

**0002014146**

NephroTrainer

Simulador Virtual de Nefrolitotomía Percutánea

Mario Jesús Castro Zafra

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN  
BOGOTÁ, D.C.  
2021

---

0002014146  
NephroTrainer  
Simulador Virtual de Nefrolitotomía Percutánea

**Autor:**

Mario Jesús Castro Zafra

MEMORIA DEL TRABAJO DE GRADO REALIZADO PARA CUMPLIR UNO  
DE LOS REQUISITOS PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN

**Director**

Ing. Leonardo Flórez Valencia, PhD.

**Comité de Evaluación del Trabajo de Grado**

Cesar Julio Bustacara Medina

Luis Carlos Díaz Chaparro

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRÍA EN INGENIERIA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN  
BOGOTÁ, D.C.  
Diciembre, 2021

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN**

**Rector Magnífico**

Jorge Humberto Peláez, S.J.

**Decano Facultad de Ingeniería**

Ingeniero Lope Hugo Barrero Solano

**Director Maestría en Ingeniería de Sistemas y Computación**

Ingeniera Angela Carrillo Ramos

**Director Departamento de Ingeniería de Sistemas**

Ingeniero César Bustacara

**Artículo 23 de la Resolución No. 1 de Junio de 1946**

*“La Universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus alumnos en sus proyectos de grado. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque no contengan ataques o polémicas puramente personales. Antes bien, que se vean en ellos el anhelo de buscar la verdad y la Justicia”*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero dar mi más profundo agradecimiento a mi esposa por su apoyo durante en desarrollo de este proyecto, el ánimo que me brindó fue incondicional y siempre un motivo de inspiración. A Geraldine por recordarme que ante un problema siempre hay una oportunidad. A Lucero por seguir siendo la estrella que ilumina mi camino. Agradezco a mi familia por impulsarme a seguir adelante, y agradezco a mi director de trabajo de grado, profesor Leonardo Flórez por su consejo y orientación que hicieron este trabajo posible.

## Contenido

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....</b>	<b>13</b>
OPORTUNIDAD Y PROBLEMÁTICA.....	13
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....</b>	<b>14</b>
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
2.3 FASES DE DESARROLLO.....	15
<b>3. MARCO TEÓRICO / ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>18</b>
3.1 NEFROLITIASIS Y TÉCNICAS DE ELIMINACIÓN.....	18
3.2 REALIDAD VIRTUAL.....	21
3.2.1 Realidad virtual inmersiva y no inmersiva.....	22
3.3 SIMULADORES DE PCNL.....	25
3.3.1 Simuladores con modelos ex-vivo.....	26
3.3.1 Simuladores de realidad virtual.....	29
3.4 CONTRIBUCIONES DEL ESTADO DEL ARTE.....	30
<b>I – DESARROLLO DEL SIMULADOR.....</b>	<b>32</b>
1. IDENTIFICACIÓN DE FUNCIONALIDADES DE VISUALIZACIÓN E INTEGRACIÓN.....	32
1.1 Establecimiento de características.....	32
1.2 Características del simulador.....	35
2. DISEÑO DE ENTORNO VIRTUAL QUE REPRESENTA EL ESCENARIO DE PCNL.....	36
2.1 Modelado, alistamiento y refinamiento de modelos tridimensionales.....	36
3. INTEGRACIÓN DE DISPOSITIVOS Y DISEÑO DE FUNCIONALIDADES.....	42
3.1 Selección de dispositivos de interacción.....	42
3.2 Implementación.....	44
4. PRUEBA PILOTO.....	50
4.1 Diseño y preparación de la prueba piloto.....	50
4.2 Aplicación y resultados de la prueba piloto.....	53

<b>II - CONCLUSIONES.....</b>	<b>56</b>
1. IMPACTO POTENCIAL Y APOORTE DEL PROYECTO.....	57
2. PERSPECTIVAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	58
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO 1: RESULTADOS DE ENTREVISTA PARA IDENTIFICAR FUNCIONALIDADES DEL SIMULADOR.....</b>	<b>63</b>

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1: Posibles ubicaciones y formas de cálculos renales. De elaboración propia Modificado de Aragonés et al. (2001).....	18
Figura 2: Tomografía cálculo alojado en el riñón derecho. Tomado de Goldman y Schafer (2017).....	19
Figura 3: Imagen ilustrativa de la nefrolitotomía percutánea. Tomado de Agudelo (2017)....	20
Figura 4: A) HDM desarrollado por en el MIT por Ivan Sutherland, B) Oculus Quest. De elaboración propia a partir de Hassnain (2016) y Reiner (2019).....	22
Figura 5: Valve Index con controles de movimiento ergonómicos y cámaras infrarrojas para detección de posición en el espacio. Tomado de <a href="https://uploadvr.com/valve-index-hands-on/">https://uploadvr.com/valve-index-hands-on/</a> .....	23
Figura 9: Tendencia en el estudio de simulación de PCNL. Fuente: Herramienta de análisis de Scopus.....	25
Figura 6: Modelo de simulador de un riñón artificial. Tomado de Vijayakumar <i>et. al.</i> (2019).....	28
Figura 7: Simulador Marion K181. A la izquierda entorno virtual generada por el dispositivo. A la derecha, el dispositivo completo con sus periféricos . Tomado de <a href="https://www.marion-surgical.com/simulators/">https://www.marion-surgical.com/simulators/</a> .....	29
Figura 10: Malla obtenida de TAC con muchos polígonos y agujeros. Se encuentra en recuadro verde la cantidad de polígonos, y señalado en amarillo los agujeros del modelo.....	37
Figura 11: Ejemplo de un modelo utilizado en el simulador con geometría adecuada para colisiones físicas.....	38
Figura 12: Modelo gratuito detallado del riñón.....	39
Figura 13: Entorno tridimensional creado para el simulador.....	40
Figura 14: Aguja de punción modificada a partir de otro modelo.....	41
Figura 15: Material creado y configurado para simular efecto de fluoroscopia en el riñón....	42
Figura 16: Ventana de configuración de eventos de entrada de Unreal Engine.....	43
Figura 17: Ejemplo de generación de movimiento de la aguja a partir de un evento de entrada configurado en Unreal.....	44



Figura 18: Metodología RAD. Elaboración propia con base en Martín (1991).....45

Figura 19: Tablero Kanban creado en [www.trello.com](http://www.trello.com) con actividades ordenadas por categoría..... 48

Figura 20: Arquitectura base de Unreal.....49

Figura 21: Arquitectura del simulador a partir de la arquitectura base definida en Unreal.....50

Figura 22: Imagen del simulador NephroTrainer, en ejecución durante la prueba piloto, mostrando en pantalla los indicadores propuestos para evaluar la ejecución de PCNL.....53

## ABSTRACT

*This work arises after identifying the need to strengthen the training of human talent in health at Hospital San Ignacio, particularly in the percutaneous nephrolithotomy procedure, a surgery to remove large stones. A simulator of this procedure was developed, and for this purpose the main functionalities were identified, three-dimensional modeling of the environment, integration of devices and a pilot test with potential users were carried out. The results of this test show that the simulator -called NephroTrainer- responds adequately to identified needs and has some advantages compared to similar products in the literature.*

*Keywords: simulator, percutaneous nephrolithotomy, Unreal, virtual reality.*

## RESUMEN

*Este trabajo surge tras identificar la necesidad de fortalecer el entrenamiento del talento humano en salud del Hospital San Ignacio, particularmente en el procedimiento de nefrolitotomía percutánea, una cirugía para remover cálculos de gran tamaño. Se desarrolló un simulador de dicho procedimiento, y para ello se identificaron las principales funcionalidades, se realizó el modelado tridimensional del entorno, integración de dispositivos y prueba piloto con usuarios potenciales. Los resultados de esta prueba muestran que el simulador- denominado NephroTrainer- responde adecuadamente a las necesidades identificadas y presenta algunas ventajas en comparación con productos similares existentes en la literatura.*

*Palabras clave: simulador, nefrolitotomía percutánea, Unreal, realidad virtual.*

## INTRODUCCIÓN

Los cálculos renales (litiasis urinaria) pueden ser producidos por diferentes razones tales como medicamentos o exceso calcio, y pueden afectar sustancialmente la calidad de vida de las personas, generando dolor extremo, dificultad para orinar, infección urinaria y potencialmente causar la muerte, por lo que su extracción resulta necesaria para la salud del paciente (Susaeta, Benavente, Marchant & Gana, 2018). De acuerdo con cifras reportadas por Obregón, Troya, Toctaguano, Herrera, & Gaus (2016), aunque el porcentaje de personas que lo padecen varía de región a región, y puede ser de hasta 9% en Europa, 5% en Asia, y 8,8% en Estados Unidos, estas cifras muestran que se trata de un padecimiento relativamente frecuente, desde un punto de vista médico.

Cuando los cálculos son muy grandes y coraliformes (llamados así por la forma, y su tamaño superior a 2 cm), cuando existen casos de riñones trasplantados, hay anomalías anatómicas renales u obesidad, se recomienda que la extracción sea a través de un procedimiento denominado nefrolitotomía percutánea (Martín & Torres, 2002). Este procedimiento consiste en realizar una pequeña incisión en la espalda para introducir un nefroscopio, y extraer los cálculos renales (Makhoul *et al.*, 2006). Ahora bien, aunque este es un procedimiento seguro y confiable (Martín & Torres, 2002), también se encuentra que las complicaciones más comunes tales como sangrado o perforación interna, pueden depender de la técnica de punción o el número de punciones requeridas, es decir con la práctica en sí misma de quien realiza la intervención, según reportan Maldonado-Alcaraz, García, Moreno-Palacios, & Serrano-Brambila (2014). Estos mismos autores, además, indican que se requieren de 36 a 60 procedimientos para que un médico pueda realizar una cirugía renal adecuada y con un mínimo de riesgos y complicaciones para el paciente.

Por lo anterior, un sistema de simulación virtual se configura como una estrategia didáctica pertinente para el desarrollo de competencias en el personal médico en entrenamiento, que les permita mayor seguridad y precisión en el procedimiento, sin necesidad de intervenir sobre seres humanos reales con las posibles implicaciones que esto tiene. Es así como este trabajo tiene como objetivo *“Diseñar un sistema simulación virtual de un procedimiento de nefrolitotomía percutánea orientado al entrenamiento del personal médico, a través del uso de interfaces de visualización e interacción.”*

Para abordar dicho propósito, este trabajo parte de presentar una revisión temática, de los conceptos que soportan conceptualmente el estudio. Complementado, además con una revisión del estado del arte, que permita conocer los estudios más actuales y representativos relacionados con el diseño o implementación de simuladores para el entrenamiento de personal médico, particularmente orientados al sistema renal. Posteriormente, se detallan las fases implementadas para el desarrollo del simulador, siendo estas principalmente cuatro: identificación de funcionalidades, diseño del entorno virtual, integración y aplicación de una prueba piloto para evaluar la percepción de usuarios potenciales.

Más adelante, en la sección de desarrollo, se describen los resultados del proceso de diseño y desarrollo del simulador, a través del seguimiento de las fases anteriormente presentadas. En esta sección se presentan las funcionalidades identificadas y los indicadores seleccionados para dar retroalimentación al personal en entrenamiento, y apoyar el proceso de enseñanza-aprendizaje. También se detallan el modelo tridimensional construido haciendo uso de Blender y Unreal, y se describe la integración de dispositivos. Las funcionalidades fueron desarrolladas mediante Unreal, para lo cual se aplicaron metodologías ágiles.

Por último, cuando se obtuvo el simulador en su estado de prototipo -que fue denominado NephroTrainer- se diseñó y aplicó un instrumento a usuarios potenciales. Con eso, se buscaba conocer su apreciación sobre el grado en que el simulador responde a las necesidades identificadas, representa el entorno de una cirugía, y presenta ventajas en comparación con otros simuladores existentes en la literatura.

Las conclusiones de este trabajo muestran que se cumplieron todos los objetivos específicos, y en consecuencia el objetivo general. En dicha sección también se presenta el aporte e impacto potencial del simulador, y así mismo se identifican algunas limitaciones del trabajo, a partir de las cuales se plantean y proponen perspectivas y futuras líneas de investigaciones, relacionadas principalmente con un mayor alcance en el diseño del simulador.

## 1. DESCRIPCIÓN GENERAL

### Oportunidad y problemática

En la Facultad de Medicina de la Universidad Javeriana se ha identificado la necesidad de fortalecer el entrenamiento en el procedimiento de extracción de cálculos renales mediante el procedimiento de nefrolitotomía percutánea (desde ahora denotada como PCNL por sus siglas en inglés). En Colombia, el hospital San Ignacio es uno de los centros clínico que realiza la mayor cantidad de intervenciones de PCNL, por ello, se hace necesario preparar a los presentes y futuros urólogos con las herramientas adecuadas para procurar el mejor desempeño en la sala de cirugía. Este procedimiento, además del desarrollo de destrezas para manipular instrumentos, involucra habilidades y factores que pueden afectar directamente a los estudiantes de y residentes de durante un entrenamiento o una operación inclusive.

La PCNL es un procedimiento mínimamente invasivo que requiere de la presencia de un radiólogo quien, mediante ultrasonido o *fluoroscopia* más comúnmente, acompaña al urólogo ayudándole a localizar y extraer los cálculos renales. La fluoroscopia se utiliza rayos X para obtener video en vivo que le permite al médico ver al interior del paciente hecho que por si mismo conlleva a dos obstáculos a sortear durante el aprendizaje de la PCNL, primero, se requiere del desarrollo de destrezas para identificar los cálculos, órganos y tejidos mostrados en las imágenes radiológicas para su ubicación y remoción. Como segundo problema, la exposición a radiación durante un entrenamiento tradicional en sala de cirugía o con modelos prostéticos representa un riesgo para los practicantes tanto por la cantidad como la duración de las sesiones de entrenamiento. Por lo anterior, se busca aplicar herramientas y conocimiento desde la Ingeniería de Sistemas y Computación, para ser puestos al servicio de la formación para el ejercicio de la medicina que tan alta importancia tiene para cualquier sociedad. Eso se logra mediante una herramienta que simule contextos reales y contribuya en el proceso de enseñanza- aprendizaje, minimizando recursos y riesgos para la vida humana.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

### 2.1. Objetivo general

Diseñar un sistema simulación virtual de un procedimiento de nefrolitotomía percutánea orientado al entrenamiento del personal médico, a través del uso de interfaces de visualización e interacción.

### 2.2 Objetivos específicos

- Identificar las principales funcionalidades del simulador de nefrolitotomía percutánea en términos de visualización e interacción.
- Diseñar un entorno virtual que represente un escenario de nefrolitotomía percutánea e incluya las funcionalidades identificadas.
- Integrar los dispositivos de interacción para su uso con el entorno virtual diseñado.
- Ejecutar una prueba piloto con usuarios finales para valorar la aceptación e impacto del sistema de evaluación en el proceso de entrenamiento.

## 2.3 Fases de desarrollo

El proyecto se llevó a cabo con cuatro fases, y cada una de ella corresponde a uno de los objetivos específicos de este trabajo. Las fases propuestas para este trabajo son:

**Fase 1:** Identificación de las funcionalidades de visualización e interacción del simulador de PCNL.

**Fase 2:** Diseño del entorno virtual que represente un escenario PCNL e incluya las funcionalidades identificadas.

**Fase 3:** Integración de los dispositivos de interacción adecuados para su uso con el entorno virtual diseñado.

**Fase 4:** Implementación de una prueba piloto con usuarios finales y no expertos para valorar la aceptación e impacto del sistema de evaluación en el proceso de entrenamiento.

Este proyecto fue diseñado para un entorno de realidad virtual para uso en un computador PC Windows, adaptable a diferentes tipos de interfaces de interacción hombre máquina y entornos de realidad virtual inmersiva y no inmersiva.

