

Simuladores virtuales para entrenamiento de habilidades para laparoscopia

Daniel Ricardo Ramos Tovar, Sergio Alexander Salinas[∇]

Facultad de Ingeniería Electrónica. Grupo de Investigación en Bioingeniería, Señales y Microelectrónica, Universidad Pontificia Bolivariana, Floridablanca, Colombia

Resumen—Este artículo presenta una revisión sobre algunos simuladores virtuales, comerciales y en investigación, disponibles actualmente para entrenamiento de cirugía laparoscópica; entre ellos se incluyen los simuladores que usan interfaces hápticas para aumentar la sensación de inmersión y el realismo de los ejercicios. Además, se describe el programa de entrenamiento Fundamentals of Laparoscopic Surgery (FLS), que está diseñado para aprender a dominar las habilidades básicas requeridas para hacer cirugías laparoscópicas, y cuyos ejercicios, o aproximaciones de ellos, han sido incorporados por gran cantidad de simuladores. Finalmente, se realiza una comparación entre los diferentes sistemas de simulación encontrados.

Palabras Clave— Entrenamiento quirúrgico; interfaz háptica; laparoscopia; simulador virtual.

VIRTUAL SIMULATORS FOR LAPAROSCOPIC SKILLS TRAINING

Abstract—This paper presents a review about some virtual simulators for laparoscopic surgery training. Currently, they are available in both commercially and under research; it includes simulators with haptic interfaces used to increase the immersion sense and realism of the exercises. Besides, the Fundamentals of Laparoscopic Surgery (FLS) training program is described; it was designed to learn basic skills required for laparoscopic surgeries, and its exercises, or very similar approaches, which have been added in many simulators. Finally, a comparison between all the simulators found is performed.

Keywords— Haptic interface; Laparoscopy; Surgery training; Virtual simulator.

SIMULADORES VIRTUAIS PARA LAPAROSCOPIC SKILLS TRAINING

Resumo—Este trabalho apresenta uma revisão Acerca alguns simuladores de treinamento virtual para a cirurgia laparoscópica. Atualmente, eles estão disponíveis comercialmente em pesquisa e sob; que inclui as interfaces táteis com simuladores usados para aumentar a sensação de imersão e realismo dos exercícios. Além disso, os Fundamentos de Cirurgia Laparoscópica (FLS) programa

[∇] Dirección para correspondencia: sergio.salinas@upb.edu.co

DOI: <http://dx.doi.org/10.14508/rbme.2016.10.19.45-55>

de treinamento é descrito; ele foi projetado para aprender as habilidades básicas necessárias para cirurgias laparoscópicas, e seus exercícios, ou muito semelhante abordagens, que foram adicionados em muitos simuladores. Finalmente, uma comparação entre todos os simuladores encontrados é realizada.

Palabras-chave—interface Haptica, Laparoscopia, formação Cirurgia, simulador virtual

I. INTRODUCCIÓN

La cirugía laparoscópica es un procedimiento en el cual se realizan pequeñas incisiones en el abdomen insuflado de un paciente para introducir, a través de éstos, un sistema de visión y unos instrumentos quirúrgicos especializados. Sus ventajas principales están relacionadas con el pequeño tamaño de las incisiones, ya que representan un menor tiempo de hospitalización y recuperación para el paciente y que las cicatrices que deja son por lejos menores a las que deja una cirugía convencional. Sin embargo, entre sus desventajas se encuentra que el aprendizaje de este tipo de técnica puede ser muy lento, ya que el cirujano debe acostumbrarse a mirar el área a operar en 2 dimensiones, no tiene contacto directo con los tejidos del paciente y puede experimentar incomodidad dado el espacio de trabajo tan reducido [1].

Normalmente, el método de enseñanza empleado en cirugía laparoscópica consiste en que los aprendices presencien una operación realizada por un cirujano experto. El inconveniente de este método es que los aprendices no ejecutan la operación, bien sea porque los centros médicos no lo permiten ante el riesgo que esto representaría, o porque el paciente podría rehusarse a que alguien inexperto lo opere. Así, la única posibilidad de practicar los procedimientos recién aprendidos es en cadáveres o animales [2]. Sin embargo, la práctica en cadáveres tiene la desventaja que el comportamiento de los tejidos muertos es distinto al de los de un paciente vivo [2], y en el caso de los animales, los resultados del aprendizaje pueden no ser los adecuados en vista de las notorias diferencias entre la fisiología animal y la humana, además del problema ético que representa la experimentación con éstos [3].

Estos inconvenientes dieron paso a la incorporación de simuladores al sistema de educación quirúrgica brindando a los practicantes la oportunidad de ganar experiencia en un ambiente controlado, mejorando sus habilidades para manipular el instrumental, adaptarse a la visión en el monitor y, una vez dominadas estas bases, tomar decisiones médicas según escenarios específicos en niveles más avanzados de simulación. Sin embargo, la efectividad de las prácticas con el simulador depende del programa de entrenamiento que se ejecute, es decir, que esté diseñado y validado para que los practicantes en verdad adquieran las habilidades necesarias para efectuar las cirugías [4].

A continuación, se expone sobre: el entrenamiento en laparoscopia, la tecnología háptica relacionada con simuladores para laparoscopia, las características de algunos simuladores virtuales disponibles en el mercado y los que aún están en procesos de investigación, para finalmente realizar una comparación y discusión sobre el tema.

II. ENTRENAMIENTO EN LAPAROSCOPIA

Desde el punto de vista médico, es fundamental un entrenamiento guiado a través de un currículo estructurado, que le permita al cirujano acostumbrarse a un entorno quirúrgico mediado por tecnología moderna, y ser capaz de desarrollar habilidades para realizar movimientos precisos, de tal forma que pueda completar un procedimiento laparoscópico con seguridad [5]. Estos entrenamientos normalmente incorporan simuladores, que pueden ser físicos o virtuales, y orientados a entrenar principalmente habilidades básicas, procedimientos de sutura, cirugía general, ginecología y urología [4, 6].

Los dispositivos para entrenamiento laparoscópico, conocidos como simuladores, permiten que los cirujanos mejoren: su percepción de profundidad, la destreza bimanual, el tiempo de realización de las actividades, habilidades relacionadas con la eficacia y el manejo de tejidos. Estas habilidades quirúrgicas, necesarias para la realización de un procedimiento laparoscópico, se pueden desarrollar con cualquier tipo de simulador, aunque podría ser más significativo con sistemas virtuales especializados [7].

2.1. Programa de Entrenamiento FLS

Para que el entrenamiento con un simulador para aprendizaje de cirugías sea exitoso, debe garantizarse que las actividades que se llevan a cabo en la simulación brinden desarrollo de habilidades “estándar” necesarias para realizar cirugías satisfactoriamente.

