

# Sistemas Robóticos en la asistencia a la cirugía

*Emilio Sánchez<sup>1, 2</sup>*

---

## RESUMEN

La robótica es el campo del conocimiento que integra diversas tecnologías como son la electrónica, mecánica, programación, pero también del conocimiento como son la lógica, la filosofía, etc. El objetivo de esa integración es la fabricación de dispositivos mecatrónicos (es decir, un sistema híbrido entre mecánica y electrónica) con distintos niveles de inteligencia para ser usados en un abanico de aplicaciones. Las aplicaciones más comunes de la robótica tienen su campo de acción en la industria, donde se pueden encontrar robots pintando, ensamblando piezas, paletizando productos, etc de manera autónoma. Otro campo de la robótica es la robótica de servicio, donde los robots interactúan con las personas, de modo que su tarea no se realiza de forma autónoma sino que su respuesta estará condicionada por el diálogo persona-robot. El presente artículo expone, a nivel divulgativo pero riguroso, las aplicaciones emergentes de la robótica en el campo de la cirugía donde los robots se presentan como asistentes o ayudantes durante las intervenciones. Otro ejemplo dentro de la robótica médica es el uso de los robots como herramientas avanzadas para ser usadas durante el proceso de rehabilitación de un paciente que ha sufrido una merma de movilidad en alguno de sus miembros. Este campo se encuentra fuera del objetivo del presente artículo. Por último, citar que el presente artículo no trata ser una exhaustiva revisión del estado del arte ni tampoco sobre la biorrobótica, entendida como la ciencia que persigue el diseñar y construir mecanismos que simulen el funcionamiento de órganos/miembros y/o el comportamiento de un ser vivo y/o conjuntos de seres vivos.

---

<sup>1</sup> Escuela Superior de Ingenieros de San Sebastián - TECNUN, España.

<sup>2</sup> Centro de Investigación CEIT, España. [esanchez@tecnun.es](mailto:esanchez@tecnun.es)

## INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA MÉDICA

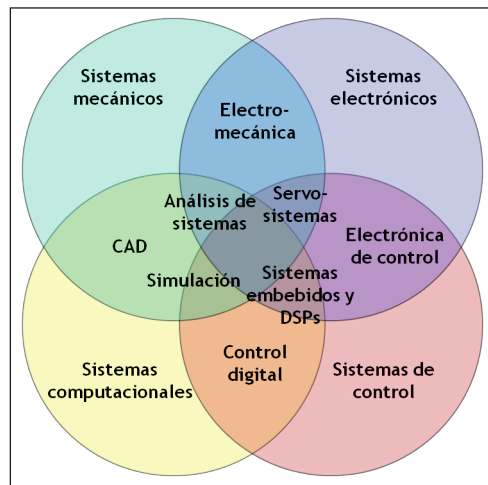
La primera referencia de uso de un robot en aplicaciones médicas data de 1985 [1] donde se utilizó un robot industrial modelo PUMA560 para realizar biopsias en neurocirugía. Por ello se puede decir sin cometer error alguno que la robótica quirúrgica es una evolución del concepto de robot industrial. La IFR (International Federation of Robotics) en la ISO8373 define un robot industrial como [2]: Un manipulador multifunción, re-programable, controlado automáticamente con tres o más ejes programables que puede estar tanto fijado en una ubicación o ser móvil para ser usado en aplicaciones de automatización industrial. Debido a que esta definición contiene conceptos que a su vez requieren una aclaración extra, la norma los define de la siguiente forma:

- **Reprogramable:** cuyos movimientos programados o funciones auxiliares pueden ser cambiados sin alteraciones físicas.
- **Multifunción:** capaz de ser adaptado a una aplicación diferente sin alteraciones físicas.
- **Ejes:** dirección usada para especificar el movimiento del robot en un modo lineal o rotatorio.

Muchas veces también podemos encontrar definiciones de robots que se enfocan en resaltar que son sistemas multitecnológicos. Así podemos definir un robot como un sistema mecatrónico. Etimológicamente la palabra mecatrónica viene de la conjunción de las palabras MECÁNICA y elecTRÓNICA, no obstante y desde un punto de vista más general, la palabra mecatrónico quiere resaltar la combinación de sistemas mecánicos, sistemas electrónicos, sistemas computacionales y sistemas de control (ver figura 1).

Figura 1

SISTEMAS MECATRÓNICOS



Centrando ahora el análisis en los requerimientos demandados por los escenarios de trabajo, se observa que las necesidades de la robótica médica difieren mucho de la robótica industrial -la clásica-, tal y como se describe a continuación. En el ámbito de la robótica industrial, los principales calificativos de un robot instalado en una fábrica son: fuerte, rápido, peligroso, autónomo, ubicado en entornos estructurados, y ejecuta operaciones simples. Y lo que es más importante, ante un fallo de la ejecución de su tarea, lo más probable que suceda es que se estropee es una pieza de un coche

o quizás éste quede mal pintado. Sin embargo, en el caso de robots quirúrgicos/rehabilitadores, se necesita que tengan una alta precisión y una alta destreza; además se encuentran ubicados en entornos no estructurados interactuando directamente con humanos (médicos y pacientes), por ello sus fuerzas y velocidades deben estar limitadas. Y no se puede admitir un fallo ya que vidas humanas están en juego. Por otro lado, y para completar el análisis del contexto de la robótica en las aplicaciones médicas, es muy común el realizar el análisis de fortalezas y debilidades de los robots y los humanos (Tabla 1).