En la primera fase, asociada con el primer objetivo específico, se identificaron las principales necesidades que se experimentan en el proceso de enseñanza-aprendizaje sobre la PCNL, y que pueden ser suplidas por el sistema de simulación diseñado. Inicialmente, se hizo una revisión de la literatura complementando el estado del arte previamente consultado para la realización de la propuesta de este proyecto. El proceso de actualización del estado del arte se llevó a cabo mediante la búsqueda en la base de datos *Scopus* y la herramienta *Google Académico*. La ecuación de búsqueda utilizada fue la siguiente: *percutaneous AND nephrolithotomy AND (simulation OR simulator)*, limitando los resultados a trabajos y estudios relacionados con la implementación, uso y validación de sistemas de simulación.

De manera complementaria, en la primera fase también se obtuvo información de personal médico del área de urología del Hospital Universitario San Ignacio (una residente en entrenamiento y un docente-instructor) sobre los requerimientos de concretos, y las características relevantes que debían ser incluidas en el simulador.

En la segunda fase, asociada con el segundo objetivo, se desarrolló el entorno virtual que representa el fundamento de la solución para el sistema de simulación de la PCNL. Para ello se tuvieron en cuenta todos los aspectos establecidos en la fase anterior. Se emplearon modelos tridimensionales del sistema urinario a partir de la segmentación de imágenes capturadas de tomografías axiales computarizadas (TAC), incluyendo los cálculos. Para crear los modelos tridimensionales de los instrumentos de cirugía y extracción se utilizó el programa de edición Blender. Estos instrumentos fueron creados de manera independiente para que se comporten de acuerdo con los comandos recibidos desde el dispositivo de interacción.

Posteriormente, se alistaron los modelos para asegurar que sean generados como mallas triangulares con una densidad poligonal de tipo *low poly*. Esto significa que cada objeto modelado no pase de 100.000 polígonos. Luego de realizado este alistamiento, los modelos se exportaron al motor de videojuegos Unreal Engine 4 para lograr una versión mejorada de los modelos hechos en Blender, con mayor realismo en color, textura y apariencia general. De igual manera, en Unreal Engine se generaron las funcionalidades definidas previamente (fase 1).

En la tercera fase, asociada con el tercer objetivo específico, se seleccionaron los dispositivos que permiten la interacción hombre-máquina y que son la representación tangible de los instrumentos quirúrgicos simulados en la fase 2. Estos dispositivos constituyen el componente de hardware del sistema de simulación. Para seleccionarlos se tuvieron en cuenta cuatro criterios: que sean de fácil acceso, que estén disponibles en y son pertenecientes al sistema CAVE (localizado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Javeriana), que tengan semejanza ergonómica a los dispositivos reales usados en PCNL y que sean compatibles con Unreal Engine (verificación de controladores de hardware disponibles y/o librerías de software integrables).

Con los dispositivos seleccionados se llevó a cabo la integración, lo que permite que las acciones realizadas con esos dispositivos sean detectadas por Unreal Engine y luego generen una reacción simulada sobre los cálculos y el sistema urinario. También se identificó si el dispositivo estaba soportado directamente por el motor, y en ese caso se creará una interfaz de comunicación entre Unreal Engine y el dispositivo. Luego, se realizó el mapeado de entradas, un procedimiento que consiste en asignar desde Unreal Engine un comportamiento al instrumento quirúrgico tridimensional de acuerdo con una acción de movimiento o un clic de un botón del dispositivo.

El mapeado de entradas se llevó a cabo directamente desde Unreal Engine sin ninguna modificación, ya que se encuentra soportado por el motor. Finalmente, se realizó un ajuste de parámetros de fuerza y sensibilidad para que exista una correspondencia



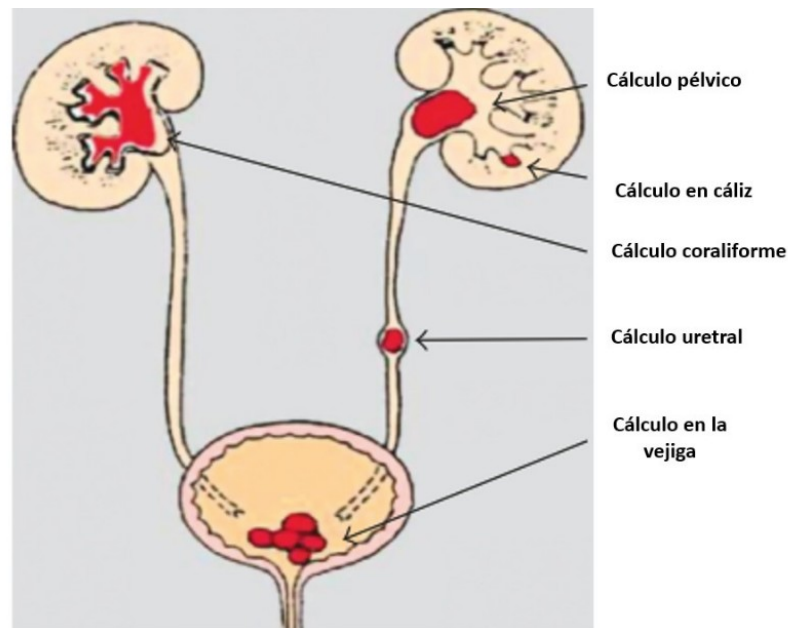
entre el grado de movimiento ejercido por el usuario en el dispositivo, y el visualizado en el modelo tridimensional.

Finalmente, en la cuarta fase, que se relaciona con el cuarto objetivo específico, se implementó un método de evaluación para medir el grado de aceptación por parte de los estudiantes-profesionales y usuarios no expertos. Para ello se diseñó un cuestionario estructurado, con preguntas cerradas que evalúan en tres niveles el cumplimiento de los criterios más relevantes sobre el simulador, así como la opción de ampliar la respuesta o hacer observaciones afines. Este instrumento se aplicó luego de mostrar a potenciales usuarios el funcionamiento del simulador, con el fin de que valoren los resultados obtenidos e identifiquen oportunidades de mejora, si las hubiera.

### 3. MARCO TEÓRICO / ESTADO DEL ARTE

#### 3.1 Nefrolitiasis y técnicas de eliminación

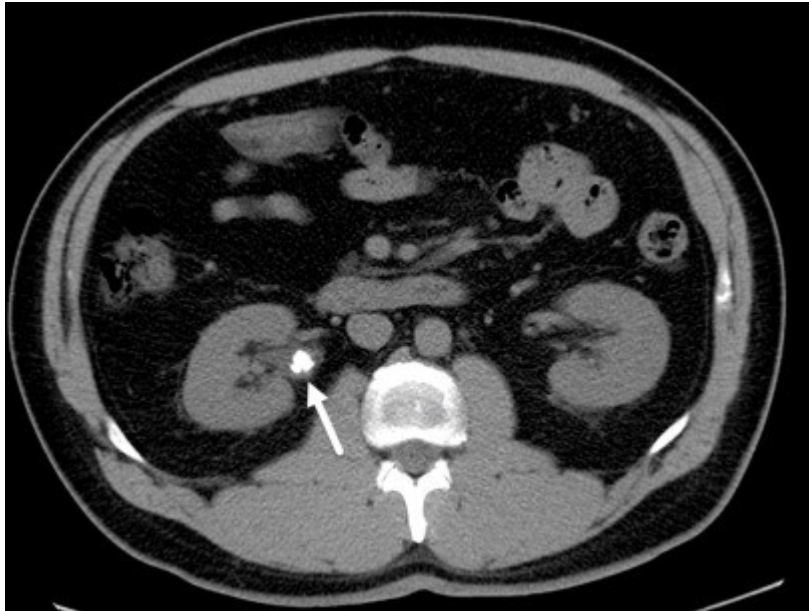
La nefrolitiasis, es una enfermedad conocida comúnmente como cálculos renales y de acuerdo con Alelign y Petros (2018) afecta al 12% de la población mundial. Esta enfermedad se describe como la formación de endurecimientos a causa de la cristalización de la orina por acumulación de sustancias que la conforman, originando obstrucciones ubicadas a lo largo del tracto urinario; desde el propio riñón o en la vejiga inclusive (figura 1).



**Figura 1: Posibles ubicaciones y formas de cálculos renales. De elaboración propia Modificado de Aragonés et al. (2001).**

Los cálculos renales producen diferentes síntomas, especialmente dolor, que resultan difíciles de soportar para el paciente una vez se alojan en el uréter o alguna de las cavidades. El diámetro de los cálculos comúnmente varía entre 1mm hasta 3cm, aunque pueden encontrarse casos de tamaños atípicos con formas asimétricas y dimensiones mucho mayores (Rubinstein Cavalcanti, Accioly, y Rodríguez, 1999) causando daño

renal permanente. Es por ello que se requiere su detección mediante ultrasonido o tomografía (figura 2).



**Figura 2: Tomografía cálculo alojado en el riñón derecho. Tomado de Goldman y Schafer (2017).**

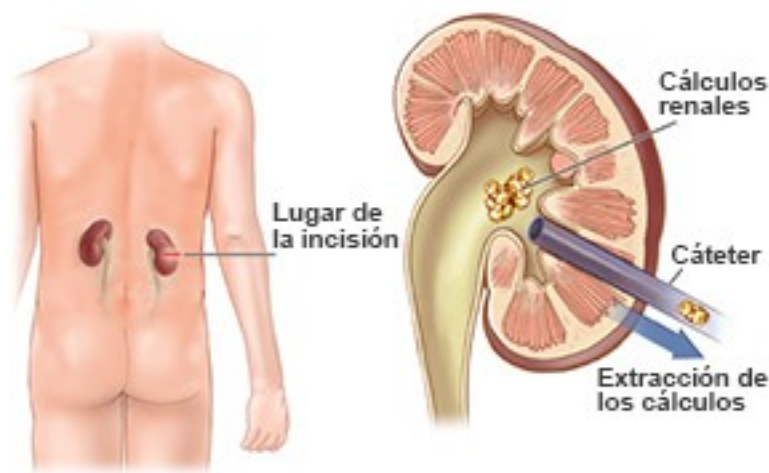
Los cálculos renales pueden ser producidos por medicamentos, calcio, estruvita, ácido úrico y cistina, y pueden tener diferentes tamaños y formas (Coe, Parks y Asplin, 1992; Alelign y Petros, 2018). El tipo de cálculo predominante es el formado por calcio con el 80% de los casos (Lock, Last y Dunea, 2001; Cooter y Pickstone, 2016), siendo además el tipo con mayor tendencia a crecer.

Los tratamientos seguidos para la eliminación de cálculos más pequeños dependen del tamaño. Para casos de hasta 5mm de diámetro la eliminación puede darse de manera espontánea con probabilidad mayor al 50%. Por el contrario, en casos en que la nefrolitiasis alcanza tamaños de 5mm a 1cm, se realizan tratamientos estimulados mediante medicamentos (Goldman y Schafer, 2017) destinados a facilitar el peristaltismo (contracciones y relajaciones de los tejidos musculares de los uréteres y el tracto digestivo) para el movimiento y expulsión del cálculo por vías urinarias.

En casos de cálculos de mayor tamaño, extracción se debe hacer de manera quirúrgica. La litrolicia extracorpórea por ondas de choque (Forssmann et al., 1980) es la in-

tervención que en cálculos de hasta 2cm se realiza con mayor efectividad (Fernández 2016) irradiando ondas de sonido de alta frecuencia para desintegrar las piedras. Si los cálculos son de mayor tamaño o se encuentran en lugares donde el procedimiento anterior no los puede alcanzar, se interviene mediante un procedimiento llamado ureteroscopia (Bagley, Huffman y Lyon, 1987) en el que se inserta un estetoscopio a través de la uretra hasta alcanzar el cálculo que por la acción de un haz de luz láser de Holmio (Wollin y Denstedt, 1998), se desintegra en partes más pequeñas que se expulsan posteriormente por la orina.

Por último, la *nefrolitotomía percutánea* (Wickham y Kellet, 1981; Zapata et al., 2015) o PCNL por sus siglas en inglés, es el procedimiento desarrollado para la extracción de cálculos que se alojan en el riñón, con tamaños superiores a 2cm o de tipo coraliforme. La PCNL se destaca por ser una operación mínimamente invasiva ya que en una incisión de 1cm localizada en la región lumbar, se hace la inserción de un catéter (figura 3) por el cual se introduce un endoscopio y un instrumento de eliminación de cálculos que puede ser un láser de Holmio o un dispositivo de desintegración por vibración.

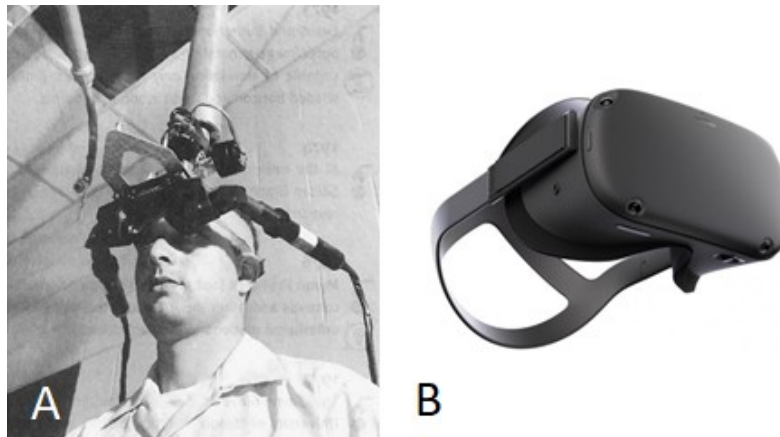


**Figura 3: Imagen ilustrativa de la nefrolitotomía percutánea. Tomado de Agudelo (2017).**

Gracias a ser una técnica especializada para eliminar piedras dentro de la cavidad pélvica del riñón, la PCNL ha visto avances importantes de las cuales se destacan: las cirugías con variación de postura (Uria et al., 1998), técnicas para casos renales pediátricos (Fernández et al., 2005) y los tratamientos para personas con obesidad (Manohar y Desay, 2007). Cada mejora en el procedimiento disminuye los riesgos que representa la formación de cálculos en la cavidad renal; según lo expresan Healy y Ogan (2007), la falta de tratamiento llega a tener efectos serios sobre el sistema urinario: generación de agentes bacterianos causantes de insuficiencia renal crónica, daños permanentes en el riñón o el fallecimiento del paciente inclusive.

### 3.2 Realidad virtual

De acuerdo con Jerald (2015), computacionalmente la realidad virtual (VR por sus siglas en inglés) se define como un grupo de tecnologías que tienen como fin representar estímulos sensoriales que no tienen presencia en el mundo real y que, por el contrario, son eventos simulados por aplicaciones de software o dispositivos de hardware. Si bien el término *realidad virtual* es bien conocido en la actualidad y popularmente relacionado con entornos tridimensionales generados por computador, sus primeros pasos se dieron en los años 60s con el *Sensorama* (Heilig, 1962), un dispositivo que permitía a los usuarios ver en una pantalla a estereoscópica a color una serie de cortos que además contaban con olores y vibraciones generados por mecanismos propios del aparato, muy al estilo de los cinemas 4D de nuestros días. Luego, a finales de esa misma década, Sutherland (1968) desarrolló lo que se conoce como el primer Head Mounted Display (HMD por sus siglas en inglés), dispositivo que evolucionó hasta volverse un ícono emblemático de la simulación y la realidad virtual (figura 4). En décadas posteriores se desarrolló esta tecnología llegando a versiones para el consumo masivo en los años 80s y 90s sistemas mayormente en investigación.



