

# Cibernética en cirugía

Myr. M.C. Antonio García Ruiz\*

Hospital Central Militar. Ciudad de México  
y Cleveland, Ohio

**RESUMEN.** Desde sus inicios, la informática ha influenciado la práctica médica en forma considerable. El avance acelerado que caracteriza a esta ciencia impone necesidades particulares para actualización de sus usuarios. En particular, los médicos tenemos necesidad de conocer de estos avances para la mejor atención de nuestros pacientes, así como para participar en el desarrollo de nuevos equipos y técnicas con una orientación de utilidad práctica. En este artículo se revisan cuatro de las áreas de informática que más influencia han tenido actualmente en la cirugía: realidad virtual, telemedicina, navegación quirúrgica y robótica.

**Palabras clave:** cirugía, cibernética, robótica.

La cibernética, en su definición original, se refiere al estudio de la comunicación entre sistemas biológicos y artificiales. Aunque su concepto ha evolucionado considerablemente y se ha diversificado hacia muchas áreas de estudio, probablemente la contribución más significativa de esta disciplina ha sido el desarrollo de los sistemas de computación. Para cumplir con los objetivos de la presente revisión, a continuación se presenta, en forma mas bien general, las áreas en que las ciencias de la computación han influenciado el desarrollo y la práctica de la cirugía general en nuestros días.

**Realidad virtual.** El lenguaje de la nueva generación de médicos y cirujanos está lleno de nuevas palabras: realidad virtual, telepresencia, telemedicina, instrucción interactiva, navegación quirúrgica, etc. Aunque la mayoría de estos términos tienen que ver con cosas que son virtuales, esto es que no existen realmente, es bien cierto que gracias a esta «avalancha tecnológica» hemos cruzado irremediabilmente de la era de la industrialización a la era de la información y más aún, a una era que pudiera llamarse de la comunicación. La

**SUMMARY.** Computer science, ever since its beginning, has had a strong influence in medical practice. Computer users have a special need to keep updated because of the speed at which this technology is changing. Doctors, in particular, have to know these advances to improve medical care and also to clinically orient the development of new equipment and techniques. This article reviews four of the informatics areas that influence the most current surgical practice: virtual reality, telemedicine, surgical navigation, and robotics.

**Key words:** surgery, cybernetics, robotics.

informática ha modificado permanentemente la forma en que practicamos la medicina y lo seguirá haciendo hasta puntos desconocidos por el momento.

La educación, el entrenamiento, la planeación, las pruebas y evaluaciones pueden ser más eficientes si se usan medios de «realidad virtual». Todas estas capacidades se conjugan en una interfase digital, esto es una red de computadoras, un visor estereoscópico, un monitor de tercera dimensión o un holograma. Usando estas tecnologías el médico puede conectarse electrónicamente con el conocimiento científico para transformar la educación en una experiencia más interactiva. En cuanto a educación y entrenamiento quirúrgico, la realidad virtual es la más prometedora de las nuevas tecnologías de informática. Este concepto, que nació modestamente con los simuladores quirúrgicos computarizados, tiene un horizonte increíblemente amplio.

Aunque mucha de la publicidad que se le ha dado a la realidad virtual está basada en especulaciones, en el campo de la medicina y la ciencia tiene un potencial inmenso para generar una gran cantidad de aplicaciones nuevas. En educación, puede facilitar y mejorar la enseñanza de anatomía y de procedimientos médicos o quirúrgicos; en planeación médica, nos permite entrenamiento para casos de desastres y accidentes masivos; en diseño virtual, nos ayuda a desarrollar y evaluar equipos, instrumentos y quirófanos, antes siquiera de iniciar su fabricación.

La realidad virtual es una rama de las ciencias de la computación que, para lograr sus objetivos, se vale de

\* Adjunto del Servicio de Cirugía General. Hospital Central Militar. Departamento de Cirugía, Sección de Cirugía General. México, D.F.

**Correspondencia:**

Myr. M.C. Antonio García Ruiz. Sala de Cirugía de Mujeres, Hospital Central Militar. Periférico Norte S/N México, D.F. CP 11600 Tel 5/ 557-3100 (ext. 1255) FAX 5/395-0468 e-mail:garciar@hotmail.org

«mundos» imaginarios, creados con computadoras especializadas en el manejo de imágenes tridimensionales. Una vez en ese «mundo» artificial, que bien puede ser un edificio, una molécula o el abdomen, el médico o estudiante pueden explorarlo ampliamente. La computadora envía estas señales virtuales a los monitores audiovisuales y a su vez, la computadora recibe información del usuario por medio de sensores instalados en varios dispositivos, por ejemplo un guante-sensor (DataGlove). Cuando el sistema se encuentra funcionando, el sujeto se disocia del mundo real y se sumerge totalmente en un mundo virtual, moviéndose (o volando) alrededor en un escenario tridimensional y usando el guante para tomar, desplazar e interactuar con objetos virtuales como si estos realmente existieran.<sup>18,23</sup>

Hace poco más de 10 años, científicos de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) de EUA usaron los vídeos enviados digitalmente a la Tierra por la sonda espacial que aterrizó en Marte para crear el primer modelo de realidad virtual. El usuario de este modelo podía «volar» virtualmente sobre la superficie de Marte. Poco después, se desarrolló el primer modelo virtual que se aplicó para planeación y educación quirúrgica: la «Pierna Virtual».<sup>2</sup> Este modelo permitía practicar la reimplantación de tendones y basándose en parámetros cinemáticos, podía estimar resultados a largo plazo de varios procedimientos. En 1991, apareció el primer simulador que usó instrumentos quirúrgicos en un «abdomen virtual» con órganos simplificados.<sup>8,24,25</sup> En este simulador el modelo virtual es una recreación tridimensional del abdomen, con estómago, hígado, vías biliares, páncreas, bazo y colon. Usando el visor estereoscópico y el guante-sensor, el cirujano en entrenamiento podía tomar una clase de anatomía «volando» alrededor de los órganos o «viajando» por la luz de los mismos. Aunque esto pudiera sonar como un juego, el poder educativo de esta herramienta es superior, ya que provee al médico y al estudiante una perspectiva única de las interrelaciones de los órganos abdominales que sería imposible obtener mediante libros o disecciones cadavéricas.<sup>9,26</sup> Añadiendo instrumentos quirúrgicos al «abdomen virtual», como bisturí, tijeras o pinzas, el residente quirúrgico puede practicar procedimientos en los órganos generados por la computadora. En los años siguientes han aparecido simuladores quirúrgicos más complejos, las estructuras virtuales ahora tienen propiedades físicas. Esto es, pueden ser deformadas por presión o estiramiento, tienen textura visual, que semeja inclusive aspecto húmedo, y son de mucho mayor definición óptica. Los simuladores quirúrgicos más recientes (tercera generación) tienen un realismo visual aún mayor con propiedades fisiológicas, esto es, pueden sangrar y tener secreciones. Las generaciones venideras de estos aparatos posiblemente incluyan representaciones de anatomía microscópica y modelos bioquímicos, permitiendo el paso de uno a otro nivel estructural sin dificultad.<sup>15</sup>

