

Robótica y cirugía laparoscópica

Carlos Martínez Ramos

Departamento de Cirugía. Departamento de Cirugía. Hospital Clínico San Carlos. Facultad de Medicina. Universidad Complutense. Madrid. España.

Resumen

La cirugía laparoscópica ha revolucionado completamente el mundo de la cirugía moderna. Al margen de sus ventajas existen importantes limitaciones. Las más destacables son la pérdida de la sensación de profundidad, de la sensación táctil y de fuerza, y de la coordinación natural ojos-manos con pérdida de la destreza manual. La principal motivación para el desarrollo de los robots quirúrgicos es la posibilidad de eliminar estas limitaciones. Los robots han adquirido un gran potencial para mejorar la capacidad quirúrgica de los cirujanos. Dado el incremento en su utilización, en un futuro próximo se asistirá al cambio de fisonomía y estructura de los actuales quirófanos. En este artículo se analiza el origen de los sistemas robóticos, su evolución y desarrollo, y las características de los robots de última generación, ya que ante el fuerte impulso de la cirugía robótica y su clara perspectiva futura, los cirujanos han de conocer todo lo referente a estas técnicas emergentes e innovadoras.

Palabras clave: Cirugía robótica. Robot quirúrgico. Cirugía laparoscópica. Telecirugía.

ROBOTICS AND LAPAROSCOPIC SURGERY

Laparoscopic surgery has completely revolutionized modern surgery. In addition to its advantages, however, this approach also presents significant limitations. The most important are loss of the sense of depth, tactile sensation and resistance, as well as loss of natural hand-eye coordination and manual dexterity. The main motivation for the development of surgical robots is the possibility of eliminating all these limitations. Robots have acquired great potential to improve the operative possibilities of surgeons. Given the continual increase in the use of surgical robots, in the near future the structure and appearance of current operating rooms will change. The present article analyzes the origin and development of robotic systems, as well as the characteristics of the latest generation of robots. Because of the strong interest in robotic surgery and its future prospects, surgeons should be familiar with these emerging and innovative techniques.

Key words: Robotic surgery. Surgical Robots. Laparoscopic surgery. Telesurgery.

Introducción

La cirugía laparoscópica, que se ha definido como "la extensión de las manos y la miniaturización de los ojos", hace accesibles, mediante la utilización de pequeñas videocámaras, zonas que anteriormente requerían grandes incisiones y, además, permite la visualización del campo operatorio, mediante un monitor, a todos los miembros que participan en la intervención.

Independientemente de las conocidas ventajas de la cirugía laparoscópica, en este tipo de cirugía también

existen importantes limitaciones, entre las cuales las más destacables son la pérdida de la sensación de profundidad, de la sensación táctil y de fuerza, y de la coordinación natural ojos-manos, con la consiguiente disminución de la destreza manual.

La pérdida de la sensación de profundidad se debe a la visión en dos planos que proporciona la observación del campo operatorio a través de un monitor.

La disminución de la sensación del tacto hace que la manipulación tisular dependa siempre de la visualización, con la consiguiente situación de fatiga que se deriva de ello. Por otra parte, cuando se trabaja con imagen ampliada como en la cirugía laparoscópica, el temblor, que en mayor o menor grado existe de manera fisiológica en las manos del cirujano, también aumenta y se magnifica, lo que incrementa la incidencia de movimientos que no tienen un fin determinado. Para compensar esta situación, el cirujano debe lentificar el procedimiento aumentando el tiempo operatorio. Esto, junto con la postura fija

Correspondencia: Prof. C. Martínez Ramos.
Departamento de Cirugía.
Hospital Clínico San Carlos.
C/ Prof. Martín Lagos, s/n. 28040. Madrid. España.
Correo electrónico: cmartinez.hcsc@salud.madrid.org

Manuscrito recibido el 2-6-2006 y aceptado el 19-6-2006.

y rígida del cirujano, conduce a la aparición de fatiga, que a su vez aumenta aún más el temblor y los movimientos no deseados.

