tener completo el esqueleto y los órganos del simulador, se procedió a realizar la conexión del sistema eléctrico e hidráulico de este, con el propósito de realizar un sistema de circulación de agua que asemeje la circulación sanguínea, de esta manera se le dará más realismo a la práctica, aumentando con ello la retroalimentación dada a los médicos al emular el pulso que tendría una persona anestesiada.

Debido a que una de las consideraciones que se tienen en el diseño del maniquí es la retroalimentación visual durante la práctica, así como la inmersión en esta, se agregó un sistema que emula el flujo sanguíneo, para esto se seleccionaron mangueras de látex para emular la arteria y vena subclavia, esto debido a que el látex es un material suave y flexible que puede pincharse sin mucha resistencia, para la selección del diámetro de las mangueras, se buscaron las medidas comerciales que había de ellas, se adquirió un metro de las medidas más pequeñas y aproximadas a las de un vaso sanguíneo (de 8x12mm y de 6x9 mm) y se seleccionó las que mejor encajaran con los orificios de las venas del corazón del maniquí impreso en 3D; en cuanto al líquido que fluirá a través de las mangueras y las bombas, se optó por emplear agua teñida a los dos

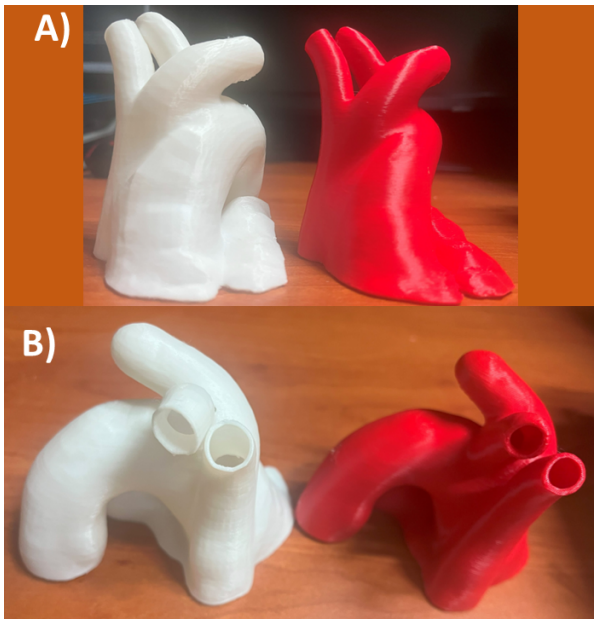


Figura 60: Comparación de la primera versión del corazón (Rojo), con la última versión (Blanco), A)vista lateral, B) vista superior.

tonos de rojo pertenecientes a la sangre venosa y arterial, con esto el usuario puede tener retroalimentación visual durante la práctica y puede identificar al momento de la punción si ha pinchado la vena o la arteria dependiendo de tono de rojo del líquido que se extraiga con la aguja. Es importante reiterar que el propósito de este es únicamente dar retroalimentación visual al usuario durante la práctica por lo cual no se considera un sistema de control que emule de manera precisa el flujo sanguíneo, así como tampoco se consideran bombas que tengan un tiempo de respuesta que pueda emular al corazón humano ni se incluye un líquido que posea una viscosidad similar a la de la sangre; en contraste tanto el control como los sensores y bombas empleadas son básicos ya que solo tienen el propósito de mover el líquido a través del maniquí a un ritmo constante.

Se comienza pasando las mangueras de látex de 6 x 9 mm a través de los orificios de las venas y arterias del corazón, puesto que se han agregado para simular los vasos sanguíneos, estas serán pinchadas durante la práctica con el sistema, razón por la que eventualmente tendrán que ser sustituidas por unas nuevas mangueras, para evitar que se sustituya toda la manguera y se tenga que desarmar el maniquí durante este proceso, se diseñaron tubos de conexiones en Solid Works, con ellos se aislaría el segmento que seria pinchado de los contenedores de agua. Sin embargo, no se tenían medidas exactas para estas conexiones y no debían obstruir el área de entrenamiento, teniendo esto en cuenta se realizaron varios diseños (ver Figura 61) y se probó cada uno de manera individual, revisando que no hubiera fugas de agua, que no se desensamblaran, que soportaran la circulación del agua y que no obstruyeran el área de interés, después de las pruebas se eligió el diseño liso de 9 mm de diámetro y 26 mm de alto, que corresponde al modelo número 6 de la Figura 61 ya que se cumplió con las características mencionadas

anteriormente.

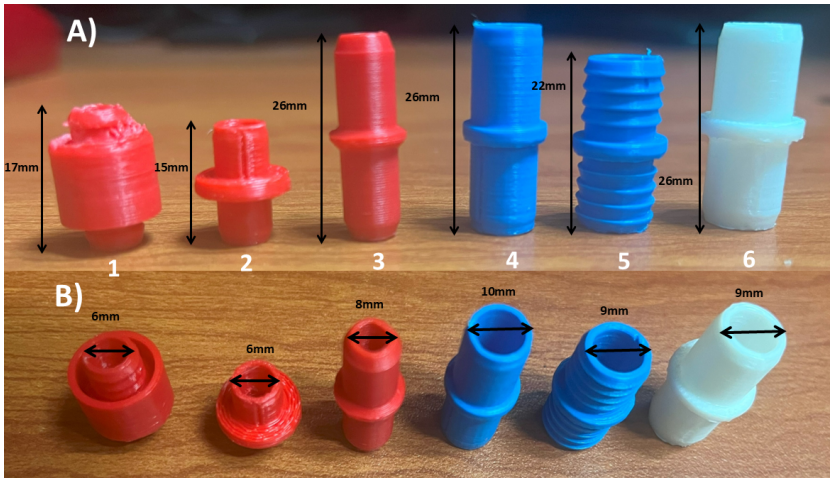


Figura 61: Distintos diseños para las conexiones de las mangueras de Látex, A) vista frontal, B) vista superior.

El siguiente paso consistió en ensamblar los contenedores de agua; para emular la circulación de la vena y arteria subclavia, se usaron dos contenedores herméticos de 330 mililitros, en cada uno se hicieron dos orificios, uno para la salida del agua y otro para su retorno, en uno de ellos se coloca un conector con una minibomba de agua sumergible, para evitar fugas de agua se sellaron ambos conectores a los orificios del recipiente con silicona, el resultado se muestra en la Figura 62. Finalmente se conectaron las mangueras de látex y se llenan con agua los recipientes.



Figura 62: Recipientes con las bombas de agua para la simulación de las circulación sanguínea.

Una vez que se ha conectado el circuito para la circulación del agua, se procedió a

la conexión del circuito eléctrico y el control de las bombas de agua para la simulación de la circulación, para lograrlo es necesario que la bomba de agua se active y apague en intervalos pequeños de tiempo, de esta forma se puede emular la actividad cardíaca; considerando que las bombas de agua sumergibles elegidas actúan como un motor de corriente directa, se requiere una resistencia (1KΩ) y un mosfet (IRLML2502TRPBF) para conectarlo a un microcontrolador (Arduino Uno) que se encarga de activar y desactivar la bomba de agua, en la Figura 63 se muestra el circuito de conexión.

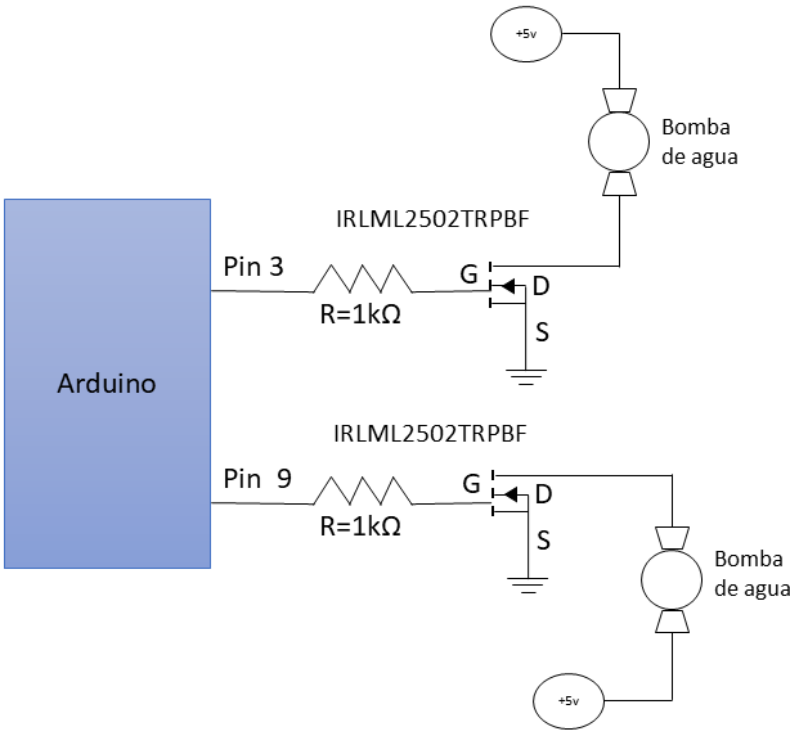


Figura 63: Circuito eléctrico para el funcionamiento de las bombas de agua.

En cuanto a la programación, se requiere simular el ritmo cardíaco normal en reposo que es 60 latidos por minuto (lpm), para lograr esto el programa, se encarga de encender y apagar la bomba cada 500 ms. Para proteger el circuito y el microcontrolador, estos fueron colocados en una caja impresa en 3D con material PLA blanco, de esta forma también se evitaría la desconexión de los cables. Para concluir con esta parte, se diseñaron e imprimieron unos pequeños ganchos que mantendrían las mangueras fijas en su lugar, al igual que ayuda a darles la trayectoria que tiene anatómicamente la vena y arteria subclavia.

6.4. Fabricación de las capas cutáneas del box-trainer

Dado que la posición del paciente no era la adecuada, no se pudo emplear la segmentación de la piel y los músculos debido a que se alteraba su posición y el espesor de

las capas en las zonas de interés, lo que provocaba que cubrieran los huesos que sirven de referencia anatómica, sin embargo se emplearon las medidas del grosor de la capa de piel, grasa y músculos obtenidos anteriormente como referencia para el diseño de estas capas en el box-trainer.

Tomando como base los modelos 3D existentes en la nube de las siluetas humanas, se hizo el modelo de la piel en Maya, posteriormente dicho modelo fue exportado a la escena en la que se tienen los modelos 3D recortados de la segmentación de imágenes, de esta forma la piel obtenida pudo ser adaptada a las dimensiones de dichos modelos, y usando las medidas obtenidas en la segmentación de las capas cutáneas, se pudo tener el grosor aproximado de estas capas y posicionar la piel.

Una vez posicionada la piel en la escena de Maya, se realizó el recorte de los modelos de la piel a la altura del recorte de los modelos de los huesos, se le agregaron paredes en los lados planos de la piel para cerrar el polígono y darle volumen. Se decidió dividir la piel en dos secciones, la parte de la espalda la cual seria también rígida debido a que esta sección tiene la función de ser la base del simulador, razón por la que fue impresa en 3D con PLA. Considerando que esta pieza tiene que encajar en los huesos y órganos de la espalada, se hace el recorte de esas estructuras en la espalda en Maya, cuando se termina la pieza se verifica que no existan estructuras abiertas ni caras dobles para evitar errores al momento de imprimir; se imprimió con un porcentaje de relleno de 10 % con un patrón de triángulos y una velocidad de 300 mm/seg. Una vez impresa la pieza es desgastada con un Dremel para que ensamble correctamente en la estructura del maniquí. En la Figura 64 se muestra la pieza final para la base y la espalda y en la Figura 65 se muestra el ensamble del box-trainer.

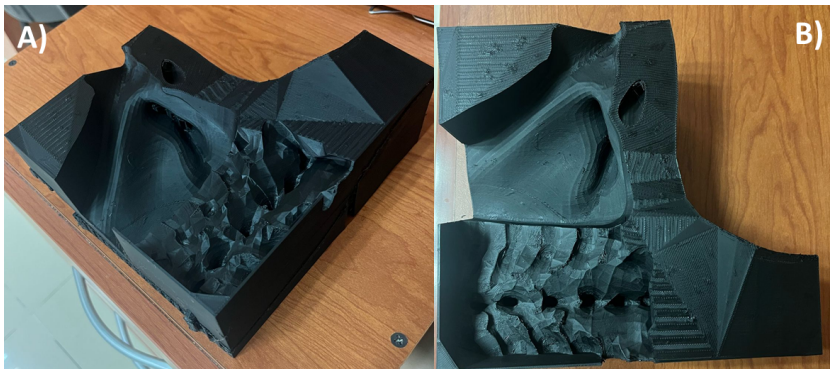


Figura 64: Versión final de la espalda del simulador físico.

Por otro lado, la sección de enfrente correspondiente al torso se fabricó con silicona Dragon Skin 10 FAST, debido a que este material es más suave y flexible, características en las cuales se asemeja a la piel y músculos ayudando así a dar una sensación realista al maniquí al momento de ubicar los puntos anatómicos. En esta parte se requiere de moldes que ayuden a darle forma al silicon, de manera que este ensamble con el esqueleto y la espalda del maniquí, no obstante se debe de tener en cuenta que se han agregado estructuras al esqueleto, como las mangueras y los soportes para los huesos, a causa de



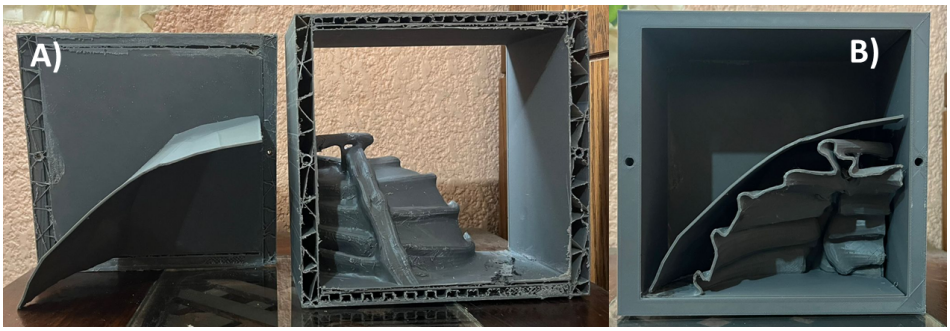
Figura 65: Box-trainer ensamblado sin las capas cutáneas.

esto se deben de realizar esos mismos cambios en el modelo virtual para la construcción de los moldes; con el propósito de evitar errores y que el modelo virtual y físico sean correspondientes, se hace el escaneo del esqueleto del maniquí físico con el escáner Sense. El modelo 3D resultante del escaneo no esta a la escala real del modelo, razón por la que se exporta el modelo a la escena en Maya donde se encuentran los modelos recortados, aquí el escaneo es empalmado con los modelos recortados. Posteriormente se le agrega el modelo de la piel del torso y se recorta la parte de la espalda, finalmente se agregan paredes, un orificio para verter el material y se le da volumen a las estructuras; este último paso se logró con ayuda del Lic. JRAV y el Dr. Joel Zagoya.

