

## ARTICULOS DE POSICIÓN

### Cirugía robótica: ¿una tecnología disruptiva?

### Robotic surgery: a disruptive technology?

---

Rafael Torres Peña.<sup>1</sup>

I. Centro Nacional de Cirugía de Mínimo Acceso, La Habana, Cuba.

Correo: [rafael.torres@infomed.sld.cu](mailto:rafael.torres@infomed.sld.cu)

---

#### RESUMEN

El objetivo del artículo es brindar a los directivos de salud una información detallada del desarrollo de la cirugía robótica y las estrategias empleadas por las compañías para su inserción en los sistemas de salud. La robótica aplicada a la cirugía ha sido considerada como una de las 10 tecnologías que ha tenido mayor impacto durante el 2018. Su inserción en la disciplina quirúrgica ha seguido una estrategia disruptiva, en la que el elevado costo ha sido su elemento más contradictorio, el cual ha influido de forma negativa en la decisión de adquirirla por parte de los sistemas de salud y en el posicionamiento de las sociedades científicas, las que en sus declaraciones de consenso han sido cautelosas en su asimilación, en tanto no se obtengan las evidencias necesarias de su costo-efectividad. Sin embargo, aunque más de 30 años no han sido suficientes para dejar obsoletas y desplazar a las tecnologías quirúrgicas precedentes, la robótica jugará un papel cada vez mayor en el desarrollo de la cirugía. Los quirófanos del futuro constarán de sistemas integrados de información en el que todos sus elementos estarán basados en información, y los robots quirúrgicos serán solo un componente. En este contexto, ni la cirugía convencional ni la laparoscópica podrán ser controladas íntegramente por el sistema, mientras que los robots si son considerados como sistemas de información totalmente controlados por computadora.

**Palabras clave:** cirugía robótica, tecnología disruptiva, Da Vinci

---

#### ABSTRACT

The aim of the lecture was to show to the health executive's detailed information about the development of robotic surgery and the strategy adopted by companies to introduce it on the health systems. Robotic applied to surgery has been considered one of the 10 more impacting technologies during 2018. Its insertion in the discipline of surgery has followed a disruptive strategy, nevertheless the high cost has been the most contradictory element. This had a negative influence on the decision of the health systems to purchase it and on the consensus statements done by scientific societies, who have been cautious until the robotic surgery shows the required evidences of the cost-effectiveness. Nevertheless, although 30 years have not been enough to consider the preceding surgical technologies obsolete or displace them, robotics will play an even greater role in the development of surgery. The operating rooms of the future will have integrated systems in which all of its elements will be based on information and surgical robots will be only a simple component. In this framework, total integration of the

conventional or laparoscopic surgery will not be possible. Conversely, the robots are indeed considered information systems completely controlled by computer.

**Key word:** robotic surgery, disruptive technology, Da Vinci

---

**Conflicto de intereses:** El autor declara que no existen conflictos de intereses

---

## INTRODUCCIÓN

Las últimas dos décadas del siglo XX y las transcurridas del siglo actual, han sido testigos de una acelerada revolución tecnológica, que ha impactado en todas las esferas de la humanidad. El desarrollo de las tecnologías de la computación, la electrónica, el vídeo y las telecomunicaciones, entre otras, han sido pilares fundamentales que han contribuido al cambio progresivo que se establece del paradigma del siglo XX (industrial) al del siglo XXI, conocido como siglo de la información, donde las tecnologías sustentadas en átomos son sustituidas por tecnologías donde los *bits* juegan un papel fundamental.

Como consecuencia, el impacto en la medicina ha sido impresionante. Uno de los primeros saltos cualitativos experimentados fue el desarrollo de la cirugía mínimamente invasiva, con la realización de la primera colecistectomía laparoscópica a finales de la década de los 80. A partir de entonces, muchos procedimientos quirúrgicos estandarizados comenzaron a transitar aceleradamente hacia un nuevo estándar, debido a las evidentes ventajas que se asociaron a una mínima invasión.<sup>1</sup> No obstante, este nuevo paradigma fue considerado prácticamente desde sus inicios, como un paradigma de transición,<sup>2</sup> con una duración estimada de aproximadamente la mitad del paradigma Halstediano de la cirugía convencional, debido al acelerado avance tecnológico y fundamentalmente a la incongruencia de esta tecnología con el desarrollo de los sistemas integrados de información, pues aunque el cirujano recibe la retroalimentación digital a través del monitor de vídeo, la interfaz operatoria continúa siendo mecánica e instrumentada de forma directa. Desventajas de la cirugía laparoscópica, tales como la magnificación del temblor de las manos del cirujano y la pérdida de la maniobrabilidad, sensación táctil e imagen tridimensional, fueron las áreas de desarrollo aprovechadas por la robótica para emerger en esta esfera como una tecnología disruptiva.

El presente artículo persigue como objetivo brindar a los directivos de salud una información detallada del desarrollo de la cirugía robótica y las estrategias empleadas por las compañías para su inserción progresiva en los sistemas de salud.

## DESARROLLO

La cirugía robótica ha sido definida por la SAGES (*Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons*) como un procedimiento quirúrgico realizado con tecnología que facilita la interacción entre el cirujano y el paciente donde la capacidad del robot de repetir tareas con precisión, corregir las deficiencias humanas y potenciar sus habilidades ha sido la base de su éxito.<sup>3</sup>

Sus ventajas y desventajas han sido enunciadas en numerosos artículos.<sup>4-6</sup> Las primeras pudieran resumirse en el incremento de la precisión quirúrgica, dado por:

- El control total del procedimiento por el cirujano, sin necesidad de depender de asistentes que manipulen el endoscopio u otros instrumentos, tal y como ocurre en la cirugía laparoscópica.
- El empleo de instrumentos articulados que incrementan hasta siete grados su maniobrabilidad.
- Una visión de inmersión en el campo quirúrgico, con una imagen tridimensional magnificada y de alta definición.
- El filtrado del tremor de las manos del cirujano.
- En términos ergonómicos, la realización del procedimiento desde una consola en la posición de sentado, reduce considerablemente la sensación de cansancio del cirujano.
- La comunicación con bases de datos electrónicas y redes de comunicación, potencializa las posibilidades de tele-asesoría en tiempo real y el acceso a registros médicos.