En la cirugía laparoscópica el movimiento de los instrumentos observados a través de un monitor en 2 dimensiones (2D) produce una situación contraria a la que induce la intuición natural, lo cual determina que se debe mover el instrumento laparoscópico en dirección opuesta a la que queremos dirigirlo. A esta situación se la conoce como *fulcrum effect* o "movimiento inverso". Esto compromete y altera la correcta coordinación ojo-mano-campo operatorio y provoca la pérdida de destreza. Por otra parte, los movimientos del instrumental laparoscópico actual tienen restricciones en relación con sus grados de libertad. La mayoría tiene 4 grados, mientras que las articulaciones de la muñeca y de la mano humanas tienen 7 grados de libertad.

El desarrollo de los robots quirúrgicos se ha producido precisamente para superar y eliminar todas estas limitaciones técnicas de la actual cirugía laparoscópica. Los robots quirúrgicos se han diseñado para aumentar y extender las capacidades de los cirujanos más allá de los límites que impone la cirugía laparoscópica.

El objetivo del presente trabajo es analizar el origen y los tipos básicos de robots quirúrgicos empleados actualmente en cirugía, dada su progresiva implantación en las salas de operaciones de un número cada vez más elevado de hospitales.

Concepto de robot quirúrgico

El término "robot" deriva de la palabra checa *robota* empleada por el dramaturgo checo Karel Capek en la obra teatral, escrita en el año 1921, llamada *Rossum's Universal Robots (R.U.R.)*. En ella el protagonista hace el papel de Dios y crea unos seres mecánicos (*robota*) para servir a la humanidad. Estos robots se perfeccionan y se rebelan más tarde convirtiendo a los humanos en sus servidores.

La palabra checa *robota* significa "trabajador" pero en esta obra se le daba el sentido de "trabajador forzado" o "esclavo". En la época feudal, en el territorio de la antigua República de Checoslovaquia, la palabra *robota* se aplicaba a los campesinos que eran obligados, dos o tres veces por semana, a abandonar sus propias tierras para trabajar sin remuneración en las tierras de los nobles. Esta palabra permaneció durante mucho tiempo con este significado, y aún hoy los jóvenes la utilizan para referirse a trabajos aburridos y carentes de interés.

El sentido del término "robot" ha evolucionado desde su fase inicial, en la que se empleaba para describir máquinas mudas que realizaban trabajos y tareas serviles y repetitivas, hasta el concepto actual en el que se considera que los robots realizan tareas no sólo altamente específicas y precisas, sino también peligrosas, en la industria y en la investigación, tareas que antes eran imposibles de llevar a cabo con la fuerza y la destreza de un trabajador humano. En este sentido los robots se utilizan actualmente y de forma rutinaria para construir microprocesadores para ordenadores, para explorar el espacio y las profundidades marinas o para traba-

jar en ambientes peligrosos, por citar sólo algunos ejemplos.

Los robots son esencialmente dispositivos mecánicos controlados por microprocesadores y equipados con sensores y motores, que desempeñan tareas físicas. Los robots quirúrgicos están basados en dos conceptos fundamentales que son la realidad virtual y la cibernética.

Se conoce como *realidad virtual* la situación o circunstancia que se produce cuando un ser humano tiene la sensación de encontrarse en un lugar distinto de donde físicamente está gracias a la información generada exclusivamente por ordenador. El entorno que se genera, y en el que la persona se encuentra inmerso, se denomina *entorno virtual*, y la situación de estar en él, *presencia virtual*.

La *cibernética* es la ciencia que estudia los sistemas de control y de comunicación de las personas con las máquinas. Dentro de ella se encuentra la *robótica*, que es una rama de la tecnología que estudia el diseño y la construcción de máquinas capaces de desempeñar tareas realizadas por el ser humano o que requieren del uso de la inteligencia.