Cuando los moldes están divididos, se verifica que no existen geometrías abiertas ni caras ocultas y se imprimen en 3D, esta impresión se realizo con 20 % de relleno, una velocidad de 50 mm/s en PLA. Posterior a imprimir los moldes estos fueron cortados manualmente cada uno en dos piezas, una que contenga la piel y la otra que contenga el esqueleto, de esta manera sera más fácil sacar la pieza final una vez que la silicona se haya secado; en la Figura 66 se muestra el resultado final de los moldes.

En la página web de la empresa SMOOTH-ON se encuentran artículos y videos tutoriales sobre el uso de sus productos, como el silicón Dragon Skin 10 FAST, uno de ellos muestra como realizar almohadillas de silicón para el entrenamiento de la inserción de agujas [65], en estas se simulan las capas de piel, grasa y musculo, con el objetivo de tener una retroalimentación táctil realista al momento de realizar la práctica de punción, por esta razón, en la primera versión de la piel del simulador se intentó emular esta técnica con el propósito de simular las mismas capas.

Para esto, lo primero fue armar y sellar las capas de los moldes, al igual que cualquier



(a) Molde del lado derecho del box-trainer.



(b) Molde del centro del box-trainer.

Figura 66: Moldes para la fabricación de la piel del box-trainer, A) molde dividido, B) molde ensamblado.

espacio en el que pudiera fugarse el material, ahora se le coloca desmoldante, posteriormente se comenzó con la mezcla para la primera capa: la piel, en esta se usaron 125 gr de la parte A y 125 gr de la B del Dragon Skin 10 FAST, en la parte B se agrego una pequeña cantidad de pintura Slic-Pig color piel, esta se mezclo hasta que el color fuera uniforme, posteriormente se agrega la parte A y se mezcla todo nuevamente, a esta combinación se le agregan 6 gotas de espesante de silicona Thi-Vex, este ayudara a que el material se reparta y adhiera en todas las paredes del molde, se combina todo y se agrega la mitad a cada molde, aquí se intenta con ayuda de un pincel que el silicón cubra en su totalidad la superficie interna de los moldes, sin embargo esto no se logra del todo debido a la forma de los moldes, ahora se deja curar el material por 50 minutos a temperatura ambiente hasta que se vuelva pegajosa al tacto. Para la siguiente capa: la grasa, para esta se usan 300 gr de parte A, 300 gr de la B y 300 gr de Slacker, este último es un fluido traslúcido que se añade a la silicona para cambiar su textura y volverla más suave, alterando a su vez las propiedades de rebote haciéndola más parecido al tejido humano. En la mezcla se agregó en la parte B una pequeña cantidad de pintura Slic-Pig color piel, esta se mezcló hasta que el color fuera uniforme, posteriormente se agrega la parte de Slacker y se mezcla todo, posteriormente se agrega la parte A, ahora se agrega la mezcla en los moldes y se deja curar el material por un día.

Cuando se intenta desmoldar la pieza final, se separan las tapas del molde de los modelos 3D de la piel, ya que de otra forma no era posible quitar la pieza sin dañarla

(Ver Figura 67), una vez fuera del molde, se pudo observar que aun existían fugas en los moldes, por lo que parte del material se salió de ellos, esto llevo a que la pieza estuviera incompleta y tuviera huecos en ella, por otro lado en las partes completas de la pieza se pudo observar que la consistencia de esta era suave, lo que hacia posible poder emular la sensación de la piel y grasa humana. En un intento de reparar la pieza se planteó la posibilidad de colocarla nuevamente en los moldes y usar más silicón para rellenar los huecos en ella, para esto antes se debía de verificar que era posible que el silicón ya seco se adhiriera con el silicón líquido, por ello se hicieron pruebas con las partes de silicón seco que se había fugado de los moldes y silicón líquido, ambos se mezclaron en un recipiente colocando una capa de silicón seco y una de líquido para verificar que ambos se adherían correctamente, el resultado fue favorable ya que una vez seco el nuevo silicón ambos se habían adherido completamente, con esto se comprueba que era posible reparar la pieza.

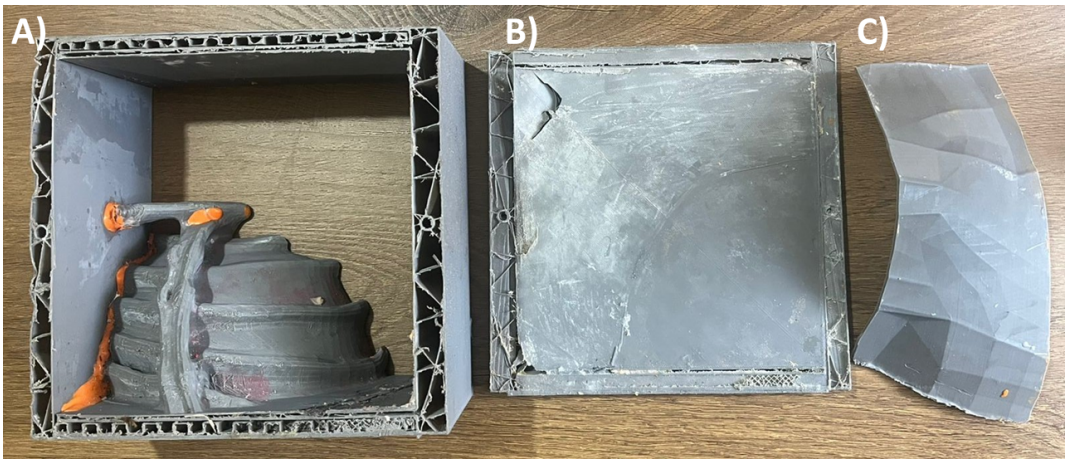


Figura 67: Molde dividido para la extracción de la pieza, A)Paredes del molde, B)Tapa del molde y C)Piel del molde.

Teniendo en cuenta que los huecos en la pieza estaban fuera de la zona de punción para el procedimiento, se optó por hacer la reparación solamente con la parte A y B del Dragon Skin 10 FAST, la pieza es nuevamente colocada dentro de los moldes, estos son sellados nuevamente y se agregó el silicón líquido hasta que los huecos se hayan llenado, sin embargo en esta parte se nota que una vez terminado de agregar el silicón una de las tapas de los moldes es movida se su sitio, ya que en esta parte no es posible mover demasiado los moldes para intentar mantener la integridad de la pieza, únicamente se regresa la tapa del molde a su lugar y se intentó sellarla nuevamente, se deja curar la pieza por un día entero nuevamente. Cuando se desmoldo la pieza se observo que nuevamente el material se había fugado, y parte del material agregado se había adherido en partes de la pieza que no tenían huecos por esta razón esa parte había aumentado su grosor y la tapa del molde había sido removida de su lugar, además que se notó que los moldes no coincidían correctamente, existía un espacio de separación en entre las dos partes de la estructura del esqueleto, por esta razón la pieza resultante era un poco más

grande que el esqueleto del simulador, además de existir una fuga en los moldes que sería muy difícil de cubrir. A pesar de los inconvenientes anteriormente mencionados, se logró tener una pieza ya completa de la piel que recubriría el box-trainer, así que, para terminar de adecuarla al esqueleto, se removió manualmente todo el material excedente hasta que encajara adecuadamente.

No obstante, cuando la pieza fue colocada en el esqueleto, se pudo observar que esta no se quedaba en su lugar, el peso de esta era demasiado y al tener una consistencia más suave por la capa de grasa, parte de la pieza se caía hacia la parte baja del modelo donde se encontraba la clavícula cubriéndola completamente haciendo muy difícil su ubicación mediante el tacto, resultado contrario a lo que se pretendía lograr, esta situación llevo a que se realizara una segunda versión de la piel para el simulador.

En esta segunda versión de la piel se decidió hacerla hueca para evitar que el peso vuelva a actuar en contra de los propósitos del proyecto. Esta vez se usaron 250 gr de parte A, 250 gr de parte B y 6 gotas de Thi-Vex, se usó el mismo procedimiento de mezclado que en la elaboración de la capa de piel de la primera versión, cuando se tiene la mezcla final de los componentes, se procede a vaciarla en los moldes, previamente sellados y cubiertos con desmoldante, esta vez se trabaja ambas mitades de la piel por separado, debido a que la cantidad del material es menor al necesario para llenar los moldes, mientras aún sea liquido el silicón, este se mueve alrededor del molde para que cubra toda la superficie interior de este, este proceso se lleva a cabo cada 10 minutos por 40 minutos, con el propósito de que el material se reparta equitativamente en todo el molde y no se quede todo en un solo lugar haciendo una pared mas gruesa que las demás, como resultado se tiene la forma de la piel completa pero sin relleno (ver Figura 68), esta se coloca en el esqueleto del simulador, teniendo un mejor resultado ya que la pieza se queda en su lugar, cubre en su totalidad el esqueleto y es posible palpar los huesos sin mucha dificultad. Para darle un soporte a la estructura de la piel, se agregó una capa delgada de fomi, el cual fue moldeado a la forma de la superficie de la piel, finalmente para unir ambas partes de la piel se emplea hilo transparente o invisible, la pieza resultante fue colocada sobre el esqueleto completando así el box-trainer, este se muestra en la Figura 69.

Para concluir con la sección del desarrollo del prototipo, se muestra a continuación el diagrama estructural del box-trainer y la lista de materiales empleados Tabla 9 y Tabla 10.



(a) Vista superior de la capa de piel.

(b) Vista inferior de la capa de piel.

Figura 68: Modelo físisco final de la capa de piel.



Figura 69: Box-trainer ensamblado.

Tabla 9: Diagrama Estructural del box-trainer

Nombre Conjunto	Componente	No. de piezas	Identidad	Descripción	Diseño	Material
Esqueleto	1	1	FI-DSYC-100 20	Esternón unido a la primera costilla y la primera vertebra	MYRA-01-100 020-P	PLA
Esqueleto	2	1	FI-DSYC-100 25	Vertebras	MYRA-01-100 025-P	PLA
Esqueleto	3	1	FI-DSYC-100 30	Segunda costilla	MYRA-01-100 030-P	PLA
Esqueleto	4	1	FI-DSYC-100 35	Tercera costilla	MYRA-01-100 035-P	PLA
Esqueleto	5	1	FI-DSYC-100 40	Cuarta costilla	MYRA-01-100 040-P	PLA
Esqueleto	6	1	FI-DSYC-100 45	Clavicula	MYRA-01-100 045-P	PLA
Esqueleto	7	1	FI-DSYC-100 50	Escapula	MYRA-01-100 050-P	PLA
Esqueleto	8	4	FI-DSYC-100 55	Soportes de unión de la escapula al pulmón	MYRA-01-100 055-P	PLA
Esqueleto	9	3	FI-DSYC-100 60	Soportes de unión de la clavícula al pulmón y la escapula	MYRA-01-100 060-P	PLA
Esqueleto	10	7	FI-DSYC-100 65	Soportes de unión para las costillas a las vertebras y al esternón	MYRA-01-100 065-P	PLA
Esqueleto	11	1	FI-DSYC-100 70	Unión de la primera vertebra a las demás	MYRA-01-100 070-P	PLA
Orgános	12	1	FI-DSYC-100 75	Pulmón derecho parte frontal	MYRA-01-100 075-P	TPU
Orgános	13	1	FI-DSYC-100 80	Pulmón derecho parte trasera	MYRA-01-100 080-P	PLA
Orgános	14	1	FI-DSYC-100 85	Pulmón izquierdo	MYRA-01-100 085-P	PLA
Orgános	15	1	FI-DSYC-100 90	Corazón con la vena y arteria subclavia	MYRA-01-100 090-P	PLA

Table 9 continued from previous page

Nombre Conjunto	Componente	No. de piezas	Identidad	Descripción	Diseño	Material
Orgános	16	4	FI-DSYC-100 95	Soportes de unión para el pulmón derecho	MYRA-01-100 095-P	PLA
Orgános	17	1	FI-DSYC-100 100	Soportes de unión para los pulmones	MYRA-01-100 100-P	PLA
Orgános	18	2	FI-DSYC-100 105	Soportes de unión para las vertebras a los pulmones	MYRA-01-100 105-P	PLA
Orgános	19	1	FI-DSYC-100 110	Base para el boox-trainer	MYRA-01-100 1010-P	PLA
Orgános	20	1	FI-DSYC-100 115	Soporte de unión del pulmón derecho al corazón	MYRA-01-100 115-P	PLA
Electrónica	21	2	FI-DSYC-100 120	Bombas de para fuente	MYRA-01-100 120-S	Compra
Electrónica	22	2	FI-DSYC-100 125	Mangueras de látex de 6x9 cm y 2m	MYRA-01-100 125-P	Latex
Electrónica	23	1	FI-DSYC-100 130	Recipiente de plástico con orificios para las mangueras	MYRA-01-100 130-P	Compra
Electrónica	24	1	FI-DSYC-100 135	Tarjeta Arduino uno	MYRA-01-100 135-S	Compra
Electrónica	25	1	FI-DSYC-100 140	Cable para conexión	MYRA-01-100 140-S	Compra
Capas Cutáneas	26	1	FI-DSYC-100 145	Molde de piel, graso y músculo	MYRA-01-100 145-P	PLA
Capas Cutáneas	27	1	FI-DSYC-100 150	Dragon Skin 10 FAST Trial Unit 2lbs	MYRA-01-100 150-S	Compra
Capas Cutáneas	28	1	FI-DSYC-100 155	SILC-PIG 9 pack	MYRA-01-100 155-S	Compra
Capas Cutáneas	29	1	FI-DSYC-100 160	Slacker Pint Unit 1 lbs	MYRA-01-100 160-S	Compra
Capas Cutáneas	30	1	FI-DSYC-100 165	Thi-Vex 1 ounce	MYRA-01-100 165-S	Compra
Capas Cutáneas	31	1	FI-DSYC-100 170	Recipiente para mezclar el silicón	MYRA-01-100 170-S	Compra
Capas Cutáneas	32	1	FI-DSYC-100 175	Pala para mezclar	MYRA-01-100 175-S	Compra
Capas Cutáneas	33	1	FI-DSYC-100 180	Liquido desmoldante	MYRA-01-100 180-S	Compra

Tabla 10: Lista de materiales para el desarrollo del box-trainer; H: hueso, S: soporte, P: pulmón, C: corazón, B: bomba, RC: recipiente, Un: conexión, Mc: microcontrolador, Sil: silicón.