Las imágenes de vídeo juegan un papel primordial en la mayoría de los procedimientos conocidos ahora como Cirugía de Invasión Mínima. Este hecho, el auge de estas nuevas técnicas quirúrgicas y la gran demanda de entrenamiento que

existe en los diferentes medios hospitalarios, han motivado la producción de simuladores que se valen de métodos de realidad virtual para lograr un mejor efecto educativo (Figura 1).

Además del realismo de los objetos representados, los sistemas de realidad virtual tienen otra característica: el efecto de «inmersión». Este concepto se refiere a la sensación de estar situado totalmente dentro del escenario virtual.

A la fecha los simuladores han incorporado exitosamente el aspecto del realismo. Sin embargo, las investigaciones continúan arduamente con relación al efecto de inmersión. El problema básico es la gran cantidad de procesos que tiene que realizar la computadora para obtener cada uno de estos efectos. A pesar de lo avanzado de las computadoras



Figura 1. Simulador quirúrgico virtual para colecistectomía laparoscópica.

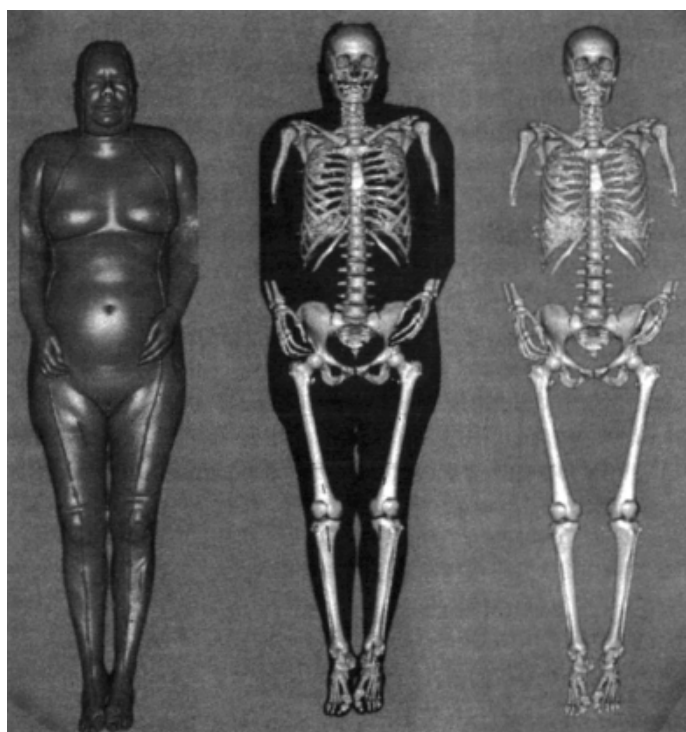


Figura 2. Proyecto «el humano visible».

actuales, estamos aún lejos de tener el poder suficiente para procesar la cantidad de información necesaria para reunirlos simultáneamente.

Bajo los auspicios de la Biblioteca Nacional de Medicina de los EUA, el proyecto «El Humano Visible» ha sido hecho público recientemente.<sup>25</sup> Este proyecto ha creado dos «cadáveres virtuales», uno masculino y otro femenino, a partir de cortes milimétricos de tomografía axial computarizada, resonancia magnética y fotografía criotomográfica tomados de cadáveres humanos (*Figura 2*). Este proyecto se ha vuelto un recurso internacional que provee un «estándar» de anatomía humana y que dará lugar a un modelo humano virtual ultrarealístico. En el momento actual del proyecto, la base de datos total se ha subdividido y asignado a varios grupos de investigadores para reconstruir modelos de los diferentes órganos y estructuras. En su momento, estos modelos servirán para fines educativos y de entrenamiento integrándose en una variedad de programas de computadora y simuladores. Algunas secuencias y demostraciones del proyecto pueden ser vistas en su dirección de Internet: <http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible-human.html>

El valor de los simuladores se extiende además al área de educación básica y referencia. En ciencias básicas, por ejemplo, hay programas que usan medios de realidad virtual para enseñar al estudiante anatomía, patología, radiología y evaluación de casos clínicos y usan el mismo modelo virtual para practicar procedimientos médicos y quirúrgicos. Algunos de estos programas pueden poner al estudiante en comunicación directa con bibliotecas para consultar bases de datos (como Index Medicus y otras) en cualquier momento. El poder de la educación está ahora a total disposición del estudiante, sin límites de horarios ni espacios.<sup>8</sup>

Otra aplicación de la realidad virtual es la planeación de atención médica en casos de desastres y situaciones de trauma múltiple. Existe ahora una nueva generación de simuladores computarizados que pueden ubicar al estudiante o médico en un escenario virtual de desastre o campo de batalla, por ejemplo. El estudiante, médico o cirujano, puede practicar la asignación de prioridades, proveer primeros auxilios y coordinar medidas de atención médica en varios niveles.<sup>20</sup> Esto es, ensayar sus procedimientos previamente a una situación de emergencia real.<sup>24,25</sup> Una aplicación más es el uso de realidad virtual para diseñar instalaciones, equipo e instrumentos médicos. Con esta tecnología, los ingenieros usan programas de computación para diseñar y probar sus productos antes de llevar el proyecto a las fábricas.<sup>10</sup>

Otros proyectos sumamente ambiciosos se encuentran en desarrollo. En uno de ellos (Hermes, Computer Motion, Goleta CA, EUA) se pretende integrar la mayoría de los equipos del quirófano bajo un «control maestro» al alcance del cirujano durante el procedimiento. Esto es, el cirujano podrá ajustar a su necesidad la iluminación, los equipos de electrocirugía y vídeo, aspiración e irrigación, la temperatura ambiente y la del paciente, las funciones de la mesa de operaciones, etc. Los medios de realidad virtual pueden incorporar múltiples tecnologías de informática para lograr