Los robots pueden ser *autónomos*, los cuales necesitan de un programa diseñado para realizar ciertas actividades, y *esclavos*, que no tienen capacidad de movimiento autónomo y son absolutamente dependientes. En la cirugía robótica se utiliza un *robot esclavo* que no puede hacer ningún tipo de movimiento sin las órdenes del cirujano. Es decir que es absolutamente dependiente del juicio, de los conocimientos y de la habilidad del médico. Consta de una estructura que semeja la anatomía de los brazos humanos, capaz de imitar los movimientos de diversas articulaciones como las del hombro, el codo, las muñecas y las manos.

En la actualidad los *sistemas robóticos quirúrgicos* se entienden como aparatos concebidos con la finalidad de ayudar a mejorar la destreza y la capacidad quirúrgica del cirujano laparoscópico, fundamentalmente la falta de precisión derivada de la reducción de la libertad del cirujano para la manipulación quirúrgica, y la pérdida de la sensación de profundidad que provoca la visión en 2D. El aumento y la mejora de la destreza se acompaña paralelamente de una considerable mejora en la seguridad.

Los sistemas robóticos tienen programas informáticos que filtran y eliminan los temblores fisiológicos. Por otra parte, los reposabrazos que existen en las consolas robóticas añaden estabilidad y comodidad, y aumentan la resistencia física durante la intervención quirúrgica. Además, colocar un microprocesador entre la mano del cirujano y el extremo del instrumento quirúrgico permite realizar *movimientos a escala*, es decir, convertir los movimientos amplios y toscos de la mano en movimientos delicados y precisos, y además permite ejercer un mejor control de la resistencia mecánica, lo cual permitirá al cirujano realizar manipulaciones que, sin este sistema, en algunos casos serían imposibles.

Los robots quirúrgicos actuales disponen de un sistema interactivo tan veloz e intuitivo, que la computadora desaparece de la mente del cirujano, y el entorno generado por el sistema aparece como real. Mediante la realidad virtual, el cirujano establece y determina las maniobras que el robot ejecutará en el paciente.

Evolución de los robots quirúrgicos

La historia de los robots quirúrgicos fundamentales comienza en el año 1985 con el robot Puma 560, un brazo robótico industrial utilizado para intentar aumentar la precisión en la realización de biopsias cerebrales mediante punción. Otros sistemas más elaborados, desarrollados posteriormente también para aplicaciones neuroquirúrgicas, fueron el robot Minerva (1993) para biopsias cerebrales estereotáxicas y el robot Neuromate (1995), tanto para biopsias como para neurocirugía estereotáxica¹.

El inicial robot Puma 560 condujo al ulterior desarrollo, en 1988, del robot Probot, diseñado específicamente para realizar prostatectomías de alta precisión por uno de los grupos pioneros en investigación robótica médica dirigidos por B.L. Davies en el Centro de Robótica del Colegio Imperial de Ciencias de Londres, que, con los doctores J.E.A. Wickham y A.G. Timothy del Instituto de Urología, fueron los precursores de este modelo que se caracterizaba por tener 6 brazos articulados².

Mientras tanto, la empresa Integrated Surgical Supplies Ltd. de Sacramento (Estados Unidos) desarrollaba el robot Robodoc, un sistema robótico para ser utilizado en cirugía ortopédica y diseñado para preparar mecánicamente la zonas óseas donde han de colocarse los implantes protésicos totales, tanto de cadera como de rodilla³.

Un papel fundamental para la evolución de los robots quirúrgicos lo desempeñaron las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos, que se plantearon el desarrollo de un mecanismo robótico mediante el cual sus cirujanos pudieran operar quirúrgicamente, desde un sitio remoto y seguro, a los soldados heridos en el campo de batalla, es decir un sistema de *telecirugía*. El fundamento de esta iniciativa se basaba en el hecho de que el 90% de las muertes en combate se producía por hemorragia secundaria a lesión de grandes vasos de las extremidades, en los soldados que no habían podido ser evacuados a los hospitales, y eran muy pocos los que morían, con las mismas heridas, si conseguían ser evacuados a tiempo. Es decir, se trataba de disminuir las muertes de soldados en combate por heridas potencialmente no mortales⁴.

