

## MODELADO, SIMULACIÓN Y CONTROL DEL ROBOT PARA CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA 'LAPBOT'

### MODELING, SIMULATION AND CONTROL OF SURGICAL LAPAROSCOPIC ROBOT 'LAPBOT'

Sergio Alexander Salinas<sup>1</sup>    Oscar Andrés Vivas Albán<sup>1</sup>

Recibido 3 de septiembre de 2008, aceptado 4 de septiembre de 2009

*Received: September 3, 2008 Accepted: September 4, 2009*

#### RESUMEN

Este artículo presenta el modelado matemático y estructural, la simulación por computador y el control por par calculado del robot para cirugía laparoscópica 'LapBot', que ha sido desarrollado en el Grupo de Investigación de Automática Industrial de la Universidad del Cauca, Colombia. Inicialmente se muestra un resumen de los principales robots utilizados como asistentes para cirugías de laparoscopia en el mundo, y de cómo tratan ellos el problema del paso por la incisión practicada en la cavidad abdominal. Con base en lo anterior se describen los requerimientos que deben cumplir los robots de este tipo y a partir de éstos se diseña el robot LapBot. Se muestra el modelo cinemático y dinámico del robot LapBot, así como el modelo de la restricción espacial que representa el punto de incisión abdominal. Se implementa una estrategia de control basada en el modelo del robot (control por par calculado). Diversas trayectorias en un plano y en un espacio de tres dimensiones son utilizadas para validar tanto el modelo como el controlador.

Palabras clave: Robótica quirúrgica, laparoscopia, simulación de robot, modelado de robot, control de robot.

#### ABSTRACT

*This paper presents the mathematical and structural model, simulation and computed torque control of the LapBot robot, developed by the Group of Investigation of Industrial Automatics, of the Universidad del Cauca, Colombia. First, a summary of the principal surgery assistant robots of the world is presented, and how they solve the problem of passing through the incision into the abdominal cavity. Based on this, the conditions that must be fulfilled by the robots of this type is exposed, and from these conditions the LapBot robot is designed. Its kinematics and dynamics model is shown, as well as the mathematical spatial restriction that incision represents. A control strategy based on the model (computed torque control) is implemented. Several trajectories defined in a plane and in a three dimensions space are used to validate the model and the control.*

*Keywords: Surgery robot, laparoscopy, robot simulation, robot modeling, robot control.*

#### INTRODUCCIÓN

El origen de la cirugía se remonta a la Grecia antigua, desarrollándose como una actividad artesanal hasta finales del siglo XIX cuando William Halsted sentó las bases de la cirugía moderna [1]. Desde 1901 cuando Kelling [2] reportó el primer caso de inspección abdominal de forma miniinvasiva (laparoscopia) en un perro, se han desarrollado múltiples técnicas para mejorar este tipo de procedimientos y ampliar sus aplicaciones.

Pero no fue sino hasta finales de los años ochenta que estos procedimientos hicieron su entrada formal a los quirófanos del mundo. Desde que Mouret realizó su primera colesistectomía laparoscópica (extracción de la vesícula) en 1987 [3], y los reportes comparativos sobre varias de estas cirugías escritos por Spaw, Reddick y Olsen en 1991 [4], el interés en esta área no ha cesado de crecer y se ha extendido a una gran cantidad de procedimientos quirúrgicos (apendicectomía, ligadura de trompas, histerectomía, bypass gástrico, etc. [5-6]).