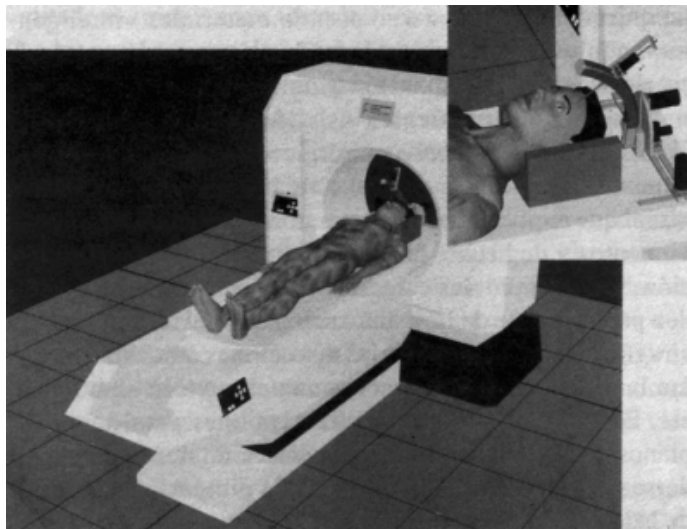
un quirófano más moderno usando materiales «inteligentes», equipos electrónicos de bajo consumo, sistemas microelectrónicos, visualización tridimensional, etc.

**Navegación quirúrgica asistida por computadora.** Todos los procedimientos quirúrgicos son actos fundamentalmente visuales. Esto es, el cirujano usa la información visual que recibe del campo operatorio para decidir sus movimientos y de hecho, procede en función de esa información. Por ejemplo, las características de la incisión dependen precisamente de la visualización que permite durante la cirugía, la minuciosidad de las disecciones aumenta conforme la dificultad para observar una estructura anatómica, etc. Es habitual que para abordar lesiones patológicas de planos anatómicos profundos, la disección tiene que extenderse considerablemente más que las dimensiones mismas de la lesión. Esto es particularmente cierto para aquellas lesiones situadas en el parénquima de órganos sólidos, como el hígado, el cerebro, etc.

En cirugía convencional el cirujano interpreta la anatomía del paciente bajo una superficie visual del campo operatorio y mediante palpación directa, magnificación óptica o aparatos especiales de iluminación, puede hacer estimaciones «volumétricas» para identificar y disecar correctamente los tejidos evitando el daño a estructuras vitales. En cirugía endoscópica, por sus inherentes restricciones de manipulación, el cirujano depende completamente de la inspección visual para evaluar la anatomía y patología que se le presentan en forma de imágenes bidimensionales magnificadas pero de campo visual reducido. Por tanto, el cirujano se ve limitado para efectuar esos cálculos «volumétricos» tan necesarios.

Una solución posible a este problema es la integración de procedimientos quirúrgicos con tecnologías de imagen intraoperatorias.<sup>16</sup> Cuatro de los métodos de imagen disponibles en la actualidad-fluoroscopia, ultrasonido, tomografía axial computarizada (TAC) e imagen por resonancia magnética (IRM) - pueden ser usados intraoperatoriamente. A excepción de la fluoroscopia, estas modalidades habían permanecido fundamentalmente como métodos de diagnóstico preoperatorio y control postoperatorio. Sin embargo, las innovaciones técnicas, particularmente la integración de sistemas computarizados de alta velocidad, han capacitado estas técnicas de imagen para asistir durante procedimientos quirúrgicos con agilidad y seguridad, convirtiéndose en instrumentos de «navegación quirúrgica» (*Figura 3*).

Es indudable que los cirujanos nos hemos acostumbrado a la fluoroscopia intraoperatoria y aparentemente la ultrasonografía se usa cada vez mas dentro del quirófano. No obstante, los grandes avances en resolución y las técnicas de reconstrucción tridimensional de los estudios de TAC y de IRM han convertido estos recursos particularmente atractivos para el cirujano. Desafortunadamente la miniaturización de los equipos de TAC y de IRM no ha llegado al grado de volverlos «portátiles», por lo que ha sido necesario convertir las salas de radiología en verdaderos quirófanos a fin de usar estas tecnologías intraoperatoriamente. Otra circunstancia que hay



**Figura 3.** Instrumentos de navegación quirúrgica. Tomografía axial computarizada.

que tener en cuenta es que, a diferencia de la fluoroscopia y el ultrasonido, la adquisición y representación de imágenes en estos estudios no es exactamente «tiempo real». Por ejemplo, en una secuencia de fluoroscopia, la velocidad de proyección en la pantalla es de 30 imágenes por segundo, esta velocidad da la impresión óptica de movimiento en «tiempo real». En ultrasonido, pasan a una velocidad de 20 por segundo. Aunque menor, esta velocidad sigue dando la impresión de movimiento continuo. Los aparatos más recientes de TAC pueden procesar imágenes a una velocidad de 15/segundo y los de IRM pueden presentar una imagen por segundo. Lo cual hace su asistencia en cirugía un tanto más complicada. No obstante, el uso intraoperatorio de estas tecnologías ofrece varias ventajas. La precisión de los efectos terapéuticos y los márgenes de seguridad, particularmente en áreas peligrosamente rodeadas de estructuras vitales, puede incrementarse si las imágenes de superficie provistas por el endoscopio se combinan con la información obtenida por el tomógrafo en tiempo «casi real».

Por otra parte, los objetivos de seguridad en cirugía de invasión mínima requieren referencia visual continua sobre la posición de los instrumentos en relación con las estructuras anatómicas dentro del área, o más bien «volumen», operatorio. Esto obliga a que la cámara endoscópica «siga» los movimientos de los instrumentos para obtener un control adecuado de cada paso del procedimiento, así como de los cambios inesperados en la geometría anatómica dentro del volumen operatorio. Lo anterior incrementa el tiempo quirúrgico en forma importante. Una de las iniciativas para resolver este problema puede ser el uso de sistemas de navegación estereotáctica que proyectan un instrumento virtual dentro de un estudio tomográfico obtenido antes de la cirugía. Este método ha dado resultados prometedores en cirugía de cabeza y cuello. Las proporciones relativamente estables del volumen operatorio en cirugía de senos paranasales y de cráneo permite la localización preoperatoria adecuada de la posición de

los instrumentos. A pesar de esto, aún hay problemas por resolver, por ejemplo, la remoción o drenaje de colecciones líquidas, el sangrado y el edema de los tejidos inducen cambios en la configuración espacial del volumen operatorio que no aparecen en la imagen preoperatoria. Ahora bien, durante procedimientos torácicos y abdominales, existen cambios continuos y de mayor graduación debidos a los movimientos de respiración, latido cardíaco y pulsos, actividad peristáltica intestinal, etc. Con los sistemas actuales, los estudios preoperatorios no permiten la percepción de estos movimientos durante cirugía. A este respecto, se está investigando la posibilidad de reproducirlos mediante aplicaciones de realidad virtual generadas por computadora.

