

Cirugía robótica (II): situación actual y posibilidades futuras

C. Martínez-Ramos

Servicio de Cirugía Mayor Ambulatoria. Hospital Clínico San Carlos. Facultad de Medicina. Universidad Complutense. Madrid

Martínez-Ramos C. Cirugía robótica (II): situación actual y posibilidades futuras. *Cir May Amb* 2007; 12: 132-139.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los sistemas robóticos quirúrgicos actuales se ha producido fundamentalmente para poder superar y eliminar los inconvenientes y las limitaciones de la cirugía laparoscópica: la pérdida de la sensación de profundidad, la disminución de la sensación del tacto, el aumento del temblor fisiológico en las manos del cirujano, la pérdida del eje *ojo-mano-campo operatorio*, el *fulcrum effect* o *movimiento inverso*, las posiciones fijas, rígidas, incómodas y nada ergonómicas, la pérdida de maniobrabilidad y destreza quirúrgicas, etc., que hacen que se restrinja el ámbito de utilización de esta cirugía laparoscópica que no es factible en los procedimientos de gran dificultad técnica (1).

A pesar de encontrarnos en la fase inicial de su utilización, los robots quirúrgicos han adquirido ya un tremendo potencial para mejorar la precisión y la capacidad de los cirujanos más allá de los límites que impone este tipo de cirugía, convirtiéndola en más segura, más fácil y, por tanto, más asequible.

En un trabajo previo han sido expuestos el origen y la evolución de los sistemas robóticos quirúrgicos (2). El objetivo del presente trabajo es analizar su situación actual así como algunas de sus posibilidades futuras.

Recibido: julio de 2007.

Aceptado: agosto de 2007.

Correspondencia: Carlos Martínez-Ramos. Unidad de Cirugía Mayor Ambulatoria. Hospital Clínico San Carlos. C/ Profesor Martín Lagos, s/n. 28040 Madrid. e-mail: cmartinez.hcsc@salud.madrid.org

SITUACIÓN ACTUAL DE LOS SISTEMAS ROBÓTICOS

Los sistemas robóticos *Da Vinci* y *Zeus* son los que, dadas sus características, han acaparado el protagonismo actual de la cirugía robótica, siendo los más empleados en la cirugía de acceso mínimamente invasivo. Desde la aprobación por la FDA para su utilización quirúrgica, ha existido entre ambos sistemas una especie de "duelo de robots" a pesar de poseer, en principio, unas prestaciones básicamente similares (3). La competencia entre ambos sistemas robóticos estuvo acompañada por disputas entre las empresas que los habían desarrollado, *Computer Motion* (*Zeus*) e *Intuitive Surgical* (*Da Vinci*), respecto a la propiedad intelectual de algunos de sus componentes, como el sistema para eliminar el temblor de las manos (4).

En este marco de batalla comercial entre empresas que desarrollan nuevas tecnologías aplicadas a los robots quirúrgicos para un mercado en principio muy limitado, se tuvo que llegar a la fusión de las mismas, lo que ocurrió en junio de 2003 tras la compra de *Computer Motion* por *Intuitive Surgical* (5,6). A partir de ese momento el objetivo prioritario se centró únicamente en el sistema *Da Vinci*, a pesar de lo cual muchos cirujanos continúan utilizando el sistema *Zeus*. Además este es el único sistema robótico que en la actualidad se ha empleado para realizar telecirugía humana sobre grandes distancias (7).

Las principales propiedades de los sistemas robóticos actuales son: visión en 3 dimensiones con aumento del tamaño y resolución de la imagen; desaparición del *efecto fulcrum* o de movimiento inverso; recuperación del eje *ojo-mano-instrumental* y de la posición ergonómica del cirujano; eliminación del temblor fisiológico; utilización de instrumental articulado, más pequeño y con mayor movilidad; y posibilidad de movimientos en escala.

Gracias a estas características, los sistemas robóticos proporcionan al cirujano un control intuitivo, una amplia gama de movimientos, capacidad de manipulación de te-

jididos finos y visualización en tres dimensiones, todo lo cual es característico de la *cirugía abierta o convencional*, pero todo ello realizado a través de pequeñas incisiones, lo que es típico de la cirugía laparoscópica o *de acceso mínimamente invasivo*. Los sistemas robóticos devuelven al cirujano la perspectiva y la sensación de “estar dentro del campo operatorio”.

No obstante, actualmente existen todavía importantes aspectos por resolver y mejorar, siendo los más destacados la falta de sistemas eficaces de retroalimentación del sentido del tacto y de la fuerza; el gran peso y el voluminoso tamaño; la mayor duración de las intervenciones, debida tanto al propio acto quirúrgico como a la preparación del robot y de los equipos periféricos; el elevado coste, tanto inicial como derivado del mantenimiento y de la necesaria actualización de estos sistemas robóticos.