<sup>1</sup> Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones. Sector Tulcán, Popayán, Colombia.  
E-mail: sergiosalinas@unicauca.edu.co; avivas@unicauca.edu.co

En la cirugía miniinvasiva los instrumentos y un sistema de visión con una fuente de luz fría son introducidos a través de pequeñas incisiones en la cavidad abdominal, observándose el interior de ésta a través de un monitor. Este tipo de intervención implica para el paciente una recuperación más rápida, con menos traumas y menores cicatrices respecto a una cirugía convencional [7]. Sin embargo, ha traído nuevos desafíos para el cirujano como por ejemplo el control de la cámara de video, la pobre ergonomía de los instrumentos utilizados, la pérdida de sensación táctil y de visión tridimensional, y la pérdida de la rotación de la articulación de la muñeca. Se puede resumir diciendo que el paciente ha ganado mucho a expensas del mayor trabajo del cirujano. Surgió entonces la idea de utilizar robots de asistencia para eliminar estos nuevos impedimentos, añadiéndole además la mejora del trabajo a escala a realizar y el filtrado del temblor del operador humano. Inclusive algunos autores han sugerido que en la historia de la evolución quirúrgica, la laparoscopia no es más que una transición tecnológica que llevaría desde los procedimientos manuales hacia la cirugía completamente robotizada [8-9].

Las principales investigaciones, desarrollos y aplicaciones se han realizado en países como Estados Unidos, Japón, Francia, Alemania y Europa en general, con resultados similares y a veces mejores que los obtenidos en procedimientos de cirugía miniinvasiva sin asistencia robotizada [10-11]. Sin embargo, para los países en desarrollo es más difícil adquirir y aplicar esta clase de tecnología principalmente por su alto costo [10].

El grupo de Investigación en Automática Industrial de la Universidad del Cauca, Colombia, está desarrollando actualmente proyectos de investigación en el área de la cirugía miniinvasiva con robots, con el fin de brindar soluciones alternativas y más económicas que las que actualmente ofrece el mercado. Como resultado de dichas investigaciones se ha diseñado un nuevo robot, llamado LapBot (robot para laparoscopia), el cual se presenta en este artículo.

### CIRUGÍA MINIINVASIVA Y LAPAROSCOPIA

La cirugía miniinvasiva es un procedimiento quirúrgico en el cual los instrumentos quirúrgicos y el equipo de visión son insertados en el cuerpo del paciente a través de pequeñas incisiones. La laparoscopia es un tipo de cirugía miniinvasiva que se realiza en la zona abdominal, en la cual los órganos son separados por medio del bióxido de carbono, con el fin de que el cirujano tenga acceso al interior del paciente y pueda manipular los instrumentos con relativa facilidad [12].

Después de obtener acceso al abdomen se realizan incisiones de 0.005 a 0.01 m, para introducir los trocares (herramienta que sirve para guiar los instrumentos al interior del abdomen) y luego por medio de ellos, las pinzas y el sistema de visión (laparoscopia o endoscopia). Esto se muestra en la Figura 1.

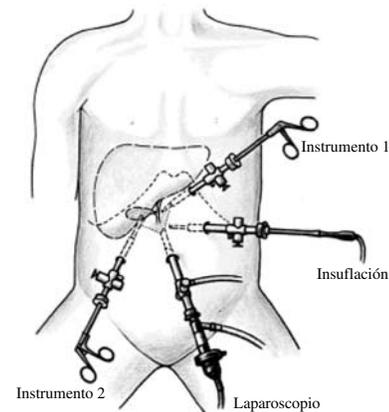


Figura 1. Configuración de los elementos básicos en una cirugía laparoscópica [12].

### ROBOTS EN CIRUGÍA MINIINVASIVA

En 1988 se utilizó por primera vez un robot industrial tipo Puma en la guía de un instrumento para la toma de una biopsia de cerebro [13], y en el siguiente año se usó un robot para actividades más invasivas en una cirugía de próstata [14]. En 1994 salió al mercado el robot AESOP, primer robot dedicado específicamente a intervenciones quirúrgicas, que se encargaba de posicionar la cámara de video en una laparoscopia [15]. Luego en 1998 se realizó el lanzamiento del robot Zeus que además de la cámara soporta también los instrumentos quirúrgicos [9], y pocos meses después se dio la aparición del robot Da Vinci, actualmente el más sofisticado robot quirúrgico existente en el mercado [16]. Sin embargo, su precio es aún inasequible para la mayoría de los hospitales del mundo, además es demasiado pesado e incómodo para los especialistas presentes en un quirófano.