En conclusión, es importante que los cirujanos nos enteremos de estos avances y nos involucremos con los servicios de radiología e imagen de nuestros hospitales para iniciar proyectos de colaboración interdisciplinaria e integrar la infraestructura necesaria para la realización de procedimientos quirúrgicos con guía asistida por imágenes tomográficas.

**Telemedicina.** La telemedicina consiste en el uso de telecomunicaciones para proveer servicios médicos en sitios distantes. Aunque este concepto incluye el uso médico del teléfono, facsímil y toda forma de educación a distancia, actualmente la telemedicina se basa cada vez en el uso de medios audiovisuales interactivos para alcanzar sus fines.

El desarrollo de la telemedicina ha crecido extraordinariamente en la presente década.<sup>19</sup> Como ha ocurrido con muchos de los avances en medicina, gran parte de este impulso ha venido de circunstancias fuera del contexto médico. En este caso, dos de los factores más importantes han sido las tendencias políticas y económicas que dominan los sistemas de atención médica en el ámbito internacional y el gran impulso que se ha dado al desarrollo de las redes de informática, entre ellas Internet. Siguiendo la política de contingencia económica, las empresas hospitalarias se han decidido a incrementar sus áreas geográficas de «captación» de pacientes para abaratar sus costos. Mientras tanto los proveedores de servicios de comunicaciones con aparatos de telemedicina compiten arduamente para lograr contratos con los hospitales que quieren proveer este servicio. Esto ha generado que los fabricantes de equipo de teleconferencia, proceso computarizado de imágenes, computadoras multimedia y equipo médico dirijan grandes campañas comerciales sobre dependencias, hospitales, médicos y público en general.

La telemedicina tiene diferentes efectos, según el punto de vista en que se le analice.<sup>19</sup> Para los habitantes de poblaciones marginadas puede ser una herramienta de gran valor para obtener servicios médicos especializados sin necesidad de trasladarse a instituciones hospitalarias de alto nivel. Para los médicos de estas instituciones puede ser un modo más eficiente de uso de recursos médicos ya existentes. Para los hospitales que cuenten con esta tecnología se puede convertir en un medio para «captar» pacientes fuera de su área geográfica de influencia. Para intereses puramente comerciales puede ser un modo de generar y atraer divisas



**Cuadro 1. Interacciones y aplicaciones de telemedicina.**

| Propósito                          | Modo de interacción                                                                         | Información transferida                                 | Amplitud de banda | Aplicaciones                                                           |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Consulta diagnóstica o terapéutica | Vídeo en tiempo real interactivo en una o dos direcciones                                   | Voz, sonido, vídeo, imágenes, textos                    | Moderada a alta   | Telepsiquiatría<br>Telecirugía<br>Exámenes interactivos                |
| Consulta diagnóstica o terapéutica | Imágenes estáticas o secuencias de vídeo con interacción vocal telefónica en tiempo real    | Voz, sonido, vídeo, imágenes, textos                    | Baja a moderada   | Dermatología<br>Cardiología<br>Otorrinolaringología<br>Ortopedia, etc. |
| Consulta diagnóstica o terapéutica | Imágenes estáticas, secuencias de vídeo, textos, datos almacenables para revisión posterior | Sonido, imágenes estáticas, secuencias de vídeo, textos | Baja              | Dermatología<br>Cardiología<br>Otorrinolaringología<br>Ortopedia, etc. |
| Educación médica                   | Vídeo en tiempo real interactivo en una o dos direcciones<br>Vídeos pregrabados             | Voz, sonido, vídeo, imágenes, textos                    | Baja a alta       | Educación y entrenamiento a distancia                                  |
| Documentación<br>Administración    | Transferencia electrónica de textos, imágenes u otros datos                                 | Textos, imágenes, documentos, datos relacionados        | Baja a alta       | Redes de información de Salud,<br>Expedientes médicos                  |

internacionales. Pero para otros, sobre todo los médicos de comunidades pequeñas de algunos países, puede representar una seria amenaza a los escasos recursos económicos de sus sistemas locales de salud.

A este respecto, nuestra vecindad con los Estados Unidos de América se convierte en una «navaja de dos filos» que por una parte agiliza la llegada de estas nuevas tecnologías y por otra nos obliga a invertir esfuerzos adicionales para entender anticipadamente las condiciones de uso y mecanismos a fin de que sus beneficios sirvan más a nuestros propósitos que a intereses ajenos. En cualquier circunstancia, lo más probable es que muchos de nuestros médicos se vean directamente o indirectamente involucrados en diversos asuntos de telemedicina dentro de los siguientes 5 años. Por lo tanto, como futuros usuarios es importante que los cirujanos entendamos cuando menos los principios básicos de la telemedicina y tener siempre en cuenta que su objetivo debe ser facilitar el acceso a ciertos tipos de atención médica especializada y mejorar la calidad general de la atención a nuestros pacientes.

La telemedicina comprende el uso de varias tecnologías y puede tener diversas aplicaciones clínicas. Su aspecto fundamental es el uso de señales electrónicas y/o digitales para transferir información de un sitio a otro. Los sistemas de telemedicina se pueden caracterizar por el tipo de información que se envía, tales como radiografías o hallazgos clínicos y por los medios que se usen para transmitirla. Muchas áreas médicas tienen aplicaciones potenciales de telemedicina: desde el simple envío de imágenes estáticas vía fax, como un trazo electrocardiográfico, hasta las más complejas como efectuar procedimientos de cirugía asistida a distancia que requieren transmisión continua de señal de vídeo en uno o dos sentidos (*Cuadro 1*). La selección eficien-

te de la vía de comunicación por usar es un factor muy importante, ya que el costo es directamente proporcional a la cantidad de información que se desee transmitir. La capacidad de transmisión por unidad de tiempo, esto es la «amplitud de banda», sigue siendo el límite práctico del tamaño y costo de los sistemas de telemedicina actuales. Por ejemplo, la transmisión continua de un vídeo, con interacción en dos sentidos, requiere cerca de 1300 veces más amplitud de banda que una llamada telefónica convencional. Hasta hace poco la transmisión continua de señal de vídeo con alta resolución requería medios muy costosos, tales como satélites o microondas. Los costos de estos medios de comunicación pueden rebasar los \$ 400 USD por hora. Los avances recientes en tecnologías de digitalización y compresión de datos permiten la transmisión de cantidades enormes de información con una amplitud de banda sustancialmente menor. Los costos de transmisión para estas señales comprimidas equivalen a un décimo de los costos por vía satélite. Estos avances de la comunicación han permitido el inicio de programas de «telementoría» en que cirujanos con gran experiencia pueden «guiar» instantáneamente a otros cirujanos en lugares distantes durante procedimientos quirúrgicos. En un futuro más bien cercano, gracias a los avances en robótica, la asistencia durante estos casos de «telecirugía» será guiada no sólo por instrucciones verbales sino por asistencia mecánica robotizada, como veremos más adelante.

