

Tonatiuh, el primer robot asistente quirúrgico desarrollado en México

*Arturo Minor Martínez¹
Rigoberto Martínez Méndez²*

RESUMEN

Con el propósito de establecer soluciones tecnológicas propias y llevarlas a los quirófanos de seguridad social, en la Sección de Bioelectrónica del CINVESTAV se realizó una investigación que culminó en el año 2002 con la fabricación de un asistente robótico para cirugías laparoscópicas. Este asistente robótico bautizado como robot Tonatiuh cuenta con diseño original, funcionalmente similar y en algunos puntos superior a los robots quirúrgicos comerciales. Ha sido probado exitosamente en más de 60 cirugías. En este artículo se presenta un resumen de las características del robot Tonatiuh, el proceso de su desarrollo así como una visión general del estado actual de la robótica médica en México en el área de las cirugías laparoscópicas.

Palabras clave: Cirugía laparoscópica, Robot Tonatiuh, Robótica médica.

INTRODUCCIÓN

La cirugía laparoscópica es considerada la cirugía del presente milenio [1] debido principalmente a las ventajas que éste método otorga como son:

- Cicatrices imperceptibles lo cual es importante estéticamente para el paciente.
- Corta permanencia hospitalaria, que en términos de costo es significativo para el paciente
- Una recuperación más rápida, lo cual implica una reincorporación al trabajo más rápida lo cual para un país es económicamente deseable.

¹ Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV del IPN),

² Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de ingeniería. aminor@cinvestav.mx, rigo@ieee.org

Las ventajas mencionadas se deben principalmente al hecho de que este tipo de cirugía no es abierta, es decir, el cirujano realiza el procedimiento quirúrgico a través de pequeños puertos de acceso realizados en el paciente, dichos puertos de acceso son orificios de un centímetro, medio centímetro o tres milímetros de longitud generalmente. Este método de acceso implica varios retos, uno de ellos es la falta de visión directa al blanco quirúrgico lo que obliga a los cirujanos a introducir pequeñas cámaras en el interior del cuerpo del paciente y proyectar las imágenes obtenidas en monitores. Se utilizan cámaras de alta resolución con una fibra óptica rígida y luz blanca, las cuales pueden ser de una óptica de cero grados o de treinta grados, según sea el procedimiento. Estos dispositivos ópticos se conocen como laparoscópios y son uno de los componentes más importantes en las cirugías laparoscópicas.

En países en vías de desarrollo es un asistente humano el que sostiene el laparoscópio y lo coloca en la posición adecuada de acuerdo a las instrucciones del cirujano para obtener la mejor visibilidad del sitio de cirugía. Sin embargo, esta asistencia humana realizada exteriormente a un lado de la mesa quirúrgica es incómoda para el cirujano ya que le reduce su área de trabajo. Además, las perspectivas visuales que necesita cambian debido al temblor involuntario del asistente, provocado principalmente por cansancio. Con este tipo de asistencia, los tiempos de cirugía suelen aumentar y la calidad quirúrgica disminuye generalmente. Otro problema muy común con la asistencia humana es la falta de comunicación entre lo que el cirujano quiere ver y lo que el asistente muestra lo cual puede frustrar el trabajo del cirujano.

A pesar de estos problemas, la cirugía laparoscópica ha demostrado su utilidad y actualmente es usada comúnmente en la mayoría de los hospitales del mundo [1]. Ahora que la cirugía laparoscópica ha establecido sus parámetros de aplicación y se ha validado su utilidad, el uso de este tipo de cirugía se extiende con gran rapidez, tanto que, actualmente se enfrentan cada vez más retos quirúrgicos en las diversas subespecialidades médicas donde se trata de implementar este método quirúrgico. Debido a estos retos, se contempló la idea de utilizar robots en cirugías laparoscópicas.