Sin embargo, se considera que estos inconvenientes en un futuro serán corregidos y superados, tanto con la creciente aceptación y consiguiente difusión de los robots quirúrgicos, como con la mejora de la tecnología, aunque la evolución del coste permanece dentro del terreno de la especulación y conjetura, ya que no se sabe si, con el paso del tiempo, el precio bajará o subirá. Para unos, las mejoras tecnológicas harán que disminuya. Para otros, las mejoras tecnológicas, como la retroalimentación táctil, el aumento de la velocidad de procesamiento y el desarrollo de un *software* más capaz y más complejo, harán precisamente que se eleve, al menos inicialmente (8).

APLICACIONES ACTUALES DE LA CIRUGÍA ROBÓTICA

Los sistemas *Zeus* y *Da Vinci*, una vez obtenidas las correspondientes acreditaciones tanto por la *Keymark* o *Marque de Conformité Européene* en Europa como por la *Food and Drug Administration* (FDA) norteamericana, han sido empleados en diferentes aplicaciones clínicas siguiendo el principio básico de que su utilización tiene como única finalidad no la de sustituir al cirujano, sino la de aumentar su destreza y capacidad ante procedimientos quirúrgicos complejos en cirugía de acceso mínimamente invasivo, por lo que su utilización será tanto más útil y adecuada cuanto más demandante sea técnicamente la intervención y cuanto más difícil sea la manipulación quirúrgica a causa de la estrechez del campo operatorio.

A pesar de que la cirugía robótica se encuentra en su fase inicial, actualmente ya se está utilizando en un amplio número de especialidades y procesos. En Aparato Digestivo se emplea en la cirugía del esófago, fundamentalmente para el tratamiento del reflujo gastroesofágico, de la acalasia y del cáncer precoz (9,10). En cirugía del estómago se realizan gastrectomías, piloroplastias, anastomosis gastroentéricas, así como gastropplastias, operaciones derivativas y colocación de bandas gástricas ajustables, para el tratamiento de la obesidad mórbida.

También se utiliza en cirugía de las vías biliares y en cirugía colorrectal (3,7,9-11).

En Cirugía Torácica, no cardíaca, se utiliza para realizar lobectomías, neumonectomías, linfadenectomías mediastínicas y timectomías (7). En Cirugía Cardíaca se emplea para efectuar *bypass* coronarios, reemplazamientos valvulares, pericardiectomías y corrección de defectos septales (7,12-15). En Cirugía Urológica se realizan nefrectomías, pieloplastias, reimplantación de uréteres, prostatectomías, cistectomías radicales. En Cirugía Ginecológica se utiliza en histerectomías, en cirugía anexial y en reconstrucciones tubáricas (16). También se está iniciando su aplicación en Cirugía Endocrina para realizar adrenalectomías (3,10,17).

A título orientativo, en los últimos 5 años se han instalado más de 400 robots *Da Vinci* a lo ancho del mundo, con los que se han realizado más de 300.000 intervenciones quirúrgicas. Sin embargo, la cirugía robótica todavía se encuentra en sus inicios y se lleva a cabo fundamentalmente en grandes centros hospitalarios de Europa, EE.UU., Canadá, México, etc., estando pendiente de establecerse y clarificarse algunos aspectos concretos sobre mala praxis, acreditación para este tipo de cirugía, establecimiento de programas de entrenamiento, etc. (7).

POSIBILIDADES FUTURAS DE LA CIRUGÍA ROBÓTICA

Algunas de las más claras aplicaciones futuras se derivan fundamentalmente de dos posibilidades de los sistemas robóticos. En primer lugar, si tenemos en cuenta que los robots no son más que sistemas informáticos, se tiene la posibilidad de que estos interactúen con otros como los actuales sistemas digitales de imagen médica, lo cual permite incrementar importantemente las propiedades de los *simuladores quirúrgicos*. Y en segundo lugar, un robot quirúrgico puede conectarse a un sistema de telecomunicaciones, lo que posibilita el poder llevar a cabo dos aplicaciones revolucionarias: la *telemonitorización quirúrgica* y la *telecirugía remota*.

Simuladores quirúrgicos

Las nuevas técnicas robóticas aplicadas a la cirugía, al igual que ocurre con cualquier tipo de innovación, normalmente encuentran una resistencia inicial para su utilización, hasta que los cirujanos lleguen a ser conscientes de que estos sistemas pueden hacer que su tarea sea más eficaz y más fácil. En este sentido el entrenamiento de los cirujanos es la clave del futuro de la cirugía robótica. Cada sistema robótico debe tener un programa específico de entrenamiento con simuladores quirúrgicos.