*Tabla 1*  
ANÁLISIS DE FORTALEZAS Y DEBILIDADES DE LOS ROBOTS Y HUMANOS

	<i>Fortalezas</i>	<i>Debilidades</i>
Robot	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precisión y repetitividad.</li> <li>• Infatigables.</li> <li>• Pueden ser esterilizables.</li> <li>• Flexibles y adaptables.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad limitada de Razonamiento.</li> <li>• Sólo protocolos procedurales Simples.</li> <li>• Voluminosos.</li> <li>• No tienen sensación táctil.</li> </ul>
Humano	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta capacidad cognitiva y de integración de diversos tipos de información.</li> <li>• Alta capacidad de coordinación bimanual y mano-ojo.</li> <li>• Alta capacidad interacción con otros miembros del equipo médico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Destreza limitada a la escala natural de movimientos.</li> <li>• Propenso a fatiga y temblores.</li> <li>• Limitada precisión.</li> <li>• Susceptible a radiación e infecciones.</li> <li>• Sin posibilidad de auto-sujetarse.</li> </ul>

Como conclusión, la robótica en la industria se plantea como un reemplazo al ser humano, evitándole el realizar trabajos repetitivos y aburridos. Sin embargo, en la medicina, debido al actual desarrollo de la robótica, los robots se introducen como asistentes del médico y/o fisioterapeuta. En otras palabras, en medicina, un sistema robótico se considera como una extensión de las habilidades humanas más que como un sustituto real del médico. Finalmente, haciendo una recapitulación de las aplicaciones de la robótica médica, se pueden encontrar los siguientes escenarios:

1. Cirugía:

- Simuladores quirúrgicos: para el entrenamiento y formación de cirujanos novatos y expertos.
- Robots de asistencia a la cirugía. En este caso, se tienen dos paradigmas principalmente: los robots teleoperadores y los robots colaborativos (COBOTS).

2. Rehabilitación:

- La rehabilitación entendida como adiestramiento necesario para recuperar la movilidad perdida de un miembro/parte del cuerpo durante un suceso traumático. Se consideran tres campos: rehabilitación cardíaca, neurológica y Post-trauma en un miembro.
- La rehabilitación entendida como asistencia de por vida a la recuperación de la movilidad del miembro dañado/debilitado: prótesis robóticas (en el caso de miembros completamente perdidos) y prótesis robóticas (en el caso de miembros debilitados).

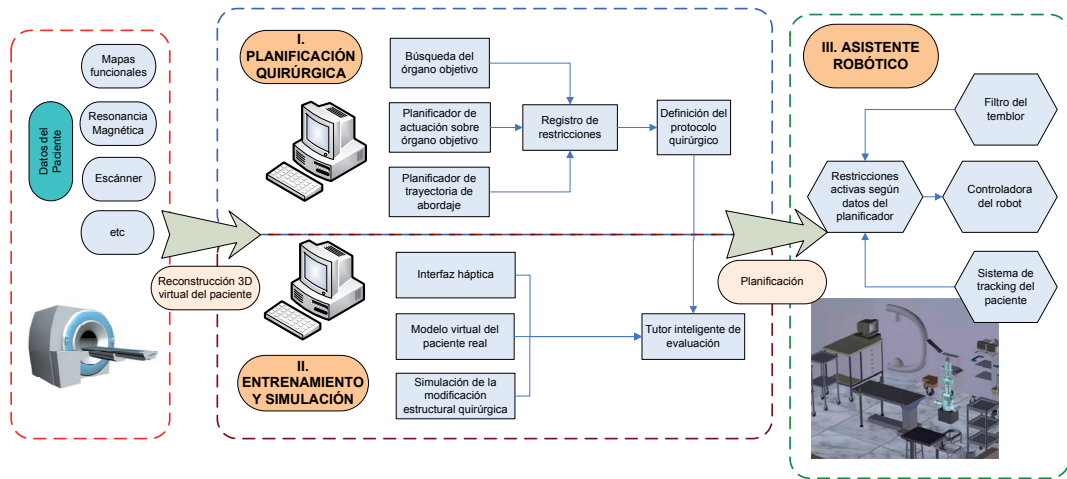
El presente artículo se centra en exponer con detalle, los casos que se encuentran en el escenario quirúrgico (sección 2) para terminar con unas breves conclusiones (sección 3).

## ROBÓTICA EN LA CIRUGÍA

Como ya se ha mencionado, la robótica en cirugía se presenta como una asistencia, no como un sistema autónomo. De ahí se desprende el concepto RCAS (Computed Aid Surgery o Cirugía Robotizada Asistida por Computadora). Un sistema R-CAS se alimenta con los datos médicos del paciente y consiste en tres módulos diferenciados: sistema planificador quirúrgico, sistema de simulación y/o entrenamiento y robot de asistencia quirúrgica (ver figura 2).

Figura 2

ARQUITECTURA DE UN SISTEMA ROBOTIZADO ASISTIDO POR COMPUTADORA O R-CAS.