**Figura 4: A) HMD desarrollado por en el MIT por Ivan Sutherland, B) Oculus Quest. De elaboración propia a partir de Hassnain (2016) y Reiner (2019).**

### **3.2.1 Realidad virtual inmersiva y no inmersiva**

La realidad virtual inmersiva (RVI) comprende el conjunto de tecnologías que le permiten al usuario - que facilitan este tipo de visualización son los antes mencionados HMDs, también conocidos como gafas/cascos de realidad virtual. La más recientes versiones de estos dispositivos -como lo ilustra la siguiente figura- cuentan con controles de movimiento de seis grados de libertad de movimiento y sensores de posicionamiento que hacen posible que el usuario se pueda mover físicamente en el entorno.



**Figura 5: Valve Index con controles de movimiento ergonómicos y cámaras infrarrojas para detección de posición en el espacio. Tomado de <https://uploadvr.com/valve-index-hands-on/>.**

Los HDMs cuentan con dos pantallas ubicadas frente a los ojos del usuario, cuya resolución a la fecha llega a 8K y un campo de visión de 210 grados. Estos dispositivos deben tener una frecuencia mínima de 90Hz (45Hz por cada ojo) para minimizar la sensación de desorientación y mareo.

Por otro lado, también se encuentran los dispositivos que hacen parte de un gran montaje en espacios físicos con videobeam estereoscópicos que proyectan el mundo virtual sobre paredes que rodean al usuario. Estos sistemas son conocidos como CAVE (Cave Assisted Virtual Environment) y su funcionamiento consiste en la captura de las imágenes proyectadas desde el videobeam a través de anteojos polarizados (Alonso *et. al.*, 2021) que hacen que el cerebro humano perciba las imágenes en tres dimensiones, utilizando el mismo principio de las salas de cine 3D. Para seguir el movimiento del usuario, estos sistemas cuentan con cámaras infrarrojas de captura de movimiento (Goldfarb, 2021) que detectan objetos conocidos como marcadores, los cuales pueden estar adheridos a los anteojos anteriormente nombrados o incluso al propio usuario.



**Sistema CAVE con una cámara IR (esquina superior derecha) y dos usuarios utilizando anteojos polarizados con marcadores. Tomado de <https://www.youtube.com/watch?v=orbrlW6mBGw>.**

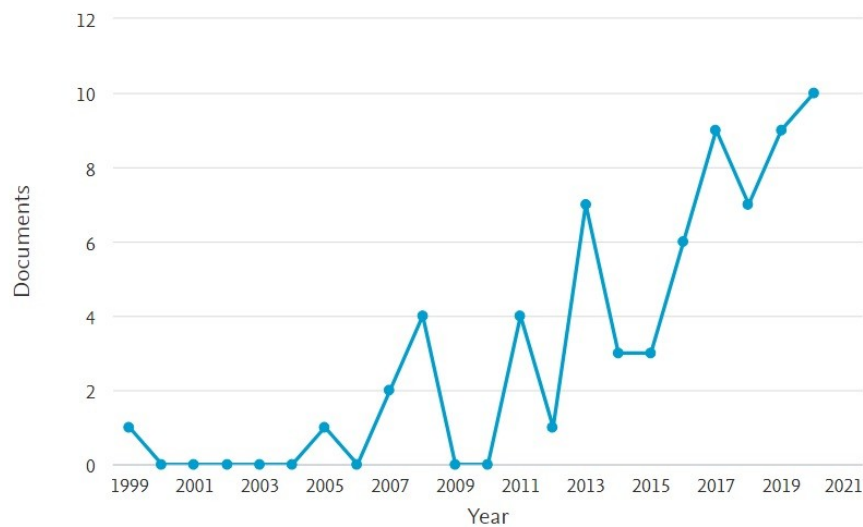
La RV inmersiva elicitaba no solo sensaciones, también emociones por lo tanto su valor va más allá de lo técnico pues le brinda experiencias perceptuales y psicológicas al individuo.

Además de la RVI, también existe la realidad virtual no inmersiva (RVNI), tecnología de uso común y cotidiano en la que el usuario no experimenta vívidamente la presencialidad en el mundo virtual teniendo mayor control sobre este último. Un claro ejemplo son los videojuegos en los que a pesar de contar con controles y mandos avanzados el estímulo visual proviene de una pantalla (monitor, televisor o dispositivo móvil) y en todos los casos está en sincronía con la percepción del usuario evitando que este último se sienta en un entorno creíble. Se puede decir que este tipo de RV sirve de complemento al mundo real.



### 3.3 Simuladores de PCNL

Los resultados de la búsqueda en Scopus con la ecuación de búsqueda percutaneous AND nephrolithotomy AND (simulation OR simulator) evidencian cómo el estudio en simulación de PCNL ha visto un incremento marcado en los últimos años, como se muestra en la siguiente figura. Si bien es cierto ha habido picos de publicaciones, la tendencia ha sido en aumento lo que indica que hay tanto un interés investigativo, como en desarrollo mismo de sistemas o procesos orientados a la simulación, siendo en varios casos con fines educativos y/o de entrenamiento.



**Figura 6: Tendencia en el estudio de simulación de PCNL. Fuente: Herramienta de análisis de Scopus.**

Los diferentes tipos de simuladores presentes en la literatura pueden ser clasificados según su funcionalidad o recursos. Por ejemplo, Brunckhorst et al. (2015) y Fiard et al. (2019) realizaron estudios acerca de simuladores orientados al entrenamiento de operaciones urológicas, identificando ventajas y desventajas de los modelos evaluados. En estos trabajos se considera la reusabilidad, versatilidad, y niveles de dificultad que pueden ser configurados en los simuladores computarizados, en contraste con las características de otros modelos de simulación analógicos/artificiales.

En este trabajo, se generó una agrupación de simuladores en cuatro categorías que se presentan a continuación.

Categoría	Descripción
<b>Impresión 3D de modelos anatómicos</b>	Estos estudios presentan el desarrollo y/o diseño de estructuras anatómicas artificiales, tales como riñones y cavidades internas impresas en sustancias elásticas o gel balística. Esto permite contar con modelos artificiales con los cuales ensayar el procedimiento de punción de PCNL.
<b>Utilización de modelos ex-vivo</b>	Estos estudios se centran en la utilización de modelos anatómicos reales, obtenidos de porcinos, bovinos y tejidos aviarios. Las estructuras utilizadas son en la realidad muy similares a las estructuras humanas en aspectos como consistencia, lo que permite realizar ensayos de punción y acceso uretral.
<b>Sistemas de simulación en realidad virtual</b>	Estos estudios se orientan al desarrollo y/o diseño de representaciones virtuales de diferentes etapas del procedimiento de PCNL, permiten la interacción hombre-máquina con controles a través de los cuales se emulan los movimientos que el médico debe realizar en dicho procedimiento.
<b>Modelos electrónicos</b>	Estos estudios se refieren al diseño y/o desarrollo de dispositivos electrónicos o robóticos que además de emular tejidos, realizan censado de factores como fuerza, localización de instrumentos y liberación de fluidos. Los modelos resultantes permiten realizar ensayos completos (todos los pasos de PCNL), pero a diferencia de los simuladores no recrean todo el entorno ni cuentan con interfaces de visualización.

**Tabla 1: Categorías propuestas para agrupar los simuladores de PCNL identificados en la literatura.**

A continuación se presentan los estudios más destacados que presentan simulaciones de PCNL, a partir de la revisión de literatura indexada en Scopus.

### 3.3.1 Simuladores con modelos ex-vivo

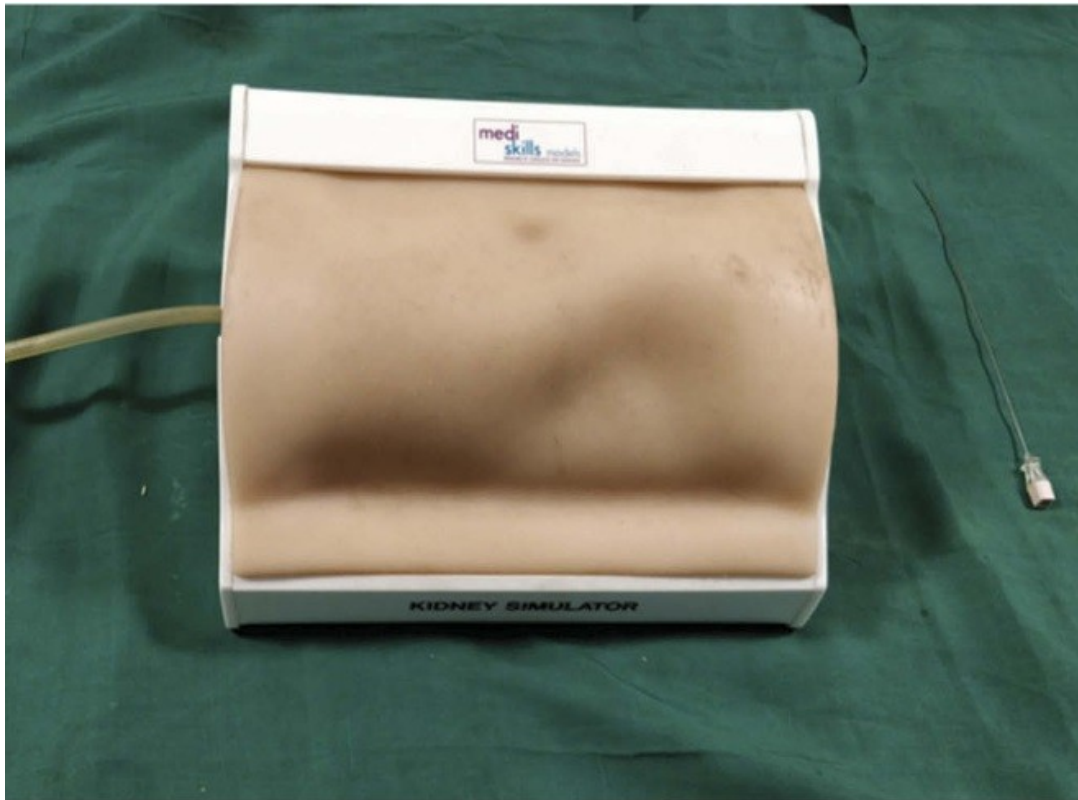
El trabajo Mishra et al. (2013) se basa en el uso de órganos reales de animales o de origen humano por su directa similitud con el riñón de un paciente a ser intervenido en una sala de cirugía. Los mencionados autores realizan un estudio sobre dos técnicas de práctica con tejidos animales: *in-vivo* y *ex-vivo*. La primera utiliza cerdos vivos

y sedados para la práctica de localización de un potencial cálculo, mientras que la segunda técnica utiliza riñones de porcinos y tejidos de gallinas.

Si bien ambas opciones de dicho trabajo presentan un grado de fidelidad cercana al procedimiento en humanos gracias a ventajas como el bajo costo de los órganos animales (para el caso ex-vivo), el uso de herramientas quirúrgicas reales y la retroalimentación física sobre tejidos reales, se presentan igualmente limitantes que se deben considerar como el delicado proceso de sedación de un animal vivo, el alistamiento previo de los órganos para el entrenamiento y la exposición a la radiación emitida por el fluoroscopio.

Respecto a los modelos ex-vivo, también se destaca el estudio de Sinha *et al.* (2015) en el cual se presenta una alternativa al uso de órganos animales vivos, tanto por razones éticas como de costo y disponibilidad. Bajo esta premisa, los autores utilizan una calabaza para recrear la pared abdominal y capas de algodón para representar los tejidos interiores en los que se vierte el líquido de contraste que hace posible ver el riñón en el fluoroscopio, en este estudio se hizo medición del tiempo de exposición al fluoroscopio, y precisión en los puntos de punción asignando un puntaje a los grupos de control participantes (expertos en PCNL y estudiantes) encontrando que los individuos con experiencia previa en PCNL tuvieron mejor desempeño que los estudiantes que tenían sus primeras poco o ninguna experiencia.

Por otro lado, se encuentra el trabajo de Vijayakumar *et al.* (2019). Estos autores aplican una técnica similar a la mencionada por Mishra al utilizar tejidos de gallina para emular la piel y grasa humanas envolviendo un riñón bovino. En este estudio se realizó un test con 20 residentes de urología con experiencia menor a 20 casos de cirugía siendo los aspectos evaluados: tiempo en realizar una punción, intentos de punción exitosos y tiempo de exposición en fluoroscopia. Los resultados se obtuvieron de la comparación con otro modelo de riñón no biológico, como se muestra a continuación.



**Figura 7: Modelo de simulador de un riñón artificial. Tomado de Vijayakumar *et. al.* (2019).**

Otro estudio destacado es el de Forbes et al. (2019) quienes compararon el desempeño de personal médico en entrenamiento, con dos modelos diferentes: riñones de cerdo (modelos ex-vivo) y modelo hecho con materiales sintéticos: espuma, guantes de hule y gel balística (silicona). Estos autores encontraron que ambos modelos representaron correctamente la sensación física de la aguja dentro del tejido, soportando alrededor de 200 punciones sin llegar a deformarse. Sin embargo, el riñón de silicona fue superior al riñón animal por costo y usabilidad. Este artículo destaca que la mayoría de los procedimientos de punción en estados unidos son realizados por radiólogos durante las cirugías PCNL, hecho que soporta la necesidad de lograr el desarrollo de estas habilidades en estudiantes y residentes que buscan especializarse en urología.

### 3.3.1 Simuladores de realidad virtual

En este tipo de simuladores, existe un predominio comercial en el desarrollo de simuladores RV para PCNL, donde los simuladores *Marion K181 PCNL* y *PercMentor* tienen la mayor presencia en el mercado de acuerdo con la literatura consultada. El simulador Marion K181 es un dispositivo integrado que cuenta con su propia computadora, monitor y lápices hápticos con la posibilidad de conectarse a un HMD de RV Oculus, como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 8: Simulador Marion K181. A la izquierda entorno virtual generada por el dispositivo. A la derecha, el dispositivo completo con sus periféricos . Tomado de <https://www.marionsurgical.com/simulators/>**

Según el fabricante este dispositivo puede simular las siguientes características:

- Predicción de acceso vía cáliz renal para PCNL.
- Determinación de ángulo, profundidad y punción para el acceso renal percutáneo guiado por fluoroscopia.
- Visualización de fluoroscópica.
- Manipulación de herramientas.
- Medición y puntuación basada en protocolos.

- Uso de herramientas de diferentes tamaños.

A partir del uso del simulador, Wu et al. (2020) propone un flujo de trabajo para generar tejidos blandos y modelos 3D a partir de imágenes computarizadas de sistemas venosos y de cuerpo completo utilizan el programa 3DSlicer para segmentar imágenes obtenidas de un TAC y generar los modelos 3D de órganos, piel y huesos, los modelos que se redujeron en cantidad de polígonos, y retopologizados en modelos *low poly* para ser utilizados en el simulador.

En relación con el simulador *PercMentor*, este fue propuesto por He, Z., Zhang, C., Zeng, (2016), y fue creado concretamente para desarrollar competencias en la punción del proceso de PCNL. Este simulador tiene una visualización de un escenario virtual y de imagen fluoroscópica. Además, cuenta con una pantalla propia, un tejido con retroalimentación física equivalente a la del riñón e instrumentos de punción.

### 3.4 Contribuciones del estado del arte

La revisión de la literatura indica que los modelos de simulación basados en órganos y tejidos biológicos destacan por su bajo costo y por el nivel de fidelidad con respecto a la realidad. Por esta razón, este tipo de modelos son una alternativa conveniente en instituciones que requieren llevar a cabo entrenamiento de personal médico, y que a la vez no pueda acceder a simuladores más complejo. No obstante, estos modelos de simulación requieren necesariamente de una intervención PCNL, ya sea de un fluoroscopio o un ecógrafo, lo cual implica mayores costos de inversión. Al respecto, Pelly et al. (2020), llevaron a cabo un estudio de revisión para identificar modelos de bajo costo (definido en el estudio como igual o inferior a 150 dólares). Estos autores encontraron que los ya nombrados modelos de Vijayakumar et al. (2019) y Sinha et al. (2015) son los de menor costo por unidad, a la vez que presentan facilidad de construcción y utilidad pedagógica.