Estos simuladores robóticos tendrán un gran impacto en la formación de los cirujanos y podrán ser comparables a los empleados en los entrenamientos de los pilotos

de aviación, los cuales han llegado a ser tan realistas que los futuros pilotos realizan en el simulador miles de despegues y aterrizajes perfectos antes de efectuar el primer vuelo real.

Con la creación de simuladores quirúrgicos robóticos se modificará drásticamente la enseñanza práctica de la Cirugía que tradicionalmente se ha realizado en pacientes, modalidad cada vez menos aceptada por la sociedad, sobre todo en los procedimientos de alto riesgo. Además, estos simuladores también pueden constituir una herramienta objetiva para comprobar y evaluar la destreza y el grado de aprendizaje quirúrgico de los cirujanos en formación antes de permitirles realizar operaciones sobre los pacientes (7,10).

La incorporación a los simuladores quirúrgicos de los últimos avances en *realidad virtual* mejorará el entrenamiento de los futuros cirujanos. En este sentido hay que destacar la visualización de imágenes anatómicas en tres dimensiones, obtenidas a partir de exploraciones digitales del propio paciente (TAC o resonancia magnética) sobre las que el cirujano puede realizar un gran número de simulaciones quirúrgicas antes de llevar a cabo la operación. Estas *imágenes virtuales* permiten ver no sólo la anatomía normal sino también situaciones patológicas, como un tumor, pudiendo penetrar literalmente en el interior de la masa para observar el grado de infiltración y además buscar metástasis ganglionares.

Para que estos *órganos virtuales* reproduzcan las propiedades físicas y fisiológicas de los órganos reales se están incorporando, por un lado, sistemas de *modelos deformables* que permiten su comportamiento de forma realista ante la aplicación de la fuerza de las maniobras quirúrgicas (cortes, punciones, suturas, etc.) y, por otro, *programas de modelización* que “dotan” de riego sanguíneo a estos órganos virtuales, lo que incrementa el realismo del simulador (18-20).

La *realidad aumentada* se define como la combinación o superposición de situaciones del mundo real con otros datos que son generados por ordenador. Actualmente, tanto el concepto como la investigación sobre realidad aumentada se centran fundamentalmente en la combinación de imágenes de vídeo obtenidas en vivo y en tiempo real, sobre las que se proyectan imágenes generadas digitalmente por ordenador. En el caso de la robótica quirúrgica, la *realidad aumentada* consiste en superponer y fusionar, sobre las imágenes reales procedentes del campo operatorio de un paciente, imágenes obtenidas de exploraciones digitales realizadas previamente a ese mismo paciente, sobre estas mismas regiones anatómicas (TAC, RMN, angiografías, ecografías, etc.) (11,13).

De esta manera se pueden observar, en el monitor del sistema robótico, no sólo las imágenes de las estructuras anatómicas reales, sino también otras *fusionadas* sobre ellas y que permiten ver, por ejemplo, la estructura vascular de los órganos, normal o patológica (coronariopatías), la localización de una masa tumoral en una víscera o la existencia de posibles lesiones (por ejemplo, valvu-

lopatías cardíacas), todo ello sin necesidad de ser visualizadas directamente, lo cual facilitará la cirugía y la hará más precisa, más segura y más eficaz, ya que se proporciona al cirujano la posibilidad de disponer de una *visión de rayos X* que le podrá guiar en el campo operatorio, identificando más fácilmente la lesión que debe extirpar o reparar, así como las estructuras que ha de respetar (21).

Además, los simuladores con *realidad aumentada* ofrecen la posibilidad de que, antes de realizar una intervención quirúrgica más o menos compleja, el cirujano pueda planearla y ensayarla con antelación, basándose en las imágenes obtenidas de las exploraciones digitales previas utilizadas para efectuar el diagnóstico (TAC, RMN, etc.). De esta manera, una vez establecido el procedimiento óptimo, se podría incluso programar para que posteriormente sea realizado de forma automatizada por el robot bajo la supervisión del cirujano (17,22).

Por otra parte, se está llegando aun más lejos en la interacción con los sistemas de imágenes. En este sentido, y mediante el adecuado tratamiento informático de las imágenes digitales, se está trabajando actualmente para poder realizar intervenciones de *bypass* coronario en un corazón latiente, pero que el cirujano lo perciba y lo observe en situación de *parada cardíaca virtual*. Esto se puede conseguir mediante la sincronización de los movimientos de la cámara de vídeo y del instrumental quirúrgico del robot, con los movimientos de cada latido del corazón (13,23). De esta manera el cirujano operará sobre un campo estático, con el corazón en *parada cardíaca virtual*, cuando en realidad el corazón y las coronarias están en movimiento, facilitándose así la intervención e incrementándose la precisión quirúrgica.