Por esta razón, a finales de la década de 1990, la Sociedad de Cirugía Endoscópica Gastrointestinal Americana (*Society of American Gastrointestinal Endoscopic Surgery – SAGES*) creó un programa llamado Fundamentos de Cirugía Laparoscópica (*Fundamentals of Laparoscopic Surgery – FLS*), cuyo objetivo principal era estandarizar un conjunto de habilidades en cirugía laparoscópica básica. El programa es una herramienta educacional y de evaluación con la cual se adquieren conocimientos fundamentales y habilidades técnicas

necesarias para efectuar los procedimientos básicos de una cirugía laparoscópica. Este programa fue lanzado en el año 2005 y su contenido está aprobado por el Colegio Americano de Cirujanos (*American College of Surgeons – ACS*) [8].

El programa de entrenamiento cuenta con información teórica y el aprendizaje consta de 6 módulos educativos. El primero se refiere a consideraciones preoperatorias, el segundo trata consideraciones durante la operación, el tercero describe los procedimientos laparoscópicos básicos, el cuarto se enfoca en complicaciones y cuidados postoperatorios, el quinto es la instrucción y práctica de las habilidades manuales, y el sexto es un repaso final [8].

Las habilidades manuales que se instruyen en el quinto módulo son 5 (Fig. 1), las cuales han sido planteadas por expertos y ampliamente validadas como las tareas fundamentales que deben dominarse para realizar satisfactoriamente un procedimiento laparoscópico básico. La primera tarea es la Transferencia Bimanual, y consiste en transportar 6 objetos insertados en un arreglo de clavijas hasta otro a su lado, y luego llevarlos de nuevo a su posición inicial, transfiriendo los objetos de una mano a la otra en el aire, y debe realizarse en un tiempo máximo de 5 minutos. El ejercicio dos es el Corte Predeterminado, y tiene también un tiempo máximo de 5 minutos; consiste en recortar un círculo dibujado sobre una gaza cuadrada ligeramente tensionada utilizando una pinza en una mano y una tijera en la otra. La tercera tarea se conoce como *Endoloop*, consiste en atar un hilo pre-anudado alrededor de una guía dibujada en una protuberancia hecha en espuma, y halar un extremo del hilo para ajustar el nudo; el tiempo máximo es de 3 minutos. La tarea cuatro es la Sutura con Nudo Extracorpóreo y la quinta con Nudo Intracorpóreo, las cuales se realizan sobre un tubo de goma con unas guías de perforación; los tiempos máximos de ejecución para estas tareas son 7 y 10 minutos respectivamente [9].



Fig. 1. Ejercicios del programa FLS en la caja de entrenamiento [9].

El programa se evalúa en 2 partes. Primero con una prueba cognitiva que consiste en un formulario de 75 preguntas de opción múltiple acerca de los conceptos en los módulos de aprendizaje, tiene una duración máxima de 90 minutos y se realiza en un computador [10]. La otra parte

es para habilidades manuales, las cuales se practican y evalúan, normalmente, en el simulador MISTELS, que es una caja de entrenamiento (*trainer box*) para llevar a cabo de manera segura y en un entorno inanimado los ejercicios del programa FLS [11]. Esta caja de entrenamiento tiene fijada una cámara con 0° de inclinación y en su tapa se insertan 2 pinzas laparoscópicas a través de un par de trocares fijos; en su interior cuenta con una base para fijar los diferentes objetos de cada ejercicio [12]. Se realizan sesiones de pre-entrenamiento y post-entrenamiento para hacer un mejor seguimiento de la evolución de las habilidades del practicante [13]. La evaluación dura aproximadamente entre 30 y 45 minutos, sumando el tiempo de todas las tareas, las cuales se califican individualmente. El puntaje considera tanto tiempo empleado (eficiencia) como precisión [8].

2.2. Arquitectura general de un simulador para laparoscopia

En general, los simuladores para laparoscopia tienen una arquitectura similar, sin importar si son físicos, virtuales o robotizados; esto es, contienen: un sistema oculto, para el cirujano, que simula al paciente; un par de interfaces estilo pinzas para laparoscopia; un sistema de visualización que le muestra al cirujano lo que está realizando y un conjunto de ejercicios de entrenamiento, normalmente intercambiables, que pueden realizarse con el simulador en específico. Un diagrama que representa el concepto se muestra en la Fig. 2.

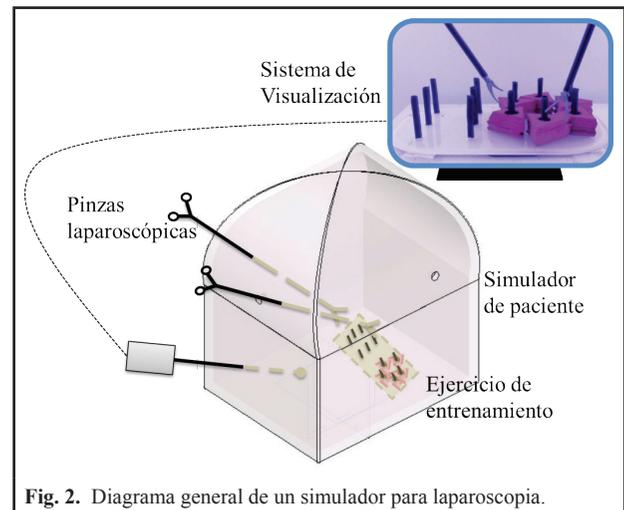


Fig. 2. Diagrama general de un simulador para laparoscopia.

Dependiendo del tipo de simulador, se pueden adicionar elementos al sistema, de tal forma que las pinzas pueden ser modificadas para adaptarse a un robot, o el sistema de visión ya no requiera un laparoscopio, porque se realiza una emulación en un mundo virtual, o los ejercicios de entrenamiento puedan ser más especializados y medirse algunas variables sobre ellos.

Todo esto es parte de los beneficios que ofrece cada sistema en particular, pero todos mantienen la misma metodología de entrenamiento.

III. INTERFACES HÁPTICAS Y LAPAROSCOPIA

Un simulador virtual de cirugía permite aprender efectivamente el manejo de las herramientas quirúrgicas sólo si es tan realista que permita un entrenamiento igual que con un simulador físico y/o represente fielmente a un paciente real. Para esto se utilizan interfaces hápticas, que son dispositivos bidireccionales que transmiten los movimientos realizados por el usuario al mundo virtual y le permiten a éste sentir fuerzas generadas por el contacto con los objetos 3D [14].

3.1. Características de las Interfaces Hápticas

Una característica muy importante a considerar cuando se trabaja con dispositivos hápticos es la transparencia o *Backdrivability*, que consiste en que el dispositivo no debe ejercer fuerzas sobre la mano del usuario si no se interactúa con un objeto virtual, así la realimentación de fuerzas y visual debe ser tan precisa que no permita distinguir entre el escenario virtual y la situación real que representa [15]. Otras son: la fuerza continua, que es la fuerza máxima que el dispositivo puede entregar por un periodo de tiempo largo [16]; la resolución de posición, que se define como el mínimo cambio de desplazamiento que puede percibir el sistema [16]; la rigidez, descrita como la capacidad del dispositivo para oponerse al movimiento del operador [17]; la fricción aparente, que se relaciona con las pérdidas por fricción de la interfaz [17]; además de los grados de libertad (GDL), el espacio o volumen de trabajo, y la máxima fuerza o par mecánico [16]. Algunas de estas características son difíciles de alcanzar debido a que el hardware háptico presenta retrasos en la realimentación de la fuerza y en la transmisión de los movimientos, lo cual se trata de compensar con programación software.