La robótica médica en cirugía laparoscópica tiene sus inicios en los años noventa del siglo pasado [2,3,4,5,6]. Lo que empezó como un sueño se convirtió en una realidad con el advenimiento del primer robot quirúrgico comercial [2,3], el cual es en realidad es un robot manipulador controlado a distancia. Los robots utilizados en las cirugías difieren de los robots industriales porque, además de los parámetros comunes para navegar en el espacio requerido, tales como, grados de libertad, velocidades, ángulos, etc., se requieren características tecnológicas específicas para poder ser aplicados en cirugía. Comenzando por la seguridad mecánica, la seguridad eléctrica, los materiales de fabricación para garantizar la esterilización y los accesorios de adaptación instrumental para que el asistente robótico sea funcional dentro del quirófano. Estas características son mucho más rigurosas cuando se trata de aplicaciones médicas. La adaptabilidad de los robots para un cambio rápido de instrumental es un punto crucial porque no se dispone de un tiempo indefinido para la cirugía; la anestesia prolongada y la exposición de los tejidos al CO₂, el cual es un gas inerte empleado para insuflar la cavidad del paciente donde se llevará a cabo la operación, también producen problemas a largo plazo en el paciente y, en el corto plazo, aumentan el costo del procedimiento.

Un punto adicional a tener en cuenta es la interface hombre-máquina, necesaria para establecer la relación directa del cirujano con el manipulador. En un inicio se utilizaron pedales, mini joystick, sistemas de activación cefálica y, finalmente, sistemas con reconocimiento de comandos verbales. En todos los casos, la precisión intrínseca del reconocimiento es crucial, además del costo temporal asociado, que también produce un retardo acumulable en el procedimiento. Pero ¿Qué es lo que realmente hace un robot y por qué es necesaria su aplicación en quirófano?

Ergonómicamente, el espacio de trabajo del cirujano es normalmente frente a él, por lo que el laparoscópico también está frente al cirujano. Para que se realice el procedimiento adecuadamente se requiere que el laparoscópico dé perspectivas ópticas adecuadas del blanco quirúrgico.

El robot asistente lo que hace, en principio, es mantener el laparoscópio en la posición deseada, sin temblor y con la aproximación visual necesaria. Las ventajas de utilizar esta tecnología son inmediatas para el cirujano, pues dispone de un mejor espacio de trabajo visual del blanco quirúrgico, así como un mejor espacio de trabajo sobre la mesa quirúrgica. Esta herramienta permite que el procedimiento utilice, en general, un menor tiempo y se realice con mejor espacio ergonómico de trabajo.

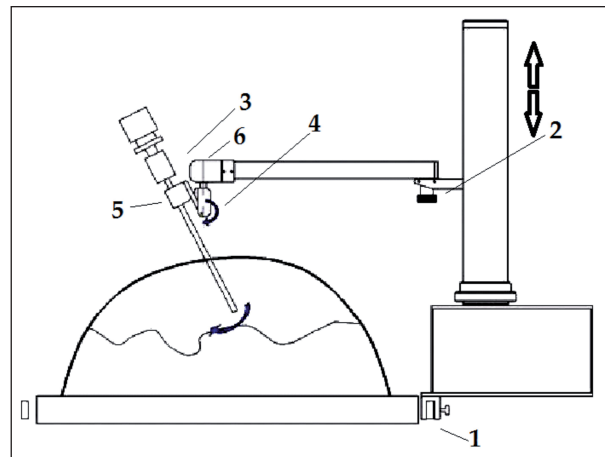
En México, según una revisión de literatura relacionada al tema realizada por los autores, no se han desarrollado robots quirúrgicos de alguna especialidad que hayan contribuido en alguna cirugía real. En la Sección de Bioelectrónica del CINVESTAV, bajo la dirección del Dr. Arturo Minor en 1999, se inició el desarrollo de una investigación para establecer nuestra propia solución tecnológica y llevar a los quirófanos de seguridad social un robot con capacidades similares a los robots comerciales. La intención jamás fue aplicar ingeniería inversa, más bien se buscó afrontar este reto tecnológico para establecer nuestras propias soluciones y proponer ideas nuevas. Dejar de resolver este tipo de retos evita una consecución de la cadena tecnológica, perdiendo la posibilidad de hacer nuevas propuestas internacionales.