Mientras que su desventaja fundamental se relaciona con el elevado costo de la tecnología.

#### Evolución histórica

El primer prototipo de robot quirúrgico utilizado en la práctica clínica fue el PUMA 560®, mediante el cual Kwoh realizó en 1985, biopsias neuroquirúrgicas guiadas por un haz de rayos láser.<sup>7</sup>

En 1988, Davies reporta el uso de un robot durante una resección transuretral de la próstata,<sup>8</sup> desarrollado en el Imperial College y que en su segunda versión, conocida como PROBOT, disponía de una probeta ultrasónica para medir y reconstruir tridimensionalmente la glándula, y que permitía al cirujano definir los trayectos de corte que posteriormente realizaba el robot con su dispositivo para remover el tejido prostático, lo cual se considera como la verdadera primera cirugía robótica en la práctica clínica.<sup>9</sup>

Años más tarde, en 1992, la corporación IBM desarrolló ROBODOC® que realizaba un vaciado del fémur y posterior colocación de la prótesis, basado en datos aportados por imágenes tomográficas del propio paciente, lo cual mejoró la precisión del procedimiento de un 75% al 96%.<sup>4,1)</sup> Este fue el primer robot aprobado por la FDA (*Food and Drug American Administration*).

Estos sistemas constituían verdaderos robots que ejecutaban su trabajo de forma autónoma y controlado solo por supervisión. Sin embargo, las preocupaciones relacionadas con la seguridad del paciente limitaron la expansión de la tecnología hasta que fue incorporado el concepto de tele-robótica, capaz de proporcionar al cirujano la posibilidad de manipular el brazo robotizado a distancia, surgiendo a partir de esos momentos los robots tele-manipulados.

En 1994, Computer Motion (Santa Bárbara, CA, EEUU), diseñó AESOP® (*Advanced Endoscopio System for Optimal Positioning*) (Fig. 1), un brazo robótico asociado a una cámara laparoscópica, manipulada inicialmente mediante un mando manual o por pedal, y que posteriormente evolucionó a un control por mando de voz, llegando a obtener rangos de movimiento que simulaban el de la mano. Este fue el primer robot aprobado por la FDA para intervenciones abdominales, el cual facilitó el desarrollo de la *solo-surgery*, al prescindir del ayudante que manipula la óptica, y sentó la base del desarrollo futuro, al proveer una plataforma significativamente estable en comparación con la cirugía laparoscópica.<sup>11-13</sup>

Figura 1. AESOP®.



Otros robots para manipular la óptica fueron subsecuentemente desarrollados, tales como ENDOASSIST (*Armstrong Healthcare Ltd, United Kingdom*), que controla el movimiento de la cámara mediante el uso de rayos infrarrojos dirigidos desde la cabeza del cirujano,<sup>14</sup> o el SGRCCS, una modificación de AESOP desarrollada por cirujanos alemanes, en el que la cámara sigue un marcador de color colocado en la punta de un instrumento laparoscópico.<sup>15</sup> Sin embargo, la necesaria participación de un asistente en la mayoría de las intervenciones, lo cual tiene especial importancia en los hospitales dedicados a la enseñanza, ha limitado el uso de estos robots.

Esto aceleró la evolución hacia una nueva etapa: la cirugía tele-robótica, en la que el cirujano, desde una consola distante, traslada los gestos de sus manos hacia los brazos robotizados, y recibe la información digital de retorno (generalmente tridimensional) de los gestos realizados, convirtiendo a los brazos en tele-manipuladores esclavos. Con este nuevo concepto se superaban así otras dos barreras de la cirugía laparoscópica: la imagen bidimensional y la ergonomía del cirujano durante las intervenciones.

Surgen así, casi de forma simultánea los sistemas ARTEMIS, desarrollado por Buess y cols. en Alemania.<sup>16</sup> ZEUS desarrollado por Computer Motion y Da Vinci por Intuitive Surgical Inc.<sup>13</sup>

ZEUS fue lanzado al mercado en 1998. Constaba de una mesa operatoria con tres brazos tele-comandados, uno de los cuales era AESOP y una consola situada a distancia desde donde el cirujano ergonómicamente posicionado controlaba los brazos. (Fig.2) El sistema pasó cuatro generaciones de desarrollo, y en su versión más acabada disponía de mando de voz, imagen tridimensional, instrumentos con 6 grados de libertad y filtrado del tremor de las manos del cirujano en una escala de hasta 10:1. Fue desarrollado específicamente para realizar cirugías cardíacas, por lo que muchos de los reportes clínicos iniciales fueron en esta área, con especial énfasis en el *bypass* coronario con arteria mamaria interna.<sup>13</sup> Con este sistema Marescaux realizó en septiembre del 2001 una colecistectomía desde Nueva York en una paciente ingresada en Estrasburgo, a 7000 km de distancia, constituyendo el primer procedimiento transatlántico, denominado operación Lindbergh.<sup>17</sup>

Figura 2. ZEUS®.



Sus limitaciones, relacionadas con la necesidad del uso de espejuelos especiales para la visión tridimensional, que generan fatiga en el cirujano, y los conflictos de colisión entre los instrumentos si los trócares no son adecuadamente posicionados, contribuyeron a que su aprobación por la FDA en el 2001, estuviera limitada a su uso como asistente quirúrgico. En espera de obtener la aprobación como cirujano, y después de un largo litigio relacionado con violaciones mutuas de propiedad intelectual, la compañía fue comprada en junio de 2003 por Intuitive Surgical Inc. (*Mountain View, Sunny Valley, California, EEUU*), con lo cual se suspendió el soporte y la producción comercial de ZEUS.<sup>18, 19</sup>

Esta compañía, venía desarrollando de forma simultánea su plataforma robótica. Los ensayos clínicos iniciales fueron realizados con un primer prototipo llamado Mona y con el que Cadiere realizó una primera colecistectomía en marzo del 1997, en el Hospital Saint-Blasius, Bélgica<sup>20</sup> y las primeras dos funduplicaturas de Nissen en el Hospital Broussais, París en 1998.<sup>21</sup> Basado en las experiencias de estos ensayos, la versión comercial final vio la luz en 1999, con el nombre de Da Vinci, en honor al gran inventor.