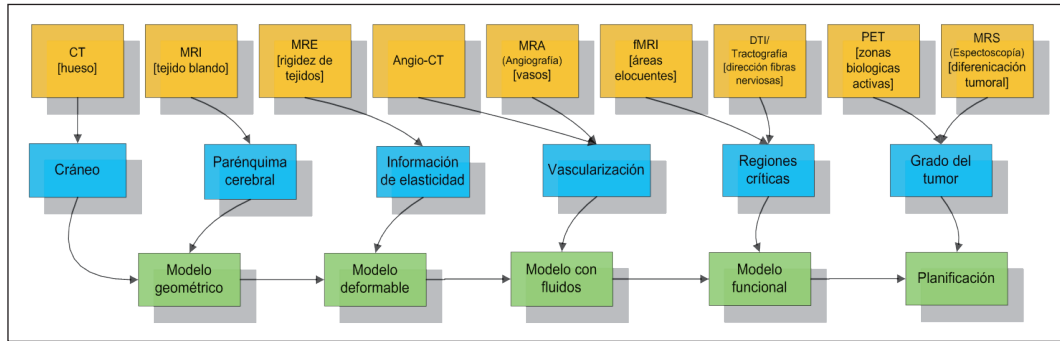


### Planificación quirúrgica

Un sistema de cirugía robotizada asistida por computadora (R-CAS) parte siempre de las pruebas médicas tradicionales de diagnóstico por imagen como pueden ser la resonancia magnética (MRI) o el tomografía axial computarizada (TAC o CT) o quizás alguno más avanzado como puede ser la elastografía por resonancia magnética (MRE). Este tipo de sistemas suelen generar imágenes del cuerpo humano del paciente. El R-CAS es capaz de cargar estos datos, que normalmente están en un formato de archivo llamado DICOM [4], y hace una reconstrucción virtual tridimensional del paciente real. La figura 3 resume las pruebas médicas que existen en la actualidad y qué información relevante puede extraerse para la creación de un modelo virtual 3D en el paciente. Señalar que las pruebas de carácter general son el CT, MRI, MRE, Angiografía (en su versión de CT o MRA). Para el caso del cerebro se pueden añadir la resonancia magnética funcional (fMRI) para detectar las áreas elocuentes del cerebro y la tactografía (DTI) para conocer la dirección de las fibras nerviosas. Finalmente, para el caso de tumores son recomendables el PET y la MRS para detectar su ubicación. De la misma forma que un médico no suele demandar el uso de todas y cada una de las pruebas debido al alto costo y que muchas veces no están disponibles o simplemente que no sean necesarias, un sistema R-CAS necesita sólo aquellas que sean imprescindibles según la intervención a realizar.

Figura 3

RECONSTRUCCIÓN DEL MODELO VIRTUAL TRIDIMENSIONAL DE UN PACIENTE A TRAVÉS DE IMAGEN MÉDICA



Gracias a que el sistema R-CAS tiene realizada la reconstrucción tridimensional del paciente, los datos se pueden usar para planificar la operación, en donde el médico, en su despacho, visualiza donde se encuentra el problema y elabora un procedimiento para resolverlo. La figura 4 muestra un ejemplo de planificador de cirugía estética maxilo-facial [3].

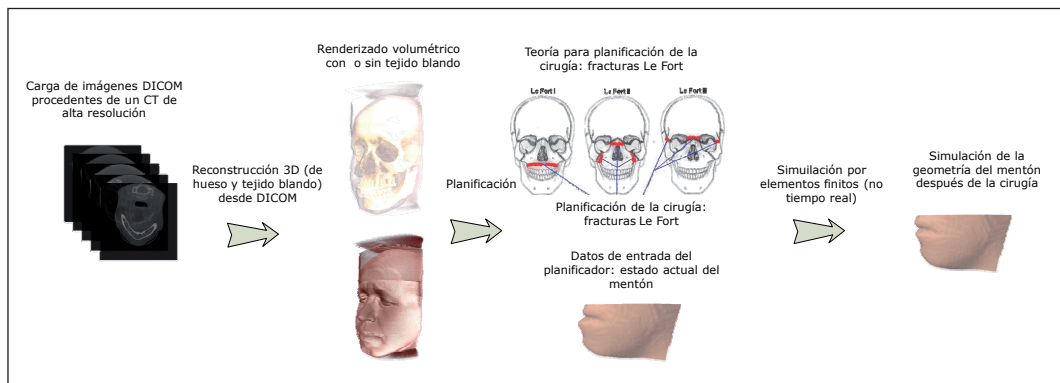
2.2 Sistema de simulación y/o entrenamiento

6

El sistema de simulación o entrenamiento quirúrgico se diferencia del planificador en el hecho de que el médico puede realizar de forma virtual una cirugía real una vez que ya se ha realizado la planificación. Es decir, en este caso el cirujano, en su despacho, puede estar operando, ejecutando una serie de acciones y movimientos que posteriormente debería realizar sobre el paciente real en la mesa de operaciones.