EL ROBOT TONATIUH

El robot Tonatiuh surgió en el año 2002, nueve años después del primer robot comercial. La evolución de su desarrollo pasó por un proceso de modificación y corrección de cada una de sus partes [6].

La solución formal y el diseño electrónico fue desarrollado por alumnos de maestría en bioelectrónica; la fabricación de cada parte mecánica del robot se realizó en el taller de la Sección de Bioelectrónica con nuestras propias consideraciones de diseño y, para acelerar el proceso, se modeló cada parte y se probaron los prototipos en quirófano realizando cirugías experimentales en modelos animales. La figura 1 muestra un diagrama simplificado de la última versión del robot

Figura 1



- 1) Soporte para sujeción del robot a la mesa quirúrgica.
- 2) Dispositivo que permite un movimiento en el eje horizontal del brazo robótico, sirve para colocar, manualmente, el brazo en el puerto de acceso. Todo el brazo puede subir y bajar como indican las flechas junto al soporte vertical.
- 3) Articulación principal para acceso al puerto, el eje de esta articulación debe estar correctamente alineado con el puerto de acceso para un correcto funcionamiento del robot.
- 4) Es una articulación pasiva la cual bascula cuando el brazo sube o baja modificando con esto el ángulo de inclinación respecto a la pared abdominal del paciente.
- 5) Efecto cilíndrico para insertar o extraer el laparoscópio.
- 6) Articulación rotatoria respecto al eje vertical, mueve a la izquierda o derecha el laparoscópio.

así como la función de sus principales componentes. La fotografía de la figura 2 muestra una de las primeras versiones y en la figura 3 se puede observar la última versión. Los principales cambios en cada versión han sido principalmente del sistema de control, el tamaño, material y acabado de las piezas. Gracias al diseño del robot y a los materiales elegidos, es posible esterilizar la parte que estará en contacto con el laparoscopio y las partes electrónicas y mecánicas se pueden cubrir con material plástico esterilizado, como se muestra en la figura 3.

El CONACyT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México) ayudó sustancialmente a la finalización del proyecto. Se concluyó con un diseño original en su totalidad, funcionalmente similar y en algunos puntos superior a los robots comerciales existentes. La tabla 1 muestra algunas de las características más importantes del robot desarrollado.

Figura 2



Robot Tonatiuh como asistente en una cirugía aplicada a un modelo porcino.

Tabla 1

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL ROBOT TONATIUH

| | |
|----------------------------|------------------------------|
| Grados de libertad | 5: 4 activos y 1 pasivo |
| Peso total | 17 kg |
| Alimentación | 127 V CA |
| Materiales de construcción | Acero, aluminio, teflón |
| Interface de control | Joystick y serial RS232 a PC |

El asistente robótico ha sido probado exitosamente, primero en modelos animales tales como perros y cerdos y posteriormente en seres humanos. Todas las pruebas se llevaron a cabo tomando en consideración el protocolo de Helsinki y con la aprobación de los cirujanos de cada unidad hospitalaria. Durante la asistencia del robot no se tuvieron problemas ni transoperatorios ni post-operatorios. La diversidad de cirugías asistidas ha confirmado su utilidad, también se realizaron protocolos de esterilización y de montaje. Es de resaltar el uso del robot en la telemedicina mediante la aplicación del prototipo en colecistectomías remotas. El 11 y 12 de abril del 2002 se ubicó al robot en un hospital de Chiapas mientras que el cirujano principal se ubicaba en la ciudad de México [8-11]. Las imágenes capturadas por la cámara del robot conectada al sistema Telesalud de ISSSTE (Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado) fueron enviadas vía satélite

a la ciudad de México, para permitirle al cirujano valorar la situación y transmitir las indicaciones a los cirujanos asistentes en el hospital de Chiapas. El robot demostró capacidades óptimas para este tipo de aplicaciones.

A su vez se ha diversificado la casuística utilizando el robot, asistiendo a diversos cirujanos, diversos procedimientos y diversos espacios geométricos (adultos y niños). El robot ha sido utilizado en procedimientos quirúrgicos tales como: colecistectomías, funduplicaturas de Nissen, Esofagotomía de Heller e histerectomías vaginales, por citar algunos. Asimismo, el robot ha sido aprobado exitosamente asistiendo en el entrenamiento en microcirugía. La figura 3 muestra la última versión del robot Tonatiuh siendo utilizado en una cirugía con un paciente humano.