Telemonitorización quirúrgica

Consiste en que un cirujano puede aconsejar y guiar a otro que esté operando a kilómetros de distancia. Ambos cirujanos comparten la misma visión del campo operatorio y el control sobre el sistema robótico, comunicándose a través de micrófonos. Este sistema se utiliza para que cirujanos expertos aconsejen y dirijan a jóvenes cirujanos con menor experiencia, durante la realización de procedimientos quirúrgicos. Y todo ello gracias a la posibilidad de poder conectarse un robot quirúrgico a un sistema de telecomunicaciones.

Este sistema puede ser utilizado para la formación a distancia en técnicas de cirugía mínimamente invasiva de cirujanos que, por diferentes motivos, no puedan desplazarse a los centros especializados donde poder iniciarse en el aprendizaje de estas técnicas quirúrgicas o donde poder aprender sus últimos avances. También puede ser aplicado para completar la formación quirúrgica de aquellos cirujanos que se han iniciado en estas técnicas en los centros especializados y que necesitan completar su curva de aprendizaje en hospitales situados en regiones re-

motas o en zonas rurales despobladas con escasos recursos formativos en el área quirúrgica.

A este tipo de actividad también se le conoce con el nombre de *telecontrol* y *teleconsejo quirúrgico*, ya que permite, desde la distancia, el seguimiento de la enseñanza así como el consejo y la ayuda a cirujanos en formación que necesiten el asesoramiento de un cirujano experto. Este podría contactar con el cirujano en formación, pudiendo tomar el control y “asistir” a la intervención, ayudando a resolver las dudas y problemas surgidos durante la misma.

Esta aplicación revolucionaría el concepto de formación y entrenamiento quirúrgico, ya que se puede establecer un “cordón umbilical” entre jóvenes cirujanos en formación y profesores de cirugía con mucha más experiencia, pudiéndose enseñar o dirigir la aplicación de una técnica avanzada o completamente nueva, en un lugar remoto y en tiempo real. Además, esta actividad podría realizarse a escala internacional, lo cual constituiría una importante y potente herramienta de ayuda y de enseñanza en estas particulares condiciones.

Esta situación, que hace poco tiempo podría considerarse utópica, en la actualidad ya constituye una realidad. En Hamilton, Ontario (Canadá), la Universidad de McMaster y el Hospital de St. Joseph han creado lo que se considera el primer proyecto mundial de *telecontrol* y *teleconsejo quirúrgico*, dirigido por el Dr. Mehran Anvari desde el *Centre for Minimal Access Surgery* (Fig. 1). Se trata de un centro de enseñanza de cirugía de acceso mínimamente invasivo para los cirujanos de todas las regiones del país, los cuales son formados en esta cirugía y, una vez que se reintegran a sus hospitales, en áreas muy alejadas de las zonas urbanas pobladas, continúan siendo supervisados y controlados en su entrenamiento quirúrgico y se les proporcionan consejos sobre dudas de aspectos concretos, en tiempo real, mientras realizan su actividad en el quirófano (24,25).



Fig. 1. Proyecto de *Telecontrol* y *Teleconsejo Quirúrgico*, dirigido por el Dr. Mehran Anvari desde el *Centre for Minimal Access Surgery* en Canadá.

Telecirugía remota

La *telecirugía* es el acto quirúrgico que se realiza por un cirujano ubicado en una situación distante respecto a la del paciente. Esta “situación distante” puede consistir en varios metros o en varios cientos o miles de kilómetros.

La manipulación robótica quirúrgica a distancia se realizó inicialmente mediante cables de varios metros de longitud para unir entre sí la acción del cirujano sobre el paciente, dentro del mismo quirófano. El reto consistía en saber cómo podían afectar a este tipo de cirugía los límites de la distancia. Las investigaciones en este sentido conducían siempre a la imposibilidad de reducir la *latencia* o *tiempo que transcurre* entre la acción del cirujano situado remotamente y el retorno de la imagen, con la acción efectuada sobre el paciente, a la correspondiente consola robótica donde se encuentra el cirujano. Así, un enlace vía satélite introduce una latencia de 600 milisegundos que hace imposible una manipulación quirúrgica con garantías de seguridad.