Además se debe tener en cuenta la velocidad de percepción de sensaciones del ser humano. Por ejemplo, para el tacto, se recomiendan velocidades de realimentación a partir de 300Hz, aunque idealmente debe ser de unos 1000Hz [18] y para la visión entre 20 y 40 Hz [18-19].

3.2. Interfaces Hápticas y Simuladores de Laparoscopia

Existen interfaces hápticas diseñadas específicamente para simuladores de cirugía comerciales, pero también es posible desarrollar aplicaciones de simulación quirúrgicas con interfaces orientadas a la industria, la academia o los videojuegos. Algunas alternativas disponibles son:

- **Sensible Phantom Devices:** En la gama baja están los modelos Omni y Desktop [20], con 6 GDL y realimentación de fuerzas en 3 de ellos (GDL activos); la gama alta conocida como Premium, pueden ser el 1.5 o el 3.0 de 6 GDL activos [21-22], o el modelo de 7 GDL con 6 activos [23]. La fuerza entregada por la gama baja va hasta 7.9N y la alta hasta 37,5N; la resolución para los Premium va desde 860 hasta 3784dpi (*dots per inch*), y en los modelos Omni y Desktop desde 450 hasta un poco más de 1100dpi. El dispositivo más económico es el Omni, que cuesta alrededor de 2400 USD; los otros modelos tienen precios más elevados: el Desktop 13500 USD, el Premium 1.5 59500 USD y el Premium 2.0, 60500 USD [24].
- **Novint Falcon:** Tiene configuración paralela y puede entregar más de 8,89N; ofrece un espacio de trabajo de 4"x4"x4", tiene una resolución de posición de más de 400dpi y cuenta con 3 GDL con realimentación de fuerzas. Por su bajo costo, ha ganado un buen posicionamiento en el mercado [14], y su precio está alrededor de 250 USD [25].
- **MPB Technologies Freedom 6S:** Es una interfaz de 6 GDL activos. Su resolución está alrededor de 2 μ m en las articulaciones de desplazamiento y de 0.02mrad en las rotacionales, y entrega una fuerza máxima de 2.5N [26]. Existe una versión de 7 GDL que cuenta con un efector final con forma de tijera con realimentación de fuerza y es intercambiable. El precio de la Freedom 6S en el 2011 era de aproximadamente 32000 USD [24].
- **Force Dimension Haptic Devices:** Este fabricante cuenta con las series Delta.x [27], Omega.x [28] y Sigma.x [29]. Las Delta pueden ser de 3 o 6 grados de libertad activos todos, las Omega pueden ser de 3, 6 o 7 GDL donde sólo los 3 GDL de traslación son activos y en el caso de la Omega.7, también el séptimo es activo, el cual se encuentra en el efector final. Por último, la Sigma.7 tiene todos sus 7 GDL activos. Estas interfaces entregan un máximo de 20N y tienen resoluciones alrededor de 0.01mm en sus GDL traslacionales y de 0.09grados o menores en sus GDL rotacionales. Los precios en el 2011 de las Omega oscilaban entre 18000 y 30000 USD, el de las Delta entre 29000 y 55000 USD, y la Sigma 7 costaba aproximadamente 80000 USD [24].
- **Quanser 5 DOF Haptic Wand:** Es una interfaz háptica de 5 GDL, 3 traslacionales y 2 rotacionales. Su estructura es de doble pantógrafo. Entrega una fuerza máxima de 9N en sus GDL traslacionales [30]. Su precio en el 2011 estaba alrededor de 65000 USD [24].
- **Mentice Xitact IHP (Fig. 3):** Interfaz diseñada especialmente para simulación de cirugías laparoscópicas. Tiene 4 GDL con realimentación de fuerzas que recrean los mismos movimientos que se pueden realizar con una herramienta de cirugía real. Cuenta con herramientas intercambiables que agregan un GDL adicional para

simular agarres pero no genera fuerzas. Su espacio de trabajo tiene forma cónica de 100° de amplitud y máximo 0.2m de profundidad, y es capaz de realimentar pares mecánicos de hasta $1.8N \times m$ en sus GDL rotacionales y fuerzas de 30N en el GDL de inserción, que es lineal [31]. La versión de esta interfaz sin realimentación háptica es la Xitact ITP [32].



Fig. 3. Interfaces hápticas Xitact IHP [31].

Las características de todos los dispositivos hápticos mencionados permiten utilizarlos en diversas aplicaciones, y la selección de uno u otro depende de la cantidad de GDL requeridos, la magnitud de las fuerzas que deben realimentarse y el presupuesto disponible. Sin embargo, debido al enfoque del presente artículo de revisión, las mejores interfaces hápticas son aquellas que se ajustan mejor a las características de los instrumentos laparoscópicos reales. Las tres características principales son los grados de libertad, las fuerzas de realimentación y el rango de movimiento permitido.

En cuanto a los grados de libertad, una interfaz adecuada debe poseer 4 para simular el movimiento de las herramientas reales, como se muestra en la Fig. 4, los cuales son pitch (rotación sobre el eje horizontal), yaw (rotación sobre el eje vertical), roll (rotación sobre su eje de inserción), y traslación sobre el eje de inserción, el cual se da en mm ya que los otros 3 se miden en grados. También debe poseer un quinto grado de libertad para accionar el extremo de la herramienta, que debe ser un movimiento de apertura y cierre [33]. Otra consideración es el espacio de trabajo, que para laparoscopias tiene forma cónica con ángulo en su vértice de aproximadamente 60° [34-35] y una altura aproximada de 0.15m (o la mitad de la longitud del instrumento que se inserte) [35].

Ahora bien, en el caso de la magnitud de las fuerzas de realimentación provocada por la interacción entre los instrumentos y los órganos, según [36] y estudios mencionados en [37], está aproximadamente entre 0 y 10-12N. Sin embargo, estos valores no son precisos debido a que la configuración de las herramientas en estas cirugías transforma la pinza en una palanca, de modo que el cirujano puede experimentar

fuerzas desde 0.2 hasta 4.5 veces la fuerza real de contacto. Según el tipo de herramienta, su fabricante y la calidad de la misma, la realimentación de la fuerza generada por el agarre de tejidos puede ser también variable, generando desgaste en el médico y tendencias a utilizar fuerzas de agarre excesivas. Esto puede confirmarse comparando esos valores de fuerza con los presentados en [38].