Adicionalmente, a partir de la revisión del estado del arte también se encuentra que los simuladores que pertenecen a la categoría de realidad virtual presentan opciones de configuración para darle variabilidad a características que pueden presentarse en la vida real. Adicionalmente, proporcionan en algunos casos la posibilidad de visualizar con HMDs de última generación y sistemas CAVE. Los estudios más representativos

de esta categoría presentan simuladores comerciales -algunos con un costo elevado- y muy pocos se basan en creaciones desarrolladas en universidades o centros de investigación.

Por otro lado, en la mencionada categoría no se encuentran simuladores de código abierto y desarrollados igualmente con herramientas de código abierto. También están restringidos a hardware propio y a una locación física determinada (no son portables). No tienen potencial de ser expandibles, que se pueda agregar características y funcionalidades, por lo que si una institución requiriera aspectos adicionales, se dependería del fabricante para su desarrollo e implementación.

## I – DESARROLLO DEL SIMULADOR

En esta sección se describen los resultados del proceso de desarrollo del simulador, partiendo desde las fases de establecimiento de necesidades y requerimientos, hasta los resultados de la validación por parte de usuarios sobre los resultados obtenidos en materia del simulador NephroTrainer. Se presenta entonces el proceso de identificación de funcionalidades, el diseño del entorno virtual, la integración de dispositivos y las pruebas piloto.

### 1. Identificación de funcionalidades de visualización e integración

La identificación de funcionalidades se llevó a cabo mediante un proceso que integró la revisión de la literatura, buscando establecer los principales requerimientos, pero a la vez complementado con el criterio de los usuarios sobre indicadores de desempeño y principales necesidades que el simulador debe satisfacer para un óptimo proceso de entrenamiento del proceso de PCNL de personal médico en formación.

#### 1.1 Establecimiento de características

La revisión de artículos y estudios relacionados con el estado del arte en simulación de procedimientos PCNL, permitió precisar los tres pasos que caracterizan al procedimiento PCNL: 1) la punción, 2) la extracción de cálculo y 3) la sutura de la región de punción. Se evidenció que la mayoría de los estudios, ya sean acerca de simuladores basados en tejidos animales, impresión 3D o realidad virtual, se enfocan principalmente en la punción, hecho posteriormente comprobado por parte del personal médico del Hospital San Ignacio en la entrevista que se realizó y se presenta más abajo en esta misma sección.

La revisión del estado del arte permitió además identificar los países y regiones en donde mayor cantidad de estudios se realizan sobre PCNL, teniendo como mayores representantes países de Asia, seguidos de Europa, América y Oceanía. Como característica final se llegó a plantear una categorización de tipos de simuladores PCNL,



previamente descritos en la tabla 1. Finalmente, la revisión del estado del arte dio lugar a una mejor evaluación de los estudios relacionados, dando como resultado una identificación preliminar de las características necesarias que debían ser considerados en el sistema de simulación propuesto: la etapa más relevante del procedimiento (la punción) y los indicadores de mayor uso para medir la destreza adquirida por el personal en entrenamiento (duración del procedimiento).

Luego de realizado el estudio del estado del arte, con su respectiva identificación inicial de aspectos relevantes, se procedió a realizar una entrevista estructurada a potenciales usuarios. Este instrumento permitió complementar las características generales del sistema, y posibilitaron el establecimiento de los requerimientos funcionales del simulador. La entrevista fue creada en línea a través de *Forms* de *Office365*, siendo aplicada a personal médico de urología del Hospital San Ignacio (estudiante residente y docente). Las preguntas realizadas junto con su finalidad se aprecian en la siguiente tabla.

No	Pregunta	Aplicación y finalidad de la respuesta en el proyecto.
1	¿Cuántas PCNLs se realizan anualmente en Colombia?	Conocer la cantidad de procedimientos PCNL en Colombia para dimensionar la pertinencia del proyecto.
2	¿Cuántas PCNLs se realizan anualmente en el Hospital San Ignacio?	Conocer la cantidad e importancia de este procedimiento en el Hospital San Ignacio en contraste con las realizadas en Colombia.
3	¿Qué otra entidad además del Hospital San Ignacio realiza la mayor cantidad de PCNLs en el país?	Identificar el papel e importancia del Hospital San Ignacio a nivel país en comparación con otras entidades.
4	De los pasos principales durante la cirugía ¿cuál se considera el más relevante?	Confirmar si la fase de punción identificada en el estado del arte es la más relevante.
5	¿Por qué la respuesta dada en el punto anterior?	Obtener de la fuente directa los argumentos que sustentan la pregunta anterior.

No	Pregunta	Aplicación y finalidad de la respuesta en el proyecto.
6	De los pasos principales ¿cuáles generan mayores dificultades en el proceso de enseñanza-aprendizaje del personal médico?	Comprobar si el paso más importante es también el más difícil de ejecutar para considerar requerimientos complementarios.
7	¿Cuál es el tipo de visualización utilizada durante las PCNL realizadas en el hospital?	Identificar cuál de las posibilidades de visualización (fluoroscopia, ultrasonido)
8	¿Qué instrumentos y especificaciones se utilizan para realizar las PCNLs en el hospital San Ignacio?	Identificar la o las herramientas que pueden ser incluidas en el simulador de acuerdo con la respuesta de la pregunta No. 4.
9	¿Cuál es la posición principal en la que se realizan las PCNLs en el hospital San Ignacio?	Conocer cuál posición (prono, supina) se debe incluir en el simulador de PCNL.
10	¿Qué indicadores son los de mayor importancia para medir la experiencia durante una intervención PCNL?	Confirmar si los indicadores de desempeño de PCNL son los encontrados en el estado del arte, o existen otros.
11	Otro indicador ¿cuál?	Encontrar un indicador particular, diferente a los encontrados en el estado del arte.
12	¿Existen requerimientos adicionales?	Conocer necesidades específicas para el Hospital San Ignacio, en materia de la realización de PCNL.

**Tabla 2: Preguntas de entrevista y su respectiva aplicación en el proyecto.**

En la instancia de entrevista fueron primordiales las respuestas dadas por el docente y el residente que respondieron las entrevistas, pues de ellas se llegó a filtrar y definir el primer grupo de funcionalidades principales y complementarias. Al ser fuentes de primera mano y con experiencia en el procedimiento facilitaron la rápida solución de du-

das adicionales posteriores a la aplicación del instrumento. Las respuestas a las entrevistas se encuentran en el Anexo 1.

## 1.2 Características del simulador

A partir de las entrevistas se identificó que los requisitos principales del simulador deben ser la posibilidad de permitir la simulación de la fluoroscopia, así como simular la punción sobre el punto anatómico correcto, ayudando a entrenar y disminuir la cantidad de punciones y tiempo necesarios para realizar el procedimiento. Esto debe poder hacerse en un modelo que represente el entorno (sala de cirugía), con los estímulos visuales aproximados a un ejercicio real, y con un modelo anatómico en la posición estándar en la cual se lleva a cabo la PCNL.

Adicionalmente, se indagó sobre buscar dispositivos de interacción hombre máquina, que permitieran emular la sensación táctil y motriz de los instrumentos quirúrgicos, para sus usuarios. Particularmente, la aguja de punción dado que este es el implemento de mayor relevancia durante la ejecución de la punción. Con el fin de adoptar tales dispositivos de interacción, se consideró el uso de los controles *wii remote* y *razor hydra*, así como de guantes hápticos tales como *HaptX Gloves DK2*, *Dexmo Gloves* y *VRGlve*. No obstante, todos estos dispositivos tenían como limitante el hecho de que no hacen parte de los recursos con los que cuenta la Universidad (siendo un alto costo para su adquisición), así como la falta de compatibilidad directa con Unreal. Por esta razón, se seleccionaron periféricos estándar de fácil acceso y compatibles con un computador de escritorio.

Finalmente, se concluyó sobre las características definitivas que tendría el simulador, con base en las necesidades previamente identificadas. Estas son:

- Debe centrarse en la punción y localización de los cálculos.
- Debe simular la forma de visualización de la Fluoroscopia.
- Debe simular la posición de cúbito supino.
- Como indicadores de medición para los aprendices dentro del simulador se pueden incluir:
  - Tiempo de procedimiento/fluoroscopia.
  - Cantidad de punciones.

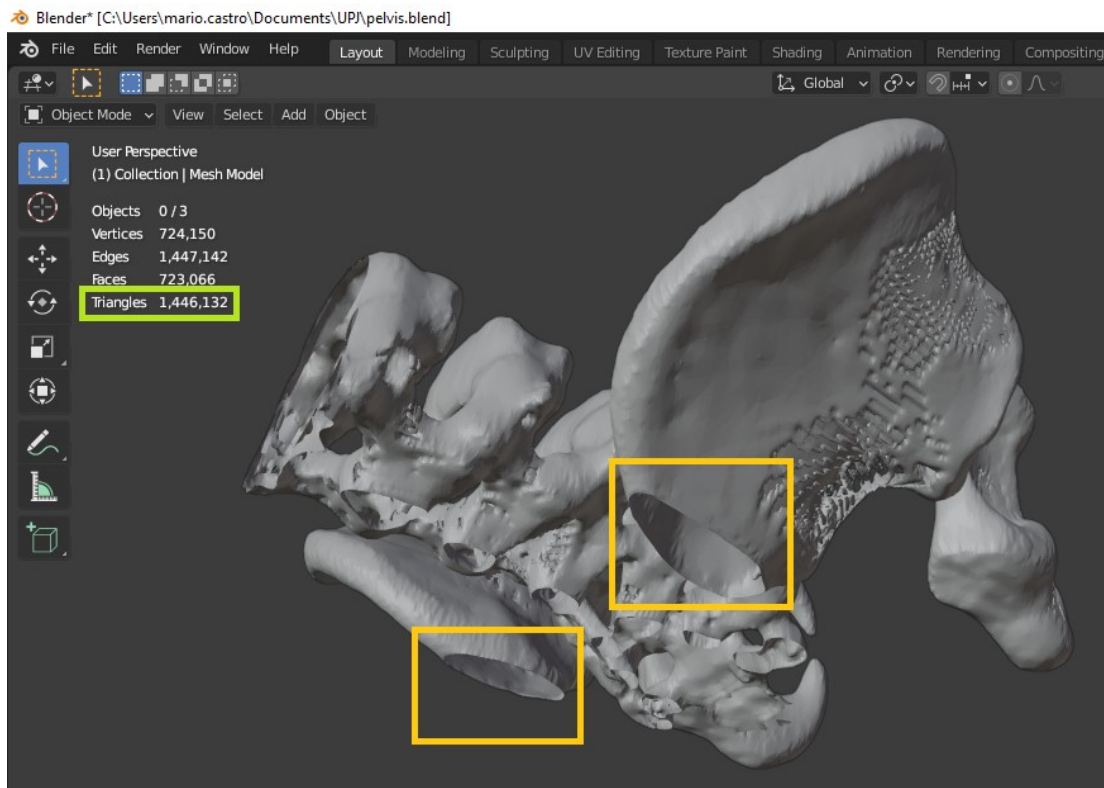
## **2. Diseño de entorno virtual que representa el escenario de PCNL**

En el diseño de entorno virtual se trabajó con diferentes modelos tridimensionales, se modelaron y refinaron los instrumentos de cirugía y extracción, y se crearon las funcionalidades del simulador.

### **2.1 Modelado, alistamiento y refinamiento de modelos tridimensionales**

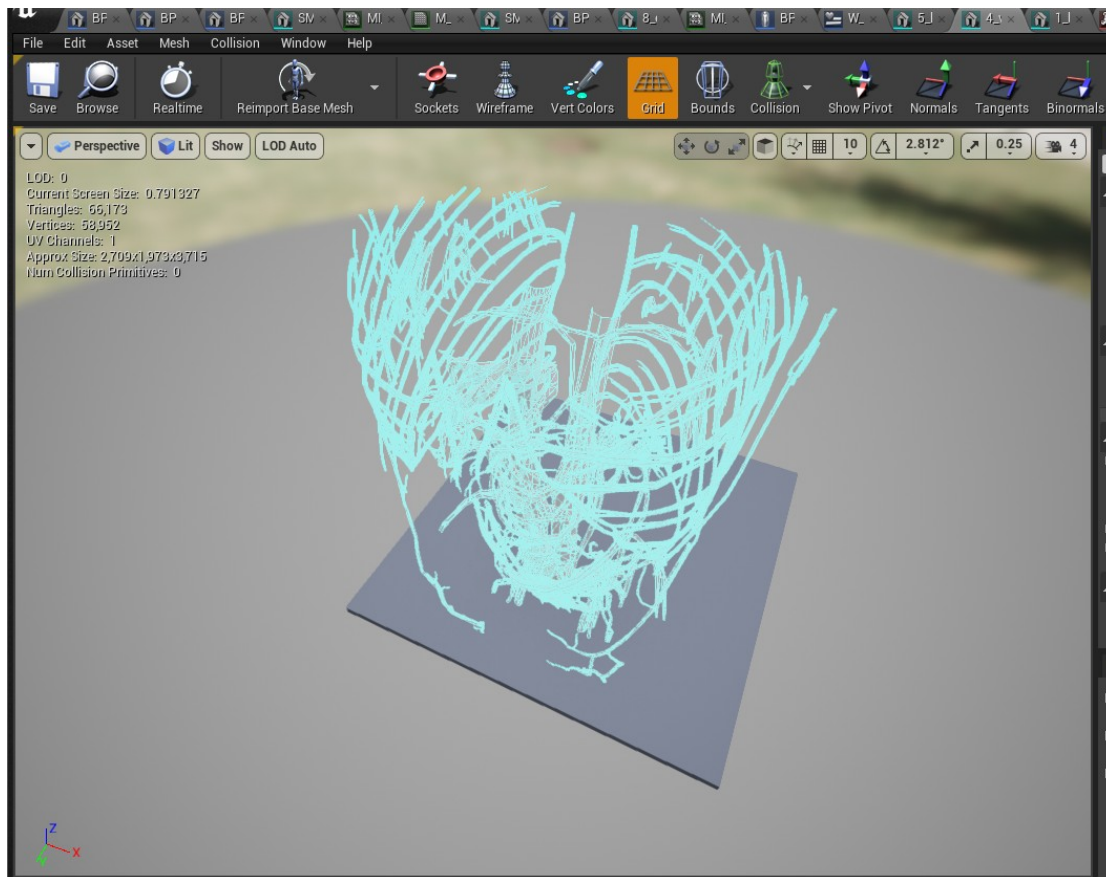
En esta fase se trabajó con modelos tridimensionales que representaban el sistema óseo de un paciente específico (cuya identidad no se identificaba en los modelos), ya que no se logró obtener modelos del sistema urinario. No obstante, esto no representó una limitación dado que el procedimiento para obtener ambos tipos de modelo (óseo y urinario) es el mismo: procesamiento de secuencias de imágenes resultantes del TAC, obteniendo un modelo tridimensional poligonal.

Se evidenció que el modelo óseo suministrado se podía importar a Unreal, pero presentaba el problema de que las mallas generadas tenían una alta densidad poligonal (del orden de millones), y además tenían una geometría incompleta.