La primera experiencia en *telecirugía remota* se realizó el 7 de julio de 1993, entre Pasadena, California (*Jet Propulsion Laboratory*) y Milán (Italia) (*Telerobotics Laboratory* del Instituto Politécnico de Milán). Un robot italiano en Milán fue controlado remotamente por un cirujano desde EE.UU. El robot se utilizó para realizar una intervención quirúrgica sobre la vesícula biliar en un modelo experimental que contenía órganos de cerdo. La transmisión fue efectuada vía satélite. Posteriormente este sistema robótico fue utilizado para realizar desde el Instituto Politécnico de Milán una biopsia de próstata a un paciente ubicado en el Policlínico de Milán, situado a 5 km de distancia (26).

Una de las primeras intervenciones de teleneurocirugía fue realizada en España por el Dr. Enrique Ferrer, quien en 1998 intervino quirúrgicamente, desde un quirófano montado en un barco anclado en el puerto de Palma de Mallorca, a un paciente con hidrocefalia obstructiva que se encontraba en un quirófano del Hospital Clínico de Barcelona (27).

Las operaciones quirúrgicas a distancia han sido y son fomentadas y auspiciadas por la NASA y por la Secretaría de Defensa de Estados Unidos. La NASA ha llevado a cabo, en octubre de 2004, una experiencia de telecirugía simulada dentro del programa *NEEMO* (*NASA Extreme Environment Mission Operations*). El objetivo consistía en probar la viabilidad de los sistemas de telecirugía para solucionar situaciones de urgencias quirúrgicas que puedan presentarse tanto en la misión de la Estación Espacial Internacional como en los futuros viajes tripulados a la Luna y a Marte, para asegurar la salud de los astronautas y, por tanto, el éxito de estas misiones, dado el desorbitado coste que supondría evacuar a la tierra a estos astronautas o incluso la práctica imposibilidad de hacerlo (28-30).

Este programa se llevó a cabo en una instalación submarina llamada *Aquarius* situada a 19 metros de profundidad en el océano Atlántico, y a 5,6 km de la costa en

Cayo Largo, Florida (Figs. 2 y 3). Este hábitat submarino fue diseñado para reproducir las mismas condiciones ambientales extremas de la Estación Espacial Internacional, tanto físicas (tiene el mismo tamaño del módulo de servicio) como psicológicas. En este reducido espacio se encontraba la tripulación compuesta por 6 miembros entre los que se encontraba un médico de familia que no tenía formación quirúrgica alguna (28-30).



Fig. 2. Estación Aquarius antes de ser sumergida.



Fig. 3. Estación Aquarius sumergida en el océano Atlántico en Cayo Largo, Florida.

Los ensayos de telecirugía se efectuaron sobre un maniquí quirúrgico, utilizándose un sistema robótico *Zeus* en versión reducida de un solo brazo dado el escaso espacio de que se disponía (Fig. 4), el cual era manejado por un cirujano desde el Hospital St. Joseph en Ontario (Canadá) a 2.500 kilómetros de distancia (Fig. 5) quien, con ayuda de la tripulación, realizó intervenciones simuladas de colecistectomía, apendicectomía, drenaje de abscesos, suturas arteriales, suturas nerviosas y nefrostomías (28-30).

Respecto a la utilización de la telecirugía remota en el frente de combate, el Pentágono está financiando actualmente el proyecto de un sistema robótico llamado *Trauma*



Fig. 4. Sistema robótico *Zeus* de un solo brazo instalado en la estación Aquarius.



Fig. 5. Centro de control en el Hospital St. Joseph en Ontario, Canadá, del sistema robótico *Zeus* instalado en la estación Aquarius.

Pod Battlefield Medical Treatment System destinado a recoger soldados en el campo de batalla, inmediatamente después de ser heridos, valorar sus heridas y efectuar un tratamiento quirúrgico inicial para estabilizarlos, y posteriormente ser evacuados a un hospital de campaña (31-34).

Dado que el 90% de las muertes de soldados en combate se producen antes de poder ser evacuados, por hemorragia secundaria a lesiones de los grandes vasos de las extremidades, el objetivo inmediato del proyecto es el de conseguir, de forma remota, detener una hemorragia y posteriormente suturar y anastomosar los vasos sanguíneos. Todo esto realizado con un sistema que se conecte de forma inalámbrica, que no proporcione su posición al enemigo y que sea suficientemente manejable, ágil y resistente para que pueda actuar bajo el fuego de combate. La idea no es nueva y el proyecto retoma el iniciado a finales de los años 80 y que dio origen al desarrollo del robot *Da Vinci*.