También existen cargas adicionales con las que debe lidiar el cirujano, ocasionadas por la fricción de las herramientas con el trocar (Fig. 4), que están entre 0 y 3N según [36], y en un estudio mencionado en [38], en el cual se mide la fricción para 6 trocares ampliamente utilizados, resultan fuerzas desde 0.25 hasta 3N. Por último, la dureza de la pared abdominal del paciente (Fig. 4), introduce pares que varían entre 0 y $0.7N \times m$ según el ángulo de inclinación de la herramienta [36-37]. Sin embargo, todos los estudios consultados concuerdan en que es difícil obtener la magnitud exacta de las fuerzas experimentadas por los médicos durante las laparoscopias, lo cual hace necesario construir los simuladores a partir de datos recolectados en diferentes investigaciones, y ajustar luego los valores de fuerza haciendo pruebas con cirujanos y atendiendo sus recomendaciones.

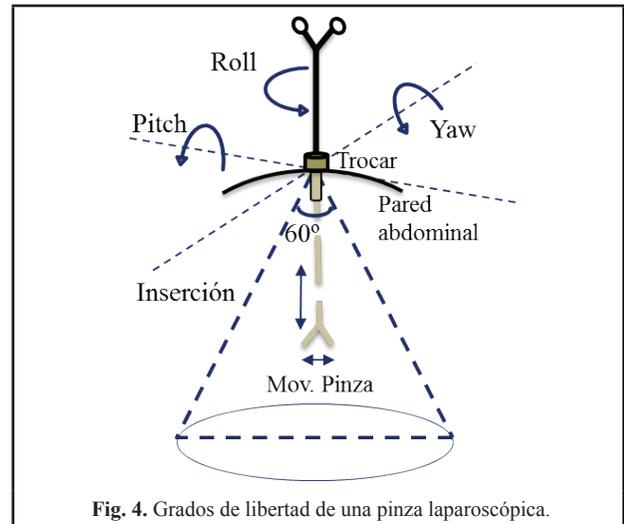


Fig. 4. Grados de libertad de una pinza laparoscópica.

De las interfaces comercialmente disponibles que se consultaron, la Xitact IHP es la más adecuada para implementar un simulador virtual de cirugía ya que está específicamente diseñada para ello. Sin embargo, en un estudio reciente en el que se compara el realismo de las sensaciones percibidas con una interfaz Xitact IHP y una ITP, el 95% de los cirujanos que participaron opinaron que la IHP genera fuerzas muy elevadas comparadas con una intervención real y que su transparencia no es tan buena; y en el caso de la ITP, la mitad de los participantes dijeron que su fricción es muy baja, pero prefieren la interfaz sin realimentación de fuerzas porque es más aproximada a la realidad [30].

Lo anterior permite pensar que es posible construir un simulador para entrenamiento de habilidades laparoscópicas básicas que brinde una realimentación sensorial similar a la de un simulador físico con interfaces hápticas no muy complejas, las cuales pueden ser interfaces de propósito general o una modificación de las mismas.

IV. SIMULADORES VIRTUALES PARA LAPAROSCOPIA

Si bien todos los simuladores buscan mejorar las destrezas quirúrgicas de los practicantes, existen algunos que permiten adquirir habilidades básicas de laparoscopia, otros que se enfocan a uno o varios escenarios quirúrgicos específicos y los que ofrecen las 2 posibilidades.

4.1. Simuladores para entrenamiento de habilidades básicas.

- Este tipo de simuladores se usan para que el usuario aprenda las bases de los procedimientos quirúrgicos por medio de ejercicios y tareas, que usualmente se reproducen en ambientes didácticos y libres de presión, que permiten afianzar conocimientos teóricos, adquirir destrezas manuales y familiarizarse con las herramientas. Por lo tanto, las actividades que se llevan a cabo en estos simuladores constituyen la primera etapa de entrenamiento simulado ya que el usuario adquiere las habilidades necesarias para operar bien en los complejos entornos quirúrgicos simulados posteriores y luego en las cirugías reales.

- SIMENDO Laparoscopy (Fig. 5): producido por la empresa DeltaTech, enfocado principalmente al entrenamiento de la habilidad básica laparoscópica coordinación mano-ojo, por lo cual no cuenta con realimentación de fuerzas. El sistema consiste en el software de simulación y un par de interfaces diseñadas para emular los instrumentos de cirugía. Una ventaja importante es que requiere pocos recursos computacionales. Su costo en el 2007 oscilaba entre 6000 y 10000 USD [40].



Fig. 5. Simulador SIMENDO [40].

- VBLaST: proyecto de investigación desarrollado en conjunto por el Instituto Tecnológico de Rensselaer, el Instituto Avanzado de Ciencia y Tecnología de Korea y el Grupo de Cirugía General del Centro Médico de Albany. Desarrollado a finales de 2008, fue el primer simulador en replicar los ejercicios propuestos en el programa FLS. Hace uso de 2 interfaces hápticas Omni Phantom modificadas para adaptar pinzas laparoscópicas [41]. En un estudio inicial sobre este simulador los resultados obtenidos indicaban que los participantes preferían utilizar el simulador físico en lugar de esta versión virtual, lo cual se debía a que la realimentación de fuerzas no era precisa [42].

- SINERGIA: simulador desarrollado dentro del proyecto denominado Red Colaborativa Temática SINERGIA, impulsado por el Ministerio de Salud de España. En este proyecto participaron la Universidad Politécnica de Madrid, el Centro de Cirugía Mini-invasiva de Cáceres, la Universidad Politécnica de Valencia, la Universidad de Valladolid y la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Cuenta con 13 ejercicios que se agrupan en 6 unidades que son orientación, agarre, tracción (*pulling*), corte, disección y sutura. Fue desarrollado con el lenguaje de programación C++ sobre una plataforma Windows, utilizando la librería *WorldToolKit* (WTK) para el manejo de gráficos y *Blender* para el modelado de objetos 3D [43].

- Simulador de la Universidad Central de Las Villas y la empresa SimPro: simulador para adquirir destreza en el manejo de las pinzas laparoscópicas para lo cual permite realizar diferentes ejercicios. Fue programado usando Ogre y PhysX, hace uso de 2 interfaces Phantom Omni modificadas para recrear las pinzas reales de cirugía, y fue desarrollado dentro del proyecto OpenSurg de CYTED [44].

4.2. Simuladores que recrean una cirugía en particular.

Estos simuladores son los que buscan recrear un escenario quirúrgico específico que permita al cirujano llevar a cabo dicho procedimiento tantas veces como sea necesario y así obtener un manejo avanzado de la cirugía que se simula.