Al igual que ZEUS, Da Vinci® fue diseñado originalmente para realizar la cirugía cardíaca a tórax cerrado, fundamentalmente el *bypass* coronario con arteria mamaria interna y la cirugía mitral. Los primeros ensayos clínicos fueron realizados en París y Leipzig en mayo del 1998 y la primera cirugía exitosa de este tipo fue reportada por Carpentier en 1999.<sup>13,22</sup>

A partir de entonces fueron incorporándose nuevos procedimientos, que incluyeron cirugías del hiato esofágico, esofagectomías, gastrectomías, colectomías, rectopexias, suprarrenalectomías, histerectomías y reanastomosis tubáricas, entre otros. También los urólogos encontraron tempranamente importantes ventajas en el uso de Da Vinci® en la prostatectomía radical y la nefrectomía, debido a la maniobrabilidad que ofrecen los instrumentos articulados durante la anastomosis de la uretra a la vejiga.<sup>9,13</sup>

Como consecuencia de estos resultados, Da Vinci® obtuvo en julio del 2000 la aprobación de la FDA para realizar cirugías de la vesícula, reflujo gastroesofágico y ginecológicas, a lo que siguió en los meses siguientes nuevas aprobaciones, para otros procedimientos quirúrgicos abdominales y torácicos, incluyendo la disección de la arteria mamaria interna, no así para las cirugías cardíacas.<sup>13</sup>

En la actualidad es el robot quirúrgico más desarrollado y ampliamente utilizado. Su versión original: el Da Vinci Standard, constaba de tres elementos: una consola, la columna de visión y el carro móvil. La consola permite al cirujano controlar mediante dos mandos de mano y varios pedales, los brazos robotizados, lo cual realiza desde una ergonómica posición de sentado, mientras que observa una imagen tridimensional en un ambiente de inmersión total, apoyado en un visor binocular que lo aísla del mundo exterior. La columna de visión contiene los componentes de vídeo (dos cámaras que proporcionan la visión tridimensional), el equipo de procesamiento de imágenes, la fuente de luz, el insuflador de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), entre otros, y que proporcionan al cirujano toda la información. El carro móvil sostiene los tres brazos articulados del robot, que reproducen los movimientos transmitidos del cirujano al paciente. Los instrumentos colocados en cada brazo son articulados en su extremo distal lo que les confiere 7 grados de libertad de movimiento y con ello una maniobrabilidad muy superior a los instrumentos laparoscópicos.

El sistema se descomercializó en el 2007 al aparecer una nueva versión de desarrollo (2006): Da Vinci S, cuya principal innovación fue la reducción del tamaño y motorización del carro, lo que le permitió un desplazamiento más fácil en el quirófano, además de otras novedades como la incorporación de una fuente de luz de Xenón de alta intensidad y el modo de imagen Tile Pro<sup>®</sup>, para permitir al cirujano visualizar en su pantalla estudios realizados previamente al paciente en un modo de multi-imágenes.

En 2009, vio la luz una tercera generación del sistema: Da Vinci Si. Sus innovaciones más relevantes fueron: la disminución del peso y tamaño de la endocámara, disminución del tamaño de la consola, la posibilidad de incorporar una segunda consola al sistema para otro cirujano, incorpora un cuarto brazo, e introduce las plataformas: puerto único, sellador de vasos, endograpadora, fluorescencia y simulador virtual. En 2010 apareció el Si-e, una versión básica del Si, con solo tres brazos robóticos.<sup>23</sup> (Fig.3)

La cuarta generación: Da Vinci Xi, apareció en abril del 2014, en la que la combinación de una plataforma móvil con la funcionalidad de un sistema de brazos quirúrgicos suspendidos, le permiten al sistema colocarse en cualquier posición alrededor del paciente y acceder a cualquier cuadrante abdominal. Se disminuye el volumen de los brazos y se le incorporan nuevas articulaciones, lo que les confiere mayor maniobrabilidad, el endoscopio puede ser colocado en cualquiera de los brazos, y los ejes de los instrumentos se alargan para un mayor alcance.

En enero del 2016, una nueva versión fue aprobada por la FDA para procedimientos laparoscópicos de cirugía general, urología y ginecología: el Da Vinci Xi con mesa operatoria integrada, en el cual se combina la tecnología del Da Vinci Xi con la mesa operatoria 7000dV de Trumpf Medical's TruSystem<sup>®</sup>, lo que permite que el paciente pueda ser reposicionado mientras el cirujano opera, sin necesidad de desatracar los puertos de los brazos del tele-manipulador.<sup>24</sup>

Figura 3. Da Vinci Si-e.



Hasta hace poco, las cuatro últimas generaciones comerciales del Da Vinci, habían sido los únicos sistemas robotizados aprobados por la FDA, que había demostrado las ventajas de dicha tecnología. Sin embargo, recientemente han sido aprobado dos nuevos sistemas de otras compañías: el *Flex Robotic Colorectal System*, de Medrobotics y el *Senhance Surgical Robotic System*, de TransEnterix Surgical, Inc.

Hasta hace poco, los sistemas Da Vinci, habían sido los únicos que habían demostrado las ventajas de dicha tecnología, y en consecuencia aprobados por la FDA. Sin embargo, recientemente han sido aprobados dos nuevos sistemas de otras compañías: el *Flex Robotic Colorectal System*, de Medrobotics y el *Senhance Surgical Robotic System*, de TransEnterix Surgical, Inc.