Este proyecto está siendo desarrollado por un consorcio liderado por el *Standford Research Institute International* e incluye otras empresas como *General Dynamics*

Robotic Systems, Oak Ridge National Laboratory, Robotic Surgical Tech Inc., así como las Universidades de Tejas, de Washington y de Maryland. En este proyecto la tecnología básica está fundamentada en el robot *Da Vinci*, que ya está aprobado por la FDA y es usado actualmente en gran número de hospitales (31-34).

Los actuales sistemas robóticos, además de aumentar y mejorar las prestaciones humanas, proporcionan la única posibilidad de realizar actuaciones quirúrgicas en lugares remotos. Las intervenciones quirúrgicas remotas requieren, como elemento fundamental, una rápida y segura transmisión de la información para conseguir un adecuado *tiempo de latencia*. Investigaciones realizadas en este sentido han demostrado que el máximo de latencia compatible con la realización de una manipulación quirúrgica a distancia con garantías de seguridad oscila, aproximadamente, entre 200 y 300 milisegundos (23,35).

El sistema robótico *Zeus* ha permitido llevar a cabo una intervención quirúrgica en la que el paciente se encontraba en Francia y el cirujano en los Estados Unidos. Entre ambos se estableció una conexión de alta velocidad (cable de fibra óptica) que logró reducir la latencia a menos de 200 milisegundos, pudiéndose así realizar con éxito esta intervención quirúrgica remota.

Esta primera operación de *telecirugía transoceánica* se realizó el 7 de septiembre de 2001. Desde Nueva York, Jacques Marescaux, cirujano del Hospital Universitario de Estrasburgo, tardó 54 minutos en extraer la vesícula biliar de una paciente de 68 años que se encontraba en un quirófano de esa ciudad de Francia. Esta intervención fue denominada *Operación Lindbergh* en recuerdo y homenaje de la gesta del aviador Charles Lindbergh, quien en el año 1927 realizó por primera vez un vuelo, en solitario y sin repostar, a través del océano atlántico, volando desde Nueva York a París a bordo de su avión *Espíritu de San Luis* (Fig. 6) (36). En este caso ha sido el acto quirúrgico el que ha cruzado el océano atlántico.



Fig. 6. Charles Lindbergh en el año 1927 con su avión *Espíritu de San Luis*.



Fig. 7. Terminal o subsistema del cirujano situado en Nueva York.

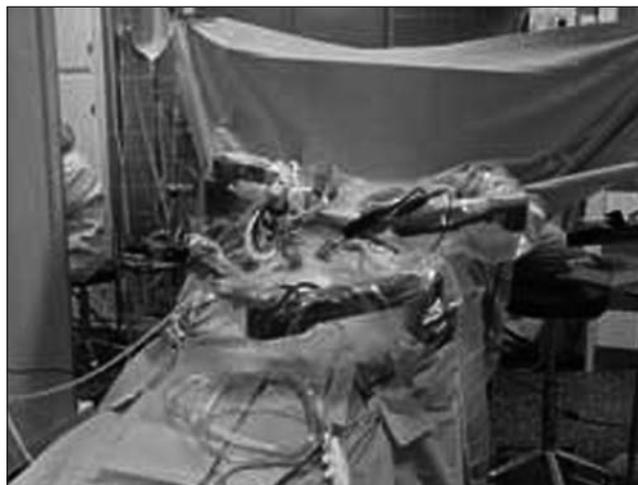


Fig. 8. Terminal o subsistema del paciente en Estrasburgo.

En esta intervención quirúrgica, el *terminal o subsistema del cirujano* estaba situado en Nueva York y el *subsistema del paciente* en Estrasburgo (Figs. 7 y 8). Sendos ordenadores conectados a canales de comunicación de alta velocidad enlazaron los dos subsistemas. La conexión entre ambas ciudades fue establecida por la empresa *France Télécom* a través de una red de fibra óptica en la que se reservó, durante la interconexión, un ancho de banda de 10 Mb/s (36).

La ubicación del cirujano se tuvo que realizar en un edificio no médico en Manhattan (oficinas de *France Télécom*) precisamente para poder disponer de la adecuada conexión a la red de fibra óptica, no disponible en la institución hospitalaria donde se había planeado inicialmente su ubicación. El equipo quirúrgico de Estrasburgo realizó el neumoperitoneo, preparó los brazos del robot y colocó los trócares. La intervención se realizó sin complicaciones y sin que se produjeran interrupciones en la transmisión de los movimientos quirúrgicos, ni degradación de la señal de vídeo (36).