Aunque la unidad más elemental de telemedicina sigue siendo el teléfono, la gran mayoría de las unidades actuales incluyen la transmisión de algún tipo de imágenes. Los grandes pioneros de esta tecnología han sido la telerradiología y la telepatología. Sin embargo en la presente década la telemedicina pasó de un periodo de relativa obscuridad, donde los proyectos eran casi exclusivamente de demostración, a

otro de gran actividad con aplicaciones clínicas reales. La gran disponibilidad actual de computadoras ha hecho relativamente fácil el integrar sistemas básicos de telemedicina. Dos o más unidades distantes (computadoras con sus respectivos «modems») pueden conectarse vía telefónica directamente o a través de una red de comunicaciones como Internet. Así de simple es el tipo de conexiones que inicialmente requiere esta tecnología. A partir de ahí, las unidades básicas pueden seguir «creciendo» al multiplicar las capacidades de comunicación entre las unidades existentes o incrementar el número de unidades en la nueva «red».

Algunos programas de telemedicina se han enfocado sobre atención médica primaria, esto es, hace las funciones de una consulta externa. Por ejemplo, en lugar de que los pacientes ya operados tengan que venir al hospital a sus consultas de seguimiento, una enfermera técnicamente entrenada efectúa visitas domiciliarias de acuerdo a una ruta preestablecida. Luego de la revisión clínica, la enfermera registra los datos que obtuvo en su unidad computarizada portátil y da las indicaciones pertinentes al paciente. De ser necesario, en ese momento se enlaza vía telefónica con la unidad central de telemedicina en el centro hospitalario, donde un cirujano especialista atiende la teleconsulta. Existen cámaras, estetoscopios y otros aparatos de diagnóstico cuyas señales pueden ser enviadas a través de la misma computadora según decida el médico en la unidad central (*Figura 4*). Una vez terminada la teleconsulta, la enfermera acude a la siguiente visita médica. Al término de la jornada, los datos recabados de todos los pacientes pasan, también vía módem, a la computadora central del hospital. De este modo la prestación del servicio médico es más eficiente, ya que resulta más cómodo para los pacientes y se evita el congestionamiento innecesario de las áreas de consulta externa en los hospitales.

Otros programas de telemedicina pueden servir al cirujano para obtener opiniones médicas especializadas en casos complejos. En esta situación, mediante sistemas de teleconferencia



**Figura 4.** Consulta de telemedicina y unidades remotas.



**Figura 5.** Sala de teleconferencias de la Fundación Clínica Cleveland.

se pueden hacer presentaciones de casos clínicos a médicos de mayor experiencia. Así los médicos de una localidad pueden seguir los lineamientos de las instituciones más avanzadas o tomar las decisiones necesarias para referir al paciente a donde corresponda. Con el mismo sistema se han implementado una abundante cantidad de programas de teleconferencias, donde médicos de unas y otras instituciones, inclusive desde distintos países, pueden compartir experiencias y conocimientos. De hecho ésta ha sido la modalidad de telemedicina que más se ha popularizado en nuestro tiempo (*Figura 5*).

Las tendencias tecnológicas sugieren que en los próximos años los proveedores de servicios de salud podrán ver pacientes en lugares remotos por medio de computadoras personales inclusive portátiles.

Los médicos van a ser capaces de seleccionar modalidades de vídeo interactivo o imágenes estáticas según sea necesario. Programas simplificados de computación permitirán acceso sin dificultad a expedientes clínicos o partes de ellos, radiografías, estudios de microscopía, información de farmacia, facturas, etc. Se tendrá disponibilidad y acceso instantáneo a bibliotecas médicas para consulta de algoritmos de diagnóstico y tratamiento. Los sistemas de referencia y programación de consultas entre médicos especialistas y personal conexo serán hechos mediante sistemas computarizados. La información de pacientes será archivada de manera tal que el personal médico autorizado pueda tener acceso desde cualquier parte del mundo. La seguridad y confidencialidad de la información se asegurarán mediante sistemas de encriptación de datos y control de acceso mediante palabras clave de alta seguridad. Pero mientras este desarrollo ocurre, el juicio crítico y las precauciones adecuadas deben balancear el uso decisivo de estas tecnologías a fin de mejor servir a las poblaciones necesitadas. La investigación en cuanto a seguridad, eficiencia, relación «costo-beneficio», y satisfacción debe ser una alta prioridad. Por ello, los médicos y proveedores debemos mantenernos al tanto de los avances de la telemedicina.

No obstante sus ventajas potenciales, la aplicación de programas de telemedicina tiene cuestionamientos importantes

en cuanto a sus aplicaciones dentro de un sistema nacional de salud. A la fecha, los estudios clínicos tendientes a evaluar la telemedicina son más descriptivos que analíticos. Por lo tanto, con la excepción de la telerradiología y la telepatología, hay pocos estudios que documenten la precisión, confiabilidad y/o utilidad clínica de las aplicaciones de telemedicina como modalidad diagnóstica o terapéutica primaria. Además desconocemos los costos reales de un sistema de telemedicina totalmente funcional. Por el momento la gran mayoría de los programas establecidos en los Estados Unidos de América cuentan con fondos subsidiados, cuando menos parcialmente, por instituciones de gobierno. Por otra parte, la falta de políticas establecidas para el reembolso de gastos por estos servicios sigue siendo la barrera más grande para la aplicación de telemedicina a gran escala. En la actualidad, los servicios de telerradiología son los únicos que reciben reembolso total rutinariamente. Tampoco hay antecedentes en cuanto a responsabilidades legales por prestar servicios de telemedicina. Esto último tiene implicaciones internacionales importantes, como el decidir que tipo de licencia debe tener el proveedor cuando la teleconsulta ocurre entre dos países.