Este concepto de *telecirugía* fue uno de los motivos que con más fuerza impulsó el desarrollo de los robots quirúrgicos. En este sentido, un grupo de investigadores de la NASA y del Ames Research Center que trabajaban en realidad virtual aplicó estos avances al desarrollo de la llamada *cirugía de telepresencia* o *telecirugía*⁵.

Los trabajos iniciales para las Fuerzas Armadas estadounidenses se realizaron, a principios de la década de los años noventa, en el Stanford Research Institute (SRI), donde trabajaban expertos en robótica y en realidad virtual. Philippe Green, ingeniero de este instituto, y sus colaboradores investigaron y desarrollaron prototipos de sensores y efectores *maestro-esclavo* para poder realizar sistemas de telemanipulación. Posteriormente, junto con Richard M. Satava, cirujano del ejército a cargo del Advanced Biomedical Technology Program (ABTP), desarrollaron un sistema capaz de realizar *telemanipulación quirúrgica remota* con la finalidad de poder atender a distancia las heridas producidas en el campo de batalla⁶.

En su conjunto, el proyecto consistía en un sistema mediante el cual se podía transportar a un soldado heri-

do a un vehículo con equipamiento robótico quirúrgico y allí intervenirle de manera remota, por un cirujano que se encontraría en un hospital de campaña (Mobile Advanced Surgical Hospital, MASH). Con este sistema se pretendía disminuir la mortalidad de los soldados heridos, fundamentalmente evitando la pérdida masiva de sangre mediante esta teleoperación, antes de que pudiera evacuarlos al hospital quirúrgico de campaña.

El prototipo de este sistema se diseñó inicialmente para cirugía abierta y consistía en la colocación de 2 cámaras de vídeo sobre la mesa de operaciones del vehículo quirúrgico en el campo de batalla, para poder transmitir las imágenes de las heridas del soldado hasta la consola de un sistema robótico situado en el hospital remoto, tras la cual se encontraba un cirujano. Esta consola (que se llamó *maestra*) estaba diseñada para recibir y mostrar las imágenes del soldado con sus heridas, y para transmitir los movimientos de las manos del cirujano a los 2 brazos de un telerobot (que se llamó *esclavo*) situado junto al soldado herido. De esta manera, el cirujano podía utilizar un sistema robótico "maestro/esclavo" para realizar manipulaciones quirúrgicas a gran distancia del paciente.

La posibilidad y la eficacia de este sistema se demostraron experimentalmente en modelos animales, pero pruebas no publicadas que se desarrollaron durante el conflicto bélico "Tormenta del Desierto" en Iraq en 1993 demostraron que la conexión vía satélite impedía llevar a cabo la cirugía con las necesarias condiciones de seguridad⁷.

Posteriormente, algunos de los ingenieros y cirujanos que trabajaron en este proyecto pasaron a desempeñar una actividad empresarial que condujo a la introducción de la robótica en la comunidad quirúrgica civil. En efecto, Fred Moll, uno de estos investigadores médicos, consideró que el verdadero valor del prototipo que se había desarrollado para la telecirugía militar por los investigadores del SRI realmente radicaba en el hecho de que constituía el primer paso para poder alcanzar posibles soluciones técnicas que resolvieran las principales limitaciones que tenía la cirugía laparoscópica. Los cirujanos generales que iniciaban la utilización de la cirugía laparoscópica contactaron con este grupo investigador y constataron el potencial de estos sistemas robóticos para mejorar las limitaciones que presentaba este tipo de cirugía.