- Empedocles es un simulador virtual desarrollado en Irlanda del Norte entre la Universidad de la Reina de Belfast (*Queen's University of Belfast*) y el Hospital Real de Belfast para Niños Enfermos (*Royal Belfast Hospital for Sick Children*) en el año 2011. Sus módulos de entrenamiento incluyen funduplicatura de Nissen, apendectomía y el ejercicio “*walking the bowel*”, en el cual se va sujetando y recorriendo el intestino grueso con las pinzas; permite personalizar escenarios y cargar modelos de órganos 3D distintos de los que vienen por defecto con el software. Posee realimentación háptica por medio de un par de controles con forma de pinzas laparoscópicas, que se conectan

a una interfaz Phantom Omni cada una. El sistema se diseñó para ser de bajo costo [45] y poder entrenar en 3D [46].

- En el Centro Nacional de Animación por Computador de la Universidad de Bournemouth se desarrolló un simulador para laparoscopia rectal, tras realizar un estudio sobre los casos de cáncer rectal y su tratamiento con laparoscopia en el Reino Unido, y encontrar que la falta de cirujanos experimentados no permitía cubrir la demanda de intervenciones de este tipo. El sistema cuenta con el software, un monitor y 2 interfaces hápticas Phantom Omni modificadas. Los escenarios se construyeron con base en imágenes de resonancias magnéticas tomadas de pacientes reales y han sido desarrollados en conjunto con cirujanos expertos, para ser tan realista como se requiere [47].

- V-Band Simulator es un sistema para entrenamiento en cirugía de banda gástrica ajustable por laparoscopia o *Lap Band*. Fue desarrollado en el Instituto Politécnico de Rensselaer y cuenta con 2 pinzas de cirugía acopladas a un dispositivo Phantom Omni cada una, las cuales están encerradas dentro de un abdomen hecho en fibra de vidrio, cuya forma imita el estado de insuflación. El simulador hace uso del motor de física Nvidia PhysX [48].

4.3. Simuladores para habilidades básicas y módulos de cirugía.

A continuación se describen simuladores híbridos que permiten entrenar habilidades básicas y también algunas cirugías en particular.

- LapSim de *Surgical Science* (Fig. 6): Cuenta con 2 módulos de aprendizaje que conforman el núcleo del sistema. Uno es el módulo básico en el que se aprende a controlar la cámara y desplazarse con los instrumentos. El otro es el módulo *Task Training* en el que se pueden practicar 4 ejercicios del FLS (no se simula el anudado extracorpóreo). Además, cuenta con otros módulos adicionales para simular colecistectomía, apendectomía, sutura avanzada y anastomosis, ginecología, hysterectomía, nefrectomía y bariatría [49].

- LAP Mentor de *Simbionix Corp*: cuenta con módulos de habilidades básicas, similares al programa FLS, pero tiene más ejercicios de sutura y de familiarización con las herramientas. También tiene módulos de procedimientos específicos para colecistectomía, apendectomía, hernia incisional, bypass gástrico, sigmoidectomía, nefrectomía, ginecología básica e hysterectomía. Además de este simulador convencional de laparoscopia, la empresa ofrece el modelo LAP Mentor Express, el cual no tiene realimentación táctil pero brinda los mismos escenarios [50].

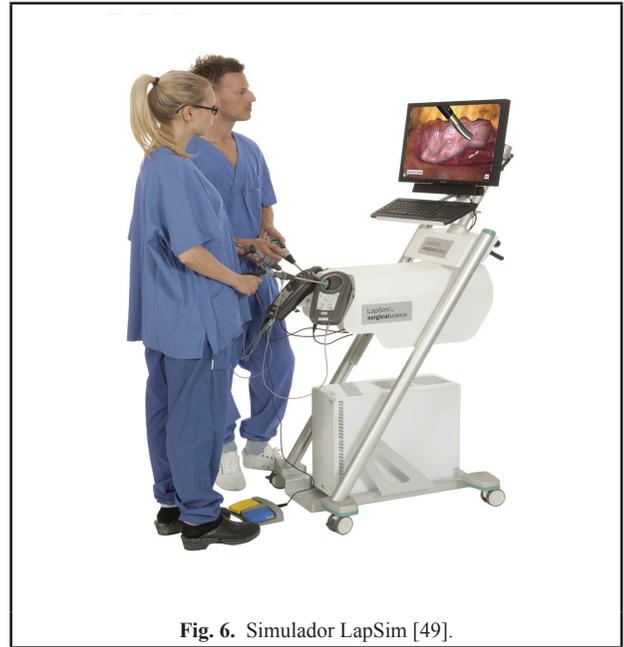


Fig. 6. Simulador LapSim [49].

- LapVR de *CAE Healthcare* (Fig. 7): Cuenta con dos módulos para aprendizaje de habilidades básicas inspirado en el FLS y ofrece la simulación de colecistectomía, apendectomía, oclusión tubaria bilateral, embarazo ectópico y salpingo-orectomía [51]. La realimentación háptica se hace con interfaces de 6 GDL y su cámara cuenta con 5 GDL [52]. Este simulador fue primero comercializado por Immersion Medicals, pero las líneas de productos de simulación de esta compañía fueron adquiridas por CAE en 2010 [53].



Fig. 7. Simulador LapVR [51].

- SEP - *SimSurgery Education Platform*: producido por *SimSurgery* y *Medical Education Technologies*. Sus módulos básicos sirven para entrenar navegación con la cámara, manipulación de tejidos y sutura básica y avanzada. Pero, sus módulos avanzados son para simulación de colecistectomía, embarazo ectópico, cistectomía ovárica y nefrectomía [54].

- LapX de Epona: cuenta con un programa de entrenamiento de 4 fases para entrenar desde habilidades básicas hasta habilidades específicas para ginecología, urología y cirugía gastrointestinal. El sistema cuenta con 2 interfaces diseñadas por la compañía que usan instrumentos de cirugía reales [55].

- En Colombia se diseñó e implementó un simulador de cirugía laparoscópica para entrenamiento en habilidades básicas y colecistectomía en un proyecto de investigación llevado a cabo entre la Universidad EAFIT y la Universidad CES. La interfaz para interactuar con el mundo virtual fue diseñada y hecha con materiales no metálicos para no introducir medidas erróneas a los sensores electromagnéticos que utilizan para medir la posición de los 4 GDL de posicionamiento del instrumento. La realimentación de fuerza la llevan a cabo conectando cada instrumento a una interfaz Phantom Omni. Los escenarios de entrenamiento para habilidades básicas del simulador son navegación, coordinación mano-ojo y sujeción de tejidos [56].

V. DISCUSIÓN

En la sección anterior se mostró una gran cantidad de simuladores para entrenamiento de habilidades básicas y de cirugía laparoscópica que han sido desarrollados en la última década. Sin embargo, todos tienen diferentes características que deben ser sintetizadas para poder apreciar las fortalezas y debilidades de cada uno de ellos, razón por la cual en la Tabla 1 se muestran las características más importantes de los simuladores virtuales consultados, con el fin de realizar una comparación entre ellos, teniendo en cuenta que para cada simulador hay diferentes datos que no se encuentran disponibles y por tanto no aparecen registrados.