A continuación se presenta un resumen de las diferentes topologías de los robots más sobresalientes que han sido diseñados como asistentes en operaciones de laparoscopia.

- **Da Vinci:** es comercializado por la empresa Intuitive Surgical [17], y tiene licencia de la FDA (*Food and Drug Administration*) de los Estados Unidos para ser empleado en pacientes humanos desde 1999 [16]. La

estructura del portador del robot (Figura 2) posee una cinemática cerrada la cual le proporciona un centro de rotación remoto, de tal forma que el robot siempre se posiciona a través del punto de incisión por medio de una estructura en doble paralelogramo. Se trata de un sistema teleoperado donde el cirujano está cómodamente sentado frente a una consola, observando en una pantalla una imagen tridimensional del paciente, y manejando dos instrumentos maestros hápticos que mueven los respectivos instrumentos quirúrgicos esclavos ubicados al interior del paciente. El robot Da Vinci posee 13 grados de libertad en total, de los cuales 7 son activos o motorizados y los otros 6 son pasivos o no motorizados que hacen parte de la estructura de doble paralelogramo.

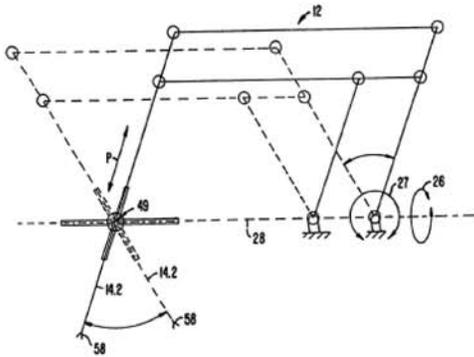


Figura 2. Estructura cinemática de doble paralelogramo [18].

La base de este robot soporta tres manipuladores de doble paralelogramo. En la Figura 3 se observa la estructura de soporte y los tres brazos del robot.

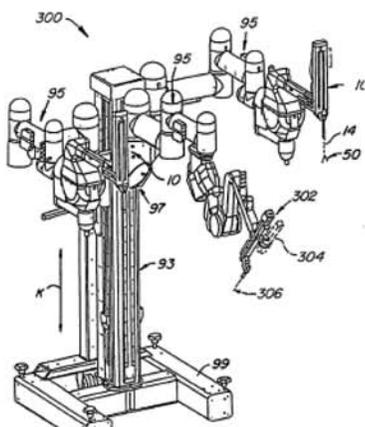


Figura 3. Robot Da Vinci con 3 brazos [18].

- **Black Falcon:** desarrollado a manera experimental por Madhani en 1998 en el MIT [19] (Figura 4). Posee la misma cinemática del robot Da Vinci, balanceado con

un contrapeso gracias a la masa misma de sus motores, permitiendo que la estructura que se ubica sobre el paciente sea mínima. Tiene 7 grados de libertad activos, los 4 primeros se localizan fuera del paciente y los otros 3 controlan el movimiento fino de la herramienta, los demás grados de libertad son pasivos y forman dos estructuras de cinemática cerrada.



Figura 4. Robot Black Falcon [19].

- **Zeus:** fue desarrollado y comercializado por la empresa Computer Motion, actualmente fusionada con Intuitive Surgical, la empresa fabricante del Da Vinci. Igual que el sistema Da Vinci, tiene licencia de la FDA para ser empleado en pacientes humanos desde 1999 [16] y como él, se trata de un sistema teleoperado. La cadena cinemática del robot se presenta en la Figura 5.

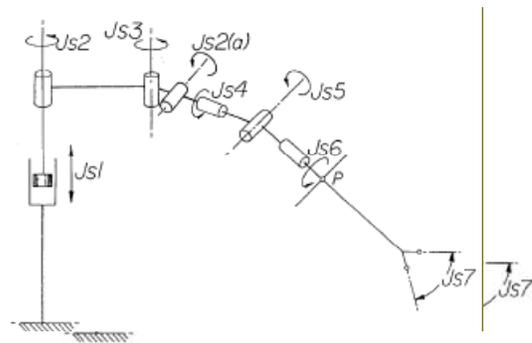


Figura 5. Estructura cinemática del robot Zeus [20].