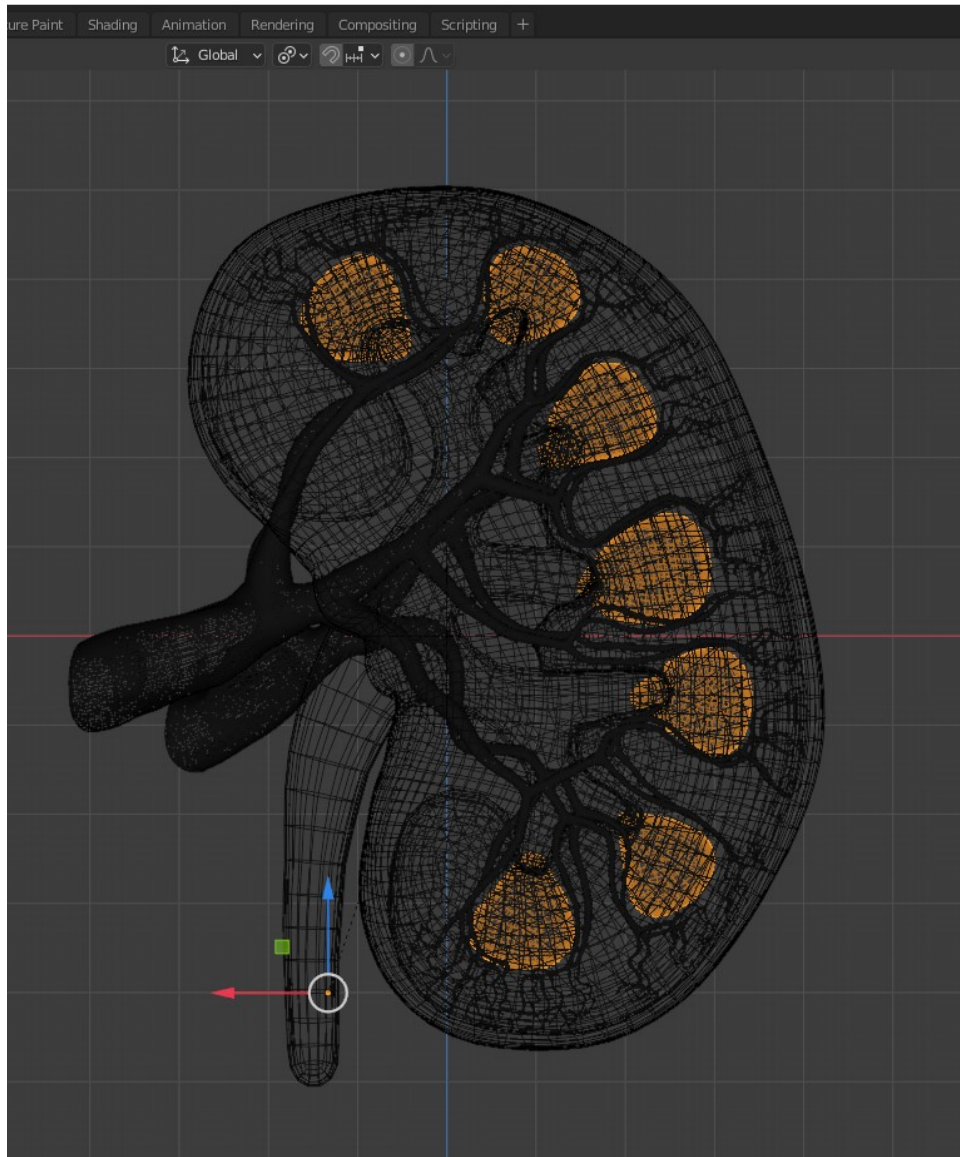
**Figura 9:** Malla obtenida de TAC con muchos polígonos y agujeros. Se encuentra en recuadro verde la cantidad de polígonos, y señalado en amarillo los agujeros del modelo.

El problema de la densidad poligonal podía solucionarse manualmente haciendo uso de Blender a través de una utilidad propia de este programa, conocida como *decimation*. Pero la geometría incompleta representaba un inconveniente mayor puesto que a nivel algorítmico implica una implementación compleja, que supera el alcance de este proyecto, como lo muestra la siguiente figura. Y una geometría sin problemas es necesaria para la física y detección de colisiones que requiere el simulador.



**Figura 10: Ejemplo de un modelo utilizado en el simulador con geometría adecuada para colisiones físicas.**

Dado que los modelos no fueron adecuados para su uso en el motor, se procedió a buscar modelos tridimensionales gratuitos que cumplieran con los requerimientos para la simulación. Se encontraron modelos en *sketchfab.com* y se importaron en el motor, como se ilustra en la siguiente figura.



**Figura 11: Modelo gratuito detallado del riñón.**

El entorno virtual que representa la sala de cirugía (camilla, fluoroscopio, monitores, entre otros) fue creado prácticamente en su totalidad y se logró a partir de modelos propios utilizando la herramienta Blender y de la misma forma de objetos de librerías gratuitas obtenidas de la tienda de recursos de Unreal Engine: <https://www.unrealengine.com/marketplace/en-US/store>.





**Figura 12: Entorno tridimensional creado para el simulador.**

En cuanto a la aguja, se partió de un modelo 3D gratuito, cilíndrico propio del motor Unreal y se realizaron modificaciones para obtener la geometría de la aguja, siendo este en su estado finalizado como lo ilustra la siguiente figura.



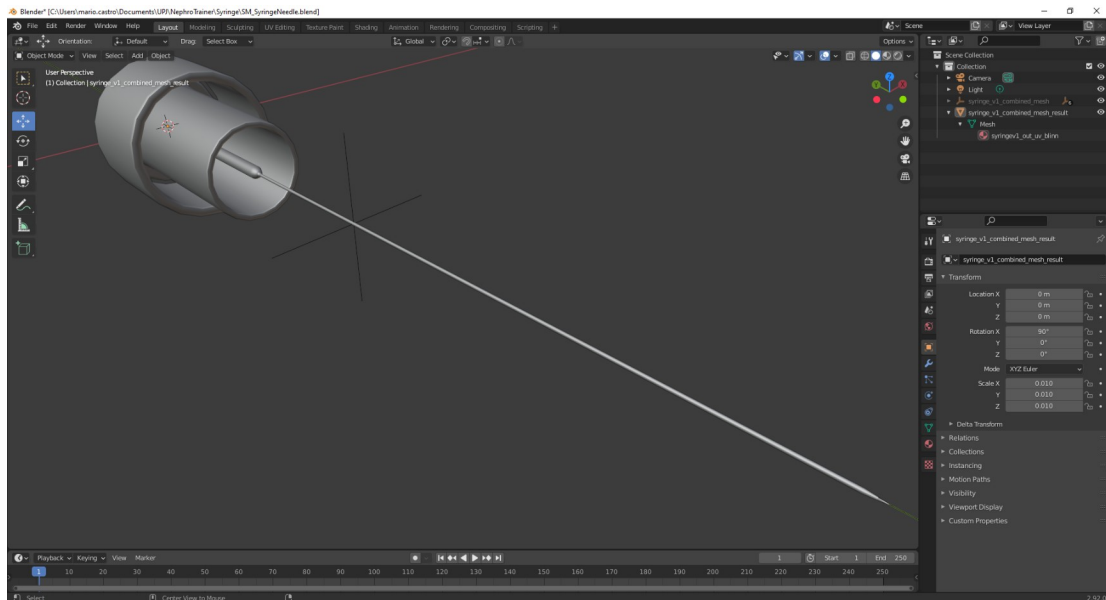
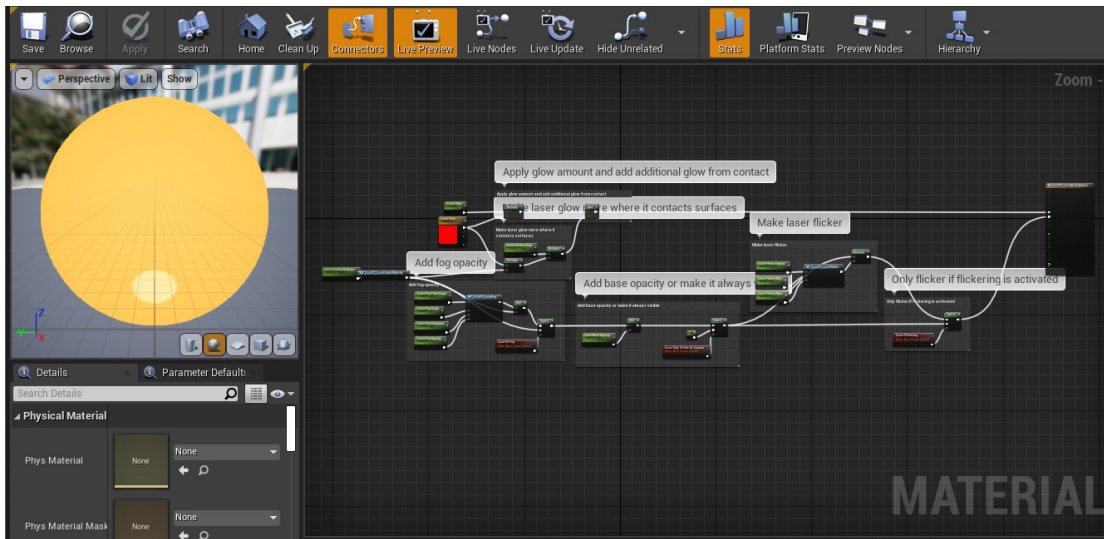


Figura 13: Aguja de punción modificada a partir de otro modelo.

El refinamiento de las mallas, concretamente de las de altos polígonos obtenidas de los TACs, se realizó directamente en el programa Blender. Luego de considerar programas comerciales como *Decimation Master* se consultó a fondo la documentación de Blender 2.91 y se evidenció que dicho software ya contaba con una herramienta (conocida como *modificador*) para este fin, llamada *decimation* que en cada ejecución puede reducir a la mitad la cantidad de triángulos del objeto original. Así, un modelo de millones de polígonos que es generado desde un TAC, puede reducirse a varias decenas de miles de polígonos que pueden ser soportados y cargados por el motor.

Las texturas y materiales para algunos objetos fueron creadas en Unreal Engine desde el editor de materiales propio del motor. Los modelos provenientes de las librerías de objetos ya poseían texturas y materiales propios de modo que solo fue necesario hacer variación de parámetros y valores.



**Figura 14: Material creado y configurado para simular efecto de fluoroscopio en el riñón.**

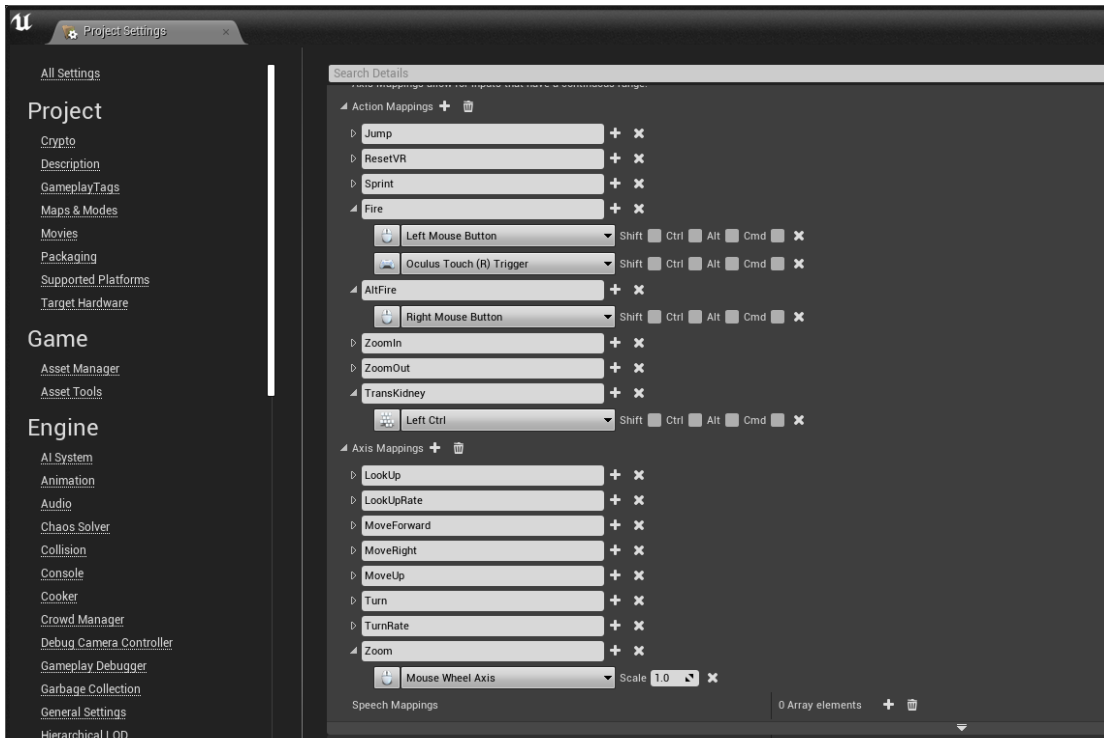
### 3. Integración de dispositivos y diseño de funcionalidades

En esta fase se seleccionaron e integraron los dispositivos de entrada con los cuales el usuario interactúa con el escenario tridimensional e igualmente se definieron los comandos con los cuales el usuario puede moverse y utilizar la aguja de punción para continuar con la implementación de las funcionalidades previamente establecidas, siguiendo una metodología de desarrollo de software.

#### 3.1 Selección de dispositivos de interacción

Con base en lo mencionado en la fase descrita en el numeral 6.2 se decidió utilizar dispositivos estándar como PC de escritorio, mouse/teclado y el más interesante de ellos, el teléfono celular con sus propiedades de acelerómetro y giroscopio que puede ser utilizado por cualquier usuario sin necesidad de dispositivos costosos, complejos de integrar. Sobre este último dispositivo se intentó realizar la implementación de una aplicación para Android que permitiera utilizar un teléfono móvil como control que permitiera emular la aguja de punción, haciendo uso de la función de giroscopio y acelerómetro del teléfono, como se puede visualizar en la siguiente figura. Sin embargo, esta aproximación no se logró debido a dificultades de comunicación entre el teléfono móvil y el computador donde se instaló el simulador.

El mouse y el teclado son reconocidos por el motor Unreal, por lo cual no se hizo necesario crear interfaces de comunicación entre tales dispositivos y el motor. Además, Unreal tiene la capacidad de asignar comandos de teclado y mouse directamente a lo que se conoce como *eventos de entrada*, esto es, asignar una tecla de forma personalizada a una acción particular a realizar por el usuario.



**Figura 15: Ventana de configuración de eventos de entrada de Unreal Engine.**

Por ejemplo, para este simulador se definió que para mover la aguja de punción hacia adelante y hacia atrás sobre el modelo anatómico, debía mantenerse presionado el botón izquierdo del mouse.