Considerando nuestras circunstancias nacionales y aunque el uso del equipo de última generación y de mayor poder pareciera lógico, la adquisición precoz de tecnologías para transmisión audiovisual continua y bidireccional puede ser un objetivo poco realista para muchas áreas marginadas. Nuestro reto será el escoger los servicios y equipos de telemedicina que provean la tecnología más accesible y de menor costo para alcanzar el objetivo deseado y cubrir las necesidades médicas de la comunidad a que vamos a prestar el servicio.

**Robótica.** Para obtener el mejor resultado en la realización de procedimientos quirúrgicos, el cirujano requiere la mayor precisión de maniobra al manipular instrumentos, tejidos y suturas. En cirugía convencional el factor más importante que va en detrimento de la precisión quirúrgica del cirujano es el agotamiento físico. En cirugía de invasión mínima y microcirugía las exigencias de precisión son aún mayores, de modo que el cansancio puede tener resultados definitivamente deficientes. Durante procedimientos laparoscópicos, la magnificación óptica permite al cirujano observar con mayor precisión las estructuras anatómicas. Sin embargo, su habilidad manual, resultado de su capacidad natural de coordinación motriz fina, está sujeta al efecto del «temblor de acción» o tremor, además del cansancio físico.

De experiencias previas, como en la industria automotriz, es conocido que los robots pueden ejecutar algunas maniobras con mayor eficiencia que los humanos, particularmente aquellas en que se requiere gran precisión o resultan en fatiga considerable. Los robots pueden realizar tareas en casi cualquier ambiente, inclusive algunos que serían peligrosos para los humanos. Los sistemas robotizados pueden reproducir rápida y efectivamente movimientos repetitivos durante periodos de duración variable y al contrario de los humanos, no están sujetos a efectos por fatiga o tremor. De aquí el interés en implementar sistemas robotizados para asistir al cirujano durante las operaciones en que la precisión quirúrgica y la fatiga física juegan un papel preponderante

o en aquellas circunstancias donde por alguna razón no se puede disponer de su presencia física.

Alrededor del mundo, varios grupos de investigadores se han dado a la tarea de desarrollar robots con aplicaciones médicas. A pesar de la gran importancia que este tema representa para el avance médico, la mayoría de publicaciones respectivas son predominantemente técnicas y carecen de datos clínicos. Intereses de seguridad militar y otros comerciales sobre esta tecnología la han rodeado de una atmósfera de celo profesional y científico. En los últimos meses se ha dado una verdadera competencia contra tiempo entre los diversos grupos interesados por desarrollar sistemas con aplicaciones susceptibles de uso clínico. Esta situación dificulta obtener información útil para comparaciones. En esta revisión se presentarán los avances más representativos de algunos grupos de investigación de los Estados Unidos de América, particularmente los de la Fundación Clínica Cleveland donde el autor ha tenido oportunidad de participar en el desarrollo del más reciente de estos sistemas: Zeus.

La industria militar ha sido pionera en el desarrollo de tecnología robótica en cirugía. El Departamento de Defensa Estadounidense (DARPA, siglas en Inglés para Defense Advanced Research Projects Agency) ha destinado fondos económicos cuantiosos para desarrollar sistemas de telemedicina y telecirugía para situaciones de guerra. Con esta finalidad se propusieron desarrollar un sistema robotizado telequirúrgico que, instalado en ambulancias blindadas y operado localmente por personal técnico, permitiría la atención quirúrgica especializada del herido de guerra en los momentos inmediatos a la lesión. De aquí se entiende que el reto del programa ha sido doble, ya que se trata de desarrollar la tecnología robótica y la de telecomunicaciones que permita su operación a distancia. Por la gran complejidad de este proyecto, ha sido necesario dividirlo en varios sub-proyectos y estos, a su vez, han sido asignados a diversos grupos de investigadores.

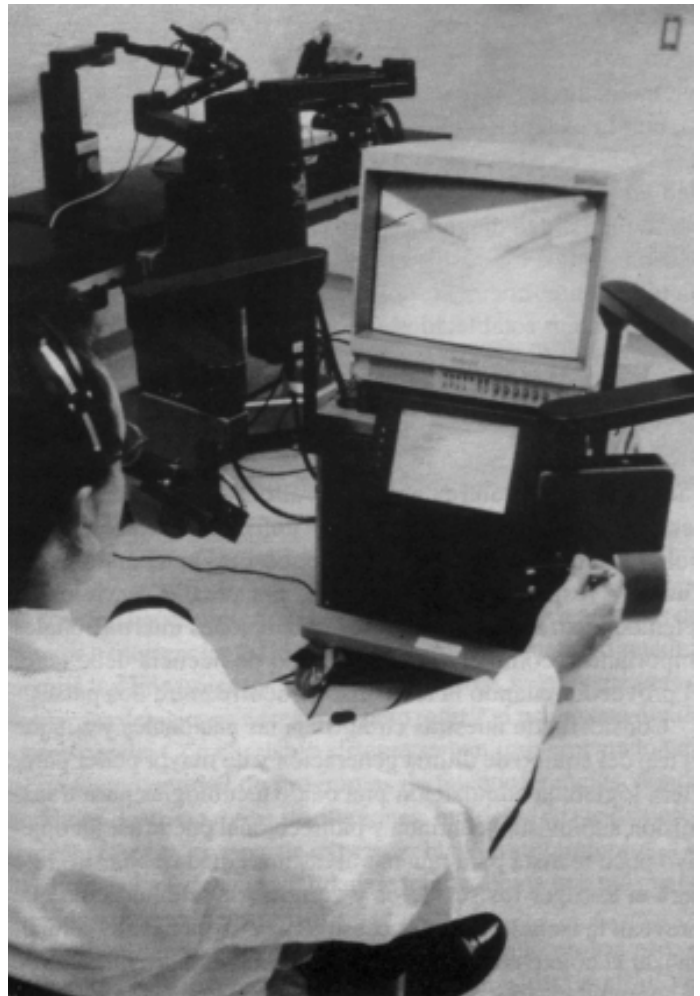
En 1993, los esfuerzos de investigación se enfocaron a desarrollar un sistema robótico que asistiera las actividades manuales del cirujano (asistencia robótica parcial) ya fuera manipulando una cámara endoscópica o un instrumento quirúrgico.<sup>1</sup> Así fue como la compañía Computer Motion, Inc., obtuvo aprobación de la Administración de Alimentos y Drogas (FDA) para comercializar un robot que manipula una cámara endoscópica.<sup>4</sup> El sistema es denominado AESOP (siglas en Inglés para Automatic Endoscopic System for Optimal Positioning) y ha tenido una buena aceptación en diferentes medios. El robot consiste en un brazo mecánico que el cirujano controla mediante un pedal o, en su versión más reciente, mediante un sistema computarizado activado por comandos de voz.<sup>22</sup> En estudios preliminares se demostró que el uso de este robot durante cirugía laparoscópica provee una imagen endoscópica de gran estabilidad y puede reducir tiempos quirúrgicos en forma considerable.<sup>11,12,21</sup> Además, ha sido usado como un medio para realizar procedimientos en los que un «telementor» controla la cámara endoscópica desde un lugar remoto.<sup>17</sup> Por su parte la compañía Microdexterity Systems, Inc., ha desarrollado un sistema robotizado para



asistir durante procedimientos de microcirugía convencional. El aparato consiste en un brazo mecánico que ha sido utilizado fundamentalmente para aplicaciones oftalmológicas. Una segunda versión del robot de Microdexterity tiene aplicaciones de microcirugía (*Figura 6*).