Figura 3



Última versión del robot asistente laparoscópico en una cirugía a paciente humano.

Este proyecto ha generado diversos productos académicos. Los más importantes han sido la formación de recursos humanos [12], la creación de grupos de trabajo con cirujanos expertos de la especialidad, artículos originales nacionales e internacionales [13-17], patentes, la creación de nuevas propuestas mecatrónicas internacionales para la especialidad, la participación como invitado en diversas conferencias [18-24], la experiencia de afrontar este reto y, la más importante, la asistencia quirúrgica especializada para nuestra población. Esta última redundante directamente en

nuestro país como un derecho a la atención hospitalaria de calidad. Actualmente, el robot sigue asistiendo regularmente cirugías de la especialidad, aunque todavía falta que se integren voluntades para que esta herramienta especializada forme parte de los hospitales de primer nivel del país.

CONCLUSIONES

El futuro de esta tecnología está en la puerta del primer mundo a través de la cirugía a distancia para aplicaciones espaciales o militares. Prácticamente los países más desarrollados nos siguen llevando más de diez años de distancia en avance tecnológico sin embargo, es posible, a través del esfuerzo comprometido con las instituciones que apoyan la investigación, llegar a soluciones innovadoras para nuestra sociedad científica y útiles para la población, como podría ser la teleasistencia a comunidades rurales.

Un punto que merece la atención es el aprendizaje quirúrgico con esta nueva tecnología. El robot ha asistido en diversos cursos de la especialidad para que residentes, cirujanos generales y cirujanos veterinarios conozcan y manejen esta tecnología contribuyendo así a su formación.

Los autores agradecen la participación de las siguientes instituciones para llevar a cabo este proyecto: Hospital Infantil Federico Gómez, ISSSTE, IMSS (México-Chiapas), Hospital ABC y Escuela Superior de Medicina IPN.

REFERENCIAS

- A. Cuschieri, Laparoscopic surgery: Current status, issues and future developments, *The Surgeon*, Volume 3, Issue 3, June 2005, Pages 125--138, ISSN 1479-666X, 10.1016/S1479-666X(05)80032-0.
- Sackier J. M. y Wang y Robotically Assisted Laparoscopic Surgery, *Surgery Endosc.* 1994; 8:63-66.
- Dagan J. y Bat L. Endoassist, a mechanical device to support an endoscope. *GastrointestEndosc*, 1982 mayo; 28 (2): 97-98.
- Alono S. Gilbert J. M. Soin B. Finlay P.A. y Gordan A. Controlled trail of the introduction of robotic camera assistant (EndoAssist) for laparoscopic cholecystectomy, *SurgEndosc.* 2002;16 (9): 1267-70.
- Taylor R., Funda J., Eldridge B. Gomory S., Gruben K., LaRose D., Kavussi L. y Andersen J. A telerobotic Assistant for laparoscopic surgery, *IEEE Eng. Med.* Vol. 14, núm. 3, pp. 279-288, 1995.
- Funda J., Gruben K., Eldridge B., Gomory S. y Taylor R. Control and evaluation of a 7-axis surgical robot for laparoscopy. *IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings 1995*, vol. 2, pp. 1477-1484.
- Mosso-Vázquez J. L., Minor-Martínez A., Gómez-González A., Padilla-Sánchez L., De la Torriente-Gutiérrez A., Lara-Vaca V. Colectomías laparoscópicas asistidas por un robot y teleguiadas vía satélite en México. *Cirugía y Cirujanos*, Vol. 70, No. 6. Noviembre 2002. Pp. 449-454.
- P. López, "Suma 'Tonatiuh' más de cien cirugías", *Periódico Reforma*, México D.F., 04-Aug-2005.
- C. Cobos-González, "Operan con brazo robot", *Presidencia de la república*, México D.F., Aug. 2005.
- Á. Cruz, "Telecirugía laparoscópica robotizada en el ISSSTE", *La jornada virtual*, 12-Apr-2002.
- ISSSTE, "Realiza el ISSSTE la primera telecirugía laparoscópica asistida por brazo robótico," *ISSSTE*, México D.F., B.035-2002, Apr. 2002.
- Maya-García E. Robot prototipo para asistente en cirugía laparoscópica, Tesis de maestría, Sección de Bioelectrónica, Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN, 04- Dic-2000.
- Mosso-Vázquez José Luis, Minor-Martínez Arturo, Lara-Vaca Verónica, Maya Enrique. Brazo robótico para sujetar y posicionar laparoscopios. Primer diseño y construcción en México, *Revista Cirugía y Cirujanos*, Vol. 69, No. 6, p.p. 295-299, Noviembre-Diciembre 2001.
- Mosso-Vázquez José Luis, Minor-Martínez Arturo, Lara-Vaca Verónica, García-Palacios Raúl, Nava-Pineda Carlos. Histerectomía vaginal video asistida a través de un brazo robótico. Reporte de un