En este sentido, la empresa Integrated Surgical Systems (actualmente llamada Intuitive Surgical) de Mountain View (Estados Unidos) en 1995 obtuvo la licencia del Stanford Research Institute sobre el sistema quirúrgico de telepresencia que había ideado Phillip Green (Green Telepresence Surgery system) y se comenzó a rediseñar ampliamente este sistema telerrobótico. En marzo de 1997 se probó en humanos el primer prototipo. En 1999 se completó el desarrollo del sistema robótico que posteriormente se comercializó con el nombre Sistema Robótico Quirúrgico Da Vinci. Finalmente, en julio de 2000, la Food and Drug Administration (FDA) lo aprobó para su uso quirúrgico⁸.

Por otra parte, la empresa Computer Motion, Inc. de Santa Bárbara (Estados Unidos), también con fondos provenientes de las Fuerzas Armadas estadounidenses,

desarrolló el sistema llamado AESOP (Automated Endoscopic System for Optimal Positioning), y que consistía en un brazo robótico con una cámara endoscópica, controlado por órdenes mediante la voz del cirujano. Poco tiempo después, en 1994, la FDA aprobó su aplicación en cirugía⁸.

Con la utilización del brazo robótico AESOP, la empresa Computer Motion empezó a desarrollar otro mecanismo robótico basado en la telemanipulación con un sistema maestro/esclavo que se llamó Sistema Robótico Quirúrgico Zeus, inicialmente diseñado específicamente para cirugía cardíaca. Posteriormente, se desarrolló para otras especialidades quirúrgicas (cirugía general, ginecología, urología, etc.). En octubre de 2001 la FDA lo aprobó para cirugía abdominal⁹.

En la actualidad las características de los sistemas robóticos Da Vinci y Zeus han hecho que sean los dos más utilizados en la cirugía de acceso mínimamente invasivo, y entre ellos ha comenzado una especie de "duelo de robots", sobre todo en lo concerniente a su utilización en la cirugía abdominal y en la cirugía cardíaca.

Sistema robótico quirúrgico Da Vinci

El sistema Da Vinci consta, básicamente, de los siguientes elementos: consola maestra, robot esclavo, instrumental y sistema de obtención de imagen (fig. 1).

Consola maestra

Es la mesa de control, situada a distancia de la mesa de operaciones, donde el cirujano ejecuta los movimientos que habrá de realizar el robot. Dado que este sistema es un robot tipo maestro/esclavo, el cirujano es el maestro y controla todas las acciones del esclavo que contiene los brazos robóticos. La consola sirve de *interface* o comunicación entre el cirujano y el robot (fig. 1).

El cirujano observa el campo operatorio a través de unos binoculares contenidos en la consola, que proporcionan visión estereoscópica de alta resolución. Sus brazos se colocan en unos reposabrazos almohadados y sus manos cogen con los dedos unos manipuladores o mangos instrumentales similares a los que posee un instrumento quirúrgico de cirugía convencional (figs. 2 y 3).

La consola traduce los movimientos en 3 dimensiones (3D) de las manos del cirujano en impulsos eléctricos, que a su vez se traducen en órdenes para los brazos robóticos que realizarán idénticos movimientos en 3D. Usando los controles de la consola, el cirujano puede realizar la cirugía, así como ampliar o disminuir sus movimientos en escalas de 1 a 1, de 3 a 1 o de 5 a 1⁵.

La consola controla y chequea cada uno de los motores del robot y verifica la posición del instrumental quirúrgico que se esté utilizando cada 750 s, con lo que se elimina la posibilidad de que se produzcan movimientos erróneos. El *software* está diseñado de manera que si el cirujano hace un movimiento brusco, el sistema se frena automáticamente. Además, un sistema de rayos infrarro-



Fig. 1. Sistema robótico quirúrgico Da Vinci.



Fig. 2. Binoculares de visión estereoscópica del sistema Da Vinci.