El sistema robótico de Medrobotics, fue aprobado en mayo del 2017 para la visualización y asistencia quirúrgica de la región anal, recto y colon distal. Por su parte, el sistema Senhance fue aceptado en octubre 2017 para procedimientos laparoscópicos ginecológicos y colorrectales y sus novedades incluyen el control de la cámara con el movimiento de los ojos, la retroalimentación háptica y el uso de trocares laparoscópicos convencionales e instrumental no articulado.<sup>25,26</sup>

### La cirugía robótica: ¿innovación disruptiva?

El término de tecnología disruptiva fue empleado por primera vez en 1995, por Clayton M. Christensen, en su artículo "Disruptive Technologies: Catching the Wave". Desde entonces se emplea con una frecuencia cada vez mayor, y designa a aquella innovación que deja obsoleta y desplaza, en unos pocos años o décadas, a una tecnología anterior, y para lo cual emplea una estrategia de disrupción, al diseñar el producto primero para un mercado denominado de no-consumo formado por un conjunto diferente de consumidores, generalmente menos exigentes y menos rentables. Progresivamente la tecnología es mejorada y reduce sus precios con lo cual comienza a ocupar los espacios a los que la tecnología establecida va renunciando, hasta hacerse con la mayor cuota del mercado existente.<sup>27,28</sup>

En una recopilación de informes sobre las tendencias tecnológicas que más crecerían en 2018, elaborados por prestigiosas consultoras y universidades como: Gartner, IDC, Forbes, Harvard o el MIT; la robótica aplicada a la cirugía ha sido considerada como una de las 10 tecnologías disruptivas que tendría mayor impacto, junto a la inteligencia artificial, la cadena de bloques (*blockchain*), la realidad aumentada, los taxis autónomos y el internet de las cosas (*IoT: Internet of Things*), entre otras.<sup>29</sup>

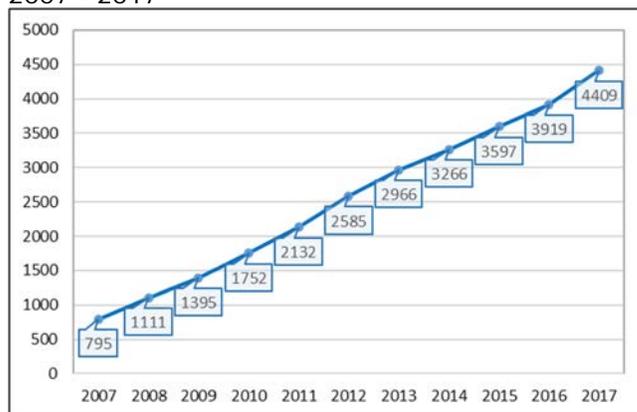
Más de 30 años de evolución no han sido suficientes a la cirugía robótica para dejar obsoletas y desplazar a las tecnologías quirúrgicas precedentes. Sin embargo, en la estrategia empleada por la misma para insertarse en el mercado han existido muchos elementos de disrupción.

A partir de la comprensión de que su desarrollo estaría condicionado por la seguridad del paciente, y con ello la introducción de sistemas robotizados tele-manipulados por el cirujano desde una consola distante, la tecnología se dirigió al inicio solo hacia un pequeño sector quirúrgico altamente demandante de tecnología: la cirugía cardiovascular de injerto del *bypass* coronario. Posteriormente se puso en manos de algunos cirujanos pioneros en cirugía laparoscópica, a partir de lo cual se ha ido mejorando progresivamente.

Otro elemento a tener en consideración ha sido el férreo control de la propiedad intelectual por parte de unas pocas compañías, lo que les ha permitido el dominio casi absoluto del mercado. Un ejemplo claro lo constituye Intuitive Surgical Inc., la que primero adquirió a su mayor competidor, Computer Motion, y luego ha introducido a su robot las mejoras progresivas de forma controlada, lo que le ha permitido contar con la aprobación comercial en los Estados Unidos de cada una de las versiones del sistema Da Vinci.

La estrategia de comercialización de esta compañía ha estado enfocada fundamentalmente hacia las economías altamente desarrolladas. De acuerdo a sus reportes anuales, a finales del 2002 habían sido comercializados los primeros 40 sistemas, los cuales fueron instalados en los Estados Unidos, donde la necesidad de aprobación por la FDA significó un aval de importancia, y en menor cuantía en Europa. En los años subsiguientes los niveles de venta se elevaron de forma exponencial, apuntando igualmente a los Estados Unidos y Europa y en menor cuantía al resto del mundo. (Gráfico 1)

Gráfico 1. Robots Da Vinci® instalados en el mundo. 2007 - 2017



Fuente: Intuitive Surgical Annual Reports<sup>(30)</sup>

En 2010 la compañía realiza una primera venta de 13 robots a Japón luego de su aprobación por las autoridades competentes en este país, lo cual significó un paso importante en su afán de expandir la tecnología. A partir de 2012 la estrategia comercial, en concordancia con una sistemática disruptiva, se abrió cada vez más a nuevos mercados en otros países, lo cual se ilustra de manera elocuente en el Gráfico 2, que muestra una tendencia creciente en el porcentaje de robots instalados en el resto del mundo, en relación con los Estados Unidos y Europa. En diciembre del 2017,

de 4409 robots instalados, 2862 estaban en los EEUU, 742 en Europa y 805 en países del resto del mundo, lo que significó un incremento de hasta un 18% en estos últimos, en los que la mayor parte se concentraban en Asia: Japón, Corea y China.<sup>30</sup>