En la Tabla 1 se puede apreciar que de los 4 simuladores que dan a conocer su plataforma de desarrollo, el lenguaje de programación predominante es C++, ya que es el lenguaje usado con OpenHaptics y PhysX. Otra característica importante es que todos los simuladores poseen interfaces realistas, es decir, adaptadas para recrear las pinzas laparoscópicas reales, y que la mayoría cuenta con realimentación de fuerzas, bien sea haciendo uso de sistemas propios desarrollados para estas aplicaciones o de interfaces hápticas de propósito general.

Tabla 1. Comparación de simuladores para laparoscopia.

Simulador	Plataforma	Interfaz	Validación	Velocidad procesamiento
SIMENDO	No reportado	2 SIMENDO sin realimentación háptica, 5 GDL [40].	Con 75 cirujanos en [57] y con 61 cirujanos en [40].	No reportado
VBLaST	No reportado	2 Omni Phantom con agarres modificados [58].	Se validó el ejercicio "Peg Transfer" con 35 cirujanos en [58].	Intel Core2 Quad, 2.75 GB de RAM y 2 tarjetas NVIDIA GeForce 8800 GTX. Ciclo de simulación mayor a 1 KHz [58].
SINERGIA	Lenguaje C++. Librería <i>WTK</i> [43].	Immersion Laparoscopic Surgical Workstation, háptica 4GDL [43].	Con 30 estudiantes de medicina en [59], con 20 cirujanos en [60] y con 42 en [61].	No reportado
Empedocles	OpenGL, <i>OpenHaptics</i> [45].	2 Phantom Omni con agarres modificados [45].	No reportado	No reportado
V-Band	SDK Nvidia PhysX [62].	2 Phantom Omni con agarres modificados [48].	No reportado	Intel Core 2 Quad a 2.66 GHz y tarjeta gráfica GeForce 8800 GTX [62].
Lapsim	No reportado	2 Interfaces Lapsim, 5 GDL. Compatible con Xitact IHP y otras interfaces [63].	Con 54 cirujanos en [64], con 34 en [65] y con 49 en [63].	No reportado
LapVR de CAE	No reportado	2 interfaces hápticas CAE de 6 GDL [52].	Con 44 médicos en [66].	No reportado
SEP	No reportado	2 interfaces SEP de 5 GDL sin realimentación háptica [67].	Módulo embarazo ectópico y salpingectomía con 32 médicos [67].	No reportado
LAP Mentor	No reportado	2 LAP Mentor de 5 GDL con o sin realimentación háptica [50].	Con 103 cirujanos en [68], 27 en [69] y 19 en [70].	No reportado
LapX	No reportado	2 LapX de 5 GDL sin realimentación háptica [55].	No reportado	No reportado
Simulador EAFIT-CES	Lenguaje C++. VTK, <i>Open Haptics</i> y GTK [33, 56].	2 Phantom Omni con agarres modificados [56].	No reportado	Intel Core 2 Duo, 2GB de RAM y gráficos NVdia GeForce 8800 GT [56].

La mayoría de los estudios de validación están enfocados a hacer *construct validity*, que es una evaluación enfocada a verificar si el simulador discrimina el nivel de experiencia de los cirujanos, y en general los simuladores comerciales aprueban satisfactoriamente la evaluación. Otro tipo de evaluación frecuente es la *face validity*, que sirve para mirar si las situaciones simuladas se parecen a las de la vida real, y debido a la similitud de los agarres de las interfaces con los instrumentos reales y a la buena calidad gráfica de los escenarios de cirugía, muchos de los simuladores también presentan resultados favorables. Además del *content validity*, que contrasta el nivel de conocimiento de contenido y su ejecución operacional. Sin embargo, en las conclusiones de la mayoría de los estudios se menciona que debe mejorarse aún más la calidad de la realimentación de fuerzas.

En cuanto a la capacidad de procesamiento de las máquinas en las cuales se corrieron los simuladores, la información muestran que hacen uso del mismo tipo de tarjeta gráfica, procesadores multi-núcleo, frecuencias de reloj cercanas, y memorias RAM con capacidades similares. Sin embargo, a pesar que cada simulador recrea diferentes tipos de escenarios y permiten realizar ejercicios distintos entre ellos, en general los resultados de las investigaciones son satisfactorios, lo cual da pie a pensar que con equipos más potentes se podrían obtener mejores resultados siempre y cuando el software haga un uso eficiente de los recursos hardware

VI. CONCLUSIONES

Los estudios indican en buena proporción que aún hay mucho por mejorar en la realimentación háptica, ya que no hay estudios claros dedicados a medir con exactitud las fuerzas implicadas en cirugías laparoscópicas para poder diseñar interfaces que en verdad representen fielmente las sensaciones de la sala de operación, pero debe tenerse en cuenta que no ha sido posible determinar valores exactos de fuerza, debido a la variabilidad en el comportamiento de los instrumentos y herramientas utilizadas para los estudios, por ejemplo, la fricción de una pinza con diferentes trocares tiene distintos valores, lo cual es lógico, pero muchas veces estos valores no son muy cercanos entre ellos, lo cual introduce un problema adicional para el modelado y la estimación.

Si bien los grupos de investigación realizan aproximaciones aceptables de simuladores de cirugía utilizando interfaces hápticas de propósito general, estos simuladores aún están incompletos y muchos de ellos no están validados para uso comercial. Sin embargo, permiten alimentar la idea de obtener un simulador aceptable con recursos hardware de costo moderado, ya que el principal inconveniente

de los simuladores comerciales es su elevado costo, que en general está entre 20000 y 150000 USD.

El elemento que más necesita aportes de investigación y desarrollo en los actuales simuladores virtuales de cirugía laparoscópica es el realismo del contacto experimentado con las interfaces hápticas y el comportamiento de los tejidos y órganos simulados cuando el usuario interactúa con ellos.

Para la realimentación es necesario seguir desarrollando proyectos de investigación para obtener interfaces con mayor transparencia mecánica, mayores fuerzas de realimentación y mejor similitud con los instrumentos reales, además de algoritmos para manejar eficientemente los recursos computacionales de modo que las sensaciones deseadas se puedan obtener en tiempo real, que es una característica muy importante para no percibir la diferencia entre la simulación y la realidad.