Al margen de esta experiencia puntual, se ha iniciado un programa piloto de telecirugía en Canadá, donde 10

millones de habitantes viven en áreas rurales escasamente pobladas. Desde el *Centre for Minimal Access Surgery* del Hospital de St. Joseph en la Universidad de McMaster de Hamilton, Ontario, el 28 de febrero de 2003, se realizó la primera de una serie de intervenciones, mediante telecirugía entre hospitales, a un paciente ingresado en el Hospital General de North Bay, una comunidad rural situada a 400 kilómetros de distancia. La infraestructura de la telecomunicación mediante fibra óptica fue proporcionada por la empresa *Bell Canada* (22,24).

Las experiencias en *telecirugía remota* han sido realizadas siempre con el sistema robótico *Zeus*. Sin embargo, el sistema *Da Vinci* ha sido modificado y capacitado para la telecirugía y así, en abril de 2005, en el *American Telemedicine Association Meeting* se realizó con este sistema una nefrectomía en un cerdo ubicado en Sunnysvale, CA, desde el Centro de Convenciones de Denver, a 900 millas de distancia (7).

CONCLUSIONES

La implantación a gran escala de los sistemas quirúrgicos robóticos, con su gran potencial para mejorar la precisión y la capacidad de los cirujanos, dependerá de la solución de algunos aspectos concretos (precio, tamaño y peso, alargamiento del tiempo operatorio y de la ocupación quirúrgica, etc.).

La aplicación de los sistemas quirúrgicos robóticos al campo de la enseñanza de la cirugía es actualmente una realidad que en el futuro modernizarán y revolucionarán los métodos de formación y entrenamiento de los cirujanos.

Actualmente se ha demostrado que puede realizarse la *telecirugía humana de larga distancia* con garantías de seguridad, tanto desde el punto de vista de la viabilidad técnica como de la seguridad clínica. Sin embargo, para que la *telecirugía remota* pueda introducirse en la práctica clínica de manera rutinaria, se necesitan resolver problemas concretos, como la ausencia de comunicaciones por cable óptico de alta velocidad en la mayoría de los hospitales; el elevado coste derivado no sólo del precio de los actuales sistemas robóticos, sino también del uso de las líneas de telecomunicación; los posibles conflictos de jurisdicción por problemas de licencias médicas en diferentes países o estados; los problemas médico-legales derivados no sólo de la posible mala praxis quirúrgica, sino también por eventuales fallos en el equipamiento robótico o por excesivo retraso en la transmisión, etc.

En un futuro, la implantación de la telecirugía teóricamente eliminaría las limitaciones de tipo geográfico que condicionan el tratamiento que reciben determinados pacientes, debido a la falta de disponibilidad de cirujanos expertos. De esta manera, cualquier paciente podría recibir el tratamiento más apropiado y más moderno, lo cual podría tener un mayor impacto en países en vías de desarrollo, donde la asistencia sanitaria es frecuentemente proporcionada por voluntarios que no necesariamente tienen expe-

riencia en todos los campos de la medicina y de la cirugía.

Finalmente, hay que tener presente que la telecirugía remota se encuentra íntimamente asociada a los sistemas robóticos y a las tecnologías de la comunicación y, por consiguiente, se beneficiará de la evolución que en el futuro se produzca en estos campos, siendo de gran importancia la aplicación de los avances en el terreno de la *realidad virtual*, de la *realidad aumentada* y de la *simulación quirúrgica*. La combinación de estas técnicas podría conducir a una nueva era en donde fuese posible la realización de una *telecirugía semiautomática* o incluso *completamente automática*. En este sentido, el doctor Richard Savata, cirujano pionero en el desarrollo de la cirugía robótica, considera que en los próximos 40-50 años la cirugía se llevará a cabo mediante sistemas robóticos y de manera completamente automatizada (33).