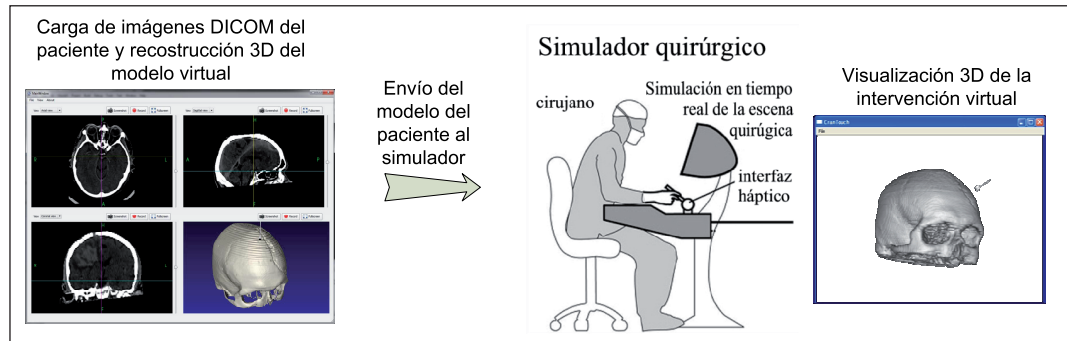
Figura 4

PLANIFICACIÓN DE CIRUGÍA ESTÉTICA MAXILO-FACIAL MAXIPLAN



Se persigue entonces que los tiempos de ejecución sean en tiempo real, es decir, los mismos que el cirujano tendrá sobre la mesa de operaciones, y que el grado de inmersión sea elevado. Como ejemplo podría citarse un simulador que permitiera a un neurocirujano hacer una craneotomía y simular una intervención en el encéfalo (ver figura 5, [5]).

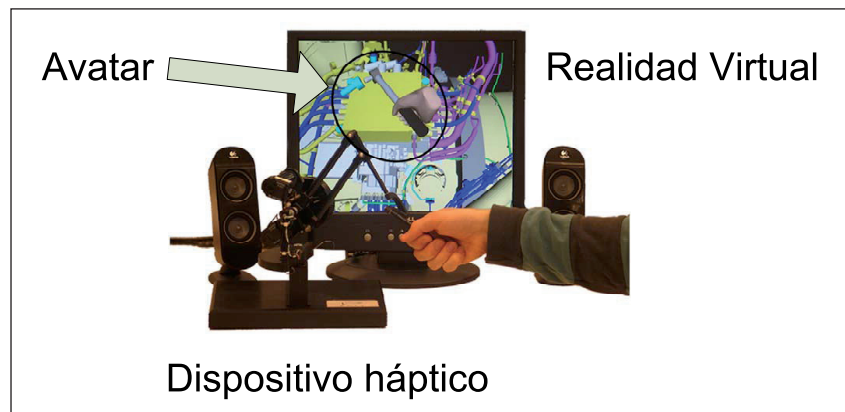
Figura 5  
SIMULACIÓN DE CRANEOTOMÍA



La diferencia entre simulación y entrenamiento se basa solamente en el tipo de datos usados para realizar la reconstrucción tridimensional. De esta forma si se usan datos reales estamos hablando de una simulación y si los datos son inventados, será un entrenamiento. Otra diferencia entre simulación y entrenamiento es el perfil del cirujano usuario del sistema. Mientras que la simulación está orientada a que sea usado por un cirujano experto que necesita adelantarse a los problemas que pueda presentar una cirugía compleja, el entrenamiento está enfocado a cirujanos novatos que quieran practicar/aprender un nuevo tipo de intervención. En los simuladores quirúrgicos, para conseguir un mayor grado de inmersión<sup>3</sup>, además de usarse una pantalla de alta resolución en 3D (para que el usuario interactúe con el sentido de la vista) y unos altavoces de alta fidelidad (para que el usuario interactúe con el sentido del oído) también se puede contar con un interfaz háptico (para que el usuario pueda interactuar con el sentido del tacto). La figura 6 muestra un ejemplo de un simulador con un dispositivo háptico integrado.

7

Figura 6  
APLICACIÓN DE INTERACCIÓN



Aplicación de interacción con una maqueta virtual de motor de avión usando una pantalla, dos altavoces y un dispositivo háptico PHANTOM de sensable (<http://www.sensable.com>)

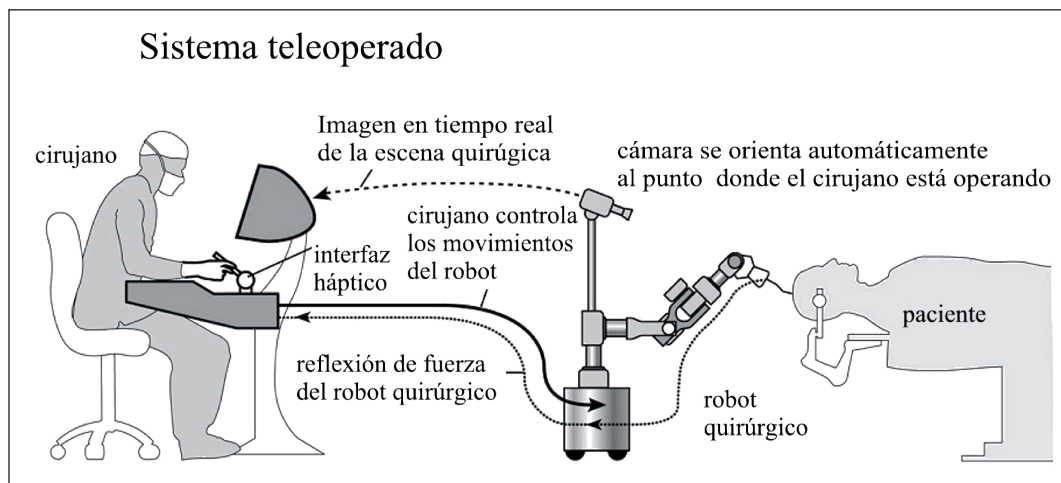
<sup>3</sup> El grado de inmersión de una simulación de realidad virtual se define como el nivel de credibilidad que presenta la realidad virtual para el usuario. Así un sistema con alto grado de inmersión, el usuario mientras interactúa con el sistema puede llegar a percibir que físicamente se encuentra dentro del mundo virtual.