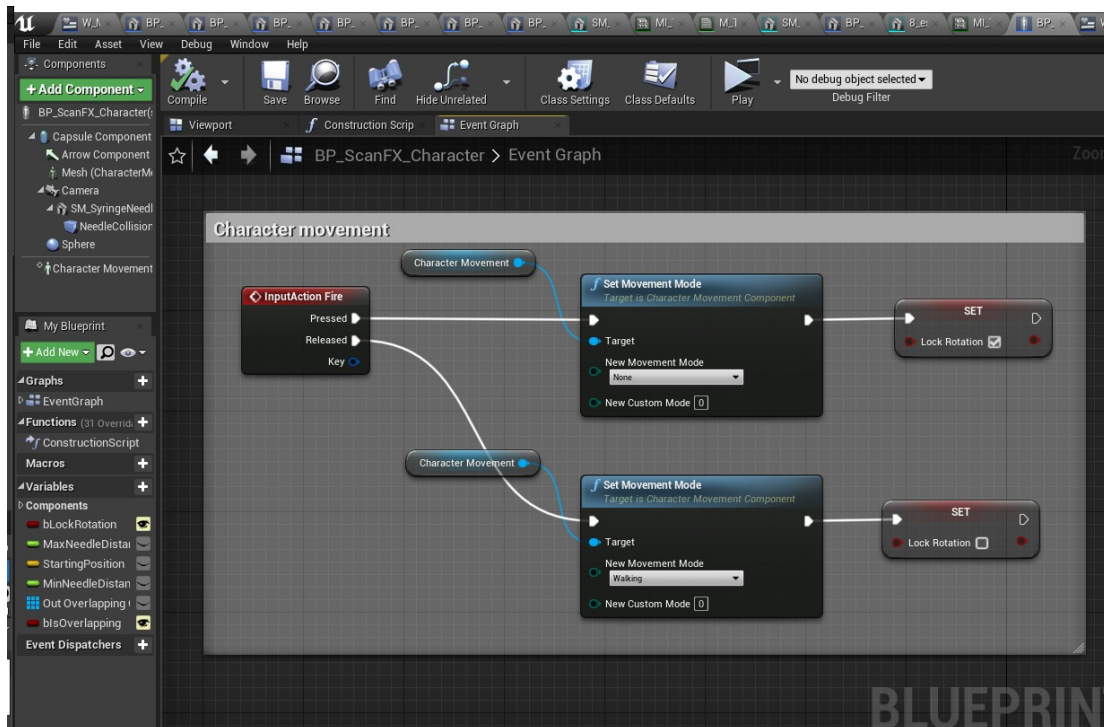


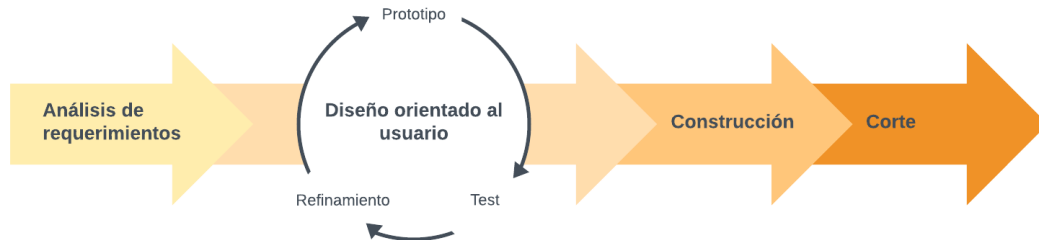
Figura 16: Ejemplo de generación de movimiento de la aguja a partir de un evento de entrada configurado en Unreal.

### 3.2 Implementación

A partir de las características y necesidades establecidas previamente, se generaron los requerimientos funcionales del simulador, así como la metodología de desarrollo de software adecuada y pertinente para ser aplicada en este proyecto. Se consideraron metodologías ágiles de desarrollo, en las que los usuarios tuvieran activa participación, logrando una rápida verificación del cumplimiento de los requerimientos, por lo que las metodologías candidatas fueron Scrum, XP, RAD y Kanvan.

Como resultado, el proyecto se llevó a cabo mediante un modelo de desarrollo híbrido basado en la metodología de desarrollo rápido de aplicaciones (RAD por sus siglas en inglés) y *Kanban*, la primera se basa en la creación de prototipos incrementales que iterativamente se refinan hasta llegar a una versión funcional en ciclos cortos de desarrollo la segunda metodología define un conjunto de estados en las que las tareas que

corresponden a un conjunto de requerimientos o *Backlog*, que van avanzando desde un estado iniciado a un estado finalizado. La siguiente figura ilustra esta metodología.



**Figura 17: Metodología RAD. Elaboración propia con base en Martin (1991).**

La metodología RAD fue desarrollada por Martin (1991) en IBM y puede verse como una precursora de las metodologías ágiles, aunque a diferencia de estas, su prioridad es la calidad del software ajustando la cantidad y prioridad de los requerimientos para ajustarse a un umbral de tiempo en lugar del cumplimiento de todos los requerimientos de software para entrega en plazos determinados o la extensión de las fechas de entrega (Beynon-Davies, Carne, Mackay, Tudhope, 1999). Debido a su principal característica, la entrega periódica de prototipos, RAD es recomendable para equipos pequeños en proyectos de corto y mediano plazo con una escala media de complejidad (Kissflow, 2021).

RAD se compone por cuatro etapas:

1. **Análisis de requerimientos:** esta etapa también llamada *planeación de requerimientos* reúne a usuarios y desarrolladores definen y acuerdan los requerimientos principales de la aplicación.
2. **Diseño orientado al usuario:** esta fase incluye a desarrolladores y usuarios, quienes trabajan juntos para desarrollar prototipos que puedan ser probados y ajustados para cumplir con el alcance de los requerimientos es la etapa reina y que caracteriza esta metodología.
3. **Construcción rápida:** ya que al desarrollar prototipos en la etapa previa se tienen componentes depurados y funcionales, en esta etapa se realiza el ensamble de estos. En esta fase el usuario posee intervención y puede dar recomendaciones y solicitudes de cambios en casos de bugs que se puedan presentar.

4. **Corte o finalización:** esta etapa se realiza la finalización del producto de software generando la versión de producción, y la capacitación de usuarios.

La segunda etapa es la que caracteriza a RAD y en donde se centra su fortaleza, la generación de prototipos. Manteniendo y robusteciendo esta fase, es posible adaptar la metodología para el desarrollo de aplicaciones con características particulares, como lo es el objetivo principal de este trabajo. Si bien la metodología RAD requiere presencia constante del usuario final durante las cuatro etapas de desarrollo, la naturaleza iterativa de esta metodología se puede aprovecharse para la creación de versiones funcionales del software sin demandar una presencia estricta del usuario durante las iteraciones de la segunda etapa, a diferencia de metodologías como *Scrum*. Un ejemplo de la aplicación de la metodología RAD al desarrollo de programas de simulación y visualización médica es presentado por Chandra et al. (2018), quienes desarrollan una versión modificada de la metodología para crear de una aplicación de análisis de imágenes tomográficas.

Durante el desarrollo del proyecto se realizaron varias iteraciones en las que se contó con la presencia de la residente y el médico docente, quienes mediante su experiencia en el procedimiento PCNL, permitieron depurar y refinar el simulador desde la evaluación del contenido gráfico hasta llegar al prototipo evaluado.

El proceso de implementación llevado a cabo en las iteraciones se gestionó mediante tableros Kanban de tres estados: en desarrollo, en revisión, terminado, a partir de lo que en metodologías ágiles se conoce como épica, la cual es un enunciado concreto que en palabras del usuario menciona lo que debe hacer el programa o sistemas que lo componen. Igualmente, se establecieron las historias de usuario, que representan los requerimientos principales del sistema y en este caso se corresponden con las funcionalidades antes descritas. En la tabla siguiente se muestran la épica y las historias de usuario:

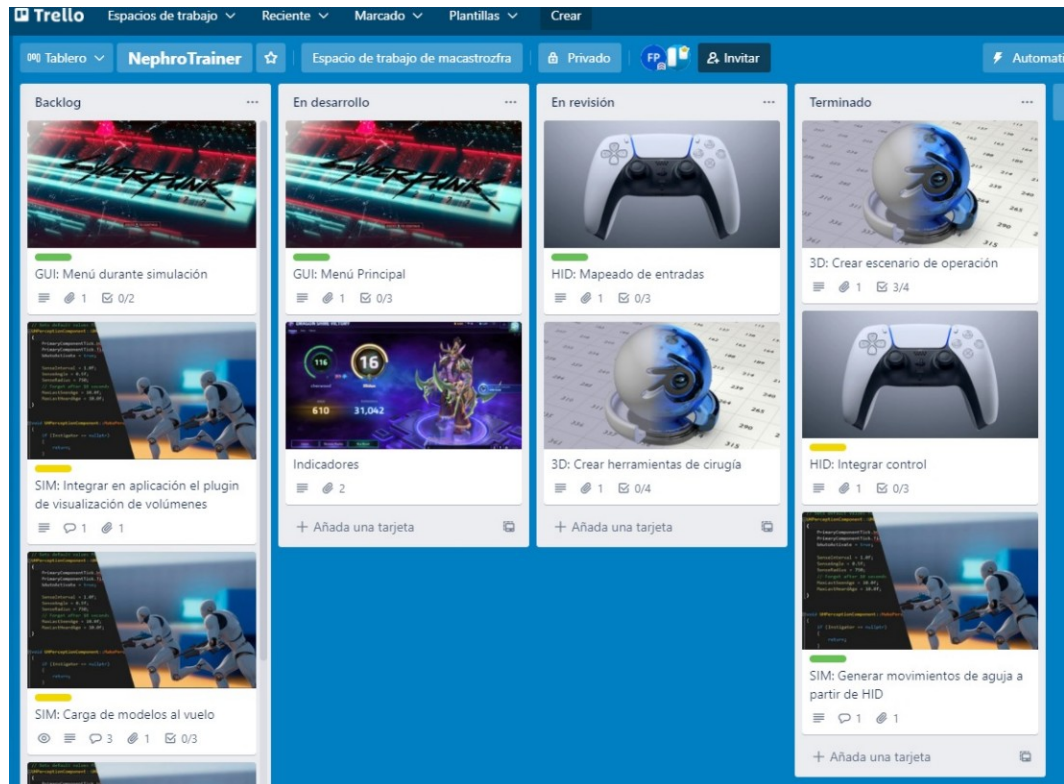
Épica	Historias de usuario
Como Urólogo deseo realizar el procedimiento de punción renal.	Como urólogo debo posicionar al paciente en posición decúbito supino.
	Debo realizar la inserción de una aguja de punción mediante un movimiento cuidadoso.
	Como urólogo requiero visualizarla posición de la aguja me-

	diante el fluoroscopio.
	Necesito visualizar los indicadores que me permitan evidenciar el resultado del entrenamiento.

**Tabla 3: Épica e historias de usuario.**

De las historias de usuario surgieron las actividades que se plasmaron en el tablero Kanban, el cual fue representado en la herramienta en línea [www.trello.com](http://www.trello.com) con la posibilidad de hacer personalización indicadores visuales que permitieron hacer una clasificación de las tareas, como se presenta en la siguiente figura. Las categorías definidas fueron las siguientes:

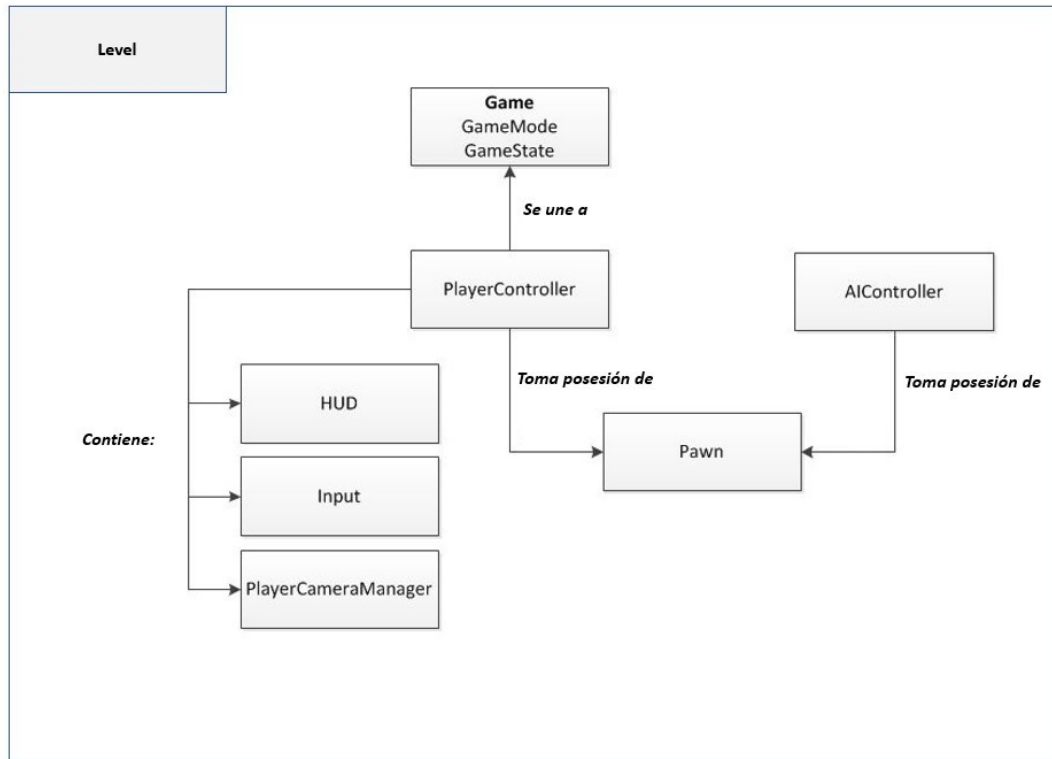
- **GUI:** elementos de interfaz gráfica.
- **SIM:** tareas de simulación.
- **HID:** integración y configuración de dispositivos de entrada.
- **3D:** modelado y objetos de escenario.
- **Indicadores:** obtención de los indicadores de medición del simulador.



**Figura 18: Tablero Kanban creado en [www.trello.com](http://www.trello.com) con actividades ordenadas por categoría.**

En lo que corresponde a la arquitectura y diseño de software, Unreal Engine 4 define por defecto una arquitectura específica orientada al desarrollo de videojuegos y a la cual se deben adaptar las aplicaciones y simulaciones que se creen con este motor. En la siguiente figura se presenta la arquitectura base que debe tener un programa creado en el motor de videojuegos Unreal Engine 4.





**Figura 19: Arquitectura base de una aplicación creada en Unreal Engine 4.**

En Unreal Engine debe existir un *nivel* o mapa en el cual se compone *actores* que se relacionan directamente con cada elemento de la arquitectura, estos actores se pueden considerar como entidades cuyas características se pueden modificar o expandir. Lo anterior se logra a partir de objetos más especializados conocidos como *componentes*, es así como los actores modifican sus características al hacer uso de los componentes, esto es lo que se conoce como el patrón de diseño *Entity Component System*. Los actores y los componentes son clases con métodos y atributos.

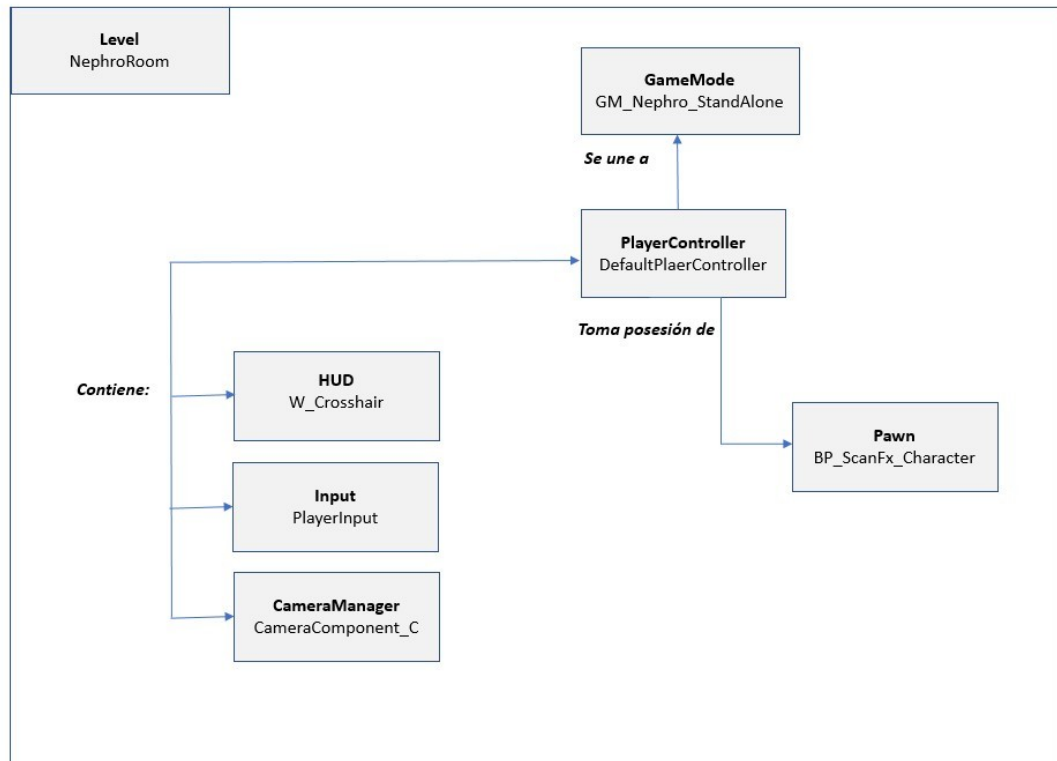
En lo concerniente a los niveles, en cada uno de ellos debe existir una entidad llamada *GameMode* en la cual se especifican las reglas del juego mediante un conjunto de actores responsables de funciones concretas. A un *GameMode* se vincula un *PlayerController* que es el puente de conexión entre el usuario y otro actor y la representación visible del usuario durante la simulación llamada *Pawn*. Un *PlayerController*

puede tomar control o posesión de uno o varios Pawns, por ejemplo, como se hace con los personajes en un videojuego de estrategia. Un Pawn puede también ser controlado por la inteligencia artificial.