Comentario	Descripción	Designación	Footprint	Referencia	Cantidad
3D-Print-PLA-H1	Esternón unido a la primera costilla y la primera vertebra	H1	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	1
3D-Print-PLA-H2	Vertebras	H2	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	1
3D-Print-PLA-H3	Segunda costilla	H3	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	1
3D-Print-PLA-H4	Tercera costilla	H4	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	1
3D-Print-PLA-H5	Cuarta costilla	H5	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	1
3D-Print-PLA-H6	Clavicula	H6	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	1
3D-Print-PLA-H7	Escapula	H7	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	1
3D-Print-PLA-S1	Soportes de unión de la escapula al pulmón	S1-1, S1-2, S1-3,S1-4	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	4
3D-Print-PLA-S2	Soportes de unión de la clavícula al pulmón y la escapula	S2-1, S2-2, S2-3	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	3
3D-Print-PLA-S3	Soportes de unión para las costillas a las vertebras y al esternón	S3-1, S3-2, S3-3, S3-4, S3-5, S3-6, S3-7	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	7
3D-Print-PLA-S4	Soportes de unión para las dos partes del pulmón	S4-1, S4-2, S4-3, S4-4	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	4
3D-Print-PLA-S5	Unión de la primera vertebra a las demás	S5	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	1
3D-Print-TPU-PS	Pulmón derecho parte superior	PS	3D-Print-TPU	3D-Print-TPU	1
3D-Print-PLA-PI	Pulmón derecho parte inferior	PI	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	1
3D-Print-PLA-PIz	Pulmón izquierdo	Piz	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	1
3D-Print-PLA-C	Corazón con la vena y arteria subclavia	C	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	1
3D-Print-PLA-S6	Soportes de unión para los pulmones	S6	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	1

Table 10 continued from previous page

Comentario	Descripción	Designación	Footprint	Referencia	Cantidad
3D-Print-PLA-S7	Soportes de unión para las vertebras a los pulmones	S7-1, S7-2	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	2
3D-Print-PLA-S8	Soporte de unión del pulmón derecho al corazón	S8	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	1
Mini Bomba de Agua.	Bombas para fuente de agua	B1, B2	Sumergible 6V	Sumergible 6V	2
5/16ÏDx1/2.ºD (8x12mm)	Mangueras de látex de 6x9 cm y 2m	M1	Caucho	B09X6TCVD7	2
10x10 cm	Recipiente de plástico con orificios para las mangueras	RC1	Contenedor con tapa	Contenedor con tapa	1
Arduino UNO	Tarjeta Arduino uno	Mc1	kg2015013528	B0BKFBT1R1	1
14,6 x 6,9 x 6,4 cm; 310 g	Cable para conexión	Un1	alambre de cobre estañado trenzado	18AWG/6 kolorów/ 10 stóp każdy	1
3D-Print-PLA-M1	Molde A de piel, grasa y músculo	Sil1	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	1
3D-Print-PLA-M2	Molde B de piel, grasa y músculo	Sil1.1	3D-Print-PLA	3D-Print-PLA	1
10 Fast	Dragon Skin 10 FAST Cartucho 400ml	Sil2	88556	B00NH0RHBK	2
10 Fast	Dragon Skin 10 FAST Trial Unit 2lbs	Sil3	88557	B00IFI7G2E	1
Smooth-On	SILC-PIG 9 pack	Sil4	88552	B005ZH0SFU	1
Smooth-On	Slacker Pint Unit 1 lbs	Sil5	SOFBASlacker	SOFBASlacker	1
Smooth-On	Thi-Vex 1 ounce	Sil6	43216-54379	B01ACABSC6	1
Vaso de plástico	Recipiente para mezclar el silicón	Sil7	Vaso de plástico	Vaso de plástico	1
Pala de madera	Pala para mezclar	Sil8	Pala de madera	Pala de madera	1
Smooth-On	Liquido desmoldante	Sil9	B004BNHLOK	B004BNHLOK	1

Table 10 continued from previous page

Comentario	Descripción	Designación	Footprint	Referencia	Cantidad
Pistola de silicon	Pistola de silicón para los cartuchos	Sil10	Herramienta	Herramienta	1
Fomi moldeable	Foami Moldeable 70 gr.	Sil11	Estructura	GPA930101QI7	1

7. Integración de la Realidad Aumentada con los lentes ML1

7.1. Programación del seguimiento de imágenes

Una vez que se han terminado los modelos 3D necesarios para la interfaz virtual del proyecto, se procedió a realizar el sistema de visión por computadora que es el responsable de llevar a cabo la interacción del mundo virtual con el mundo real, desplegando los elementos virtuales sobre el mundo real en el tamaño y posición predeterminados en la programación.

Para la implementación de los algoritmos y simulaciones necesarios en esta investigación, se utilizó una computadora marca Lenovo equipada con un procesador Intel CORE i7 de novena generación. Este equipo incluye una tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE GTX, lo que facilita el manejo de aplicaciones gráficas intensivas, una memoria RAM de 16 GB y un disco duro de estado sólido. Además, el sistema operativo instalado en la computadora fue Windows 11, proporcionando una interfaz estable y actualizada para el desarrollo de software.

En cuanto a los programas específicos, se empleó la versión 4.27 del motor de juego Unreal Engine (UE), desarrollado por Epic Games. Este motor gráfico está enfocado principalmente a la creación de videojuegos y se caracteriza por su robustez y capacidad para crear entornos interactivos de alta fidelidad. Para los propósitos de este proyecto, Unreal Engine se utilizó para realizar toda la programación del seguimiento de imágenes para los lentes Magic Leap One (ML1).

Paralelamente, se utilizó la versión 4.26 del SDK de Magic Leap, que es esencial para integrar realidades aumentadas y gestionar adecuadamente los elementos visuales y de interacción en los entornos virtuales creados.

El seguimiento de imágenes (*Image Tracking*) integrado en la tecnología ML1 permite detectar imágenes planas bidimensionales de un conjunto de objetivos definidos de forma personalizada, realizando un seguimiento continuo de las ubicaciones y orientaciones de las imágenes a medida que se mueven en el entorno. Esta funcionalidad posibilita la colocación de contenido virtual en función de la presencia de una imagen física [66].

Las imágenes ideales para los objetivos de seguimiento de imágenes tiene las siguientes características:

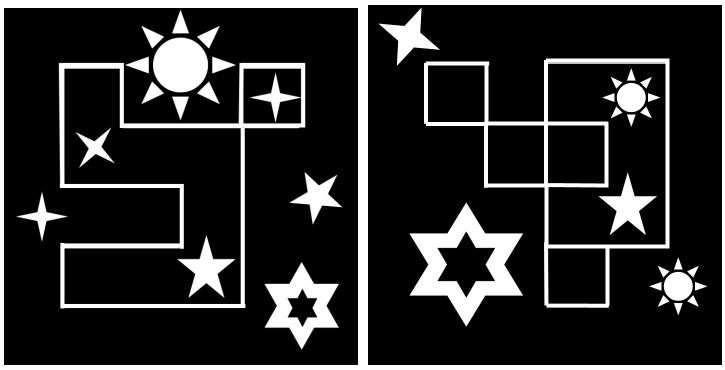
- Muchas esquinas de alto contraste.
- Pocas o ninguna simetría
- Poca o ningún patrón repetitivo.
- Muchas diferencias identificables entre sí.

Los archivos de las imágenes que emplea el seguimiento deben ser JPG o PNG. Además, no es necesario que las imágenes sean de alta resolución, ya que no ofrecen ventajas adicionales de detección o seguimiento; por lo tanto, cualquier imagen con

dimensiones superiores a 640x480 píxeles debería ser adecuada, sin embargo mediante experimentación se determinó que las dimensiones mínimas para que una imagen pueda ser detectada por el sistema de ML1 con UE4 es de 350x350 píxeles.

Teniendo en cuenta el objetivo del seguimiento de imágenes en el proyecto, se rastrearán dos imágenes diferentes que cumplan con las características anteriormente enlistadas. Una de ellas despliega el modelo anatómico en 3D (ver Figura 43) y la segunda imagen se coloca como marcador en una jeringa para cateterización, con el objetivo de realizar el seguimiento de esta y determinar en tiempo real su posición y orientación.

El primer paso en esta sección del proyecto fue la elección de las imágenes para el seguimiento, siguiendo los requerimientos mencionados con anterioridad para las imágenes usadas en el seguimiento, se optó por crear un par de imágenes a partir de los patrones Aruco, obtenidos mediante la librería de OpenCV en el entorno de Google Colab con el lenguaje de programación de Python, al apegárnos a las recomendaciones proporcionadas por la página oficial de Magic Leap,en las que no se sugiere usar patrones Aruco, se lleva a cabo la modificación de las imágenes, pasándolas primero por un detector de bordes tipo "Sobel", en el propósito de detectar y resaltar los bordes de las imágenes, posteriormente se agregaron figuras simples a la imagen de manera aleatoria, con la finalidad de proporcionarle a esta más esquinas y bordes que pueda identificar durante el seguimiento. Las imágenes resultantes se muestran en las Figuras 70a y 70b.



(a) Marcador pasivo 1 para el seguimiento.

(b) Marcador pasivo 2 para el seguimiento.

Figura 70: Marcadores definidos para el seguimiento

Ahora que se tienen las imágenes seleccionadas, como segundo paso se procedió a la programación del seguimiento de imágenes con UE4 y el paquete de desarrollo SDK de Magic Leap. Para esto, primero se creó un nuevo proyecto en blanco en el entorno especial de UE4 (previamente instalado), posteriormente se agregan los elementos necesarios a la escena, como los BluePrints (Interfaz basada en nodos) de tipo Pawn y Actor, en este último se agregó una API de ML1, llamada *"MagicLeapImageTracker"*, esta se encarga de detectar la imagen previamente seleccionada, reconocer su posición y orientación en el mundo y posteriormente desplegar el contenido virtual ligado con dicha imagen, al igual que realizar el seguimiento de esta en tiempo real.

Otro aspecto importante es el tamaño de la imagen en el mundo real para que esta pueda ser detectada, al momento de definir las características del seguimiento con la API de Magic Leap, se solicita especificar el tamaño máximo en centímetros de la imagen, esta será detectada solo si cumple con dicha dimensión o una menor (en la que aún sean distinguibles sus elementos), si se tiene una imagen que sobrepase el tamaño especificado no será detectada por el sistema de ML1. En esta parte se realizó el seguimiento de una sola imagen, con el propósito de comprobar la programación, así como la efectividad de las imágenes seleccionadas, y la visualización de los modelos 3D obtenidos. El resultado se muestra en la Figura 71.

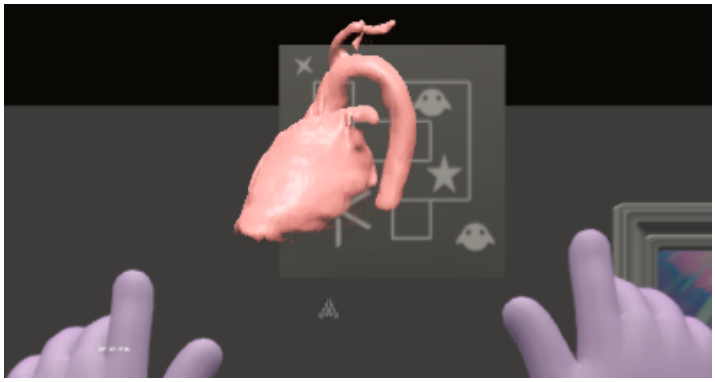


Figura 71: Seguimiento de una sola imagen.

Como tercer paso se realizó la programación del seguimiento para dos imágenes diferentes, y con ayuda de variables globales se calculó la diferencia entre la posición de ambas (Ver Figura 73), con lo cual se pretende obtener la estimación de la distancia en centímetros que existe entre ambas imágenes, sin embargo, en esta parte cabe resaltar que las coordenadas están en unidades del entorno UE4, no se logró trasladarlas a centímetros o alguna otra unidad del sistema métrico, también debe mencionarse que las pruebas con ambas imágenes se realizaron usando modelos 3D sencillos (menor resolución, peso y tamaño) a comparación de los modelos anatómicos obtenidos anteriormente, para que el software *The Lab*, soportara la simulación.En el esquema mostrado en la Figura 72se sintetiza el proceso de programación del seguimiento de imágenes.

Una vez que ha ejecutado la función de seguimiento de imágenes, se agregaron todos los modelos anatómicos que se modificaron al entorno, en este se comprueba que se despliegan correctamente al momento de detectar el marcador, al igual que se verifica el cambio en la posición y orientación de los modelos dependiendo de la ubicación del marcador.