Los interfaces o dispositivos hápticos aparecieron a comienzos de la década de los 90. La palabra háptico viene del griego haptesthai significando táctil, es decir, relacionado con el sentido del tacto. Ello refiere a la interacción manual con entornos (en este caso son virtuales), o también a la exploración y/o manipulación. Un interfaz háptico es un dispositivo mecatrónico diseñado para interactuar con humanos de la misma forma que se interacciona con un ratón de ordenador. En este caso, el usuario controla los movimientos de un cursor o avatar virtual que se desplaza y orienta en un espacio tridimensional. Si este avatar se choca o interacciona con otros objetos virtuales, el movimiento de la interfaz háptico queda bloqueada gracias a los motores que esta posee. Este bloqueo de movimiento es percibido por el usuario como una fuerza de acción-reacción sobre su brazo, es decir, una sensación kinestética.

### ASISTENTE ROBÓTICO

El último módulo de un sistema R-CAS es el asistente robótico propiamente dicho. La primera aplicación que podemos encontrar de este tipo de sistemas es el uso del robot como un sistema estereotáctico, es decir, como un sistema posicionador para herramientas quirúrgicas que localiza puntos en la cabeza a través de un sistema de coordenadas. Ejemplos comerciales de estos sistemas son el ROSA [16] y el Pathfinder [17]. En una aplicación más avanzada, el controlador del robot recibe la información desde el planificador de forma que los movimientos del robot son una combinación de las restricciones impuestas desde el planificador y las órdenes/consignas de movimientos provenientes del cirujano durante la intervención. Los paradigmas de robots asistentes que nos podemos encontrar en un quirófano son fundamentalmente dos: robots teleoperados y robots colaborativos o COBOTs (ver figura 7). Mientras que los robots teleoperados se encuentran controlados a distancia desde una consola remota, en el caso de los COBOTs el cirujano los sujeta y empuja/mueve/arrastra desde su parte final (donde se encuentra acoplada la herramienta).

Figura 7  
EJEMPLO DE ROBOT QUIRÚRGICO



Ejemplo de robot quirúrgico de teleoperación (izquierda) y de robot colaborativo o COBOT (derecha).

## ROBOTS QUIRÚRGICOS TELEOPERADOS

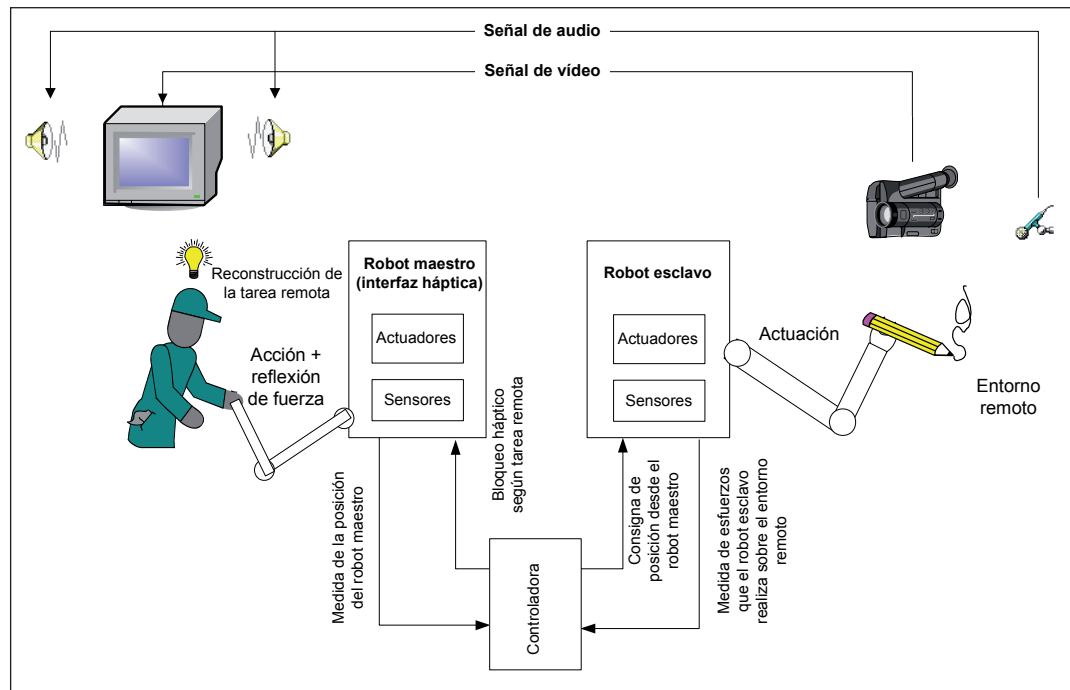
Como ya se ha mencionado el robot teleoperado se controla a distancia desde una estación remota mientras que el cobot lo sujeta el cirujano. En ambos casos el propio robot es el que porta el instrumental y el movimiento es una combinación de la intencionalidad del cirujano más las restricciones provenientes dese el planificador.