El robot Zeus tiene una cinemática serial con 6 grados de libertad activos ( $J_{s1}$ ,  $J_{s2}$ ,  $J_{s3}$ ,  $J_{s6}$ ,  $J_{s7}$ ) y 3 pasivos ( $J_{s2a}$ ,  $J_{s4}$  y  $J_{s5}$ ) de los cuales  $J_{s2a}$  tiene valor de ángulo fijo. Las articulaciones activas permiten orientar y posicionar al robot en cualquier punto dentro del abdomen del paciente y las pasivas permiten mantener un movimiento de pivot en el punto de incisión como se puede observar en la Figura 6. Zeus tiene 2 brazos que se localizan en la camilla de cirugía

y son controlados desde una posición remota por medio de un sistema maestro, similar al robot Da Vinci.

- **Laprotek:** es un sistema robotizado que está siendo elaborado por la empresa EndoVia Medical en Boston (Estados Unidos) y evaluado por la FDA para su licenciamiento en el uso con humanos [22].

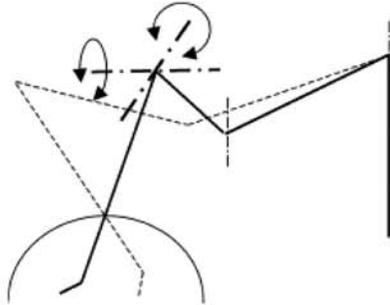


Figura 6. Movimiento de las articulaciones pasivas del robot Zeus [21].

La Figura 7 presenta el diagrama estructural del robot, donde la letra P indica el punto de incisión en el paciente, mostrándose además el diagrama cinemático correspondiente [23].

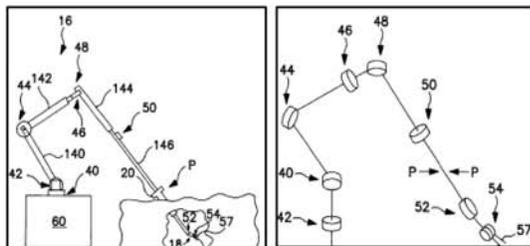


Figura 7. Diagramas estructural y cinemático de Laprotek [23].

Este robot tiene dos articulaciones pasivas que permiten mantener un movimiento libre a través del punto P; dichas articulaciones se muestran en el diagrama con los números 46 y 48. En total el robot tiene 8 articulaciones que le permiten posicionar y orientar la herramienta quirúrgica en un espacio tridimensional manteniendo un punto fijo P.

- **Endobot:** fue diseñado con propósitos de investigación por Kang y Wen en el Rensselaer Polytechnic Institute de Nueva York [24]. En la Figura 8 se pueden observar los dos instrumentos del robot y su estructura cinemática.

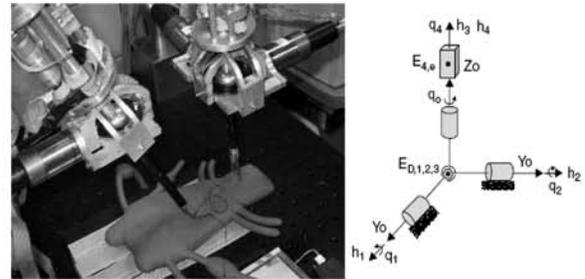


Figura 8. Fotografía del robot Endobot (izquierda) y su estructura cinemática (derecha) [24].

Este robot está basado en una articulación esférica y dos arcos semicirculares que se localizarían sobre el punto de incisión, en un diseño compacto y liviano que ofrece el mínimo de articulaciones. Está provisto de 4 grados de libertad en el manipulador (3 de rotación y uno de traslación) y la herramienta es de 2 grados de libertad, para un total de 6. Sin embargo, la estructura física del robot quedaría sobre el paciente, dificultando el desarrollo de una cirugía real.