Un *PlayerController* contiene una interfaz de usuario HUD, un gestor de dispositivos y comandos de entrada identificado como *Input*, y finalmente contiene un *PlayerCameraManager* que se encarga de manejar las cámaras que son utilizadas en la simulación. A estos elementos que conforman la arquitectura se les conoce como *Gameplay Framework*.

A partir de lo anterior, a cada elemento de la arquitectura se le debe asociar una clase que embebe la funcionalidad requerida para los actores. Para este simulador, dichas clases fueron desarrolladas combinando C++ y *Blueprints* -el método de programación visual de Unreal Engine basado en flujogramas-. Al actor *GameMode* se le asignó la clase *GM\_NephroTrainer* que controla las reglas que se utilizan en un juego de disparos en primera persona y la visualización en un monitor estándar.

A *PlayerController* se le asignó la clase *DefaultPlayerController* para recibir notificación de eventos que durante la simulación puedan afectar al jugador y a al Pawn que él controla. Al elemento Pawn se le asignó la clase *BP\_ScanFx\_Character*, cuya labor es la de representar los movimientos en vista de primera persona y mostrar el modelo 3D de la aguja de punción. Para la interfaz gráfica o HUD que muestra los indicadores definidos para este simulador, se creó la clase llamada *W\_Crosshair*. Los comandos de entrada de mouse y teclado fueron procesados por la clase *PlayerInput* y finalmente, al elemento *CameraManager* se le asoció la clase *CameraComponent\_C* para controlar la cámara en primera persona que por la cual el usuario puede ver el mundo virtual. La arquitectura resultante para *NephroTrainer* es la siguiente:



**Figura 20: Arquitectura del simulador a partir de la arquitectura base definida en Unreal Engine. En cada cuadro es específica el nombre de la clase asociada.**

## 4. Prueba piloto

Luego de finalizado el desarrollo del simulador, se procedió a evaluar su apreciación y desempeño frente a usuarios reales, a manera de prueba piloto, que permitiera conocer el cumplimiento de requerimientos, la apreciación frente al entorno modelado, y las ventajas frente a otros instrumentos afines.

### 4.1 Diseño y preparación de la prueba piloto

El diseño y preparación de la prueba tuvo como propósito identificar los aspectos centrales que debían cuestionarse a los potenciales usuarios, para conocer su percepción sobre la funcionalidad y capacidad de representación del modelo de la realidad de un procedimiento de PCNL. Además, se buscó que evaluaran la capacidad del si-

mulador de evaluar los indicadores fundamentales, identificados previamente, que permiten dar cuenta del nivel de desempeño del personal médico en entrenamiento sobre su ejecución del PCNL.

En ese orden de ideas, se construyó un instrumento que se presenta a continuación.

		¿Considera que el simulador desarrollado responde al propósito establecido?	¿Considera que el entorno tridimensional creado representa adecuadamente el entorno real en el cual se realiza el procedimiento?	¿Considera que la forma de interacción con los dispositivos es coherente con movimientos naturales?	¿Considera que Nephro-Trainer representa alguna ventaja en relación con simuladores semejantes?
Participante 1	1				
	2				
	3				
	Comentarios				
Participante 2	1				
	2				
	3				
	Comentarios				
	2				
	3				
	Comentarios				

Convenciones	
1	En alto grado
2	Parcialmente
3	En bajo grado
4	Argumente su elección

**Tabla 4: Instrumento diseñado para la prueba piloto.**

El instrumento de evaluación consta de cuatro preguntas cerradas, cada una de las cuales se responde en una escala de 1 a 3, siendo 1 en alto grado, 2 parcialmente y 3 en bajo grado. Adicionalmente, por cada una de estas cuatro preguntas cerradas, se dio un espacio de comentarios, si los hubiere.

La primera pregunta es: *¿Considera que el simulador desarrollado responde al propósito establecido?* Con ella se busca evaluar si el resultado evidenciado en el simulador recoge la motivación de los usuarios, de facilitar el entrenamiento del procedimiento de PCNL, estableciendo además indicadores de desempeño que permitan tanto la supervisión docente como la retroalimentación para el estudiante.

La segunda pregunta es *¿Considera que el entorno tridimensional creado representa adecuadamente el entorno real en el cual se realiza el procedimiento?* Esta, permite evaluar si el entorno recreado es coherente con el entorno del procedimiento, tales como los implementos de cirugía, el modelo anatómico, el monito de fluoroscopia, entre otros.

La tercera pregunta es *¿Considera que la forma de interacción con los dispositivos es coherente con movimientos naturales?* Con ella se busca evaluar si la forma de manipular los dispositivos de entrada -mouse y teclado- permiten realizar un movimiento semejante al que se realiza en la vida real cuando se lleva a cabo el PCNL.

La cuarta pregunta es *¿Considera que NephroTrainer representa alguna ventaja en relación con simuladores semejantes?* Con ella se busca evaluar si este simulador exhibe características más favorables desde el punto de vista técnico, de enseñanza-aprendizaje u otro, en contraste con otros simuladores que pudiera utilizar el Hospital San Ignacio en el entrenamiento de PCNL y/o presentes en la literatura.

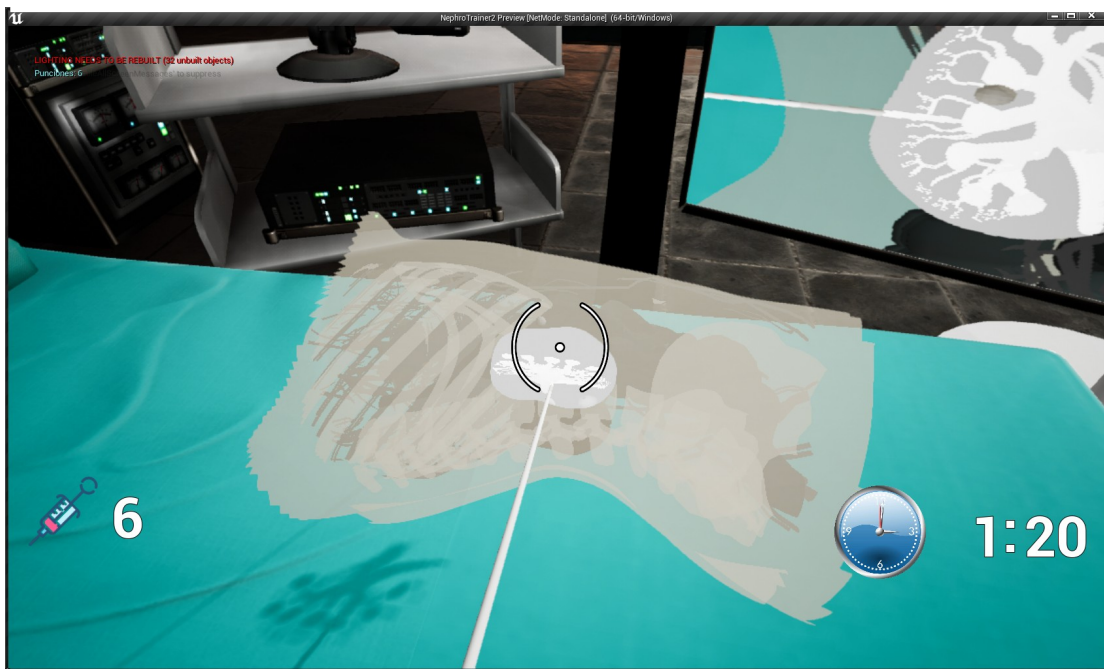
Este instrumento se aplicó a dos de tres participantes, siendo estos dos primeros, los usuarios potenciales: un médico especializado en urología y docente del Hospital San Ignacio, y una médico residente de urología, del mismo centro. Estos dos participantes realizaron su valoración desde la perspectiva del conocimiento técnico, y del proceso de enseñanza-aprendizaje del procedimiento de PCNL, por lo que pueden valorar la precisión del simulador en recrear un entorno real y un modelo anatómico preciso. También valoran la conveniencia del simulador para medir los indicadores de desempeño establecidos, y la manera en que dicho simulador podrá hacer el proceso enseñanza-aprendizaje más eficiente para docentes y estudiantes.

Por otro lado, el tercer participante fue el profesor Leonardo Flórez, director de este trabajo, cuya perspectiva de evaluación si bien no fue técnica desde el punto de vista

médico, si lo fue desde el punto ingenieril e investigativo. En este caso se valoró el uso de herramientas de hardware y software, así como la capacidad de aplicar el conocimiento relacionado con la línea de énfasis, a un caso real y con impacto social.

## 4.2 Aplicación y resultados de la prueba piloto

Para la aplicación del instrumento de evaluación mencionado se generó un espacio de reunión en el cual se socializó a los participantes de la prueba piloto el prototipo de NephroTrainer, en funcionamiento. Se describieron los elementos de interfaz gráfica, su relación con lo acontecido en el escenario virtual y se mostraron las funcionalidades implementadas.



**Figura 21: Imagen del simulador NephroTrainer, en ejecución durante la prueba piloto, mostrando en pantalla los indicadores propuestos para evaluar la ejecución de PCNL.**

A continuación se presentan las valoraciones realizadas por cada uno de los participantes al instrumento previamente descrito.

		¿Considera que el simulador desarrollado responde al propósito establecido?	¿Considera que el entorno tridimensional creado representa adecuadamente el entorno real en el cual se realiza el procedimiento?	¿Considera que la forma de interacción con los dispositivos es coherente con movimientos naturales?	¿Considera que Nephro-Trainer representa alguna ventaja en relación con simuladores semejantes?
Participante 1 (Médico docente)	1	X	X	X	
	2				X
	3				
	Comentarios	-	.	-	“Es un trabajo que cumple bien con la necesidad y su oportunidad de mejora se da con la integración de un modelo físico.”
Participante 2 (Residente)	1	X	X	X	
	2				X
	3				
	Comentarios	-	-	-	“Opino que puede ser aún mejor al integrarlo con un modelo físico y la cueva.”
	2				
	3				
	Comentarios				

**Convenciones**

- 1 En alto grado
- 2 Parcialmente
- 3 En bajo grado
- 4 Argumente su elección

**Tabla 5: Resultados de la aplicación del instrumento para la evaluación piloto, a los tres participantes establecidos.**

Sobre la primera pregunta, la apreciación de los participantes fue que el simulador responde a lo que se esperaba, cumpliendo con las expectativas y considerando las restricciones por razones de salud pública de los últimos meses. Sobre la segunda pregunta, se encuentra que el entorno virtual permite al usuario visualizar o experimentar de forma muy próxima la sensación de una sala de cirugía. En relación con la tercera pregunta, se observa que los movimientos que permite hacer el mouse son suficientemente intuitivos y con los grados de libertad necesarios para realizar el movimiento que se lleva a cabo durante la punción. Por último, la cuarta pregunta arroja observaciones y comentarios sobre cómo podría mejorarse el simulador, para dar ventaja sobre otros productos similares.

En suma, los resultados obtenidos señalan que los participantes tuvieron una percepción favorable sobre el simulador, el modelo representado y sus funcionalidades. Se destacan apreciaciones sobre oportunidades de mejora, que son consistentes con el hecho de que se presentó un prototipo funcional.



## II - CONCLUSIONES

Este trabajo planteó por objetivo general el diseño de un sistema de simulación virtual del procedimiento de PCNL, orientado especialmente al entrenamiento de personal médico, y cuya motivación provino de necesidades específicas propias del Hospital San Ignacio.

Para dar cumplimiento a este objetivo general, el primer objetivo específico propuesto fue el de identificar las funcionalidades fundamentales que debería tener este simulador. Al respecto, se realizó una revisión de la literatura, que junto con entrevistas a potenciales usuarios, permitió establecer que el simulador debía centrarse en la punción, la visualización del fluoroscopio, manteniendo una misma posición anatómica, y que incluyera dos indicadores de desempeño: el tiempo demorado en el procedimiento y la cantidad de punciones. Los resultados obtenidos de la prueba piloto indican que las funcionalidades fueron identificadas de forma precisa, suficiente y necesaria para el entrenamiento a personal médico.

El segundo objetivo específico fue diseñar el entorno virtual que represente de forma adecuada el escenario real en el cual se llevaría a cabo el procedimiento de PCNL, es decir, la sala de cirugía, implementos, modelo anatómico, entre otros. En este sentido, se logró recrear de manera muy próxima el entorno, haciendo uso de las prestaciones del motor Unreal Engine y herramientas de generación de contenido digital, que para el caso fue particularmente Blender. Los resultados de la prueba piloto también indican que la representación lograda fue bastante fiel al entorno real, que los movimientos necesarios para el PCNL son consistentes con los que serían los movimientos reales que realizaría el cirujano en la punción.

El tercer objetivo de este trabajo fue integrar los dispositivos de interacción su uso en el entorno virtual diseñado. En este aspecto, se logró la implementación propiamente dicha, mediante la aplicación de metodologías de desarrollo de software adecuadas y pertinentes para este tipo de proyecto, de acuerdo con el alcance y el tiempo disponible, que en todo proyecto es un recurso limitado. Así como en la consecución de los objetivos específicos anteriores, en la prueba piloto se evidenció que la integración fue efectiva, permitiendo que el usuario perciba la similitud de movimientos en el simulador, en comparación con la vida real, de forma intuitiva.

Finalmente, el cuarto objetivo buscó ejecutar una prueba piloto para conocer la aceptación de potenciales usuarios en cuanto a la versión del simulador. En este sentido,

se diseñó y aplicó un instrumento para conocer tal aceptación y percepción de tres participantes, dos de los cuales fungieron como usuarios y un tercero como experto en computación gráfica y simulación. Como se mencionó previamente, los resultados de esta prueba fueron favorables, indicando así un cumplimiento del propósito en el diseño del simulador.

Con base en lo anterior, se puede concluir que se cumplió el objetivo general de este proyecto. También se logró dar cumplimiento a los aspectos que motivaron la propuesta de este proyecto de investigación y desarrollo, y, a la luz del estado del arte, se encuentra que NephroTrainer ofrece algunas ventajas. En primer lugar, está desarrollado con una herramienta de código abierto, que se puede extender a funcionalidades diferentes. Adicionalmente, puede adaptarse a otro tipo de hardware, tanto en interfaz de interacción como de visualización. Una tercera ventaja sobre otros productos existentes en la literatura es que gracias a ser desarrollado con Unreal, el grado de fidelidad visual es mucho mayor.

Sin embargo, se identifican algunas limitaciones del proyecto que justifican la propuesta de futuras líneas de investigación derivados de este trabajo. A continuación se presenta el impacto potencial y aporte del proyecto, así como las perspectivas futuras identificadas.

## 1. Impacto potencial y aporte del proyecto

Desde una perspectiva tecnológica, el impacto de este proyecto se refiere a la aplicación de la realidad virtual para el diseño de simuladores, un área de trabajo muy fructífera como se evidenció en la revisión de la literatura y que en este trabajo se pone en práctica para resolver necesidades concretas evidenciadas en el Hospital San Ignacio. En materia tecnológica, NephroTrainer presenta algunas ventajas en contraste con otros productos similares descritos en la sección *Simuladores de PCNL*. En primer lugar, puede ser utilizado en computadores de escritorio facilitando el acceso y uso.