Fig. 3. Manipulador o mango instrumental del sistema Da Vinci.

jos desactiva los brazos robóticos siempre que el cirujano retire los ojos del sistema binocular⁵.

Robot esclavo

El robot esclavo está constituido por tres brazos (actualmente puede haber un cuarto), uno de los cuales contiene el manipulador para la cámara y los otros dos los manipuladores de instrumentos articulados que reproducen los movimientos de las manos del cirujano realizados desde la consola maestra. El robot esclavo se encuentra conectado a la consola por medio de cables y está montado en un soporte móvil que permite instalarlo al lado de la mesa de operaciones (fig. 1).

Instrumental

Los instrumentos articulados que pueden manejarse son de una gran variedad: tijeras, bisturí, diferentes tipos de pinzas, ganchos, disectores, portaagujas, etc. Todos ellos están dotados de retroalimentación táctil electrónica que transmite las sensaciones de presión, resistencia, flexibilidad, etc., y permiten al cirujano *sentir* la cirugía. Estos instrumentos pueden intercambiarse durante la cirugía con la ayuda del instrumentista y del ayudante del cirujano.

Los brazos de un ser humano tienen 29 grados de libertad de movimiento que realizan en los 3 planos cartesianos, por lo que pueden realizar 594.823.321 movimientos. El sistema Da Vinci tiene 7 grados de libertad de movimientos en 3 planos cartesianos, o sea 117.649 movimientos, lo que representa el 0,019% del total de la capacidad del brazo del ser humano, cercano al que utiliza el cirujano en una cirugía convencional. Esta cifra es muy superior comparada con los 3 grados de libertad y 729 movimientos que podemos realizar con los instrumentos de cirugía laparoscópica y que representan únicamente el 0,00012% del total de la capacidad del brazo humano y el 0,61% de la capacidad del sistema Da Vinci⁵.

Sistema de obtención de imagen

Es muy parecido al sistema convencional utilizado en cirugía laparoscópica, pero en 3D real. Consta de una cámara doble que le permite obtener 2 señales de vídeo (canal derecho e izquierdo) que al integrarse conforman una señal de vídeo estereoscópica, que dos monitores de alta resolución proyectan a un sistema conocido como "caja de espejos" para crear una tercera dimensión real, la cual proporciona al cirujano la sensación de "inmersión" en el campo quirúrgico.

Proporciona la sensación de que la punta de los instrumentos quirúrgicos es una extensión de los mandos de control de la consola maestra, y da la impresión de estar en el campo operatorio. Cuando el cirujano mueve la cámara en el campo operatorio consigue el efecto conocido como "navegación". Las imágenes por medio de los visores telescópicos logran aumentar hasta 20 veces el tamaño normal, lo que permite al cirujano ver los órganos con mucho más detalle⁵.

Procedimiento

El asistente del cirujano hace la incisión en los lugares establecidos e introduce los instrumentos del robot, la cámara y el instrumental necesario. El cirujano se sitúa en un asiento que puede ajustar a su altura y con la proximidad que desee con respecto a la consola maestra. Coloca su cabeza de manera que sus ojos se ajusten a los visores que le permiten ver imágenes reales del interior del paciente en 3D. Los dedos del cirujano cogen el instrumental por debajo de las imágenes, con las muñecas posicionadas de forma natural en relación con sus ojos devolviendo al cirujano la perspectiva y la sensación de *estar dentro del campo operatorio*, que se ha perdido con la cirugía laparoscópica.

Mediante la cámara telescópica, el cirujano puede *navegar* dentro del cuerpo del paciente, localizar el órgano afectado e interactuar con tijeras, pinzas de sujeción, bisturí, electrocauterio, láser, disectores ultrasónicos y el resto de los recursos quirúrgicos. El cirujano siempre está viendo los instrumentos que utiliza a través de los monitores.