### ESTRUCTURA FUNCIONAL DE LAPBOT

Después del estudio bibliográfico se ha llegado a la conclusión que la estructura de un robot debe cumplir con los siguientes requisitos mínimos para ser utilizado en una cirugía laparoscópica:

- Seis grados de libertad activos que le proporcionen la posibilidad de orientar y posicionar la pinza o herramienta en cualquier lugar dentro de un espacio tridimensional, en este caso la cavidad abdominal del paciente.
- Al menos dos grados de libertad de los seis activos deben ubicarse al interior del abdomen del paciente con el fin de orientar de forma fina la herramienta, quedando la mayor parte del robot por fuera del cuerpo del paciente.
- Por lo menos dos grados de libertad pasivos que le permitan mantener un centro de rotación remoto donde se ubicaría el trocar, de tal forma que el robot no tenga la posibilidad de perder esa referencia. Es de anotar que otro enfoque normalmente utilizado es no utilizar grados de libertad pasivos para respetar el paso por el trocar, sino algoritmos presentes en el modelo geométrico que tengan en cuenta estas restricciones [25]. La desventaja de esta solución es que el sistema no es intrínsecamente seguro, dado que tiene la posibilidad motora de perder el centro

de rotación remoto (la ubicación del trocar) y por tanto la posibilidad de lesionar al paciente.

Teniendo en cuenta las condiciones anteriores, para el diseño de este nuevo robot se escogió una estructura de nueve grados de libertad, con seis articulaciones activas y tres pasivas. Se descartó la estructura cerrada de doble paralelogramo por tener demasiadas articulaciones pasivas que complican en exceso el análisis e incrementan el peso y el costo del robot.

En la Figura 9 se puede observar la estructura cinemática que se diseñó para LapBot; las distancias del robot se han etiquetado con letras D y R (según la Tabla 1 que muestra los valores de sus parámetros geométricos), la articulación prismática se representa con un prisma y las rotoideas con cilindros, cada una con su respectivo número. El punto de incisión por donde cruza el trocar en la cirugía se ha representado con un anillo que se encuentra entre las articulaciones 7 y 8, de tal forma que sólo dos articulaciones quedan dentro de la cavidad abdominal del paciente.

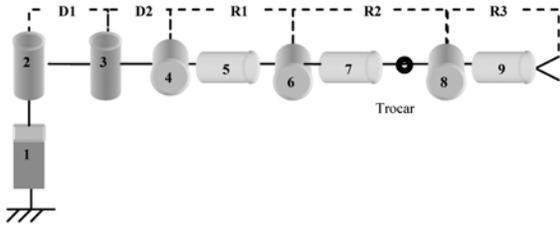


Figura 9. Estructura cinemática del robot LapBot.

Las tres primeras articulaciones permiten posicionar a LapBot en un espacio tridimensional, la articulación 4 se fija en un valor para que el robot se incline de tal forma que el paciente quede por debajo del nivel superior del robot, la quinta y la sexta son articulaciones pasivas que mantienen el movimiento del cuerpo de longitud  $R2$  a través del trocar, y las últimas 3 articulaciones corresponden a la orientación del efector final.

### MODELADO MATEMÁTICO DEL ROBOT LAPBOT

Se analizó la estructura del robot y se obtuvo la tabla de parámetros geométricos (Tabla 1) siguiendo la metodología descrita en [26].

Donde:

$j$  representa el número de la articulación o cuerpo.

$\mu_j$  indica si la articulación es activa (con motor) o pasiva (sin motor).

$\sigma_j$  indica si la articulación es de traslación (1) o de rotación (0).

$\alpha_j, \theta_j$  son ángulos que dependen de los ejes de las articulaciones o de la rotación de una articulación rotoide.

$d_j, r_j$  son distancias entre los ejes de las articulaciones o que involucran el desplazamiento de una articulación prismática.

Tabla 1. Parámetros geométricos de LapBot.