Aunque uno de los objetivos del proyecto es lograr el seguimiento de imágenes, en el caso de la ubicación de los modelos 3D anatómicos, esto puede llegar a ser contraproducente, debido a que la ubicación de dichos modelos se modifica cada segundo dependiendo del marcador y del movimiento de la cabeza del usuario, estos se encuentran en constante movimiento, generando un temblor o inestabilidad en su despliegue,

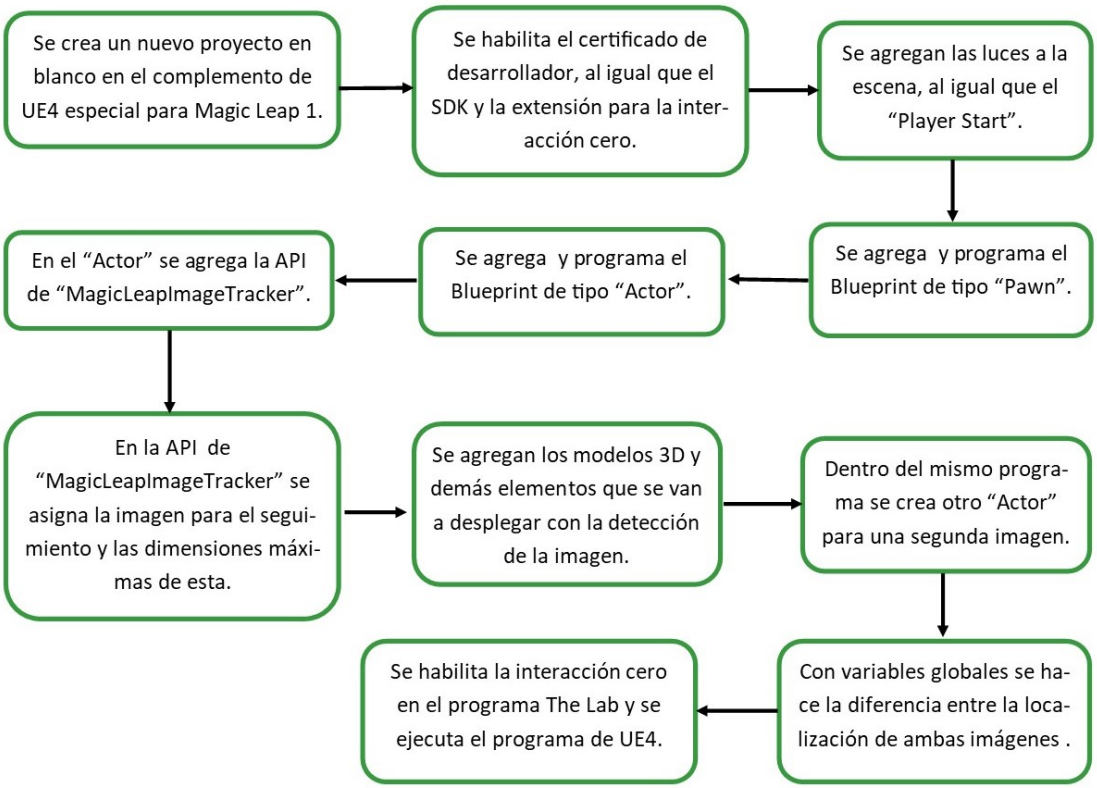


Figura 72: Diagrama de la programación del seguimiento de imágenes.

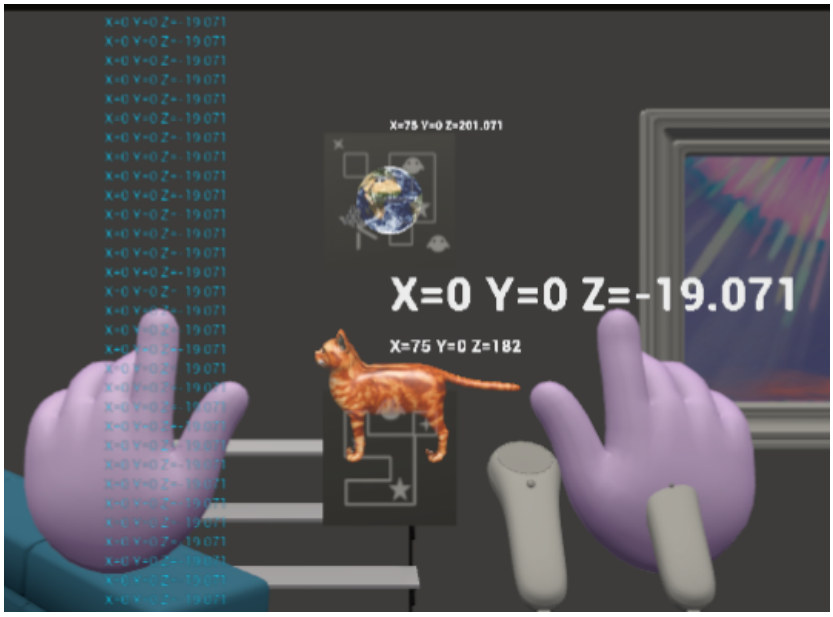


Figura 73: Simulación para el seguimiento de dos imágenes.

lo que podría generar molestia o mareos en los usuario en caso de usar el simulador por tiempo prolongado, aunado a esto es necesario que todo el tiempo los lentes estén viendo el marcador para desplegar los modelos, si en algún momento este se pierde los modelos desaparecen, lo que provocaría fallas en el simulador durante la práctica de punción.

Razón por la que, en el caso del despliegue de los modelos 3D se considera una mejor opción usar la imagen unicamente como marcador de posición y no para seguimiento; con esto se planteo lograr que lo lentes reconocieran la imagen, obtuvieran su ubicación y desplegaran los módelos 3D dejándolos estáticos en su lugar, de esta forma se quita la inestabilidad en su despliegue y no desaparecen aunque se perdiera de vista la imagen.

ML1 no tiene ningún plugin o función para Unreal Engine que haga esta tarea, para lograrlo se empleó el plugin de "MagicLeapImageTracker", este reconoce el marcador y obtiene su ubicación en el mundo real, con ayuda de banderas, se le indica al programa que el marcador ha sido encontrado, la ubicación se obtiene y se guarda en una variable tipo vector, entonces se desactiva el plugin y los modelos serán ubicados en las coordenadas que fueron guardadas, solo se debe de tener cuidado de ubicar correctamente el marcador para que el centro de la imagen coincida con el centro del maniquí, de otra forma los modelos no empalmaran 1 a 1, además considerando que se desactiva el plugin, no habrá forma de modificar la ubicación de los modelos una vez desplegados; en la Figura 74 se muestra la simualción de los modelos anatómicos finales desplegados al detectar el marcador.

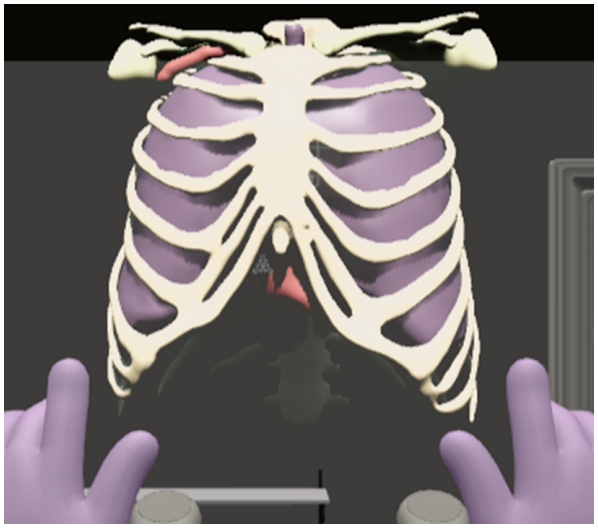


Figura 74: Simulación para el despliegue de los modelos 3D con una imagen como marcador.

En esta parte es importante considerar el valor del error de posición entre los modelos virtuales con los reales, debido a que de este depende brindar una guía visual precisa; actualmente no existen estándares universales para los errores de posición en MR [67], sin embargo, varios estudios se han centrado en medir el error entre imágenes virtuales

y objetos reales para MR, de acuerdo con el objetivo general del proyecto, de realizar una herramienta de práctica precisa para punción de la vena subclavia, se toma de referencia el trabajo expuesto por Uhl et al. [67] en el que evaluaron el error de posición de una técnica asistida por resonancia magnética para la punción de la arteria femoral en un phantom, se encontró un error de posición axial medio de 1.0 mm y un error de posición sagital medio de 1.1 mm; otro trabajo que se tiene en cuenta es el estudio expuesto por Wu, et al. [68] en el que también se realiza la medición del error de posicionamiento, pero aplicado a la guía visual mediante MR en punción lumbar, se obtuvieron los errores de posición del marcador de ubicación craneal entre la imagen por CT a lo largo de los ejes de izquierda a derecha (eje x), antero-posterior (eje y) y superior-inferior (eje z) de la mesa de CT fueron 0,09 ± 0,06 cm, 0,30 ± 0,28 cm y 0,22 ± 0,12 cm, respectivamente, mientras que los de la posición del marcador caudal midieron 0,08 ± 0,06 cm, 0,29 ± 0,18 cm y 0,18 ± 0,10 cm. Teniendo estas medidas de referencia, el error de posición entre los modelos 3D del torso y el modelo físico debe de mantenerse dentro de estos rangos y no exceder 1.1 mm.

Anteriormente se mencionó la importancia del tamaño de los marcadores para la programación del seguimiento de imágenes, pero este aspecto debe de considerarse también en el diseño del box-trainer, ya que como se construyó solo la sección superior derecha del torso, el espacio que se tiene para colocar el marcador sin interferir en el área de práctica, es reducido, sin embargo, también se debe de considerar que el marcador no puede ser demasiado pequeño para que los lentes lo puedan distinguir sin tener que acercarlo completamente a las cámaras de los ML1.

Con el propósito de obtener las dimensiones adecuadas para el marcador que indica el despliegue de los modelos 3D virtuales, se realizaron pruebas con diferentes tamaños de ambos marcadores, comenzando con marcadores de 10x10 cm, reduciéndoles 1 cm hasta tener un marcador de 2x2 cm, en esto se obtuvo que el marcador adecuado para esta tarea es el de 5x5 cm, debido a que imágenes con dimensiones superiores obstruyen el área de práctica y con dimensiones inferiores las cámaras de los lentes los pierden fácilmente a distancias mayores de 35 cm. Otro aspecto por resaltar es que para esta tarea se seleccionó el marcador 1 mostrado en la Figura 70a, ya que aunque ambos marcadores fueron diseñados con las características necesarias para su detección, el marcador mencionado es detectado en un menor tiempo por los lentes ML1, además el diseño del marcador 2 mostrado en la Figura 70b solo se detecta correctamente con dimensiones superiores a 6x6 cm lo que lo hace inadecuado para los fines planteados en el proyecto, lo que llevo a que se descartará su uso.

A fin de darle a los médicos un ambiente de práctica apegado a la realidad, se optó por usar en el sistema una aguja real para cateterismo venoso central de la marca ARROW; sobre el apoyo del émbolo de la aguja se coloca el marcador, de manera que este no debe medir más de 2x2 cm, el objetivo de esto es que no haya oclusión en el campo de visión de los médicos al manipular la aguja, pero el segundo marcador no es adecuado para ser usado con estas dimensiones, razón por la que se debe de emplear un marcador con una imagen más simple que cumpla con las características enlistadas anteriormente y puedan ser detectados por lo lentes. En la Figura 75 se muestran ocho

marcadores propuestos para esta tarea, para determinar cuál de estos es el adecuado, se realizaron pruebas de detección con los lentes ML1, buscando el que sea visto en el menor tiempo posible y no se pierda fácilmente. El marcador señalado con el número siete es el más adecuado.

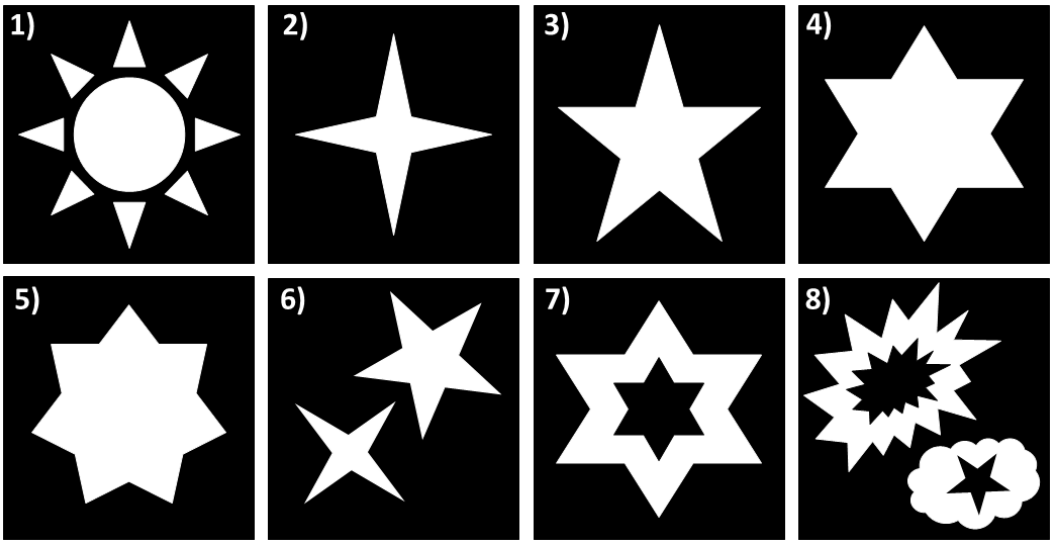


Figura 75: Marcadores propuestos para el seguimiento de la aguja.

7.2. Programación del Entorno Virtual con ML1

Utilizando el mismo equipo y programas descritos en la sección anterior, se comenzó con el diseño de la interfaz gráfica de usuario (GUI). Iniciando con la programación de la función que se ocupará de ubicar la GUI en el mundo real mediante los sensores de los lentes; para esto se usó de referencia la función del MLTK (Magic Leap Toolkit Unreal Engine) de ML1 llamada "Keep in Front", con esta función los elementos del mundo virtual se mantienen frente a la vista del usuario en todo momento, por lo cual sigue los movimiento de la cabeza, adicionalmente empleando el "Raycast", o láser de los lentes, se detectan las superficies más cercanas al usuario y la distancia en la que este se encuentra de ellas, posteriormente escala el contenido virtual para que puedan ser visibles tomando en cuenta estos factores.