En un esquema común de un sistema de teleoperación. A un lado, se encuentra la consola del cirujano que cuenta con uno o dos interfaces hápticas (robot maestro). Las trayectorias descritas por el robot maestro son replicadas por el robot esclavo (el robot asistente quirúrgico). Un ejemplo de ello es el robot Da Vinci, el único modelo de robot quirúrgico teleoperado disponible a nivel comercial [6]. Muchos de estos sistemas tienen la posibilidad de bloquear el movimiento del robot maestro en función de las fuerzas/pares de interacción entre el robot esclavo (el robot quirúrgico) y el sistema remoto. Es lo que se denomina control bilateral de teleoperación (el robot maestro controla al esclavo y a su vez el esclavo controla al maestro). La figura 8 muestra de forma esquemática los flujos de señales entre el robot maestro, esclavo y controladora.

Además de las ventajas propias de un sistema robotizado (reducción del temblor, aumento de precisión) un sistema teleoperado presenta la ventaja de que puede escalar las trayectorias, así por ejemplo un desplazamiento de un 1cm del robot controlado por el médico puede estar escalado a un desplazamiento de 1mm. En el caso de contar con sensores de fuerza, también se podrán escalar las fuerzas.

Figura 8

PARTES DE UN SISTEMA DE TELEOPERACIÓN CON REFLEXIÓN DE FUERZA



En el ejemplo mostrado el robot esclavo copia las trayectorias del robot maestro y el robot maestro es bloqueado según las fuerzas/pares medidos en el robot esclavo.

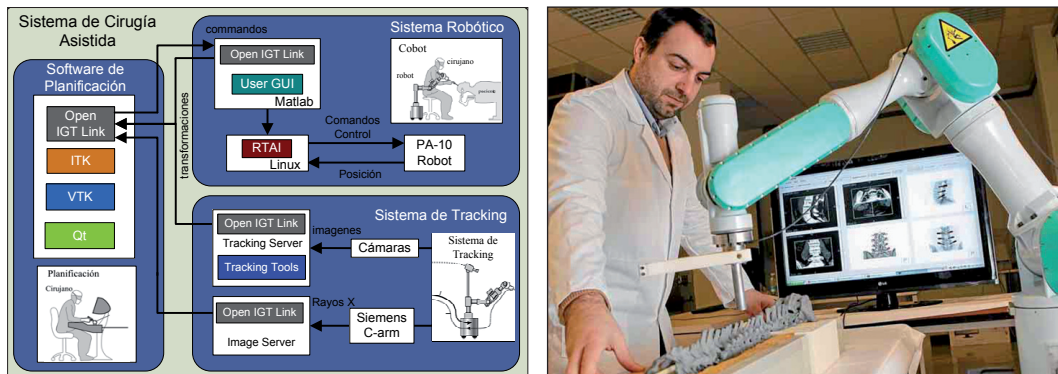


La mayor desventaja de los sistemas teleoperados es que la distancia entre el paciente y el médico dificulta al médico el percibir detalles de la operación debido a que la información comunicada entre el robot maestro y esclavo son muy limitadas. Por ejemplo, la pérdida de información táctil, importante para controlar isquemias, o la falta de una buena percepción espacial. Una solución intermedia será la colocación de un robot/COBOT que fuera manejado directamente. Al ser el movimiento del COBOT una consecuencia de la información proveniente del planificador y de la fuerza de interacción médico-COBOT, el médico sigue percibiendo de forma directa la interacción robot-paciente. La desventaja del empleo de COBOTs es que no se pueden hacer escalados de trayectorias (pero sí de fuerzas si se cuenta con la arquitectura adecuada). Sin embargo, las ventajas ganadas es que el médico, al estar operando sobre el paciente, puede recibir información directa del estado del paciente a través de todos sus sentidos corporales. Por ello, los médicos pueden mostrarse menos reacios al uso de una arquitectura basada en COBOT que al uso de una arquitectura de teleoperación. La figura 9 muestra la arquitectura del proyecto SpineRoboCAS [9] que emplea el planificador ViewIT-Spine [10] y un COBOT [8] para la asistencia de cirugía de fijación transpedicular de vértebras [7]. El software de planificación ViewIT-Spine se encuentra programado usando el entorno de ventanas QT[11], las librerías de programación de gráficos VTK (Visualization Toolkit, [12]), de segmentación de imágenes médicas ITK (Insight Segmentation and Registration Toolkit, [13]). El COBOT se controla desde una plataforma Linux RTAI (Real Time Application Interface, [14]). Para comunicar todos los módulos entre sí se ha empleado la librería de comunicaciones OpenIGT-Link (Open Network Interface for Image Guided Therapy, [15]).

10

Figura 9

ARQUITECTURA Y FOTO DE UN SISTEMA R-CAS CON UN ASISTENTE COBOT (COLLABORATIVE ROBOT)



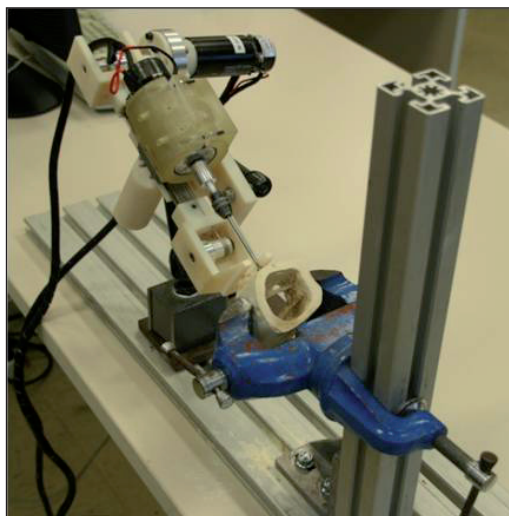
Una vez que el médico define donde pretende hacer la osteotomía con el software de planificación, el COBOT le asiste en la intervención.