$j$	$\mu_j$	$\sigma_j$	$\alpha_j$	$d_j$	$\theta_j$	$r_j$
1	1	1	0	0	0	$r_1$
2	1	0	0	0	$\theta_2$	0
3	1	0	0	D1	$\theta_3$	0
4	0	0	$90^\circ$	D2	$\theta_4$	0
5	0	0	$90^\circ$	0	$\theta_5$	R1
6	0	0	$-90^\circ$	0	$\theta_6$	0
7	1	0	$90^\circ$	0	$\theta_7$	R2
8	1	0	$-90^\circ$	0	$\theta_8$	0
9	1	0	$90^\circ$	0	$\theta_9$	0
x	0	1	0	0	0	R3

A partir de esta tabla se puede encontrar el Modelo Geométrico Directo (MGD) que permite calcular la posición y orientación del efector final del robot en el espacio cartesiano, conociendo los valores  $\theta_j$  y  $r_j$  asociados a las articulaciones.

Por su parte, el modelo dinámico, el cual sirve para simular y controlar el robot, relaciona los pares o fuerzas proporcionadas a los motores con las posiciones, velocidades y aceleraciones articulares. Para su cálculo es necesario inicialmente calcular los parámetros inerciales de base que constituyen el conjunto mínimo de valores de inercias y masas a tener en cuenta en el modelo dinámico del robot. Los parámetros de base permiten eliminar aquellos parámetros que no tienen efecto sobre el modelo, agrupando otros con el fin de simplificar las ecuaciones finales del modelo dinámico.

Siguiendo esta metodología, el programa SYMORO (*S*ymbolic *M*odelling of *R*obots) [27] proporciona la tabla de parámetros mínimos del robot LapBot, los cuales se muestran en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Parámetros del tensor de inercia de LapBot.

$j$	$XX_j$	$XY_j$	$XZ_j$	$YY_j$	$YZ_j$	$ZZ_j$
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	ZZ2R
3	0	0	0	0	0	ZZ3R
4	0	0	0	0	0	0
5	XX5R	0	0	0	0	ZZ5R
6	XX6R	0	0	0	0	ZZ6R
7	XX7R	0	0	0	0	ZZ7R
8	XX8R	0	0	0	0	ZZ8R
9	XX9R	0	0	0	0	ZZ9R

Tabla 3. Parámetros del primer momento de inercia, masas e inercia de los motores de LapBot.

$j$	$MX_j$	$MY_j$	$MZ_j$	$M_j$	$Ia_j$
1	0	0	0	M1R	Ia1
2	0	0	0	0	0
3	MX3R	MY3R	0	0	Ia3
4	0	0	0	0	0
5	MX5	MY5R	0	0	0
6	MX6	MY6R	0	0	0
7	MX7	MY7R	0	0	Ia7
8	MX8	MY8R	0	0	Ia8
9	MX9R	MY9R	0	0	Ia9

Donde:

$M_j$ : masa del cuerpo de la articulación  $j$ .

${}^jMS_j = [MX_j \ MY_j \ MZ_j]^T$ : vector columna del primer momento de inercia de la articulación  $j$ .

$XX_j, XY_j, XZ_j, YY_j, YZ_j, ZZ_j$ : elementos que representan el tensor de inercia de la articulación  $j$ .

$Ia_j$ : inercia del motor de la articulación  $j$ .

La letra R al final de algunos elementos significa que dicho parámetro agrupa en él a otros que en las tablas aparecen como nulos. Esta reducción de parámetros permite trabajar con sólo 30 parámetros inerciales de base y no con el total de 99 parámetros, lo cual simplifica enormemente los cálculos en simulación del sistema robot.

Usando las dos tablas anteriores y de nuevo con la ayuda del software SYMORO se obtiene el Modelo Dinámico Inverso (MDI), el cual permite calcular los pares o fuerzas mecánicas para cada articulación en términos de las posiciones, velocidades y aceleraciones de cada articulación (ecuación (1)), de acuerdo al método de Lagrange-Euler [26]:

$$\Gamma = A(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + Q(q) \quad (1)$$

Donde:

$\Gamma$  es el par o fuerza aplicada.