Empero, para propósitos del proyecto, no es conveniente que el contenido virtual se encuentre todo el tiempo frente al usuario, dado que durante la práctica puede obstruir su vista, confundir las instrucciones o empalmar los elementos de la interfaz con los modelos anatómicos 3D virtuales que se van a ubicar en el maniquí físico, por esta razón se modificó la programación de esta función, comenzando con la creación de un Blueprint de tipo Actor, posteriormente se agrega una función llamada "Keep in Front", aquí se realizó la programación de esta función con base en lo mostrado en el MLTK, y se agregó una variable extra de tipo vector, en esta se van a guardar las coordenadas del

Raycast de la ultima posición en la que ubicaron los elementos virtuales, estos valores salen de la función y son enviados al entorno principal “Event Graph”; cuando el usuario levante el pulgar izquierdo le indicará al programa que es en esa posición donde quieren ubicar el mundo virtual, con las cámaras que integran los lentes se reconoce esa señal, se guardan las coordenadas del mundo virtual, se desactiva la función de “Keep in Frontz se mantiene el contenido con el último tamaño y posición indicados.

En el mundo virtual se agregó un panel en el que se muestran la imagen de la portada, junto con el nombre del sistema, la imagen del control con la descripción de sus elementos, una flecha para pasar al siguiente paso y las instrucciones de la práctica. Usando el “Trigger”del control, se pasa a la siguiente ventana, ya que se dieron las instrucciones iniciales del sistema, se pregunta al usuario si desea iniciar la práctica, de la misma forma con el “Trigger”se selecciona la opción de aceptar, entonces comienzan a aparecer las instrucciones de preparación del paciente mencionadas en la sección 4.1Obtención de los requisitos de usuario.

Al finalizar con estas instrucciones, se pasa a la práctica de la punción; para esto el usuario se debe de acercar al maniquí con el marcador marcador ya ubicado, gracias a esto se desplegaran los modelos 3D sobre el maniquí, empalmando ambos 1:1 o con el error de posición mencionado con anterioridad, en la parte superior de los modelos, comienzan aparecer las instrucciones para llevar a cabo la punción de la vena subclavia.

El siguiente paso en la programación del entorno virtual consiste en el seguimiento de la aguja con el marcador número siete, pero este paso ya no se realizó a causa de que la empresa Magic Leap, anunció el fin de la vida útil para los lentes ML1, a partir del 31 de diciembre del 2024, lo que significó el cierre de los servidores y las cuentas de desarrolladores para todos los usuarios de ML1, cancelando los IDs que hacían posible la activación y funcionamiento de los lentes, de la misma forma ya no se obtuvo acceso a la documentación y soporte de ML1, perdiendo también acceso al software The Lab, el cual hacia posible la comunicación y programación de los lentes.

De la misma forma, se cancelaron los certificados de desarrollador proporcionados por la empresa, consecuentemente, no fue posible generar instaladores de las aplicaciones desarrolladas, todo lo anterior provocó que la programación del entorno virtual y la GUI no puede concluirse con la tecnología de Magic Leap, a pesar de que se logró realizar la proyección de los modelos 3D virtuales sobre el esqueleto del maniquí físico, no se logró medir el error de posición que existía entre ellos, debido a que no se le dio al marcador su posición final sobre el box-trainer ya que este no se había concluido en el momento en el que se perdió el acceso a los lentes ML1, sin embargo considerando que tanto los modelos virtuales como los modelos impresos tienen como base los mismos estudios de CT es posible realizar su ubicación 1:1 o con un error dentro de los rangos expuestos en [67] y [68], no obstante también influirá las características de la tecnología que se implemente para lograr esta tarea.

8. Programación del Entorno Virtual

En esta sección se describe el diseño y programación del mundo virtual; el objetivo es recrear una habitación y mostrar el funcionamiento del simulador una vez que el box-trainer se combine con unos lentes de realidad aumentada o mixta, por ejemplo los lentes Hololens de MIcrosoft o los Meta Quest 3. La programación se realizó en el software Unreal Engine 4 (UE4), versión 4.27.

Se creó un nuevo proyecto de tipo "Game", se asignó un nombre al proyecto y una ruta en la que se guardará, dentro del este se agregaron los elementos necesarios para el entorno que son: "Sky_ sphere", cinco "Static Mesh"de tipo "Cube"para la construcción de la habitación, las luces y los modelos 3D del box-trainer, la mesa donde se colocara y el panel de las instrucciones, con esto se crea la escena y se procede a la programación de los eventos.

La programación se comenzó con el Blueprint del tipo "Pawn", en el se agregó el modelo 3D de la mano en un "Static Mesh"; de la misma forma se agregó una cámara y un "SpringArm", se ubican todos los elementos de manera que la cámara represente al jugador, por lo cual esta se encuentra un poco inclinada.

Ya que se tienen los elementos necesarios en la sección de "Event Graph" se agregaron los comandos que permiten el movimiento y rotación del jugador sobre los ejes X, Y, Z.

Para los movimientos sobre los ejes, se agregó un offset local de una unidad (negativa o positiva) sobre el eje deseado, usando una tecla diferente para cada movimiento; estas son: 1) Letras A y Z para Arriba y Abajo (Eje Y), 2) Letras D y C para Izquierda y Derecha (Eje X) y 3) Letras S y X para Adelante y Atrás (Eje Z).

En cuanto a las rotaciones, se lograron obteniendo las coordenadas de rotación del "Static Mesh" en el mundo virtual y posteriormente agregándole o quitándole una unidad en el eje donde se quiere realizar la rotación, de la misma forma, se emplearon teclas diferentes para cada movimiento, son: 1) Up y Down para rotación en X y 2) Right y Left para rotación en Z, con esta programación el jugador puede desplazarse a lo largo del escenario y ubicarse frente al simulador cuando la práctica comience.

Para la siguiente programación se agregó un BluePrint del tipo "Game Instance", en este se crearon las variables globales del juego, con ellas se comunican los diferentes BluePrints del juego, lo que hace posible la secuencia de las acciones del juego.

El siguiente BluePrint de tipo "Actor" contiene el modelo 3D del box-trainer, dicho modelo se agregó dentro de un "Static Mesh", al mismo tiempo se agregó un "Box Collision" (ver Figura 76).

Con el objetivo de que se puedan visualizar los modelos 3D de las estructuras anatómicas del tórax cuando la práctica sobre el box-trainer comience, se cambia el material de este a uno traslucido cuando el jugador colisione con la caja que contiene al modelo 3D del simulador, finalmente se cambia el valor de la variable global "Activate", esta será verdadera cuando el material sea traslucido y falsa en caso contrario; dicha variable se encarga de que los modelos 3D anatómicos solo sean mostrados cuando el jugador este interactuando con el box-trainer.

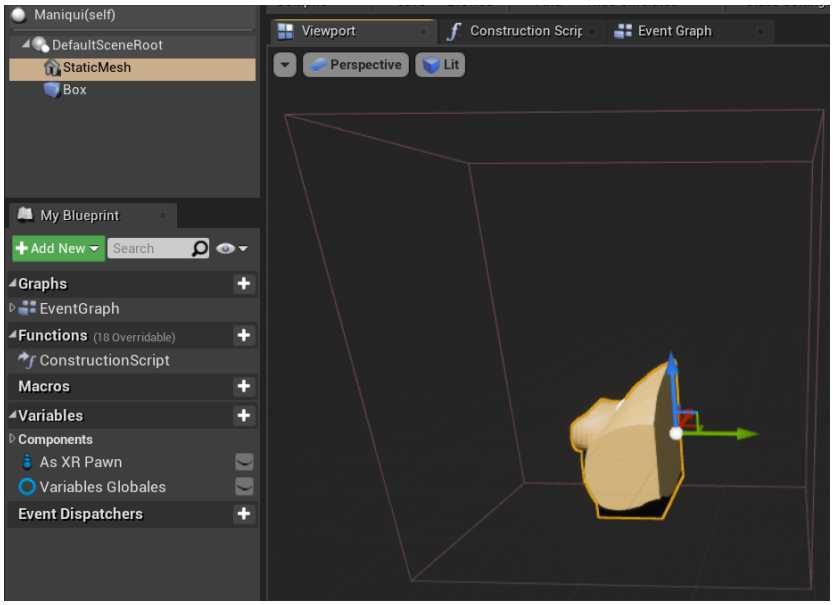


Figura 76: BluePrint del box-trainer.

A continuación, se comenzó con la programación de las instrucciones del juego y los pasos previos a la punción de la vena subclavia, para esto se creó un nuevo BluePrint de tipo "Actor", en este se agregaron dos "Static Mesh Cube", uno para la portada y las instrucciones del juego y otro para las indicaciones posteriores, tres "TextRender", uno para el nombre del sistema, otro para las instrucciones y el último para la segunda línea de las instrucciones largas.

Con el bloque "Set Hidden in Game" se ocultan todos los elementos anteriormente mencionados, posteriormente se seleccionó la tecla F para pasar las instrucciones del juego, usando una variable de tipo entero, se cuenta el número de veces que se ha presionado la tecla para relacionarla con el caso correspondiente, en la primera iteración se obtienen las coordenadas de la cámara del jugador, se agrega un offset en el eje Y, estas nuevas coordenadas son empleadas para ubicar las instrucciones a una distancia frente al jugador, posteriormente se muestran los paneles con la portada del juego, en la siguiente iteración se cambia la imagen del panel colocando las instrucciones del juego, a partir de la tercera iteración se comienzan a mostrar las indicaciones para la preparación previa a la punción de la vena subclavia, estas fueron mencionadas en la sección 4.1.1, se enlistan nuevamente a continuación:

1. Evalúa el estado actual del paciente.
2. Verifica que no existan contraindicaciones del procedimiento en el paciente.
3. Informa al paciente sobre el procedimiento.
4. Si ha dado su consentimiento, continúa.
5. Verifica que tienes el equipo necesario para llevar a cabo el procedimiento.
6. Asea los muebles donde se colocarán los materiales.
7. Limpia y prepara al paciente para la intervención.

8. Verifica que el equipo sea estéril
9. Limpia el sitio de acceso y un espacio adicional con el antiséptico.
10. Coloca el campo estéril sobre el paciente, con el sitio de acceso expuesto.
11. Infiltra anestesia local y espera a que haga efecto antes de continuar.
12. Inicia el proceso de punción de la vena subclavia
13. Realizar el proceso de punción infraclavicular por marcas anatómicas.
14. Localiza la escotadura esternal.
15. Localiza la clavícula y divídela en tres secciones.
16. Localiza la segunda costilla.
17. Coloca el dedo índice izquierdo en la escotadura esternal.
18. Coloca el dedo pulgar en el tercio medio de la clavícula.
19. Sin mover los dedos de la mano izquierda, introduce la aguja en un ángulo de 30° en relación con la pared torácica.
20. La aguja debe pasar por debajo de la clavícula y sobre la segunda costilla, por debajo de la posición del pulgar.
21. Dirige la punta de la aguja apuntando detrás del dedo índice.
22. Ejerce un poco de succión sobre el émbolo de la jeringa.
23. Posiciona a 3 cm de profundidad.
24. Ejerce un poco de succión sobre el émbolo de la aguja
25. Asegurese que el color corresponda con la sangre venosa

Se llega hasta el punto 11, una vez que se han terminado las instrucciones se le indica al jugador que mire hacia el modelo 3D del box-trainer y se acerque un poco, en la última iteración se ocultan nuevamente los elementos del presente BluePrint y se modifica el valor de la variable global "Model", esta le indica al siguiente BluePrint que se han completado las instrucciones iniciales y pueden ser mostrados los modelos 3D anatómicos para continuar con la práctica, así se asegura que los elementos del entorno virtual no interfieran entre ellos durante la práctica, y se siga la secuencia correcta de los pasos para la punción de la vena subclavia; gracias a las banderas que indican el inicio y final de una tarea, no es posible omitir o saltarse pasos durante la práctica.

El último BluePrint programado corresponde al que contiene los modelos 3D de las estructuras anatómicas del tórax y las instrucciones para llevar a cabo la punción de la vena subclavia.

Se comenzó agregando los modelos 3D optimizados de los huesos y órganos de los tórax mencionados en la sección 5.3, cada uno fue asignado a un "Static Mesh" diferente, de esta forma se puede interactuar independientemente con los modelos, haciendo posible que se detecte si se ha puncionado algún órgano diferente a la vena subclavia o si se logró la tarea; después se agregaron dos "Text Render" en los que se muestran las instrucciones, así como tres "Static Mesh" con los modelos de los aros que resaltan las zonas indicadas en las instrucciones, junto con ellos se agregan flechas de color rojo que ayudan a darle énfasis a las instrucciones (ver Figura 77).

La verificación de las banderas indica que se han llevado a cabo las instrucciones previas y el jugador ya se encuentra interactuando con el box-trainer, si ambas son

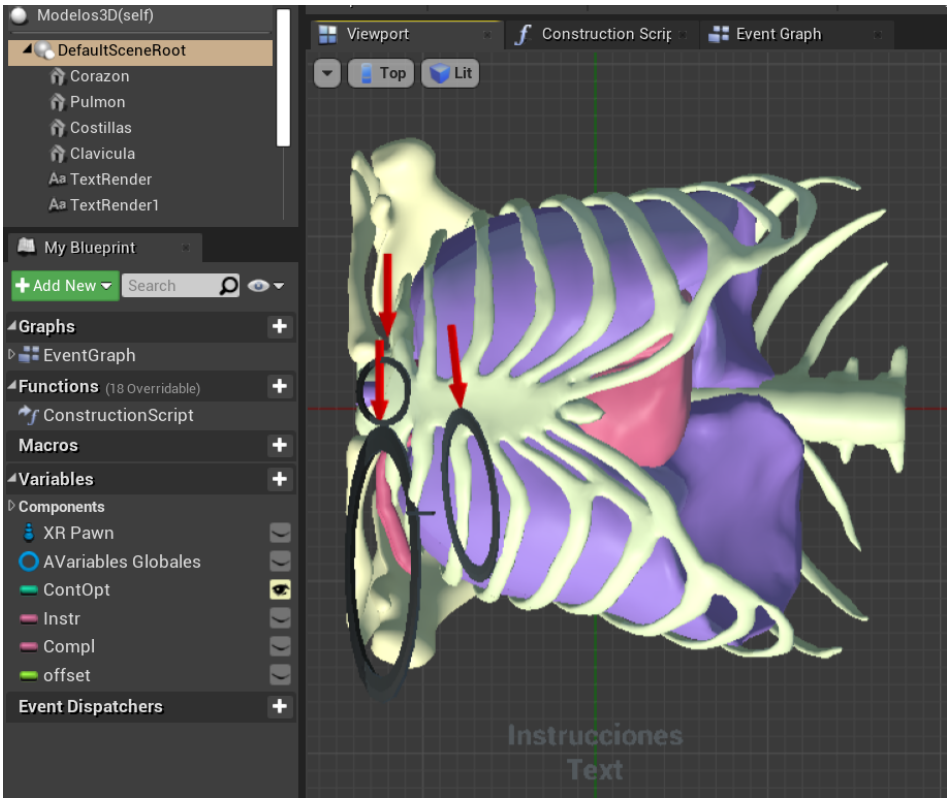


Figura 77: BluePrint correspondiente a las instrucciones de punción de la vena subclavia del juego.

verdaderas, entonces se muestran los modelos 3D anatómicos. En esta ocasión para cambiar las instrucciones se usa la tecla G, al presionarla se aumenta el valor del contador, cambiando las iteraciones del "Switch".