## HERRAMIENTAS MECATRÓNICAS PARA ROBOTS QUIRÚRGICOS

Una vez definida la plataforma R-CAS, el centro de atención se focaliza en el tipo de herramienta a usar. En principio no hay limitación en el tipo, pudiendo ser una herramienta quirúrgica convencional adaptada para ser acoplada al extremo final del robot o también se podrá pensar en el emplear una herramienta robótica de presentaciones avanzada diseñada ad-hoc. Tal es el caso del prototipo mostrado en la figura 10 que consiste en una herramienta de craneotomía u osteotomía que es capaz de pararse automáticamente al detectar cambios de la rigidez[18], cosa que sucede cuando consigue perforar todo el hueso. Un segundo tipo de herramientas clásicas son los pedales quirúrgicos. Estos pedales normalmente sirven para controlar/accionar las herramientas quirúrgicas, pero hasta ahora se ha explorado poco el uso de un pedal como elemento de comunicaron hacia el médico (ver Figura 11). La Figura 12 muestra un pedal háptico, que, al igual que sucede con un dispositivo háptico convencional de mano, permite enviar al usuario información táctil. Esta información puede contener datos relevantes sobre la operación, como el ritmo cardíaco, los niveles de señales de un determinado nervio, rigidez del hueso que se está perforando, etc [19].

*Figura 10*

PROTOTIPO DE HERRAMIENTA FRESADORA SEMIAUTÓNOMA DEL PROYECTO DRIBON



## CONCLUSIONES

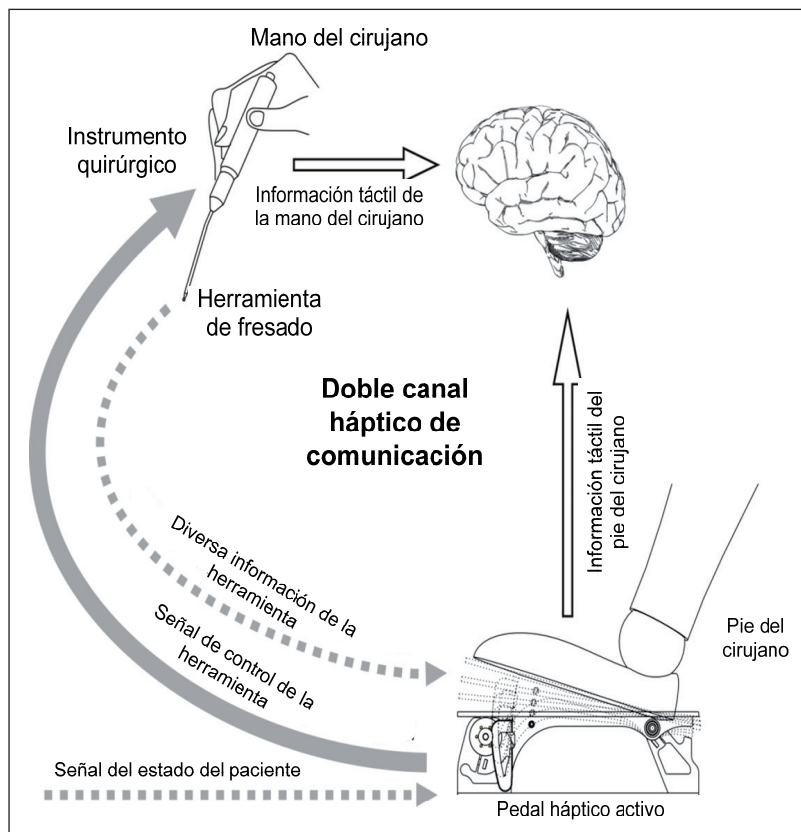
El presente artículo ha tratado de exponer de forma divulgativa el ámbito de aplicación de la robótica quirúrgica. Hoy en día la robótica en el quirófano es un hecho aunque todavía queda mucho camino por recorrer. Los mayores obstáculos se encuentran por un lado en hacer equipos robustos y fáciles de usar por los cirujanos y por otro, el conseguir tener un histórico de pruebas y ensayos médicos que demuestren objetivamente la ventaja de usar los procedimientos robotizados frente a la cirugía convencional. El desarrollo de la telecirugía entre dos puntos geográficamente remotos es de un vital interés pero se encuentra supeditado al desarrollo de sistemas de comunicaciones con retardos mínimos. Las investigaciones en el campo de la robótica médica se centran sobre todo en la mejora de:

- La exactitud y fidelidad de la información del modelo virtual del paciente,
- La robustez y transparencias de los algoritmos de control posición/fuerza de los robots
- El nivel de realismo de la información transmitida en las distintas, modalidades sensoriales, destreza de las cadenas cinemáticas que constituyen robots laparoscopios y/o para cirugías de puerto único y usando los orificios naturales (NOTES),
- La destreza de los robots de forma que se puedan hacer manipulaciones más precisas y a menor escala,
- La precisión y robustez de los sistemas ópticos de detección de la ubicación real del paciente en quirófano

Un punto que queda abierto y no discutido en el presente artículo es el uso de nano-robots intracorporales con la miniaturización de componentes. De esta forma se conseguiría una actuación directa allí donde se requiera. Con todo, el papel que desempeñen los robots en la cirugía irá creciendo en importancia, pero es muy improbable que en un futuro sea capaz de sustituir totalmente la labor del cirujano.