La asistencia robótica total en cirugía laparoscópica, esto es cuando el cirujano usa únicamente las piezas del sistema robótico para realizar la cirugía o parte de ella, está en sus etapas iniciales de desarrollo. La compañía Intuitive Surgical, Inc., ha desarrollado un sistema robótico para telecirugía convencional. Aunque no hay muchos datos disponibles con relación al robot de «Intuitive», sabemos que consiste en dos unidades: la estación de trabajo, donde el cirujano maneja los controles y la unidad quirúrgica remota, donde se encuentran los brazos robotizados. Los mecanismos del sistema fueron diseñados originalmente con maneras y acciones que semejan los instrumentos de cirugía convencional. Esto permite que los movimientos del cirujano sean «intuitivos», esto es, como los que ya domina en cirugía convencional, sin requerir adaptarse al funcionamiento del robot. Además, el sistema está supuestamente equipado con visión estereoscópica y retroalimentación táctil. Los reportes en literatura médica se han limitado a mencionar que con ayuda este robot se pueden realizar procedimientos de microcirugía como anastomosis vasculares en modelos animales. Sin embargo no tenemos datos suficientes como para efectuar un análisis comparativo contra capacidades humanas o de otros sistemas robotizados. Recientemente se presentó la iniciativa de crear una versión del sistema «Intuitive» con aplicaciones para cirugía endoscópica.

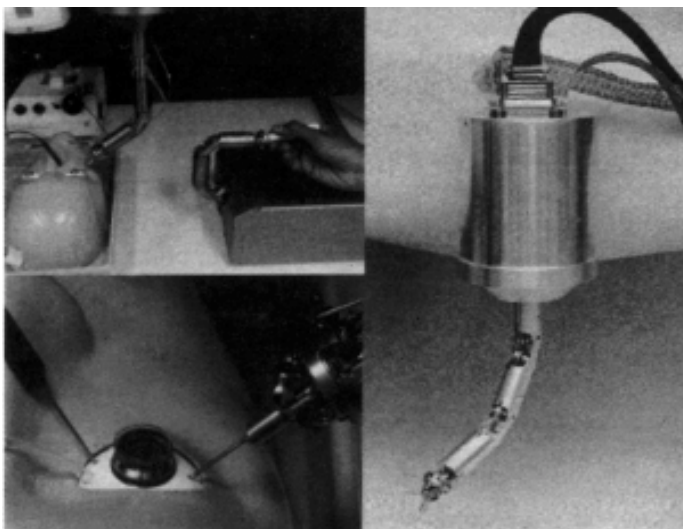
En el Centro de Cirugía de Invasión Mínima de la Fundación Clínica Cleveland (FCC) hemos tenido oportunidad de participar con la compañía Computer Motion, Inc., en el desarrollo de un nuevo sistema para proveer asistencia robótica total durante procedimientos endoscópicos. El sistema robótico, denominado «Zeus», está compuesto por tres brazos mecánicos que controla el cirujano a través de un sistema



**Figura 7.** Sistema robotizado «Zeus» (Computer Motion) durante pruebas preclínicas.

computarizado. Uno de estos brazos controla la cámara (AE-SOP) y los otros dos manipulan una variedad de instrumentos laparoscópicos (*Figura 7*). El cirujano maneja estos instrumentos a través de dos controles que tienen forma semejante a los manuales de los portaagujas laparoscópicos regulares. El sistema reproduce precisamente los movimientos del cirujano y volviéndolos más precisos ya que filtra el tremor natural. Así se tiene la estabilidad suficiente para realizar maniobras extensivas de suturas intracorpóreas bajo gran magnificación laparoscópica. Además tiene la característica de poder reducir o amplificar los movimientos del cirujano a escala. De tal modo que el cirujano puede realizar movimientos amplios en los controles, mientras los brazos robóticos se mueven dentro de márgenes reducidos.

Durante 1997, probamos el sistema robótico en un laboratorio experimental. En esa experiencia con el primer prototipo del robot, encontramos que efectivamente permite la realización de una variedad de destrezas endoscópicas básicas en modelos inanimados.<sup>5</sup> Sin embargo, también encontramos un número de detalles técnicos que incrementaban el tiempo quirúrgico para realizar las tareas. Con ese hallazgo, los ingenieros de Computer Motion dedicaron los siguientes 8 meses para perfeccionar los mecanismos



**Figura 6.** Aplicaciones de microsuturas con el robot de Microdexterity, Inc.



del robot. Entre tanto, completamos el siguiente experimento probando el uso del robot para crear anastomosis vasculares (puentes coronarios) en modelos inanimados.<sup>7</sup> Realizamos un total de 14 anastomosis con permeabilidad documentada del 100%. El tiempo quirúrgico promedio en las primeras 7 anastomosis fue de 46 minutos, sin embargo se redujo a 28 minutos en los últimos 7 intentos. Posteriormente probamos el sistema robótico en modelos animales vivos para crear una variedad de anastomosis suturadas (intestinal, biliar, ureteral y tubaria).<sup>6</sup> Los hallazgos fundamentales de este experimento fueron que el robot puede operar seguramente en proximidad del paciente y sin obstruir al personal quirúrgico ni los equipos de quirófano. No tuvimos ningún incidente intraoperatorio, esto es los animales no sufrieron ninguna lesión a consecuencia de las maniobras del robot y 22 de las 24 anastomosis resultaron permeables. En el siguiente experimento evaluamos el uso del robot bajo condiciones quirúrgicas de esterilidad.<sup>13,14</sup> Creamos reanastomosis tubarias en 6 cerdos previamente sometidos a salpingoclasia. El uso del robot durante las cirugías mantuvo los lineamientos de la técnica estéril. Al término de las cirugías se documentó permeabilidad en el 100% de las anastomosis. Todos los animales sobrevivieron la cirugía sin complicaciones. A las 6 semanas, sacrificamos los animales y documentamos permeabilidad en 8 de las 12 anastomosis. Los resultados de estas investigaciones fueron sometidos a la FDA y al comité de bioética de la FCC a fin de obtener autorización para usar el sistema robótico en un estudio clínico controlado de reanastomosis tubaria que inició el 16 de junio de 1998. El primer caso en que usamos asistencia robótica total en humanos fue para una reanastomosis tubaria a fin de restablecer la fertilidad de una paciente luego de una salpingoclasia.<sup>3</sup> A nuestro conocimiento, esta fue la primera cirugía de este tipo realizada en el mundo. A un mes de seguimiento, la permeabilidad tubaria de la paciente se demostró por salpingografía.