Las posibilidades futuras para ampliar, mejorar y aplicar los sistemas quirúrgicos robóticos sólo estarán limitadas por la propia imaginación humana y por el coste económico de los mismos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Martínez-Ramos C. Robótica y cirugía laparoscópica. *Cir Esp* 2006; 80 (4): 189-94.
2. Martínez-Ramos C. Cirugía robótica (I): origen y evolución. *Cir May Amb* 2007; 12 (3): 89-96.
3. Jacob BP, Gagner M. Robotics and general surgery. *Surg Clin N Am* 2003; 83: 1405-19.
4. Computer Motion to start patent infringement war on medical robotics against intuitive surgical. Available at: <http://www.hoise.com/vmw/00/articles/vmw/LVVM070018.html>
5. Intuitive Surgical and Computer Motion to merge. Available at: http://findarticles.com/p/articles/mi_m0BPC/is_4_27/ai_100484220
6. Intuitive Surgical and Computer Motion to merge. Available at: <http://trueforce.com/News/ComputerMotionNews/ComputerMotion20030307.htm>
7. Kurley KC, Moses GR. Los usos de los robots quirúrgicos. Disponible en: http://www.intramed.net/actualidad/art_1.asp?nomCat=Articulos&IDactualidad=41804
8. Lanfranco A, Castellanos AE, Desai JP, Meyers WC. Robotic surgery. A current perspective. *Ann Surg* 2004; 239: 14-21.
9. Gould JC, Melvin WS. Telerobotic foregut and esophageal surgery. *Surg Clin N Am* 2003; 83: 1421-7.
10. Galvani C, Horgan S. Robots en cirugía general: presente y futuro. *Cir Esp* 2005; 78: 138-47.
11. Hashizume M, Sugimachi K. Robot-assisted gastric surgery. *Surg Clin N Am* 2003; 83: 1429-44.
12. Batellini R, Falk V, Mohr F. Cirugía coronaria miniinvasiva asistida por computadora (robótica). *Rev Arg Cardiol* 2003; 71: 302-6.
13. Diodato MD Jr, Damiano RJ Jr. Robotic cardiac surgery: Overview. *Surg Clin N Am* 2003; 83: 1351-67.
14. Falk V, Jacobs S, Gummert J, Walter T. Robotic coronary artery bypass grafting (CABG). The Leipzig experience. *Surg Clin N Am* 2003; 83: 1381-6.
15. Kypson AP, Nifong LW, Chitwood WR Jr. Robotic mitral valve surgery. *Surg Clin N Am* 2003; 83: 1387-403.
16. Falcone T, Goldberg JM. Robotics in gynecology. *Surg Clin N Am* 2003; 83: 1483-9.
17. Sung GT, Gill IS. Robotic renal and adrenal surgery. *Surg Clin N Am* 2003; 83: 1469-82.
18. Monserrat C, Alcañiz M, Meier U, et al. Simulador para el entrenamiento en cirugías avanzadas. 2003. Disponible en: <http://www.dsic.upv.es/~cmonserr/Articulos/Simul2003.pdf>.

19. Levis D. Realidad virtual y educación. 1977. Disponible en: http://www.diegolevis.com.ar/secciones/Articulos/master_eduvirtual.pdf.
20. Maddern GJ. Robotic surgery: Will it be evidence-based or just "toys for boys"? *Med J Australia* 2007; 186: 221-2.
21. Meier U, Monserrat C, Alcañiz MC, et al. Simulación quirúrgica. 2003. Disponible en: <http://www.dsic.upv.es/~cmonserr/Articulos/Simul2003.pdf>.
22. Cirugía Robótica. Disponible en: http://www.depeca.uah.es/docencia/doctorado/cursos04_05/83190/Documentos/Cirugiarobotica.pdf
23. Kay S. Remote Surgery. Available at: http://www.pbs.org/wnet/innovation/episode7_essay1.html
24. Ideals inspire medical innovators. Available at: <http://news.bahai.org/story/210>
25. Zeidenberg J. International teaching centre for keyhole surgery opens in Hamilton. Available at: <http://www.canhealth.com/dec99.html#anchor34332>
26. Carbajal A. TecnoCirugía 2001. Disponible en: <http://www.med.uchile.cl/anterior/otros/laparosc/index.html>
27. Ferrer E. Teleneurosurgery. Presented at the 5th International Congress of Minimally Invasive Surgery. Cairo, Egypt: 2001.
28. NASA Extreme Environment mission operations NEMO. Available at: <http://spaceflight.nasa.gov/shuttle/support/training/neemo/neemo7/>
29. Schiber M. NEEMO's undersea operations: Making telemedicine a long distance reality. Available at: http://www.space.com/scienceastronomy/neemo_surgery_041019.html
30. Jackson W. Sea medicine. Available at: http://www.gcn.com/print/23_29/273961.html
31. Christensen B. Trauma Pod Battlefield Medical Treatment System. Available at: <http://www.technovelgy.com/ct/ScienceFictionNews.asp?NewsNum=364>
32. Robotic trauma pod sought. Available at: <http://www.washtimes.com/national/200503281253046012r.htm>
33. Satava RM. Robotic surgery: From past to future. A personal journey. *Surg Clin N Am* 2003; 83: 1491-500.
34. Elias P. Pentagon invests in unmanned trauma pod. Available at: <http://www.usatoday.com/tech/news/20050328traumapodpentagon.htm>
35. Fabrizio MD, Lee BR, Chan DY, et al. Effect of time delay on surgical performance during telesurgery manipulation. *J Endourol* 2000; 14: 133-8.
36. Marescaux J, Leroy J, Rubino F, et al. Transcontinental robot-assisted remote telesurgery: Feasibility and potential applications. *Ann Surg* 2002; 4: 487-92.