Se estudiaron diferentes tipos de simuladores virtuales útiles para el entrenamiento en cirugía laparoscópica y se observó que la mayoría de ellos usan ejercicios de la FLS o similares como base para el aprendizaje, y algunos más especializados, especialmente los comerciales, permiten realizar tareas específicas de algunas cirugías en particular.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo recibido por parte del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS) a través de su programa de Formación de Jóvenes Investigadores y a la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

REFERENCIAS

- [1]. Jaffray B. Minimally Invasive Surgery. *Archives of disease in childhood*. 90, 537–42, 2005.
- [2]. García J. Arias M. Valencia E. Diseño de prototipo de simulador para entrenamiento en cirugía laparoscópica. *Revista Ingeniería Biomédica* 5, 13–19, 2011.
- [3]. Anderegg C., Archibald K., Bailey J., Cohen M., Kaufman S., Pippin J.A critical look at animal experimentation. Medical Research Modernization Committee, 2006.
- [4]. Tsuda S., Scott D., Doyle J., Jones D.B. Surgical skills training and simulation. *Current Problems in Surgery*, 46, 271–370, 2009.
- [5]. Fundación INSIMED. Curso Básico: Habilidades en laparoscopia. Consultado el 1 de marzo de 2016 en: <http://www.insimed.org/pdf/Laparoscopico%20Basico.pdf>
- [6]. Zendejas B., Brydges R., Hamstra S., Cook D. State of the Evidence on Simulation-Based Training for Laparoscopic Surgery. *Annals of Surgery*, 257, 586-593, April, 2013.
- [7]. Beltrán Guáqueta V.A., Hernández Perilla D.L. Impacto del entrenamiento con simuladores de laparoscopia dentro del programa de cirugía general: Universidad del Rosario. Tesis de Grado, Especialistas en Cirugía, General, Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario, 2013.

- [8]. Fundamentals of Laparoscopic Surgery. Bulletin of information. 1–6, 2012.
- [9]. Fundamentals of Laparoscopic Surgery. FLS Manual Skills Written Instructions and Performance Guidelines. 2012.
- [10]. Henao O., Escallón J., Green J., Farcas M., Sierra J.M., Sánchez W., Okrainec A. Fundamentos de cirugía laparoscópica en Colombia empleando telesimulación: una herramienta adicional para la formación integral de cirujanos. *Biomédica* 33, 1, 24, 2013.
- [11]. Sroka G., Feldman L., Vassiliou M., Kaneva P., Fayez R., Fried G. Fundamentals of laparoscopic surgery simulator training to proficiency improves laparoscopic performance in the operating room—a randomized controlled trial. *The American Journal of Surgery*. 199, 115–20, 2010.
- [12]. Fried G.M., Feldman LS, Vassiliou MC, Fraser SA, Stanbridge D, Ghitulescu G, Andrew CG. Proving the Value of Simulation in Laparoscopic Surgery. *Ann. Surg.* 240, 518–528, 2004.
- [13]. Fundamentals of Laparoscopic Surgery. Fundamentals of Laparoscopic Surgery - Technical Skills Proficiency-Based Training Curriculum. 1–5, 2012.
- [14]. Pinto Salamanca M.L. Análisis e implementación de una interfaz háptica en entornos virtuales. Tesis, Maestría en Ingeniería – Automatización Industrial, UNAL, 2009.
- [15]. MPB Technologies Inc. How do you choose a haptic device? (2006). Consultado el 2 de Noviembre de 2013 en: http://www.mpb-technologies.ca/mpbt/mpbt_web_2009/_en/resources/articles/How%20do%20you%20choose%20a%20haptic%20device.pdf
- [16]. Hamza-lup F.G., Bogdan C.M., Popovici D.M., Costea O.D.A Survey of Visuo-Haptic Simulation in Surgical Training. *Third International Conference Mobile, Hybrid On-line Learn.* 57–62, 2011.
- [17]. Vélez Escorial A. Diseño mecánico de un interfaz háptica para realidad virtual. Proyecto fin de Carrera, Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [18]. Berkley J.J. Haptic Devices. White Paper by Mimic Technologies Inc. 1–4, 2003.
- [19]. Astley O.R., Hayward, V. Design Constraints for Haptic Surgery Simulation. *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, San Francisco, CA, 2446–2451, 2000.
- [20]. Sensable Technologies Inc. Specifications for the PHANTOM Desktop and PHANTOM Omni haptic devices, 2009.
- [21]. Sensable Technologies Inc. Specifications for the PHANTOM Premium 3.0/6DOF Haptic Device, 2009.
- [22]. Sensable Technologies Inc. Specifications Comparison for the PHANTOM Premium 1.5/6 DOF & 1.5 High Force/6DOF Haptic Devices, 2009.
- [23]. Sensable Technologies Inc. Sensable Phantom 7 DOF Option Brochure, 2007.
- [24]. Coles T.R. Investigating Augmented Reality Visio- Haptic Techniques for Medical Training, PhD Thesis, Bangor University, 2011.
- [25]. Novint Inc. Novint - Gaming & Consumer Products, 2013.
- [26]. Demers J.S., Boelen, J.M.A., Sinclair I.P.W. Freedom 6S Force Feedback Hand Controller. *SPRO'98 1st IFAC Workshop on Space Robotics*. Montreal, Canada. October, 1998.
- [27]. Force Dimension. delta.x haptic devices. 2010.
- [28]. Force Dimension. omega.x haptic devices. 2010.
- [29]. Force Dimension. sigma.7 haptic device. 2010.
- [30]. Quanser. HAPTICS & ROBOTICS 5-DOF Haptic Wand. 1, 1–2, 2008.
- [31]. Mentice AB. Xitact IHP - Instrument Haptic Port. 2007.
- [32]. Mentice AB. Xitact ITP - Instrument Tracking Port. 2007.
- [33]. Diaz C.A., Posada D., Trefftz H., Bernal J. Development of a Surgical Simulator to training Laparoscopic procedures. *International Journal of Education and Information Technologies*, 2, 95–103, 2008.
- [34]. Shin W., Ko S., Kim J., Kwon D. Development of a 5-DOF Laparoscopic Assistant Robot. *International Journal of ARM*, 7, 21–28, 2006.
- [35]. Direkwatana C. Workspace Analysis for A New Design Laparoscopic Robotic Manipulator, “MU-LapaRobot1.” *20th National Grad Research Conference*, Mahidol University, Salaya, Febraury, 2011.
- [36]. Picod G., Jambon a C., Vinatier D., Dubois P. What can the operator actually feel when performing a laparoscopy? *Surgical Endoscopy*, 19, 95–100, 2005.
- [37]. Westebring-van der Putten E.P., Goossens R.H.M., Jakimowicz, J.J., Dankelman J. Haptics in minimally invasive surgery—a review. *Minim. Invasive Ther. Allied Technol.* 17, 3–16, 2008.
- [38]. Chmarra M.K., Dankelman J., van den Dobbelen J.J., Jansen F.W. Force feedback and basic laparoscopic skills. *Surg. Endosc.* 22, 2140–8, 2008.
- [39]. Våpenstad C., Hofstad E.F., Lango T., Mårvik R., Chmarra M.K. Perceiving haptic feedback in virtual reality simulators. *Surg. Endosc.* 27, 7, 2391–7, 2013.
- [40]. Verdaasdonk E.G.G., Stassen L.P.S., Schijven M.P., Dankelman J. Construct validity and assessment of the learning curve for the SIMENDO endoscopic simulator. *Surg. Endosc.* 21, 1406–12, 2007.
- [41]. Maciel A., Liu Y, Ahn W, Singh T.P., Dunnican W, De S. Towards a virtual basic laparoscopic skill trainer (VBLAST). *Stud. Health Technol. Inform.* 132, 275–80, 2008.
- [42]. Zhang L., Grosdemouge C., Arikatla V.S., Ahn W, Sankaranarayanan G, Jones D, Schwaizberg S, Cao C.G. The Added Value of Virtual Reality Technology and Force Feedback for Surgical Training Simulators. *Work A J. Prev. Assess. Rehabil.* 21, 2288–2292, 2012.
- [43]. Lamata P., Gómez E.J., Sánchez-Margallo F.M., López O., Monserrat C., García V., Alberola C., Florido M.A., Ruiz J., Usón J. SINERGIA laparoscopic virtual reality simulator: didactic design and technical development. *Comput. Methods Programs Biomed.* 85, 273–83, 2007.
- [44]. Consorcio OPENSURG. Robótica Médica: Notas prácticas para el aprendizaje de la robótica en bioingeniería. CYTED, 2013.
- [45]. Mckenna K., Mckenemy K., Ferguson R. S., Dick A., Potts S. Enhancing the Immersive Reality of Virtual Simulators for Easily Accessible Laparoscopic Surgical Training. *Proc. of the International Society for Optical Engineering*. San Jose California, United States. January, 2008.
- [46]. Bisharat M., Ferguson R.S., Dick, A.C. The Use of Laparoscopic Simulators in Paediatric Surgical Training: a Pilot Study. *Br. Assoc. Pediatr. Surg. Congr.* 1, 2009.
- [47]. Pan J.J., Chang J., Yang X., Zhang J.J. A Medical VR Simulator in Laparoscopic Rectum Surgery. *CyberTherapy Rehabil.* 4, 19–20, 2011.
- [48]. Sankaranarayanan G, Adair J.D., Halic T., Gromski M.A., Lu Z., Ahn W., Jones D.B., De S. Validation of a novel laparoscopic adjustable gastric band simulator. *Surg. Endosc.* 25, 1012–8, 2011.
- [49]. Surgical Science. LapSim. Virtual Training - Proven Results. 2013.
- [50]. Symbionix. LAP Mentor. 2012.