Gráfico 2. Robots Da Vinci® instalados, según región. 2007 – 2017

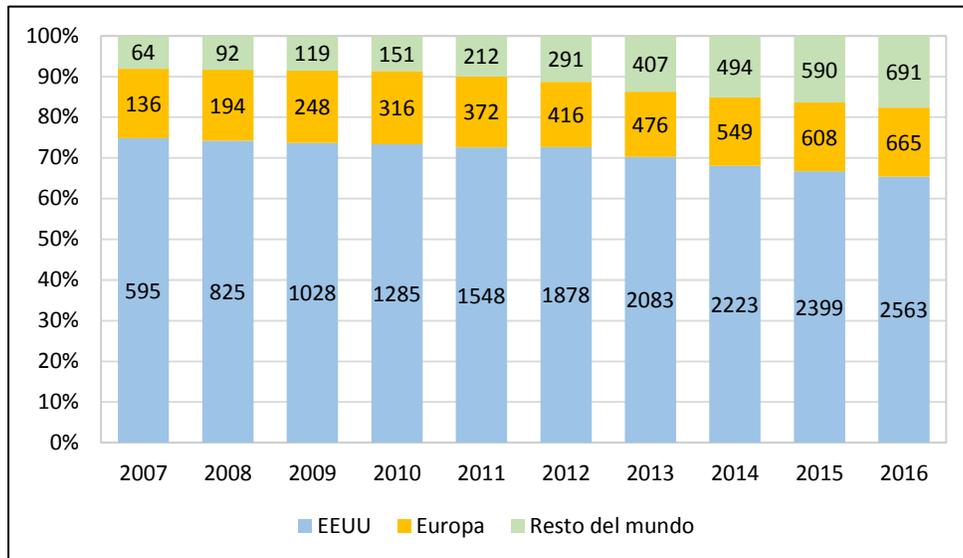
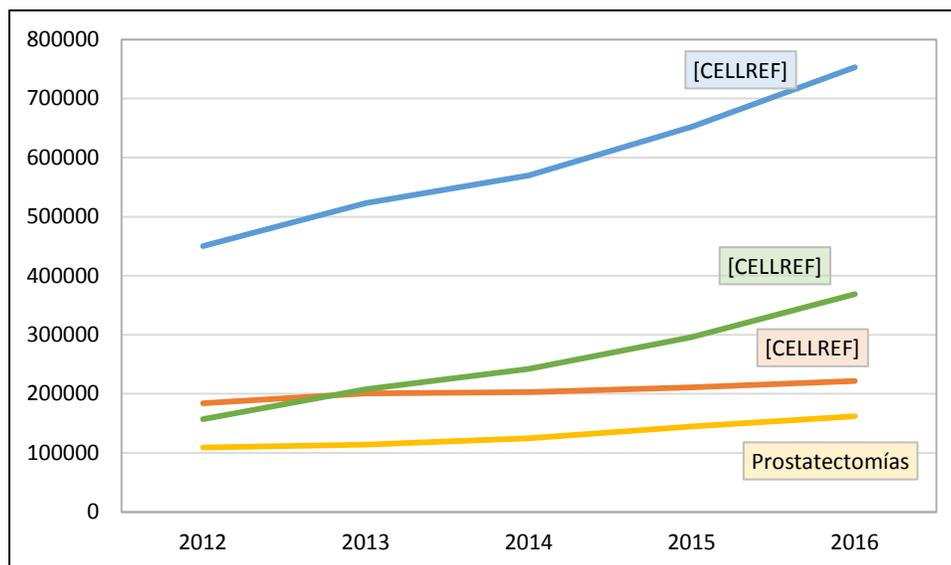


Gráfico 3. Procedimientos quirúrgicos realizados con Robots Da Vinci®. 2012 - 2016



El aumento progresivo en las ventas de sistemas robóticos Da Vinci, trajo aparejado un lógico incremento del número de procedimientos quirúrgicos, con un estimado para diciembre de 2016 de 753,000 intervenciones quirúrgicas realizadas. La prostatectomía radical y la histerectomía han sido los más frecuentes. Entre los años 2008 y 2011 éstos constituían entre el 70 y el 80% de todas las cirugías robóticas realizadas a nivel mundial. Sin embargo, estos porcentajes han descendido gradualmente, hasta constituir aproximadamente el 50% a finales de 2016, para dar paso a un número creciente de otros procedimientos quirúrgicos, en concordancia con la estrategia disruptiva de ir ganando los espacios a los que las tecnologías precedentes van renunciando.<sup>30</sup> (Gráfico 3)

En la actualidad, aunque los cirujanos han realizado más de cien procedimientos robóticos diferentes, los más relevantes en la literatura publicada, y sobre los cuales Intuitive Surgical evalúa su tecnología, pertenecen a 5 especialidades, y se exponen en el Gráfico 4.

Gráfico 4. Procedimientos robóticos más relevantes, 2016

Especialidad	Procedimiento quirúrgico robotizado
Urología	Prostatectomía Nefrectomía parcial (tumorectomía)
Ginecología	Histerectomía
Cirugía General	Cirugía colorrectal Sacrocolpopexia Hernioplastias, Colecistectomías,
Cirugía Cardiorácica	Reparación de la válvula mitral Lobectomía
Cirugía de Cabeza y cuello	Cirugía robótica transoral

Fuente: Intuitive Surgical Annual Report 2016. <sup>30</sup>

Otras cirugías como la hepato-biliar compleja, la cirugía bariátrica, las reintervenciones del hiato esofágico, el cáncer gástrico, esofágico y rectal y la cirugía de grandes masas suprarrenales también son realizadas, aunque se necesitan estudios más robustos para definir el papel de la robótica en ellas. <sup>5,6</sup>

No obstante, a pesar de todos los elementos de innovación mostrados por la tecnología, su elevado costo ha influido de forma negativa en la decisión de adquirirla por parte de los sistemas de salud. El costo inicial por la compra de un sistema Da Vinci ha oscilado entre 0.6 y 2.5 millones de dólares, al que se le adiciona un costo anual por concepto de mantenimiento que fluctúa entre 80 000 y 170 000 dólares, en dependencia de la región geográfica y el modelo y configuración seleccionados del sistema. <sup>(5,23)</sup>

Un estudio publicado en 2010 que analizó el costo de la cirugía robótica y su impacto en un sistema de salud, documentó en al menos 20 intervenciones quirúrgicas, un incremento adicional promedio del costo por procedimiento por el uso del robot, que osciló entre 1 600 y 3 200 dólares (6 al 13% del costo total de los procedimientos). En teoría, si la tecnología robótica remplazara completamente a las anteriores, solo en los 20 procedimientos estudiados, significaría para el sistema de salud de los Estados Unidos un costo adicional de 1.5 billones de dólares, que pudiera elevarse a 2,5 billones si se incluye el costo amortizado de los robots. <sup>31</sup>

Esto explica por qué hasta el presente la compañía ha empleado una estrategia disruptiva que no ha apuntado centralizadamente a los sistemas de salud, sino de forma fragmentada a los hospitales que deciden adquirirla, creando así un marco de competencia ideal para su mercado. En la actualidad la estrategia comercial se desplaza hacia soluciones más atractivas desde el punto de vista económico, divididas en dos líneas

de desarrollo diferente: (1) cirugía del cáncer y otros procedimientos complejos, (2) procedimientos de menor complejidad. En vista de que los procedimientos complejos se amortizan mucho más rápidamente, para los hospitales que realizan un volumen elevado de estos, se recomienda entonces como propuesta el sistema robotizado Xi, que incluye además en su versión más costosa las tecnologías de: endosellador (*EndoWrist One Vessel Sealer*), el suturador mecánico (*EndoWrist Stapler*) y la mesa operatoria integrada (*Table Motion products*), mientras que para los hospitales que clasifiquen dentro de la segunda categoría, la propuesta incluye versiones más económicas como el Da Vinci Si-e y los instrumentos para cirugía a través de un solo puerto.