Adicionalmente, el simulador tiene el potencial de adaptarse a diferentes entornos y plataformas de simulación inmersiva, lo cual representa una ventaja al tener diferentes modos de uso, tanto en interfaces de visualización como en interfaces de interacción hombre-máquina correspondientes a realidad virtual inmersiva y no inmersiva. Otra ventaja importante de este simulador surge de la necesidad de los usuarios y el ámbito concreto de aplicación, que es el Hospital San Ignacio. Y es que NephroTrai-

ner responde a lo que para los usuarios de este centro corresponde a los indicadores de desempeño más importante: tiempo total y número de punciones.

La tercera ventaja NephroTrainer *vs* otros simuladores es que dada la tecnología con que fue desarrollado se puede extender a nuevas funcionalidades que surjan de otros requerimientos específicos. A nivel gráfico esto implica que se puede lograr mayor realismo visual y mayor detalle en el entorno. En términos de funcionalidades, pueden agregarse otras fases del procedimiento, otros indicadores de desempeño y otras variables anatómicas y/o fisiológicas.

Por otro lado, este proyecto tiene un impacto social, ya que se espera que a partir del simulador creado se pueda facilitar el proceso de enseñanza-aprendizaje en la formación de personal médico, particularmente aquellos en proceso de especialización en urología. NephroTrainer permitiría la reducción de riesgos para los pacientes con estados delicados de nefrolitiasis, al posibilitar la mejora en experiencia y un aumento en las habilidades del cirujano en PCNL. Como se señaló en la introducción de este trabajo, algunas de las complicaciones de dicho procedimiento obedecen directamente a la ejecución del médico. En este sentido, el simulador sería un espacio óptimo para formar suficientemente a los médicos, antes de intervenir a pacientes reales y disminuir así las posibles complicaciones derivadas.

Finalmente, este simulador le permitiría al Hospital San Ignacio consolidar su práctica docente y proyección a la comunidad a través de convenios para el acceso el entrenamiento de estudiantes – docentes de medicina de otras instituciones de educación superior aliadas o entidades públicas/privadas de prestación de servicios hospitalarios especializados. Ya que la necesidad de entrenamiento en este procedimiento, si bien comenzó como una necesidad identificada en el Hospital San Ignacio, es consistente con necesidades de otras instituciones.

## **2. Perspectivas futuras de investigación**

Adicional a lo anterior el desarrollo de este simulador representa la generación de una tecnología con potencial innovador ya que no se han identificado productos de realidad virtual similares al que se busca crear. Gracias a la necesidad existente para entrenar a los estudiantes y profesionales de medicina, existe un gran potencial de aceptación como herramienta útil y de uso habitual. Es por ello que una perspectiva futura de investigación implica la aplicación de fases de desarrollo de mayor madurez tec-

nológica, utilizando como posible metodología la de TRL, y buscando llevar a un nivel más avanzado para lograr un mayor impacto social y eventualmente lograr una posible protección de propiedad intelectual con el medio que se considere pertinente.

No obstante, este trabajo presenta algunas limitaciones. La primera de ellas, relacionada justamente con su alcance, fue que se trabajó para llegar a un prototipo funcional. Por lo tanto, una línea de trabajo que fortalecería la investigación sería que el simulador incluya otras fases del procedimiento de PCNL, como extracción del cálculo y sutura, mejoras en su apartado visual con involucramiento de diseño artístico, así como la inclusión de factores vitales aleatorios, tales como cambio en ritmo cardíaco o hemorragias. De igual forma, cambios anatómicos relevantes, incluyendo modelos que representen personas obesas o niños.

Otra limitación es el hecho de que no fue posible emplear controles de movimiento, por lo que otra línea y perspectiva futura sería la inclusión de múltiples controles de movimiento con varios grados de libertad, así como la inclusión de dispositivos de realidad virtual de tipo HMD. Esto permitiría un incremento en la sensación de inmersión y mayor similitud con el entorno real del procedimiento.

## REFERENCIAS

1. Agudelo J., (2015). <http://drjoseagudelo.com/procedimientos/>.
2. Alelign, T., & Petros, B. (2018). Kidney stone disease: an update on current concepts. *Advances in urology*, 2018.
3. Alonso, J. R., Flores, J. L., & Fernández, A. (2021, September). Learning Optics with a DIY Polarization-based 3D display. In *Education and Training in Optics and Photonics* (pp. F2A-3). Optical Society of America.
4. Aragonés García M, Parra Gordo ML, Cigüenza Sancho M, Medina Díaz M, Peláez Suárez D. Calcificaciones renales: imagen en ecografía. *EuroEco*.2011;2:68-71.
5. Bagley, D. H., Huffman, J. L., & Lyon, E. S. (1987). Flexible ureteropyeloscopy: diagnosis and treatment in the upper urinary tract. *The Journal of urology*, 138(2), 280-285.

6. Bevan, N., Carter, J., Earthy, J., Geis, T., & Harker, S. (2016, July). New ISO standards for usability, usability reports and usability measures. In *International conference on human-computer interaction* (pp. 268-278). Springer, Cham.
7. Brunckhorst, O., Challacombe, B., Abboudi, H., Khan, M. S., Dasgupta, P., & Ahmed, K. (2014). Systematic review of live surgical demonstrations and their effectiveness on training. *British Journal of Surgery*, 101(13), 1637-1643.
8. Brunckhorst, O., Aydin, A., Abboudi, H., Sahai, A., Khan, M. S., Dasgupta, P., & Ahmed, K. (2015). Simulation-based ureteroscopy training: a systematic review. *Journal of surgical education*, 72(1), 135-143.
9. Coe, F. L., Parks, J. H., & Asplin, J. R. (1992). The pathogenesis and treatment of kidney stones. *New England Journal of Medicine*, 327(16), 1141-1152.
10. Cooter, R., & Pickstone, J. (2016). *Companion to medicine in the twentieth century*. Routledge.
11. Fernández González, D. (2016). Efectividad de la terapia de ondas de choque en pacientes que presentan espasticidad: una Revisión sistemática (Bachelor's thesis).
12. Fernández González, I., Santos Arrontes, D., Llanes González, L., Espinales Castro, G., Luján Galán, M., & Berenguer Sánchez, A. (2005). Técnica e indicaciones de la nefrolitotomía percutánea "mini-percutánea". *Archivos Españoles de Urología* (Ed. impresa), 58(1), 55-60.
13. Goldfarb, N., Lewis, A., Tacescu, A., & Fischer, G. S. (2021). Open source Vicon Toolkit for motion capture and Gait Analysis. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 212, 106414.
14. Fiard, G., Descotes, J. L., & Troccaz, J. (2019). Simulation-based training in urology: A systematic literature review. *Progres en urologie: journal de l'Association francaise d'urologie et de la Societe francaise d'urologie*, 29(6), 295-311.
15. Forbes, C. M., Lim, J., Chan, J., Paterson, R. F., Gupta, M., Chew, B. H., & Scotland, K. (2019). Introduction of an ex-vivo pig model for teaching percutaneous nephrolithotomy access techniques. *Canadian Urological Association Journal*, 13(10), 355.
16. Forssmann, B., Hepp, W., Chaussy, C., Jocham, D., Schmiedt, E., & Brendel, W. (1980). Prototyp für die klinische Anwendung der berührungsfreien Nierensteinertrümmerung durch Stoßwellenimpulse. *Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering*, 25(s1), 414-416
17. Goldman, L., & Schafer, A. (2017, June). *Goldman-Cecil Medicina Interna*. Edra.
18. Hassnain. (2016). Augmented Reality (AR) Links Real and Virtual Worlds [Fotografía]. Obtenida de <https://muddlex.blogspot.com/2013/01/augmented-reality-ar-links-real-and.html>.
19. Healy, K. A., & Ogan, K. (2007). Fisiopatología y tratamiento de los cálculos coraliformes infecciosos. *Clínicas urológicas de Norteamérica*, 34(3), 363-374.
20. Heilig, M. L. (1962). U.S. Patent No. 3,050,870. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
21. International Organization for Standardization. (2018). Occupational health and safety management systems— Ergonomics of human-system interaction (ISO Standard No. 9241-11). Obtenido de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9241:-11:ed-2:v1:en>.
22. International Organization for Standardization. (2019). Occupational health and safety management systems— Ergonomics of human-system interaction (ISO Standard No. 9241-210). Obtenido de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9241:-210:ed-2:v1:en>.

23. Jerald, J. (2015). *The VR book: Human-centered design for virtual reality*. Morgan & Claypool.
24. Kissflow. 2021. *Rapid Application Development (RAD): Changing How Developers Work*. Obtenido de <https://kissflow.com/rad/rapid-application-development/#rad-vs-other-models>.
25. Lock, S., Last, J. M., & Dunea, G. (2001). *The Oxford illustrated companion to medicine*.
26. Lopes Nunes, I. (2006). *Ergonomics and Usability—key factors in Knowledge Society*.
27. Ma, M., Jain, L. C., & Anderson, P. (Eds.). (2014). *Virtual, augmented reality and serious games for healthcare 1 (Vol. 1)*. Berlin: Springer.
28. Maldonado-Alcaraz, E., García, F. G. M., Moreno-Palacios, J., & Serrano-Brambila, E. (2014) Entrenamiento de residentes de Urología en el modelo inanimado.
29. Makhoul, B., Yatim, M., Guinard, J., & Fourcade, R. O. (2006). Método de punción renal para realizar una nefrolitotomía percutánea. *EMC-Urología*, 38(3), 1-8.
30. Martin, J. (1991). *Rapid application development*. Macmillan Publishing Co., Inc.
31. Martín, R., & Torres, D. (2002). Nefrolitotomía percutánea: Experiencia en el Hospital San José, Bogotá. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*, 11(2), 21-31.
32. Melzer, J. E., & Moffit, K. (2001). Head-mounted displays. *Digital Avionics Handbook*.
33. Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 77(12), 1321-1329.
34. Nielsen, J., 1993. *Usability Engineering*. Academic Press.
35. Nobuhiko MUKAI, M. H., & Katsunobu MUROI, T. H. (2001). New graphics models for PC based ocular surgery simulator. *Medicine Meets Virtual Reality 2001: Outer Space, Inner Space, Virtual Space*, 81, 329.
36. Obregón, M., Troya, C., Toctaguano, S., Herrera, D., & Gaus, D. (2016). Cambios en el perfil epidemiológico de cálculos renales en un Hospital Rural en Ecuador. *Práctica Familiar Rural*, 1(1).
37. Pelly, T., Shanmugathas, N., Bowyer, H., Wali, A., & Pankhania, R. (2020). Low-cost simulation models in Urology: a systematic review of the literature. *Central European Journal of Urology*, 73(3), 373
38. Reiner, A. (2019). Oculus Quest Review – The Next Step For VR . Obtenida de <https://www-gameinformer.com/review/2019/04/30/oculus-quest-review-the-next-step-for-vr><https://www-gameinformer.com/review/2019/04/30/oculus-quest-review-the-next-step-for-vr>.
39. Rubinstein, I., Cavalcanti, A. G., Accioly, P. M., & Rodríguez, H. C. (1999). Cálculo corali-forme gigante en paciente de riñón único. *Revista Argentina de Urología*, 64(4), 202.
40. Ruthenbeck, G. S., & Reynolds, K. J. (2015). Virtual reality for medical training: The state-of-the-art. *Journal of Simulation*, 9(1), 16-26.
41. Scopus. 2020. *Uro Analyze search results* [Imágen generada de herramientas de Scopus]. Obtenida de <https://www.scopus.com /term/analyzer.uri>.
42. Susaeta, R., Benavente, D., Marchant, F., & Gana, R. (2018). Diagnóstico y manejo de litiasis renales en adultos y niños. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 29(2), 197-212.
43. Sutherland, I. E. (1968, December). A head-mounted three dimensional display. In *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I* (pp. 757-764).
44. Tai, Y., Wei, L., Zhou, H., Peng, J., Li, Q., Li, F., ... & Shi, J. (2019). Augmented-reality-driven medical simulation platform for percutaneous nephrolithotomy with cybersecurity awareness. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(4), 1550147719840173.

45. Uria, J. V., Gerhold, J. V., López, J. L., Rodriguez, S. V., Navarro, C. A., Fabián, M. R., ... & Elipe, M. S. (1998). Technique and complications of percutaneous nephroscopy: experience with 557 patients in the supine position. *The Journal of urology*, 160(6 Part 1), 1975-1978.
46. Wickham, J. E., & Kellet, M. J. (1981). Percutaneous nephrolithotomy. *Br Med J (Clin Res Ed)*, 283(6306), 1571-1572.
47. Wollin, T. A., & Denstedt, J. D. (1998). The holmium laser in urology. *Journal of clinical laser medicine & surgery*, 16(1), 13-20.
48. Wu, C. O., Sunderland, K., Filippov, M., Sainsbury, B., Fichtinger, G., & Ungi, T. (2020, March). Workflow for creation and evaluation of virtual nephrolithotomy training models. In *Medical Imaging 2020: Image-Guided Procedures, Robotic Interventions, and Modeling* (Vol. 11315, p. 1131524). International Society for Optics and Photonics.

## ANEXO 1: RESULTADOS DE ENTREVISTA PARA IDENTIFICAR FUNCIONALIDADES DEL SIMULADOR.

*Estos resultados se generaron de manera conjunta entre una médico residente y un médico especializado (docente), del Hospital San Ignacio.*

1.¿Cuántas PCNLs se realizan anualmente en Colombia? Texto de varias líneas.

No disponemos de esa información en Colombia

2.¿Cuántas PCNLs se realizan anualmente en la PUJ?

Aproximadamente 40

3.¿Que otra entidad además del Hospital San Ignacio realiza la mayor cantidad de PCNLs en el país?

Pablo Tobón Uribe

Hospital de La Samaritana

Clínica de Marly

Clínica Medellín

Clinica Vida Medellín

Hospital Universidad Nacional

4.De los pasos principales durante la cirugía ¿cuál se considera el más relevante?

- Punción y localización de los cálculos **X**
- Desintegración t remoción de los cálculos
- Sutura

5.¿Por qué la respuesta dada en el punto anterior?

El acceso adecuado es el paso fundamental en la cirugía, el cual debe ser preciso para disminuir las complicaciones.



6. De los pasos principales ¿cuáles generan mayores dificultades en el proceso de enseñanza-aprendizaje del personal médico?

- Punción y localización de cálculos X
- Desintegración y remoción de cálculos
- Sutura

7. ¿Cuál es el tipo de visualización utilizada durante las PCNL realizadas en el hospital?

Fluoroscopia

Ultrasonido

Ambas X

¿Otras? ¿Cuales?

9. ¿Qué instrumentos y especificaciones se utilizan para realizar las PCNLs en el hospital San Ignacio?

Ecógrafo portátil

Fluoroscopio

Nefroscopio 26Fr

Guía hidrofílica

Aguja Chiba para punción

Dilatadores telescopados

Camisa de Amplatz

Medio de contraste

Cistoscopio

Lithoclast (Fragmentador neumático)

10. ¿Cuál es la posición principal en la que se realizan las PCNLs en el hospital San Ignacio?

La mayoría en decúbito supino

11. ¿Qué indicadores son los de mayor importancia para medir la experiencia durante una intervención PCNL?

- Tiempo
- Precisión (número de punciones)
- Uso de instrumentos
- Otro: tasa libre de cálculos: Se realiza UROTAC a las 4 semanas para evaluar litiasis residual.

12. Otro indicador ¿Cuál?

Hb posoperatoria (medición de sangrado)

Tiempo de fluoroscopia

Tiempo de hospitalización

Infección posoperatoria

13. ¿Existen requerimientos adicionales?

Por ahora no