Las instrucciones mostradas corresponden a las expuestas en la sección 4.1.1 enlistadas anteriormente a partir del inciso 13, sin embargo cuando las instrucciones comiencen a indicar los puntos de referencia anatómicos que deben de ser localizados, se empieza a mostrar un aro y una flecha señalando la estructura correspondiente. En el momento en que las instrucciones comiencen a indicar la punción de la vena, se muestra una aguja que se va moviendo de acuerdo con las instrucciones y punciona la vena, para esto se lee la posición del "Static Mesh" de la aguja y se agregan los grados de inclinación y las unidades que tiene que avanzar en el eje correspondiente, finalmente la práctica termina al momento en que la aguja punciona la vena.

El escenario se concluye agregando todos los BluePrints descritos anteriormente en el nivel del juego, y posicionando el "Player Start" en el lugar donde el jugador se posiciona para iniciar con el juego (Ver Figura 78), en el diagrama mostrado en la Figura 79 se resumen los pasos para la programación del entorno virtual.

En la programación de este entorno virtual se considera la secuencia de la técnica de punción de la vena subclavia por marcas anatómicas, proporcionando pasos técnicos



Figura 78: Escenario final del juego.

y no técnicos, con el fin de brindarle a los médicos un entrenamiento completo.

Con los elementos virtuales, como los modelos 3D, así como de las flechas que destacan los puntos de referencias anatómicas, se pretende darle al usuario retroalimentación visual que ayude en su aprendizaje. La presentación del sistema y las instrucciones iniciales pretenden que el juego sea fácil de aprender, sin embargo, aún no se ha incluido las herramientas de seguimiento para la detección de errores durante la práctica , debido a que estas dependen de la tecnología presente en los lentes de AR o MR seleccionados para el sistema, por lo cual el simulador físico-virtual descrito en el proyecto no esta completo para realizar pruebas en usuarios, con lo que se mediría su usabilidad y se detectarían errores en el diseño y programación de este.

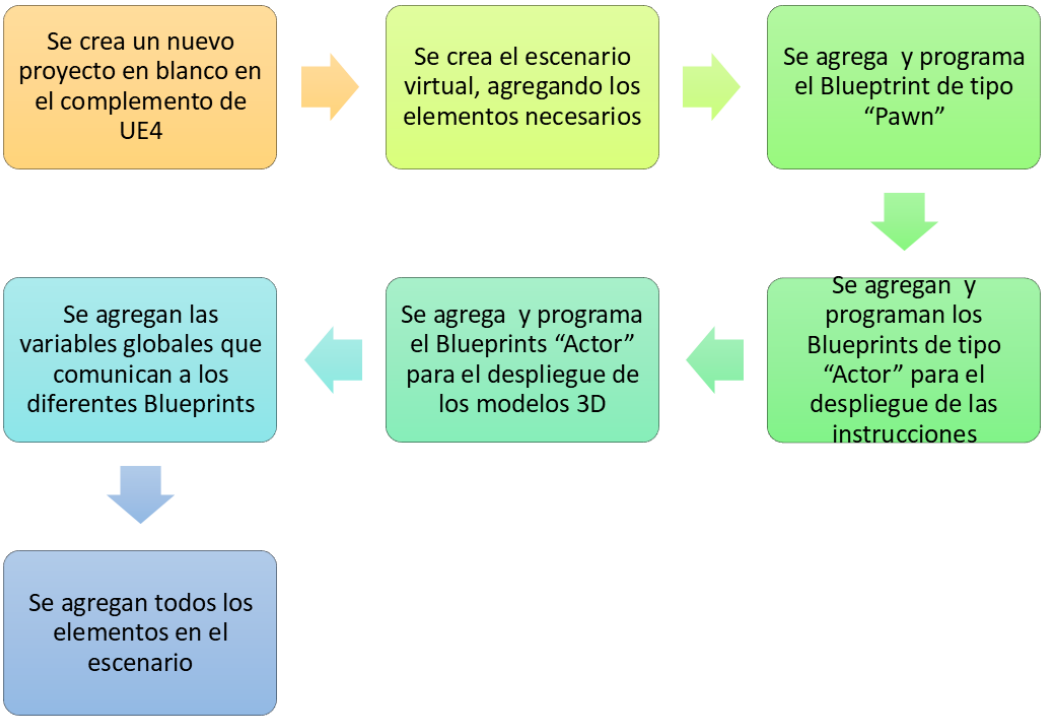


Figura 79: Diagrama en el que se resume la programación del entorno virtual.

8.1. Resultados y Prueba de funcionamiento

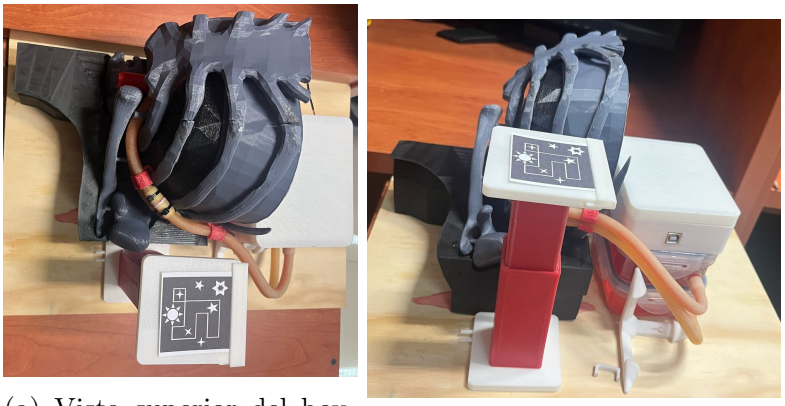
El primer resultado que se reporta es la obtención de los requisitos de usuario con la investigación documental y la aplicación de las encuestas, el siguiente son los modelos 3D de las estructuras anatómicas del tórax obtenidos en la segmentación de imágenes por CT con 3D Slicer, ya que esto constituye la base del diseño del box-trainer y parte de la guía visual del entorno virtual, dentro de esto también se destaca como resultado la redacción de un artículo de investigación basado en dicha segmentación al igual que la adecuación de los modelos en Autodesk Maya 2024, el cual fue enviado a la Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica, este sigue en estatus de revisión (ver Anexo 5: Artículo de Investigacón redactado).

Posteriormente, la construcción del box-trainer, considerando dentro de este, la impresión 3D de las piezas, la instrumentación, el diseño e impresión de los moldes y la piel de silicona, es otro de los resultados del proyecto.

Finalmente se considera la programación del entorno virtual, en este, la integración del maniquí y la demostración del funcionamiento del simulador.

Con el fin de validar la posibilidad de integrar el box-trainer y el entorno virtual en un escenario de realidad mixta, se realizó una prueba de funcionamiento utilizando los lentes Magic Leap 1 (ML1). En dicha prueba se desplegaron los modelos anatómicos segmentados sobre el box-trainer mediante el uso de marcadores pasivos, confirmando la factibilidad de la superposición en un entorno inmersivo (ver Figura 80 y Figura 81).

Sin embargo, la continuidad de esta línea de trabajo se vio limitada debido al final de la vida útil del dispositivo y la imposibilidad de mantener los programas desarrollados. Por esta razón, el proyecto se consolidó en un simulador físico-virtual (maniquí en silicona más entorno virtual), manteniendo la validación con MR como antecedente y considerándola como una línea abierta para futuras integraciones tecnológicas.



(a) Vista superior del box-trainer ensamblado con el marcador

(b) Vista lateral del box-trainer ensamblado con el marcador.

Figura 80: Box-trainer ensamblado sin las capas cutáneas



Figura 81: Despliegue de los modelos 3D sobre el esqueleto del box-trainer con los lentes ML1

9. Conclusiones

En el desarrollo del proyecto se realizó la construcción de un maniquí del lado superior derecho del torso, también conocido como box-trainer, un simulador físico destinado al entrenamiento de le técnica de punción de la vena subclavia por marcas anatómicas, gracias a los materiales con los que fue construido es posible palpar e identificar los puntos de referencia anatómicos, parte fundamental en la localización de la vena subclavia; se destaca que la construcción de este se basó en los modelos 3D obtenidos mediante la segmentación de imágenes por CT de una persona, con lo que se aseguró la precisión anatómica del box-trainer tanto en la ubicación de sus componentes (huesos y órganos) como de las dimensiones de estos, puesto que corresponden con las dimensiones de una persona de 1.50m de altura. De la misma forma, los modelos 3D virtuales de las estructuras anatómicas del tórax pueden emplearse como guía visual para el aprendizaje de la técnica de punción.

Prueba de lo anteriormente mencionado se ilustra en la Figura 81 donde se observa que los modelos virtuales coinciden con los modelos impresos en 3D, demostrando así que se obtuvo una herramienta fiel anatómicamente a la que se le puede adaptar un sistema virtual, con la finalidad de crear un simulador basado en MR sin que se comprometa la precisión anatómica del simulador y del procedimiento. Si bien el maniquí podría emplearse de manera individual, debido a que por sí solo constituye un simulador físico, se necesitaría de un profesional con experiencia en CVC que supervise la práctica, aunado a esto en [18] se concluye que la práctica en punción de la vena subclavia mejora cuando se tiene un apoyo visual basado en AR, a que sí se realiza solo con el maniquí y US.

Otro aspecto a mencionar es que, con ayuda de los cuestionarios aplicados a los profesionales de la salud, se puede resaltar la importancia de practicar la técnica de abordaje por marcas anatómicas, lo que contrasta con lo expuesto en la literatura donde se describe y recomienda el abordaje por US; del mismo modo se observó que a pesar de los maniquíes existentes en el mercado, la mayoría (85.7 %) de los estudiantes encuestados aprenden la técnica de manera teórica, empleando material audiovisual y observando la cateterización de la vena subclavia en pacientes. Esto podría deberse al precio de los maniquíes, ya que ronda entre 1,250 y 12,000 USD (22,964 - 220,461 pesos MXN) dependiendo de los accesorios, precisión y funcionalidades que tengan.

En cuanto a la programación del mundo virtual, se muestra el concepto del funcionamiento del simulador cuando sean integrados unos lentes de AR o MR; las instrucciones mostradas durante la práctica corresponden a aspectos técnicos y no técnicos del procedimiento al igual que orientan al usuario en la localización de los puntos anatómicos de referencia y la colocación de las manos durante el procedimiento, sin embargo, en este no se muestra la detección de errores durante la práctica, no mide el tiempo ni evalúa su ejecución, ya que esto dependerá de los lentes que sean integrados, la tecnología presente en ellos y el lenguaje de programación en los que puedan programarse, por ejemplo, al emplear los lentes ML1 en el desarrollo del simulador de MR, se implementaron los plugins que tenía destinados a la detección y seguimiento de imágenes,

lo que hizo posible el despliegue de los modelos 3D sobre el box-trainer, así como el seguimiento de la aguja y la posterior medición de la profundidad en su inserción y el grado de inclinación; gracias a los sensores de los lentes ML1 era posible el despliegue de la interfaz frente al usuario y el reconocimiento de determinados gestos con las manos (como señalar con el dedo índice) lo que daba la posibilidad de manipular el programa sin necesidad de controles. Ahora el programa desarrollado con tecnología de ML1 no puede ser trasladado hacia otros lentes de AR o MR, por la razón de que sus sensores y plugins son diferentes, sin embargo, es posible adaptarlo si se encuentran plugins o funciones equivalentes. Además, cabe mencionar que los lentes ML1 quedaron obsoletos debido al término de su soporte de desarrollo por el fabricante, razón por la cual no se recomienda adquirirlos nuevamente.

Por todo lo descrito anteriormente se puede concluir que se cumplió con el objetivo general, la meta de ingeniería y los alcances del proyecto, ya que se logró finalizar la construcción del box-trainer y el mundo virtual empleando segmentación de imágenes médicas, al igual que se definió una metodología de desarrollo que abarco desde la concepción del diseño, las características importantes que debían incluirse, hasta la construcción y programación del simulador.

Se obtuvo una primera versión conceptual, sin embargo, aún se deben de realizar correcciones, ya que durante el desarrollo de este se detectaron errores en el diseño sobre todo en los moldes y la elaboración de la piel, debido a que se encontraron fugas en estos y su empleo para crear la piel en una sola pieza fue difícil, ya que no sellaban correctamente, también cabe señalar que con la forma que tienen y la viscosidad del material, el silicon no llega a todos los rincones del molde por lo que la piel sale incompleta. Adicionalmente, la posición del paciente (brazos hacia arriba) en la que fueron tomados los estudios dificulto la obtención de los modelos de la piel, lo que llevo a que fueran imprecisas, afectando las medidas del grosor de la piel, grasa y músculo, volviendo sus dimensiones finales superiores a la referencia anatómica natural, en los sitios donde se ubican los puntos de referencia anatómicos. Aunque esta condición no impide su adecuada localización en esta versión del maniquí, gracias a que solo se fabricó la piel sin las capas de músculos y grasa, si se dificulta esta actividad.

10. Trabajo Futuro

Con base en el trabajo realizado, se recomienda la modificación en el diseño de los moldes para la elaboración de las capas cutáneas, ya que el diseño actual presenta dificultades en su manipulación. El material no se distribuye adecuadamente en todos los rincones, se tiene varias fugas en los moldes y las dos partes de este no embonan correctamente, provocando que la pieza resultante no sea uniforme y presente una longitud ligeramente mayor, por unos milímetros, respecto al tamaño del box-trainer. Consecuentemente, se recomienda reubicar o rehacer el modelo de la piel para que se acople correctamente en el esqueleto y permita la localización precisa de los puntos de referencia anatómicos mediante palpación. Asimismo, se sugiere delimitar la sección de piel que será reemplazada tras el uso continuo del simulador (zona de punción), y diseñar un soporte que facilite su sujeción e intercambio, garantizando un montaje estable y un mantenimiento sencillo.