En el futuro los precios deben disminuir en la medida que la competencia irrumpa en el mercado. Hoy solo unas pocas compañías que han introducido productos en el campo de la cirugía robótica o han declarado la posibilidad de incursión en este mercado, tienen potencialmente la capacidad para producir prototipos competitivos.<sup>25,26,30,32-35</sup> Algunas de ellas se muestran en el Gráfico 5.

Gráfico 5. Compañías con capacidad para producir productos competitivos

Compañía	País	Producto
Auris Surgical Robotics, Inc.	Estados Unidos	Monarch Platform (Sistema robótico para broncoscopia)
Avatera Medical GmbH.	Alemania	Avatera System (Sistema robótico para procedimientos laparoscópicos)
Cambridge Medical Robotics Ltd.	Reino Unido	Versius System
Verb Surgical	Estados Unidos	Anunciada la comercialización del primer sistema en 2020.
Medicaroid Inc.	Japón	OT-100 Vercia™ (Mesa operatoria robotizada)
MedRobotics Corp.	Estados Unidos	Flex Robotic Colorectal System®
Meere Company Inc.	Corea	Revo-I (Sistema robótico para cirugía urológica y gastrointestinal)
Medtronic PLC.	Irlanda	Mazor X (plataforma para cirugía robótica espinal)
Olympus Corp.	Japón	NEDO (robot para cirugía gastrointestinal, torácica y neurocirugía)
Samsung Corporation.	Corea	Samsung's single-port robotic system (Cirugía robótica por puerto único)
TransEnterix Surgical Inc.	Estados Unidos	Senhance Surgical Robotic System (procedimientos ginecológicos y colorrectales)
Titan Medical Inc.	Canadá	SPORT Surgical System (Cirugía robótica por puerto único)

Además, en la actualidad comienzan a estar disponibles de manera creciente en internet, softwares para robots quirúrgicos con códigos de fuente abierta,<sup>36</sup> lo que asociado al interés de los investigadores en muchas universidades del mundo y a las múltiples asociaciones entre compañías conocidas como *joint venture*, incrementará la competencia en esta esfera. Uno de los ejemplos más sobresaliente de asociación es el de *Johnson & Johnson* con *Google Inc.* para fundar una nueva empresa, *Verb Surgical*, con el objetivo de fusionar sus conocimientos en las áreas de robótica e inteligencia artificial y proyectar robots conectados a internet lo cual refuerza su capacidad para el entrenamiento a distancia.<sup>32</sup> Otros países como China han incluido a la cirugía robótica dentro de su prioridad de desarrollo con el soporte de políticas nacionales y subsidios, gracias a lo cual han sido desarrollados recientemente varios prototipos por diversas empresas y universidades, dentro de las que destaca la Universidad de Tianjin, con los prototipos *Smart S*, *Smart S2* y *Micro Hand S*, los que a pesar de haber sido evaluadas su seguridad y factibilidad en la práctica clínica en pocos pacientes y tienen limitaciones relacionadas con la imposibilidad de emplear el bisturí ultrasónico, su costo estimado es diez veces inferior al de la tecnología ya establecida.<sup>37,38</sup>

El elevado costo ha influido también en el posicionamiento de las sociedades científicas como la SAGES y la EAES (*European Association of Endoscopic Surgeons*), las que en sus declaraciones de consenso han sido cautelosas en su asimilación, en tanto no se obtengan las evidencias necesarias de su costo-efectividad.<sup>3,23,39,40</sup>

Hasta el presente, una parte importante de las evidencias encontradas se resumen en un meta-análisis realizado en 2016, que incluyó 108 estudios prospectivos y ensayos clínicos randomizados y 14 448 pacientes.<sup>5</sup> En este estudio se demostró que la cirugía robótica aventajó sistemáticamente a la cirugía convencional y la mínimamente invasiva, solo en cuanto a las pérdidas sanguíneas y la necesidad de transfusiones de sangre, independientemente de la especialidad y el tipo de procedimiento. Adicionalmente en comparación con la cirugía convencional mostró una disminución de la estadía hospitalaria y la morbilidad. Estos resultados pudieran significar una mejor precisión quirúrgica asociada no solo a las bondades del uso de los instrumentos articulados y la visión tridimensional, sino además al uso de tecnologías avanzadas como la *Firefly Fluorescence Imaging* que permite una disección vascular más segura, mientras que la disminución de la estadía hospitalaria y las complicaciones en relación con la cirugía convencional pueden estar en correspondencia con su capacidad mínimamente invasiva, lo cual ya había sido previamente demostrado.

El estudio no pudo demostrar una mejoría de la estadía hospitalaria, ni de la tasa de complicaciones, en relación con la cirugía mínimamente invasiva. También mostró tiempos quirúrgicos mayores para la cirugía robótica, lo que contradice su propósito de simplificar los procedimientos. Estos resultados negativos pueden estar relacionados con la necesidad de reubicar al robot durante la cirugía, las implicaciones de la curva de aprendizaje o la realización de procedimientos que antes no habían sido realizados de forma mínimamente invasiva como la prostatectomía.

No obstante, lo más trascendente es el reconocimiento de que la mayoría de las investigaciones han fallado en identificar una variable primaria adecuada, diferente de las comúnmente empleadas, que demuestre el verdadero valor añadido de la cirugía robótica y con ello su costo-efectividad. Se necesitaría para ello evaluar parámetros más sensibles tales como: resultados funcionales y oncológicos, calidad de vida, ergonomía y la evaluación del incremento de la precisión mediante la medición en las imágenes de vídeo de los errores y eficiencia en la manipulación intraoperatoria de los tejidos. Otras variables no clínicas que también deben ser tomadas en consideración incluyen: el impacto en los sistemas de salud, el entrenamiento y la asesoría.