caso, Revista Cirugía y Cirujanos, Vol. 70, No. 2, p.p. 105-108, Marzo-Abril 2002.

Mosso-Vázquez José Luis, Minor-Martínez Arturo, Lara-Vaca Verónica, Padilla Díaz Luis Miguel. Navegación endoscópica asistida por un robot en animal de experimentación, Revista Cirugía y Cirujanos, Vol. 70, No. 5, p.p. 346-349, Septiembre-Octubre 2002.

Minor A., Mosso JL, Domínguez A., Martínez R.C. , Muñoz R., Lara V. Robot para cirugía laparoscópica, Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica , Vol. XXIII, Núm. 1, p.p. 27-32, Marzo 2002.

José Luis Mosso-Vázquez, Arturo Minor Martínez, Amanda Gómez-González, Luis Padilla Sánchez, Alberto de la Torre-Gutiérrez, Verónica Lara-Vaca. Colectomías laparoscópicas asistidas por un robot y teleguiadas vía satélite en México, Cirugía y Cirujanos Vol. 70, No.6, p.p. 449-454, noviembre-diciembre 2002.

Minor-Martínez A. Colaboración académica en el “1er Simposium Internacional Cirugía Asistida por Computadora Imágenes Médicas y Robótica Médica” con el tema “Robótica Médica”, Instituto Nacional de Cancerología de México, Universidad Hebrea de Jerusalén, Israel, 16 de agosto 2000.

Minor-Martínez A. Participación en el “Primer Symposium Mexicano Internacional Sobre Cirugía Ortopédica Integrada por Computadora” con el

tema “Robótica Médica” Hospital de Ortopedia “Victorio de la Fuente Narváez” del IMSS y la Universidad Hebrea de Jerusalén, Israel, Septiembre 2000.

Minor-Martínez A. “Cirugía Robótica en el I.P.N.”, congreso de la Sociedad de Ex-Alumnos de la Escuela Superior de Medicina del I.P.N. A.C., Acapulco, Gro. 20 y 21 de octubre 2000.

Minor-Martínez A. Ponente en el congreso de Jornadas Médicas con el tema “Robótica Médica y Endoscopia Virtual”, ISSSTE y Centro Médico Nacional “20 de Noviembre”, del 2 al 4 de octubre 2000.

Minor-Martínez A. Ponente en el “I Foro Inter Universitario Sobre Cirugía Robótica e Imágenes Médicas” con el tema “Cirugía Robótica en la E.S.M. del I.P.N.”, realizado por el Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Medicina, 11 de septiembre 2001.

Minor-Martínez A. Ponente con la conferencia “Robótica Médica Actualidades y Trabajos Desarrollados en México”, dentro del marco del “2do. Simposium de Ingeniería de Sistemas”, Universidad del Valle de México, 15 de noviembre 2001.

Minor-Martínez A. ponente en la Sesión Mensual “Medicina Robótica, Avances en nuestro País”, Asociación Médica del Hospital de Especialidades MIG, A.C. 26 de Agosto 2004.