Los movimientos de los brazos del robot se originan en las manos del cirujano por medio de manipuladores o mangos instrumentales similares a los que posee el instrumental quirúrgico de una cirugía convencional (fig. 3). Estos se encuentran conectados a la consola maestra y al moverlos generan comandos reales que pasan por un sistema avanzado de computación donde se digitalizan y editan a la velocidad de la luz, para luego transmitirse a los brazos del robot que ejecutará lo dispuesto.

El asistente cambia manualmente los instrumentos que se encuentran en los extremos de los brazos del robot, según las indicaciones del cirujano. Al equipo quirúrgico moderno se ha integrado un nuevo componente, el ingeniero biomédico que controla los sistemas de computación y los sistemas de alta tecnología con los que se realizan estas intervenciones quirúrgicas.

En la consola del cirujano se restituye el eje *ojo-mano-campo operatorio* que con gran frecuencia se pierde en la cirugía laparoscópica, y que hace que el sistema sea más ergonómico y la intervención sea más fácil de realizar (figs. 1 y 2).

El sistema quirúrgico Da Vinci proporciona al cirujano un control intuitivo, una amplia gama de movimientos, capacidad de manipulación de tejidos finos y visualización en 3D, característico de la cirugía abierta o convencional. Todo ello se realiza a través de pequeñas incisiones, que son típicas de la cirugía de acceso mínimamente invasivo. Este sistema confiere, en primer lugar, la posibilidad de hacer más fáciles las actuales operaciones laparoscópicas, y transformar en rutinarias las intervenciones más difíciles y, en segundo lugar, aporta el potencial para hacer factibles nuevos procedimientos quirúrgicos.

Sistema robótico quirúrgico Zeus

El sistema robótico Zeus es similar al sistema Da Vinci, aunque posee importantes diferencias. Consta de 3 brazos robóticos interactivos colocados en la mesa de operaciones, un sistema de control computarizado y una consola ergonómica para el cirujano. Uno de los brazos robóticos se utiliza para posicionar el endoscopio que



Fig. 4. Sistema robótico quirúrgico Zeus.

proporciona la visualización del campo operatorio. Los otros 2 brazos robóticos manipulan los instrumentos quirúrgicos bajo el control del cirujano (fig. 4).

El cirujano sentado en la consola puede observar el campo operatorio en 2D o en 3D (fig. 4). Controla los movimientos del sistema endoscópico mediante comandos de voz, ya que la cámara es manejada por un brazo de tipo AESOP. Los manipuladores situados en la consola controlan los movimientos del instrumental quirúrgico⁹.

El sistema Zeus está constituido por dos subsistemas físicamente separados entre sí, llamados *terminal del cirujano* y *terminal del paciente*. El *subsistema del cirujano* tiene la consola que recibe las instrucciones del cirujano; el *subsistema del paciente* contiene dos brazos robóticos que traducen las instrucciones del cirujano en movimientos de los instrumentos que contienen. Existe otro brazo robótico que controla la cámara endoscópica. Se puede acoplar una gran variedad de instrumentos quirúrgicos a los brazos robóticos⁹.

Las diferencias fundamentales entre los dos sistemas robóticos se encuentran, en primer lugar, en la consola. En el sistema Da Vinci el cirujano mira hacia abajo, hacia un visor binocular que se caracteriza por poseer 2 señales de vídeo (canal derecho e izquierdo) (fig. 2), que al integrarse conforman una señal de vídeo estereoscópica, que se proyecta por 2 monitores de alta resolución a un sistema conocido como *caja de espejos* para crear una tercera dimensión real, la cual proporciona al cirujano la sensación de *inmersión* en el campo quirúrgico¹⁰.

En el sistema Zeus, el cirujano se encuentra frente a una pantalla vertical que muestra una imagen en 2D, pero puede proporcionar una imagen en 3D estereoscópica utilizando unas gafas de luz polarizada (fig. 4).

A diferencia del sistema Da Vinci, en el sistema Zeus el brazo que soporta la cámara posee un mecanismo de control accionado mediante la voz del cirujano.