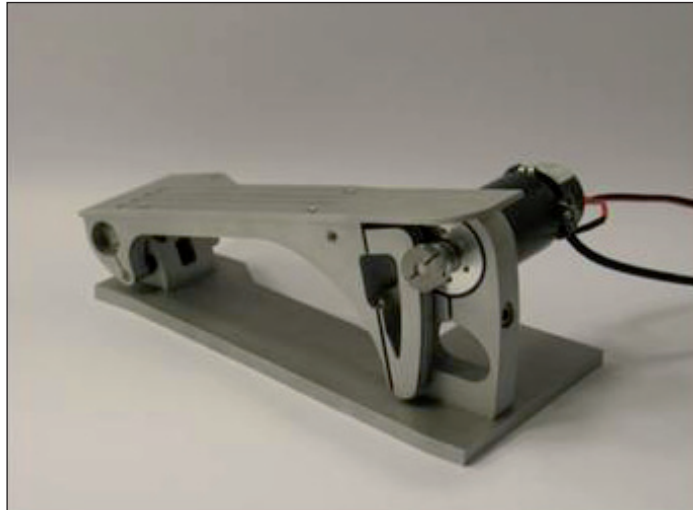
Figura 11

PARADIGMA DE COMUNICACIÓN BIDIRECCIONAL



Paradigma de comunicación bidireccional usando un pedal háptico: el médico acciona la herramienta pisando el pedal, e información relevante del paciente se envía de regreso al pedal a modo de vibración o cambiando el comportamiento dinámico del pedal.

Figura 12  
PROTOTIPO DE PEDAL HÁPTICO



## REFERENCIAS

- [1] Kwoh, Y. S., Hou, J., Jo nckheere, E. A. and Hayall, S.; “A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery”, IEEE Trans. Biomed. Engng, 35(2), 153-161 (1982).
- [2] International Federation on Robotics, Industrial robot as defined by ISO 8373. Disponible en <http://www.ifr.org/industrial-robots/>
- [3] San Vicente, G., Buchart, C., Borro, D., and Celigeta, J.T., Maxillofacial Surgery Simulation using a Mass-Spring Model Derived from Continuum and the Scaled Displacement Method, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, Vol. 4, No. 1, pp. 89-98. January 2009.
- [4] Medical Imaging & Technology Alliance, The DICOM Standard, Disponible en <http://medical.nema.org/standard.html>
- [5] G. Echegaray, I. Herrera, C. Buchart, D. Borro, Towards a Multimodal Neurosurgery Simulator: Drilling Simulation and Visualization Using Real Patient Data, Proceedings of the XXIX Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica (CASEIB 2011), pp. 423-426. Cáceres, Spain. November 16-18, 2011.
- [6] Intuitive Surgical, Ciruga da Vinci comparada con la ciruga tradicional: lea la evidencia, Disponible en <http://www.davincisurgery.com/spanish/>
- [7] Bertelsen, A., Melo, J., Sánchez, E., and Borro, D., A review of surgical robots for spinal interventions, International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery. 2012.
- [8] Melo J., Sanchez E., Díaz I., Adaptive Admittance Control to Generate Real- Time Assistive Fixtures for a COBOT in Transpedicular Fixation Surgery, IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. Pp. 1170- 1175 June 24-28, 2012 Roma, Italy. DOI: 10.1109/BioRob.2012.6290806

- [9] Bertelsen, A., Melo, J., Sánchez, E., and Borro, D., Implementation of a cooperative human-robot system for transpedicular fixation surgery, Proceedings of the XXIX Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica (CASEIB 2011), pp. 303-306. Cáceres, Spain. November 16-18, 2011.
- [10] Borro D., Bertelsen A. Registro de la Propiedad Intelectual del programa de ordenador denominado VIEWIT.00/2011/3699. (2011).
- [11] Digia, The QT frame work, Disponible en <http://qt.digia.com/Product/>
- [12] Kitware Inc., The Visualization Toolkit, Disponible en <http://www.vtk.org/>
- [13] Kitware Inc., The Insight Segmentation and Registration Toolkit, Disponible en <http://www.itk.org/>
- [14] Bucher R., Dozio L., Gasperini D., Mayer H., Mantegazza P., Masarati P., Neuhauser M., Racciu G., Schleaf D., Soetnes P., RTAI - the RealTime Application Interface for Linux from DIAPM, Disponible en <https://www.rtai.org/>
- [15] The OpenIGTLink Community, OpenIGTLink: Open Network Interface for Image Guided Therapy, Disponible en <http://openigtlink.org/>
- [16] Medtech, The ROSA-Neurochirurgie Robotic System, Disponible en <http://www.medtech.fr/Produits/ROSA-Neurochirurgie>
- [17] ProSurgics, The pathfinder Robot, Disponible en <http://prosurgics.com/pdfs/PathFinderspec.pdf>
- [18] Louredo M, Díaz I, Gil JJ, DRIBON: A Mechatronic Bone Drilling Tool, Mechatronics, 2012
- [19] Savall, J., Pedal de Accionamiento para aplicaciones médicas. Patent number PCT/ES2007/000600. Applicant: CEIT. (2007).