- [51]. CAE Healthcare. LapVR Surgical Simulator. 2012.
- [52]. CAE Healthcare. LapVR Administrator's Guide. 2012.
- [53]. Våpenstad C., Buzink S.N. Procedural virtual reality simulation in minimally invasive surgery. *Surg. Endosc.* 27, 2, 364-77, 2013.
- [54]. SimSurgery. SEP - Surgical Simulation Platform. 2011.
- [55]. Epona. LAP X Training for perfection. 2011.
- [56]. Díaz C., Trefftz H., Bernal J., Eliuk S. General algorithms for laparoscopic surgical simulators. *Revista Ingeniería Biomédica* 4, 57-70, 2010.
- [57]. Verdaasdonk E.G.G., Stassen L.P.S., Monteny L.J., Dankelman J. Validation of a new basic virtual reality simulator for training of basic endoscopic skills: the SIMENDO. *Surg. Endosc.* 20, 511-8, 2006.
- [58]. Arikatla V.S., Sankaranarayanan G, Ahn W., Chellali A., De S., Caroline G.L., Hwabejire J., DeMoya M., Schwaitzberg S., Jones D.B. Face and construct validation of a virtual peg transfer simulator. *Surg. Endosc.* 27, 5, 1721-9, 2013.
- [59]. Sánchez-Peralta L.F., Sánchez-Margallo F.M., Moyano-Cuevas J.L., Pagador J.B., Enciso S., Gómez-Aguilera E.J., Usón-Gargallo J. Learning curves of basic laparoscopic psychomotor skills in SINERGIA VR simulator. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* 7, 881-9, 2012.
- [60]. Sánchez-Peralta L.F., Sánchez-Margallo F.M., Moyano-Cuevas J.L., Pagador J.B., Enciso-Sanz S., Sánchez-González P., Gómez-Aguilera E.J., Usón-Gargallo J. Construct and face validity of SINERGIA laparoscopic virtual reality simulator. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* 5, 307-15, 2010.
- [61]. Moyano-Cuevas J.L., Sánchez-Margallo F.M., Sánchez-Peralta L.F., Pagador J.B., Enciso S., Sánchez-González P., Gómez-Aguilera E.J., Usón-Gargallo J. Validation of SINERGIA as training tool: a randomized study to test the transfer of acquired basic psychomotor skills to LapMentor. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* 6, 839-46, 2011.
- [62]. Maciel A., Halic T., Lu Z., Nedel L., De S. Using the PhysX engine for Physics-based Virtual Surgery with Force Feedback. *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg.* 5, 341-353, 2009.
- [63]. Våpenstad C., Hofstad E.F., Bø L.E., Chmarra M.K., Kuhry E., Johnsen G., Mårvik R., Langø T. Limitations of haptic feedback devices on construct validity of the LapSim(®) virtual reality simulator. *Surg. Endosc.* 27, 4, 1386-96, 2012.
- [64]. Duffy A.J., Hogle N.J., McCarthy H., Lew J.I., Egan A., Christos P., Fowler D.L. Construct validity for the LAPSIM laparoscopic surgical simulator. *Surg. Endosc.* 19, 401-5, 2005.
- [65]. Woodrum D.T., Andreatta P.B., Yellamanchilli R.K., Feryus L., Gauger P.G., Minter R.M. Construct validity of the LapSim laparoscopic surgical simulator. *Am. J. Surg.* 191, 28-32, 2006.
- [66]. Iwata N., Fujiwara M., Kodera Y., Tanaka C., Ohashi N., Nakayama G., Koike M., Nakao A. Construct validity of the LapVR virtual-reality surgical simulator. *Surg. Endosc.* 25, 423-8, 2011.
- [67]. Hessel M., Buzink S.N., Schoot D., Jakimowicz J.J. Face and Construct Validity of the SimSurgery SEP VR Simulator for Salpingectomy in Case of Ectopic Pregnancy. *J. Gynecol. Surg.* 28, 411-417, 2012.
- [68]. McDougall E.M., Corica F.A., Boker J.R., Sala L.G., Stoliar G., Borin J.F., Chu F.T., Clayman R.V. Construct validity testing of a laparoscopic surgical simulator. *J. Am. Coll. Surg.* 202, 779-87, 2006.
- [69]. Zhang A., Hünerbein M., Dai Y., Schlag P.M., Beller S. Construct validity testing of a laparoscopic surgery simulator (Lap Mentor): evaluation of surgical skill with a virtual laparoscopic training simulator. *Surg. Endosc.* 22, 1440-4, 2008.
- [70]. Andreatta P.B., Woodrum D.T., Birkmeyer J.D., Yellamanchilli R.K., Doherty G.M., Gauger P.G., Minter R.M. Laparoscopic skills are improved with LapMentor training: results of a randomized, double-blinded study. *Ann. Surg.* 243, 854-63, 2006.
- [71]. Park B. Development of a Virtual Reality Excavator Simulator: a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology. PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.