Por último, el sistema Zeus utiliza instrumental endoscópico convencional, mientras que el sistema Da Vinci utiliza instrumental articulado especial que permite transmitir y

traducir los movimientos de las muñecas, las manos los y dedos del cirujano, lo que le confiere una destreza mayor¹⁰.

Conclusión

A pesar de encontrarnos en la fase inicial de su utilización, los robots quirúrgicos ya tienen un tremendo potencial para mejorar la precisión y la capacidad de los cirujanos frente a las intervenciones quirúrgicas. Numerosos cirujanos pertenecientes a muy diversas especialidades, como cirugía general, cirugía torácica, cirugía cardiovascular, cirugía urológica, neurocirugía, cirugía vascular periférica y cirugía ginecológica, ya han incorporado a su práctica diaria el uso de esta tecnología¹¹.

Los robots quirúrgicos, cada vez más sofisticados, continuarán incrementando claramente su utilidad y cada vez serán más y más utilizados. En un futuro próximo cambiarán, con total seguridad, la fisonomía y la estructura de las salas de operaciones y, además, mejorarán drásticamente los resultados de los procedimientos quirúrgicos, sobre todo los realizados mediante cirugía de acceso mínimamente invasivo, ya que precisamente se han diseñado para superar las dificultades y las limitaciones técnicas de esta cirugía, la cual llegará a ser más segura, más fácil y, por lo tanto, más asequible. En este sentido, algunos autores consideran que la cirugía laparoscópica ha constituido una tecnología de transición hacia la cirugía robótica¹².

Y si tenemos en cuenta que la cirugía de acceso mínimamente invasivo ha revolucionado el mundo de la cirugía moderna, la cirugía robótica se está convirtiendo actualmente en el paradigma de la cirugía de nuestra era y de su futuro.

Bibliografía

1. Clearcy K, Nguyen C. State of the art in surgical robotics: Clinical applications and technology challenges. *Computer Aided Surgery*. 2001;6:312-28.
2. Davies BL, Hibberd RD, Timoney AG, Wickham JEA. A clinically applied robot for prostatectomies. En: *Computer-Integrated Surgery*. Taylor RH, Lavalée S, Burdea GC, Mosges R, editors. MIT Press; Cambridge, Massachusetts, USA: 1995. p. 593-601.
3. Nogler M, Polikeit A, Wimmer C, Bruckner A, Ferguson SJ, Krismer M. Primary stability of a Robodoc implanted anatomical stem versus manual implantation. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2004;19:123-9.
4. Bellamy RF. The causes of death in conventional land warfare: implications for combat casualty care research. *Mil Med*. 1984;149:55-63.
5. Ballantyne GH, Moll F. The Da Vinci telerobotic surgical system: the virtual operative field and telepresence surgery. *Surg Clin N Am*. 2003;83:1293-304.
6. Satava RM. Virtual reality and telepresence for military medicine. *Ann Acad Med Singapore*. 1997;26:118-20.
7. Cirugía robótica. Inicios y evolución. Disponible en: <http://ciberhabitat.gob.mx/hospital/robotica/inicio.htm>
8. Sackier JM, Wang Y. Robotically assisted laparoscopic surgery. From concept to development. *Surg Endosc*. 1994;8:63-6.
9. Marescaux J, Rubino F. The Zeus robotic system: experimental and clinical applications. *Surg Clin N Am*. 2003;83:1305-15.
10. Rossetti A, Sizzi O. Robotically-assisted laparoscopic surgery. The Trocar. 2002. Disponible en: <http://thetrocar.net/view.asp?ID=12>
11. Galvani C, Horgan S. Robots en cirugía general: presente y futuro. *Cir Esp*. 2005;78:138-47.
12. Satava RM. Emerging technologies for surgery in the 21st century. *Arch Surg*. 1999;134:1197-202.