Se recomienda también la integración de unos lentes de AR o MR, como los Meta Quest 3 o los Microsoft Hololens, así mismo se podría realizar la programación del entorno virtual para que se midan las variables relevantes en la práctica de punción de la vena subclavia como el ángulo de inclinación, la profundidad de la punción, el tiempo que tardo el abordaje y el número de intentos fallidos, igualmente se recomienda programar la detección de errores y simular eventos que pudieran ocurrir si la práctica no se llevó de manera correcta, así como asignar una calificación o puntaje a esta. Pero antes de incluir o adquirir unos lentes de AR o MR se recomienda verificar que no tengan tiempo limite de soporte, el año de lanzamiento y de ser posible la cantidad de usuarios o de unidades vendidas, con el fin de evitar una situacion como la ocurrida en el presente proyecto con los lentes ML1.

Finalmente se recomienda realizar pruebas de validación y usabilidad del box-trainer con médicos expertos para detectar errores y proponer mejoras en el diseño.

Referencias

[1] J. D. Jiménez-Gonzales, R. G. Jaramillo-Salamanca, and G. Alfonso-Hernández, *ABC de los procedimientos médicos básicos: Una guía de aprendizaje y enseñanza para profesionales de medicina*. Bogotá, Colombia: Centro Editorial Facultad de Medicina, primera ed., 2018.

[2] A. R. Robinson, N. Gravenstein, L. A. Cooper, D. Lizdas, I. Luria, and S. Lampotang, "A mixed-reality part-task trainer for subclavian venous access," *Simulation in Healthcare*, vol. 9, no. 1, pp. 56–64, 2014.

[3] J. Tanwani, S. Nabecker, J. Q. Hiansen, A. Mashari, N. Siddiqui, C. Arzola, A. Goffi, and S. Peacock, "Use of a novel three-dimensional model to teach ultrasound-guided subclavian vein cannulation," *ATS Scholar*, vol. 4, pp. 344–353, 2023.

[4] M. I. Soffler, M. M. Hayes, and C. C. Smith, "Central venous catheterization training: Current perspectives on the role of simulation," *Advances in Medical Education and Practice*, vol. 9, pp. 395–403, 2018.

[5] H. C. M. Mendes, C. I. A. B. Costa, N. A. da Silva, F. P. Leite, A. Esteves, and D. S. Lopes, "PIÑATA: Pinpoint insertion of intravenous needles via augmented reality training assistance," *Computerized Medical Imaging and Graphics*, vol. 82, 2020.

[6] J. W. Sappenfield, W. B. Smith, L. A. Cooper, D. Gonsalves, and N. Gravenstein, "Vein in a Mixed Reality Simulator," *HHS Public Access*, vol. 127, no. 1, pp. 83–89, 2019.

[7] F. Imigo G., A. Elgueta C., E. Castillo F., E. Celedón L., C. Fonfach Z., J. Lavanderos F., and E. Mansilla S., "Accesos venosos centrales," *Cuadernos de Cirugía*, vol. 25, no. 1, pp. 52–58, 2011.

[8] C. Y. Huang, J. B. Thomas, A. Alismail, A. Cohen, W. Almutairi, N. S. Daher, M. H. Terry, and L. D. Tan, "The use of augmented reality glasses in central line simulation: "see one, simulate many, do one competently, and teach everyone"," *Advances in Medical Education and Practice*, vol. 9, pp. 357–363, 2018.

[9] D.-C. Andrea, "Simulación en educación médica," *Investigación en Educación Médica*, vol. 3, pp. 100–105, 11 2013.

[10] J. Gonzalez-Vargas, H. Tzamaras, D. Brown, J. Moore, and S. Miller, "Preparing for the lasting effects of COVID-19 on medical training: The design and pilot study

of a low-fidelity virtual reality prototype for Central Venous Catheterization training," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 66, no. 1, pp. 1877–1881, 2022.

[11] I. Ma, P. Wijdenes, D. Borkenhagen, J. Babione, and G. Hallihan, "Leveraging augmented reality training tool for medical education: A case study in central venous catheterization," *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, vol. 2018-April, pp. 1–7, 2018.

[12] D. F. Pepley, C. C. Sonntag, M. A. Yovanoff, D. C. Han, S. R. Miller, and J. Z. Moore, "Building ultrasound phantoms with modified polyvinyl chloride: a comparison of needle insertion forces and sonographic appearance with commercial and traditional simulation materials," *Physiology & behavior*, vol. 176, no. 5, pp. 498–503, 2017.

[13] J. Martínez-García, M. Hernández-Pérez, H. Ramírez-Camarena, L. Rossano-Muñoz, and C. Borrego-Gaxiola, "Acceso venoso central por vena subclavia , experiencia en 117 niños en estado crítico," *Bol Med,*, vol. 1, no. 5, pp. 4–8, 2004.

[14] R. W. Taylor and A. V. Palagiri, "Central venous catheterization," *Critical Care Medicine*, vol. 35, no. 5, pp. 1390–1396, 2007.

[15] S. de Salud, "NOM-022-SSA3-2012," 2012.

[16] G. O. C. Hernández, S. F. García, and V. M. L. Méndez, "Experiencia en catéteres venosos centrales y periféricos en el Centro Estatal de Cancerología Veracruz, México," pp. 2006–2009, 2010.

[17] A. P. Singam, A. Chaudhary, and S. Shrey, "Anatomical landmark guided versus ultrasound-guided technique for subclavian vein cannulation in critically ill patients," *Journal of Krishna Institute of Medical Sciences University*, vol. 8, no. 4, pp. 50–57, 2019.

[18] K. Suzuki, S. Morita, K. Endo, T. Yamamoto, S. Fujii, J. Ohya, K. Masamune, and S. Sakai, "Learning effectiveness of using augmented reality technology in central venous access procedure: an experiment using phantom and head-mounted display," *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, vol. 16, no. 6, pp. 1069–1074, 2021.

[19] M. Rios-Hernandez, *Desarrollo de un sistema de rehabilitacion de miembro superior en un ambiente virtual para la recuperacion de la movilidad despues de un accidente cerebrovascular y fracturas.* PhD thesis, 2020.

[20] M. Ríos-Hernández, J. M. Jacinto-Villegas, N. Zemiti, A. H. Vilchis-González, M. A. Padilla-Castañeeda, and B. Debien, "Development of a lumbar puncture

virtual simulator for medical students training: A preliminary evaluation," *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, no. August, 2023.

[21] K. Moore, A. Dailey, and A. Angur, *Anatomía con orientación clínica*. Barcelona España: Wolters Kluwer, septima ed., 2012.

[22] Biografías y Vida, "El Aparato Circulatorio," 2015.

[23] M. Latarjet and A. Ruiz Liard, *Anatomía Humana*. México, D.F.: Editorial Médica Panamericana, 4° ed., 2004.

[24] E. Pró, *Anatomía Clínica*. Ciudad de México: Editorial Medica Panamericana, 1° ed., 2012.

[25] J. P. Macaluso, "Caso Clínico," 2020.

[26] R. Gutiérrez Vega and R. Sánchez Lozada, *Procedimientos Clínicos y Cuidados Postoperatorios*. México, D.F.: Editorial Prado, S.A. de C.V., 1° ed., 2007.

[27] Instituto Nacional del Cancer, "Catéter venoso periférico," 2019.

[28] V. Kumar, A. K. Abbas, and J. C. Aster, *Robbins y Contran Patología Estructural y Funcional*. Barcelona España: Elsevier, novena ed., 2015.

[29] R. Márquez Martín and G. E. Muñoz Maldonado, *Cirugía general para el médico general*. México, D.F.: McGrawHill Educación, 2° ed., 2011.

[30] Medicox, "Catéter Intravenoso Bioseguro," 2023.

[31] M. d. C. Fernández Górgola, C. d. V. Rivero, and S. Aybar, "Revista de Divulgación Técnica Agrícola y Agroindustrial," *Revista de Divulgación Técnica Agrícola y Agroindustrial*, pp. 1–5, 2010.

[32] SurtimedK Insumos Médicos, "Catéter para venoclisis mariposa," 2023.

[33] T. L. Corporation, "Catéter de inyección con aguja Para más informació sobre," 2024.

[34] F. J. Pérez Martínez, "Presente y Futuro de la Tecnología de la Realidad Virtual," *Creatividad y sociedad: revista de la Asociación para la Creatividad*, no. 16, pp. 3–39, 2011.

[35] D. B. Mekbib, J. Han, L. Zhang, S. Fang, H. Jiang, J. Zhu, A. W. Roe, and D. Xu, "Virtual reality therapy for upper limb rehabilitation in patients with stroke: a meta-analysis of randomized clinical trials," *Brain Injury*, vol. 34, no. 4, pp. 456–465, 2020.

[36] F. Telefónica, *Realidad Aumentada: una nueva lente para ver el mundo.* Madrid España: Editorial Ariel, S.A, 1° ed., 2011.

[37] I. M. Melo Bohórquez, "Realidad aumentada y aplicaciones," *Tecnología, investigación y academia TIA*, vol. 6, no. junio 2018, pp. 28–35, 2018.

[38] L. Flórez, "Realidad Aumentada y Realidad Mixta," *Universidad Autónoma de Occidente*, no. May 2013, 2013.

[39] C. Rigueros Bello, "La realidad aumentada: lo que debemos conocer," *Tia*, vol. 5, no. 2, pp. 275–261, 2017.

[40] K. Dao Tao, "Imagenes de la realidad aumentada," 2023.

[41] A. Merino, "Realidad mixta, Realidad virtual," *Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción*, p. 22, 2018.

[42] D. Ayza, "Realidad Mixta Entrando En Un Nuevo," 2018.

[43] D. W. Anatomy, "Advanced picc and central venous catheter training model," 8 2025.

[44] B. Phantom, "Gen ii ultrasound central line training model," 8 2025.

[45] A. Lab, "Anatomy lab central venous catheterization ultrasound training model," 8 2025.

[46] trucorp, "Trucvc," 8 2025.

[47] S. Corporation, "Deluxe centralineman training package," 8 2025.

[48] K. D. KIOTO, "Simulador de inserción cvc ii," 8 2025.

[49] B. INC., "Heart venous catheterisation simulator buyamag, buyamag inc," 8 2025.

[50] Y. Liu, J. Li, J. Chang, S. Xiao, W. Pei, and L. Wang, "A new inexpensive ultrasound-guided central venous catheterization simulation model," *BMC Medical Education*, vol. 23, no. 1, pp. 1–8, 2023.

[51] A. Raffaele, V. Mauri, M. Negrini, E. Negrello, G. B. Parigi, L. Avolio, A. Pietrabissa, F. Auricchio, and S. Marconi, "Elaboration and development of a realistic 3D printed model for training in ultrasound-guided placement of peripheral central venous catheter in children," *Journal of Vascular Access*, 2023.

[52] L. R. Rochlen, E. Putnam, R. Levine, and A. R. Tait, "Mixed reality simulation for peripheral intravenous catheter placement training," *BMC Medical Education*, vol. 22, no. 876, pp. 1–8, 2022.

[53] B. C.-K. Tong and Benjamin Chun-Kit Tong, "Training Surgical Residents with a Haptic Robotic Central Venous Catheterization Simulator," *Physiology & behavior*, vol. 176, no. 5, pp. 139–148, 2017.

[54] C. N. de Bioética, "¿qué es bioética?," 1 2024.

[55] C. N. de Bioética, "Guía nacional para la integración y el funcionamiento de los comités hospitalarios de bioética," 2015.

[56] C. de Organizaciones Internacionales de las Ciencias Médicas, "International ethical guidelines for health-related research involving humans," tech. rep., Organización Mundial de la Salud, 2017.

[57] C. N. de Bioética, "GuÍa nacional para la integracion y el funcionamiento de los comitÉs de Ética en investigaciÓn," tech. rep., Secretaria de Salud, 2016.

[58] IONOS, "Casa de la calidad explicación con ejemplo, ionos méxico," 7 2020.

[59] D. de Jesús Pastrana-Blanco, "¿qué es triz y cómo puede ayudarte para la toma de decisiones?," 7 2024.

[60] M. Henrich-Saavedra and O. Rojas-Lazo, "Aplicaciones de la metodología triz en el diseño ergonómico de estaciones de trabajo," *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, vol. 16, pp. 102–107, 10 2013.

[61] N. P. Suh, "The principles of design," 2010.

[62] J. M. Carreño, G. S. A. Jiménez, and A. E. E. Miranda, "Diseño axiomático para dispositivos mecatrónicos," *Inventio*, vol. 18, 11 2022.

[63] J. J. Boretti and E. C. Mukdise, "Puncion subclavia."

[64] P. Frykholm, A. Pikwer, F. Hammarskjöld, A. T. Larsson, S. Lindgren, R. Lindwall, K. Taxbro, F. Öberg, S. Acosta, and J. Åkeson, "Clinical guidelines on central venous catheterisation," *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, vol. 58, pp. 508–524, 2014.

[65] SMOOTH-ON, "How to make a needle insertion trainer," 2 2013.

[66] M. Leap, "Magic leap developer," 2020. 06-03-2024.

[67] C. Uhl, J. Hatzl, K. Meisenbacher, L. Zimmer, N. Hartmann, and D. Böckler, "Mixed-reality-assisted puncture of the common femoral artery in a phantom model," *Journal of Imaging*, vol. 8, 2 2022.

[68] J. Wu, L. Gao, Q. Shi, C. Qin, K. Xu, Z. Jiang, X. Zhang, M. Li, J. Qiu, and W. Gu, "Accuracy evaluation trial of mixed reality-guided spinal puncture technology," *Therapeutics and Clinical Risk Management*, vol. 19, pp. 599–609, 2023.