La cirugía robótica es considerada además una tecnología *cutting-edge*, lo cual podría traducirse como "tecnología de borde cortante", término que por un lado hace alusión a una novedad tal que puede implicar un gran progreso, mientras que por el otro tiene un gran riesgo de ser poco fiable e incurrir en un gran costo el intentar usarla. En los finales de la década de los 80, la cirugía mínimamente invasiva, expresada en la colestectomía laparoscópica, fue considerada en sus inicios una tecnología *cutting-edge*, en la que las evidentes ventajas fueron demostradas y terminó por implementarse rápidamente, determinando un desarrollo acelerado de la cirugía y grandes ganancias para las compañías suministradoras de dispositivos médicos. Lo contrario sucedió con la cirugía endoscópica transluminal a través de orificios naturales (*NOTES, Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery*), la cual inició su desarrollo en 2004 y una década después no había logrado demostrar su beneficio, por lo que las compañías que invirtieron cuantiosos recursos en prototipos de dispositivos que no se desarrollaron o en el mejor de los casos migraron a la cirugía intraluminal, tuvieron pérdidas considerables.

Ese riesgo está presente en la actualidad para la cirugía robótica, pues 30 años no han bastado para demostrar su real valía. Además del costo, que ha sido su principal talón de Aquiles, es importante señalar que las novedosas tecnologías que han sido modularmente incorporadas a la cirugía robótica tales como: la visualización tridimensional de alta definición, los sistemas de navegación, los instrumentos articulados, la fluorescencia intraoperatoria y el grapado inteligente, entre otras, pueden ser igualmente incorporadas a las tecnologías precedentes.

### **Conclusiones:**

A pesar del empleo de una estrategia disruptiva con elementos negativos asociados al costo y no haber demostrado aún su efectividad, además de los riesgos inherentes a una tecnología *cutting-edge*, la robótica jugará un papel cada vez mayor en el desarrollo de la cirugía. Para comprender esta afirmación es necesario contextualizarla dentro del momento tecnológico que vive la humanidad, caracterizado como "Era de la Información".

La clave para entender el futuro de la cirugía está en comprender que la tecnología de la información será la base estructural de su desarrollo. Un quirófano del futuro cercano constará de sistemas integrados de información en el que todos sus componentes tienen que estar basados en información.

En este contexto, ni la cirugía convencional ni la laparoscópica logran cumplir con el requerimiento, pues en ambas al menos uno de sus componentes es mecánico, como rasgo inherente a la era industrial de desarrollo tecnológico a la cual pertenecen. Solo los robots quirúrgicos son considerados como procesos informáticos íntegramente controlados por computadora en sus dos sentidos: la adquisición de la imagen (información digital aferente) y la respuesta en forma mecánica del instrumento (información digital eferente), a lo cual se le añade la mente humana que se encuentra entre ambos y controla sus brazos articulados.

Los robots, sin embargo, serán solo un componente aislado del sistema informatizado, al cual se integrarán otras innovaciones que incluirán: tecnologías para el manejo digital de bases de datos hospitalarias, sistemas de soporte de decisión, imágenes digitales, planeación quirúrgica, asesoría a distancia, dispositivos de evaluación y detección automática de errores, entre otras.

Aunque en el futuro cercano un número de procedimientos continuarán realizándose por cirugía convencional y cirugía mínimamente invasiva, la mayoría transitarán a procedimientos asistidos por computadoras, sean robóticos o guiados por imágenes

**REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

1. Ruiz J. Evolución histórica de la terapéutica Endoscópica. En: Ruiz J, Torres R, Fernández A, Martínez MA, Pascual H. Cirugía Endoscópica. Fundamentos y aplicaciones. Ciudad de La Habana: Científico-Técnica; 2000. p 21-2.
2. Satava RM. Surgery 2001: a technologic framework for the future. *Surg Endosc.* 1993; 7:111-3.
3. Herron DM, Marohn M. A consensus document on robotic surgery. *Surg Endosc.* 2008;22: 313-25
4. Jacobsen G, Elli F, Horgan S. Robotic surgery update. *Surg Endosc.* 2004; 18:1186-91.
5. Tan A, Ashrafian H, Scott AJ, Mason SE, Harling L, Athanasiou T, et al. Robotic surgery: disruptive innovation or unfulfilled promise? A systematic review and meta-analysis of the first 30 years. *Surg Endosc.* 2016; 30:430-5.
6. Oviedo-Barrera RJ. The Surgical Robot: Applications and Advantages in General Surgery. [e-book] [Internet]. In: Serdar Küçük, editor. *Surgical Robotics*. INTECH; 2018. p 39-64. [cited 2018 Nov 24]. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.68864>
7. Kwoh YS, Hou J, Jonckheere EA, Hayati S. A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereo-tactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1988;35:153-61.
8. Davies BL, Hibberd RD, MJ Coptcoat, Wickham JEA. A surgeon robot prostatectomy-a laboratory evaluation. *J Med Engng Technol.* 1989;13:273-7.
9. Bann S, Khan M, Hernandez J, Munz Y, Moorthy K, Datta V, et al. Robotics in surgery. *J Am Coll Surg.* 2003;784-95.
10. Paul Ha, Bargar WL, Mittlestadt B, Musits B, Taylor RH, Kazanzides P. Development of a surgical robot for cementless total hip arthroplasty. *Clin Orthop.* 1992;285:57-66.
11. Unger X, Unger H, Bass R. AESOP robotic arm. *Surg Endosc.* 1994; 8:1131
12. Kavoussi LR, Moore RG, Adams JB, Partin AW. Comparison of robotic versus human laparoscopic camera control. *J Urol.* 1995; 154:2134-46.
13. Ballantyne GH. Robotic surgery, telerobotic surgery, telepresence, and telementoring. Review of early clinics results. *Surg Endosc.* 2002;16:1389-1402.
14. Yavuz Y, Ystgaard B, Skogvoll E, Marvik R. A comparative study evaluating the performance of surgical robots AESO and Endoassist. *Surg Laparosc Endosc Percut Tech.* 2000; 10:163-7.
15. Omote K, Feussner H, Ungeheuer A, Arbter K, Wei GQ, Siewert JR, Hirzinger G. Self-guided robotic camera control for laparoscopic surgery compared with human camera control. *Am J Surg.* 1999;177:321-4.
16. Schurr MO, Buess G, Neisius B, Voges U. Robotics and telemanipulation technologies for endoscopic surgery. *Surg Endosc.* 2000;14:375-81.
17. Marescaux J, Leroy J, Rubino F, Smith M, Vix M, Simone M, et al. Transcontinental robot-assisted remote telesurgery: feasibility and potential applications. *Ann Surg.* 2002;235:487-92.