Entre tanto otros centros hospitalarios, también en coordinación con Computer Motion, Inc., se han dedicado a desarrollar un modelo experimental para realizar cirugía de puentes coronarios con asistencia total del sistema robótico «Zeus» durante la creación de la anastomosis. El proyecto ha enfrentado dificultades que han tenido que ver mas bien con el método para proveer el campo quirúrgico seco e inmóvil necesario para operar endoscópicamente. Sin embargo, sus resultados preliminares parecen ser prometedores y serán dados a conocer al término de sus investigaciones.

## Referencias

1. Begin E, Gagner M, Hurteau R, de Santis S, Pomp A. A robotic camera for laparoscopic surgery: conception and experimental results. *Surg Laparosc Endosc* 1995; 5: 6-11.
2. Delp S, Loan P, Hoy M, Zajac F, Topp E, Rosen J. An interactive graphicsbased model of the lower extremity to study orthopaedic surgical procedures. *IEE Transactions on Biomedical Engineering* 1990; 37: 8.
3. Falcone T, Goldberg J, Garcia-Ruiz A, Margossian H, Stevens L. Full robotic assistance for laparoscopic tubal reanastomosis. First case report. *J Laparoendosc & Adv Surg Tech*. 1998 En prensa.
4. Gagner M, Begin E, Hurteau R, Pomp A. Robotic interactive laparoscopic cholecystectomy. *Lancet* 1994; 343: 596-597.
5. Garcia-Ruiz A, Gagner M, Miller JH, Steiner CP, Hahn JF. Manual vs robotically assisted laparoscopic surgery in the performance of basic manipulation and suturing tasks. *Arch Surg* 1998; En prensa.
6. García-Ruiz A, Shibuya K, Miller JH, Steiner CP, Hahn J, Gagner M. Performance enhancement for sutured laparoscopic anastomosis using a master-slave robot. *J Am Coll Surg*. 1998 En prensa.
7. Garcia-Ruiz A, Smedira NG, Loop FD, Hahn JF, Miller JH, Steiner CP, Gagner M. Robotic surgical instruments for dexterity enhancement in thoroscopic coronary artery bypass graft. *J Laparoendosc & Adv Surg Tech* 1997; 7: 277-283.
8. Hoffman H. Virtual reality meets medical education. En: Morgan K, Satava R, Sieburg H et al (eds) *Interactive Technology and the new Paradigm for Health Care* IOS Press, Washington, DC. 1995: 30-136.
9. Hon D. Medical reality and virtual reality. *Medicine Meets Virtual Reality: 4 - Health Care in the Information Age*. 1996; 327-341.
10. Kaplan K. A virtual environment for a surgical room of the future. En: Morgan K, Satava R, Sieburg H et al (eds) *Interactive technology and the new paradigm for healthcare*. IOS Press, Washington, DC, 1995: 161-167.
11. Kavoussi LR, Moore RG, Adams JB, Partin AW. Comparison of robotic versus human laparoscopic camera control. *J Urol* 1995; 6: 2134-2136.
12. Kavoussi LR, Moore RG, Partin AW, Bender JS, Zenilman ME, Satava RM. Telerobotic assisted laparoscopic surgery: initial laboratory and clinical experience. *Urology* 1994; 44: 15-19.
13. Margossian H, Garcia-Ruiz A, Falcone T, Goldberg JM, Attaran M, Miller JH, Gagner M. Robotically assisted laparoscopic tubal anastomosis in a porcine model. A pilot study. *J Laparoendosc & Adv Surg Tech* 1998; En prensa.
14. Margossian H, García-Ruiz A, Falcone T, Goldberg JM, Attaran M, Gagner M. Robotically assisted laparoscopic microsurgical uterine horn anastomosis. *Fertil Steril* 1998; En prensa.
15. McGovern K. The virtual clinic: a virtual reality surgical simulator. *Proceedings of Medicine Meets Virtual Reality II* 1994; 27-30.
16. Melzer A, Schmidt A, Kipfmüller K, Gronemeyer D, Seibel R. Technology and principles of tomographic image-guided interventions and surgery. *Surg Endosc* 1997; 11: 946-956.
17. Moore RG, Adams JB, Partin AW, docimo SG, Kavoussi LR. Telerobotic of laparoscopic procedures. *Surg Endosc* 1996; 10: 107-110.
18. Noar MD. Innovations in training for flexible endoscopy. En: *Endosurgery*. Tooouli J, Gossot D, Hunter JG. (eds) Churchill Livingstone, New York, 1996: 925.
19. Perednia DA. Telemedicine technology and clinical applications. *JAMA* 1995; 273: 483-488.
20. Rosen J. The evolution of virtual reality from surgical training to the development of a simulator for health care delivery. *Medicine Meets Virtual Reality: 4 - Health Care in the Information Age* 1996; 89-97.
21. Sackier JM, Wang Y. Robotically assisted laparoscopic surgery. *Surg Endosc* 1994; 8: 63-66.
22. Sackier JM, Wooters C, Halverson A, Uecker D, Wang Y. Voice activation of a surgical robotic assistant. *Am J Surg* 1997; 174: 406-409.
23. Satava RM. Surgery 2001: A technologic framework for the future. *Surg Endosc* 1993; 7: 111-113.
24. Satava RM. Virtual reality surgical simulator: the first steps. *Surg Endosc* 1993; 7: 203-205.
25. Satava RM. The impact of virtual reality upon training in surgery. En: *Endosurgery*. Tooouli J, Gossot D, Hunter JG. (eds) Churchill Livingstone, New York, 1996; 27-31.
26. Satava RM. Virtual reality, telepresence surgery and advanced surgical technologies. *Min Invas Ther & Allied Technol* 1996; 5: 2-4.