Anexo 1: Encuesta a médicos

Cuestionario: Experiencia en el aprendizaje de la punción de la vena subclavia

El presente cuestionario tiene como objetivo recopilar información sobre la experiencia de los médicos en el aprendizaje de la técnica de punción de la vena subclavia, su participación es voluntaria y no remunerada. La información será recopilada de manera anónima y empleada para propósitos académicos en el desarrollo de un simulador para el entrenamiento de la técnica de punción y cateterización de la vena subclavia con realidad mixta.

Gracias por su participación.

1. ¿Cuál es su rama de especialidad médica?
2. ¿Ha realizado la punción y cateterización de la vena subclavia en pacientes?

   Si / No
3. Si su respuesta fue afirmativa, ¿Este procedimiento médico lo lleva a cabo en hospitales de primero, segundo o tercer nivel?
4. ¿Ha llevado a cabo el procedimiento de cateterización de la vena subclavia en pacientes mediante alguna de las dos técnicas siguientes?

   a) Guiada por marcas anatómicas.

   b) Guiada por ultrasonido.

   c) Ambas
5. Si eligió la respuesta de ambas, ¿Cuál de las dos técnicas utiliza con mayor frecuencia?

   a) Guiada por marcas anatómicas.

   b) Guiada por ultrasonido
6. Si contestó que sólo implementa la técnica guiada por ultrasonido, ¿Conoce y puede realizar la punción y cateterización de la vena subclavia guiado por marcas anatómicas?

   Si / No
7. Si implementa la técnica guiada por ultrasonido, en los hospitales en los que la realiza ¿tiene siempre disponible el equipo de ultrasonido?

   Si / No
8. ¿Aproximadamente, cuántas cateterizaciones de la vena subclavia ha realizado en pacientes durante su carrera profesional?

9. ¿Cuántos años tiene practicando la técnica de cateterización de la vena subclavia?

10. ¿Qué actividades realizó para aprender y practicar la cateterización de la vena subclavia?

    a) Revisión literaria.

    b) Uso de material audiovisual (videos, imágenes).

    c) Uso de maniquíes para entrenamiento del proceso (palpación o uso de ultrasonido para la inserción de la aguja).

    d) Entrenamiento con un simulador virtual.

    e) Entrenamiento con un simulador de realidad aumentada.

    f) Entrenamiento con un simulador de realidad mixta.

    g) Práctica identificando el sitio de punción mediante marcas anatómicas.

    h) Práctica identificando el sitio de punción mediante ultrasonido.

    i) Observar la punción y cateterización de la vena subclavia en pacientes.

11. ¿Cuáles son los errores comunes cuando se está aprendiendo la técnica de cateterización de vena subclavia?

12. ¿Cuánto tiempo practicó antes de pasar a realizar la cateterización subclavia en un paciente?

13. ¿Del 1 al 10 cómo calificaría su desempeño al realizar su primera cateterización subclavia en pacientes?

14. ¿Considera que tuvo la preparación suficiente al realizar su primera cateterización subclavia en un paciente?

    Si / No

15. Si su respuesta fue negativa, ¿Qué cambiaria o agregaría a la práctica de la técnica de cateterización antes de realizarla en un paciente?

16. ¿Qué le evaluó el doctor a cargo cuando realizó su primera cateterización subclavia?

    a) Tiempo de ejecución.

    b) Ubicación del sitio de punción mediante marcas anatómicas.

    c) Ubicación del sitio de punción mediante ultrasonido.

    d) Ángulo de inserción.

    e) Profundidad de inserción.

17. ¿Ha empleado maniquíes para el aprendizaje de la cateterización de la vena subclavia?

    Si / No

18. ¿Qué actividades practicó con el maniquí?

    a) Ubicación del sitio de punción por marcas anatómicas.

    b) Ubicación del sitio de punción por ultrasonido.

    c) Punción de la vena subclavia.

    d) Inserción del catéter (canulación).

19. ¿El uso del maniquí lo ayudo a mejorar sus habilidades en la cateterización subclavia?

    Si / No

20. ¿Ha utilizado algún simulador virtual, de realidad aumentada o mixta para practicar la cateterización de venas centrales durante su formación académica o profesional?

    Si / No

21. Si su respuesta es afirmativa indique ¿Cuál?

22. ¿Ha enseñado la técnica de cateterización de la vena subclavia? / ¿Tiene experiencia en la enseñanza de la técnica de cateterización de la vena subclavia?

    Si / No

23. ¿Cuáles son las dificultades en el aprendizaje de la técnica de cateterización?

24. ¿Qué actividades o herramientas emplea para enseñar la técnica de cateterización?

25. ¿Cómo determina que un estudiante es capaz de realizar la cateterización de la vena subclavia en un paciente?

26. ¿Cuáles son los aspectos que evalúa en sus estudiantes al momento de realizar la cateterización de la vena subclavia?

27. ¿Cómo determina que un estudiante es capaz de realizar la cateterización sin supervisión?

Anexo 2: Consentimiento Informado 2

Consentimiento Informado

Yo (Nombre del participante) he sido invitado/a a participar en el proyecto de investigación de Maestría en Ciencias de la Ingeniería "Desarrollo de un simulador para el entrenamiento de punción de la vena subclavia con Realidad Mixta", que cuenta con el respaldo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México y está bajo la dirección del Dr. Juan Manuel Jacinto Villegas (jmjacintov@uaemex.mx, cel. 5518670186), mediante la donación de mis imágenes por tomografía computarizada.

El objetivo de la investigación comprende el desarrollo de un simulador para el entrenamiento médico de la técnica de punción de la vena subclavia, empleando la metodología de Diseño Centrado en el Usuario y Realidad Mixta, con ello desarrollar una herramienta que ayude a los médicos en entrenamiento a practicar y adquirir experiencia en la técnica de punción venosa central antes de realizarla en un paciente real. Entiendo que este estudio busca realizar un maniquí anatómicamente fiable, a través de la segmentación de imágenes médicas en el software libre 3D Slicer, con lo que se obtendrán modelos 3D de órganos y huesos del tórax, por lo cual autorizo el empleo de mis estudios de Tomografía Computarizada de corazón y pulmones realizados en el año 2020 en el hospital del área privada Centro Médico de Toluca, los cuales forman parte de mi proceso de diagnóstico y monitorización médica, el cual es independiente al desarrollo del proyecto anteriormente mencionado; de la misma forma se me ha explicado que en los estudios se borraran todos mis datos personales y de identificación, a través del mismo software, sustituyendo mi nombre por el seudónimo "Sujeto1" y guardando las imágenes en un archivo con extensión Nrrd el cual no contendrá ninguno de mis datos personales, por lo que mi información será anónima para todas las personas externas al proyecto.

Estoy en conocimiento que no habrá retribución por el uso de estos estudios, que no habrá riesgo para mi salud e integridad física ya que mi participación se limita a la donación de mis imágenes por tomografía, que no se revelara ningún dato de identificación en las tesis y artículos de investigación que surjan durante el desarrollo del proyecto, que se compartirán los modelos 3D resultantes en formato OBJ y JPG, que mis imágenes serán almacenadas y empleadas en un periodo de 10 años que es lo que comprende el desarrollo del proyecto, que se me notificará de los productos obtenidos a partir del empleo de mis estudios y que estoy en libertad de retirar el consentimiento para el uso de mis imágenes médicas en cualquier momento que lo desee, con ello los investigadores se comprometen a borrar los archivos que las contengan, consecuentemente no podrán usarlas en trabajos fututos de este y ningún otro proyecto, sin embargo, podrán seguir empleando los productos que se hayan obtenido de ellas hasta ese momento.

Otorgo mi consentimiento para el uso de las imágenes por tomografía computarizada, tanto la fase simple, como la arterial y la contrastada con fines de investigación científica, manteniendo mi información anónima en todo escrito y publicación que pueda generarse a través de ellos.

Acepto voluntariamente donar los estudios mencionados, entiendo que tengo derecho a retirar mi participación de la investigación y he recibido una copia del presente documento.

Nombre del participante: Teléfono:

Fecha y Firma:

Nombre del Testigo: Teléfono:

Fecha y Firma:

Nombre del Testigo: Teléfono:

Fecha y Firma:

Anexo 3: Dictamen del Comité de Ética

Universidad Autónoma del Estado de México

FACULTAD DE MEDICINA
COMITÉ DE ÉTICA EN INVESTIGACIÓN
CEI/024/2025
Toluca, Estado de México, 29 de mayo 2025
Asunto: Dictamen de Aprobación

DR. JUAN MANUEL JACINTO VILLEGAS
INVESTIGADOR PRINCIPAL
P R E S E N T E

Por este medio, el Comité de Ética en Investigación (CEI) con número de registro **CONBIOETICA-15-CEI-002-20210531**, informa a usted que el protocolo:

DESARROLLO DE UN SIMULADOR PARA EL ENTRENAMIENTO DE LA PUNCIÓN DE LA VENA SUBCLAVIA CON REALIDAD MIXTA

Fue sometido a revisión y **APROBADO** en sesión ordinaria, en ABRIL 2025, obteniendo así el número de **Registro: 006.2025** en su Archivo.

Se extiende la presente para los fines que al interesada convengan,

ATENTAMENTE
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO
"2025, 195 Años de la Apertura del Instituto Literario en la Ciudad de Toluca"

Dr. Virgilio Eduardo Trujillo Condes
Presidente del CEI

Dra. Adriana C. Pliego Carrillo
Secretaria del CEI

Ccp. Archivo

Jesús Carranza, esq. Paseo Tollocan s/n
Col. Moderna de la Cruz, C.P. 50180,
Toluca, Estado de México. Tel: 722 217 35 52
medicina.uaemex.mx

Anexo 4: Costo total del prototipo

Pieza	Cantidad	Precio Parcial	Costo Final (Pesos)
Esternón unido a la primera costilla.	146.47gr.	2.93 USD	0
Vertebras	75.59 gr.	1.51 USD	0
Segunda, tercera y cuarta costilla	45.88 gr.	0.92 USD	0
Clavicula	15.23 gr.	0.30 USD	0
Escapula	71.19 gr.	1.42 USD	0
Uniones	13.76 gr.	0.28 USD	0
Pilmón derecho parte superior (TPU)	35 gr.	80 pesos	80
Pulmón derecho parte inferior	125.99 gr.	2.52 USD	0
Pulmón izquierdo	80.71 gr.	1.61 USD	0
Corazón con la vena y arteria subclavía	35.60 gr.	0.71 USD	0
Bombas para fuente de agua	2	113 pesos	113
Mangueras de latex de 8x12 cm y 2m	20m.	391 pesos	391
Recipiente de plastico con orificios para las mangueras	2	75 pesos	150
Tarjeta Arduino uno	1	350 pesos	350
Molde A de piel, grasa y músculo	957 gr.	19 USD	0
Molde B de piel, grasa y músculo	598 gr.	11.91 USD	0
Dragon Skin 10 FAST Cartucho 400ml	2	721 pesos	1442
SILC-PIG 9 pack	1	734.54 pesos	734.25
Slacker Pint Unit 1 lbs	1	483.25 pesos	483.25
Thi-Vex 1 ounce	1	77.32 pesos	77.32
Foami Moldeable 70 gr.	1	15 pesos	15
Filamento PLA	3	527 pesos	1581
		Total	5416.82

Anexo 5: Artículo de Investigacón redactado

3D model reconstruction from Computer Tomography scans using 3D Slicer: Optimization and Preparation for Mixed, Augmented, and Virtual Reality applications.

Reconstrucción de modelos 3D a partir de imágenes por Tomografía Computarizada con 3D Slicer: Optimización y preparación para aplicaciones de Realidad Mixta, Aumentada y Virtual.

ABSTRACT

This paper aims to reconstruct and optimize 3D models from Computer Tomography (CT) scans for Mixed, Augmented, and Virtual Reality applications. Image segmentation divides an image into distinct regions using software tools, facilitating the analysis of specific structures. This study focuses on the thorax segmentation methodology implemented in the open-source software 3D Slicer and the subsequent retopology in Autodesk Maya. In addition, the resultant 3D models will be implemented in a subclavian vein puncture simulator. Three experiments were conducted to evaluate the optimization process. The most significant results include a reduction in render time by 6 seconds, a decrease in physical memory usage from 13,539 MB to 12,172 MB (77.9% to 69.3%), and a reduction in GPU memory usage from 80.6% to 59.8%. In conclusion, optimized models are more efficient for computer rendering, contributing to more effective simulation experiences. The final output comprises two OBJ files: one using the original segmented models and another with the optimized models.

Keywords: 3D Slicer, Augmented reality, CT, Medical image segmentation, Retopology.

RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo la reconstrucción y optimización de modelos 3D a partir de imágenes por Tomografía Computarizada (CT) para aplicaciones en Realidad virtual, aumentada y mixta. En la segmentación de imágenes, se divide una imagen en distintas regiones empleando softwares especializados, lo cual facilita el análisis de estructuras específicas. El presente artículo se enfoca en la metodología de segmentación del tórax implementada en el software de libre acceso 3D Slicer y la Re-topología de los modelos en Autodesk Maya. Aunado a esto, los modelos 3D resultantes se implementarán en un simulador de punción de la vena subclavia. Se realizaron tres experimentos para evaluar la efectividad del proceso de optimización de los modelos 3D.

Los resultados más significativos incluyen una reducción en el tiempo de renderizado de 6 segundos, una disminución en el uso de la memoria física de 13,539 MB a 12,172 MB (77.9% a 69.3%) y una reducción en el uso de la GPU del 80.6% al 59.8%. En conclusión, los modelos optimizados son más eficientes para la renderización por computadora, lo que contribuye a simulaciones más efectivas. El resultado final consiste en dos archivos OBJ: uno con los modelos segmentados originales y otro con los modelos optimizados.

Palabras clave: 3D Slicer, CT, Realidad Aumentada, Re-topología, Segmentación de imágenes médicas.

Anexo 6: Tabla de conversión de gauges a milímetros

TABLA DE CONVERSIÓN DE CALIBRES G A MM

GAUGE	MM
8	4
10	3.5
11	3
12	2.8
13	2.4
14	2/2.1
15	1.8
16	1.6
17	1.4/1.5
18	1.2/1.3
19	1/1.1
20	0.9
21	0.8
22	0.7
23	0.6
24	0.55
25	0.5
26	0.45
27	0.4
28	0.35
30	0.3

Fuente: Atlas of Retinal and Vitreous Surgery; Travis A. Meredith; 1999, Mosby.