18. Haidegger T and Benyó Z. Extreme Telesurgery. In: Seung Hyuk B, editor. Robot Surgery. Intech; 2010, p.25-44.
19. Annual Reports [Internet]. Intuitive Surgical: Annual Report 2003. [update 2002 Mar 12; cited 2018 Dec 5]. Available from: [http://www.annualreports.com/HostedData/AnnualReportArchive/i/NASDAQ\\_ISRGR\\_2003.pdf](http://www.annualreports.com/HostedData/AnnualReportArchive/i/NASDAQ_ISRGR_2003.pdf)
20. Himpens J, Leman G, Cadiere GB. Telesurgical laparoscopic cholecystectomy [letter]. Surg Endosc. 1998;12:1091
21. Cadière GB, Himpens J, Vertruyen M, Bruyns J, Fourtanier G. Nissen fundoplication done by remotely controlled technique. Ann. Chir. 1999; 53(2):137-41.
22. Carpentier A, Louimel D, Aupacie B, Berrebi A, Reliand J. Computer-assisted cardiac surgery [letter]. Lancet. 1999; 353:379-80.
23. Tsuda S, Oleynikov D, Gould J, Azagury D, Sandler B, Hutter M, et al. Da Vinci Surgical System (Intuitive Surgical, Sunnyvale, CA). [Internet]. SAGES; 2018 [cited 2018 Nov 24]. Available from: <https://www.sages.org/publications/tavac/tavac-analysis-davinci-surgical-system/>
24. SAGES. Da Vinci Xi Surgical System with Table Motion: Fourth generation robotic-assisted surgical platform. SAGES; 2018 [cited 2018 Nov 24]. Available from: <https://www.sages.org/publications/tavac/da-vinci-xi-surgical-system-table-motion-fourth-generation-robotic-assisted-surgical-platform/>
25. Ross S, DeReus H. Flex Robotic System and Flex Colorectal Drive [Internet]. SAGES; 2018 [cited 2018 Nov 24]. Available from: <https://www.sages.org/publications/tavac/flex-robotic-system-and-flex-colorectal-drive/>
26. Topaz A, Milone L. Senhance surgical robotic system. [Internet]. SAGES; 2018 [cited 2018 Nov 24]. Available from: <https://www.sages.org/publications/tavac/senhance-surgical-robotic-system/>
27. Bower JL, Christensen CM. Disruptive Technologies: Catching the wave. Harvard Business Review 1995.
28. Loza Matovelle D, Dabirian R. Introducción a la Tecnología Disruptiva y su Implementación en Equipos Científicos. Rev Politécnica. 2015;36(3).
29. Computing. Las 10 tecnologías que protagonizarán 2018 [Internet]. Computing; 2018 [cited 2018 Nov 24]. Available from: <http://www.computing.es/analytics/informes/1103388046201/10-tecnologias-protagonizaran-2018.1.html>
30. Intuitive Surgical Annual Reports (2007-2017) [Internet]. AnnualReports.com; 2019 [Update 2018 Feb 2; cited 2019 Jan 15]. Available from: <http://www.annualreports.com/Company/intuitive-surgical-inc>
31. Barbash GI, Glied SA. New Technology and Health Care Costs - The Case of Robot-Assisted Surgery. N Engl J Med. 2010;363(8):701-4.
32. Schaaf T. In MedTech History - Surgical Robotics: Part 1 [Internet]. MedTech Strategist; 2018 [Update 2018 Jun 12; cited 2019 Jan 15]. Available from: <https://www.medtechstrategist.com/mts-blog/medtech-history-robotics-1>

33. Schaaf T. In MedTech History - Surgical Robotics: Part 2. [Internet]. MedTech Strategist; 2018 [Update 2018 Jun 12; cited 2019 Jan 15]. Available from: <https://www.medtechstrategist.com/mts-blog/medtech-history-robotics-2>
34. Roh KS, Yoon S, Do Kwon Y, Shim Y, Kim YJ. Single-Port Surgical Robot System with Flexible Surgical Instruments. In: Liu H, Kubota N, Zhu X, Dillmann R, Zhou D, editors. Intelligent Robotics and Applications. ICIRA 2015. Lecture Notes in Computer Science, vol 9245. Springer, Cham.
35. Chang KD, Abdel Raheem A, Choi YD, Chung BH, Rha KH. Retzius-sparing Robot-assisted Radical Prostatectomy using Revo-i robotic surgical system: Surgical Technique and Results of the First Human Trial. BJU Int. 2018;122(3):441-8.
36. Arata J, Kozuka H, Kim HW, Takesue N, Vladimirov B, Sakaguchi M, Tokuda J, Hata N, Chinzei K, Fujimoto H. Open core control software for surgical robots. Int J CARS. 2010;5:211-220
37. Yi1 B, Wang G, Li J, Jiang J, Son Z, Su H, Zhu S. The first clinical use of domestically produced Chinese minimally invasive surgical robot system "Micro Hand S". Surg Endosc. 2016;30:2649-55.
38. China Medical Robotics Industry Report, 2016-2020 [Internet]. Research and Markets; 2019 [Update 2016 Oct 1; cited 2019 Jan 10]. Available from: [https://www.researchandmarkets.com/research/kv78vq/china\\_medical](https://www.researchandmarkets.com/research/kv78vq/china_medical)
39. Szold A, Bergamaschi R, Broeders I, Dankelman J, Forgione A, Lango T, et al. European Association of Endoscopic Surgeons (EAES) consensus statement on the use of robotics in general surgery. Surg Endosc. 2015;29:253-88.
40. Talamini MA. SAGES Assessment on the Da Vinci Surgical System. Surg Endosc. 2016;30:803-4.

---

Recibido: 2 de febrero de 2019.

Aprobado: 11 de marzo de 2019.

*Dr. Rafael Torres Peña, Rafael.* Centro Nacional de Cirugía de Mínimo Acceso, La Habana, Cuba.

Correo electrónico: [rafael.torres@infomed.sld.cu](mailto:rafael.torres@infomed.sld.cu)