$A(q)$  es la matriz de inercia, simétrica y definida positiva.

$C(q, \dot{q})$  es la matriz que incluye las fuerzas de Coriolis y centrífugas.

$Q(q)$  es el vector de fuerzas gravitacionales.

La posición articular está dada por  $q$ , la velocidad por  $\dot{q}$  y la aceleración por  $\ddot{q}$ .

Igualmente, despejando las aceleraciones articulares de la ecuación se calcula el Modelo Dinámico Directo (MDD), el cual permite simular el robot en un software como Matlab/Simulink®.

### MODELADO DE LA RESTRICCIÓN POR INCISIÓN Y MODELO GEOMÉTRICO INVERSO

El Modelo Geométrico Inverso (MGI) permite calcular los valores de las  $\theta_j$  y  $r_j$  asociadas a las articulaciones dependiendo de la localización deseada del efector final del robot en el espacio cartesiano.

Para hallar el MGI de un robot con seis grados de libertad se usa normalmente el método de Paul [28], pero dado que LapBot posee 9 grados de libertad es necesario encontrar otras 3 ecuaciones linealmente independientes adicionales a las 6 que ofrece el método de Paul para poder hallar el MGI. Estas 3 ecuaciones se pueden encontrar por la restricción espacial que aparece cuando el robot debe pasar a través de una pequeña incisión y moverse sobre ésta (ver Figura 10).

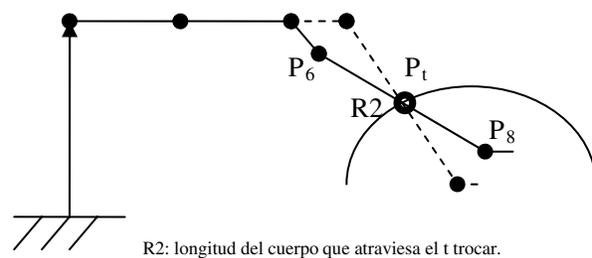


Figura 10. Movimiento alrededor del punto de incisión.

La articulaciones 6 y 8 se representan por las posiciones cartesianas  $P_6(x_6, y_6, z_6)$  y  $P_8(x_8, y_8, z_8)$  respectivamente, y el punto de incisión (trocar) está en  $P_t(x_t, y_t, z_t)$ . El vector desde  $P_6$  hasta  $P_8$  debe ser colineal con el vector entre  $P_6$  y  $P_t$ , lo cual se puede expresar por medio del siguiente producto vectorial:

$$(P_t - P_6) \times (P_8 - P_6) = 0 \quad (2)$$

De aquí aparecen 2 ecuaciones linealmente independientes, otra ecuación se puede definir teniendo en cuenta que Lapbot debe mantener parte del cuerpo de longitud  $R_2$  dentro del abdomen del paciente y por lo tanto la distancia entre la posición del trocar y la articulación 6 debe ser menor a dicha longitud. Es decir, la sección del robot que pasa por la incisión no puede ser totalmente introducida o extraída del abdomen mientras se desarrolla la cirugía porque puede herirse al paciente. Esta restricción se modela por medio de la siguiente desigualdad:

$$|P_t - P_6| < R_2 \quad (3)$$

Así, con el MGD, las posiciones y orientaciones deseadas, y las ecuaciones y , es posible encontrar nueve ecuaciones no lineales independientes con nueve incógnitas, de las cuales surgen diferentes soluciones. A través de las restricciones de longitud de los cuerpos y definiendo la variable  $r_1$  como positiva, se escoge la solución válida para LapBot, la cual representa su respectivo MGI.

### PRUEBA DE LOS MODELOS GEOMÉTRICOS

Antes de diseñar el controlador se realizó una prueba con los modelos geométricos para verificar que es posible seguir trayectorias cartesianas pasando a través de un punto de pivot. Para esto se usó el diagrama que se presenta en la Figura 11.

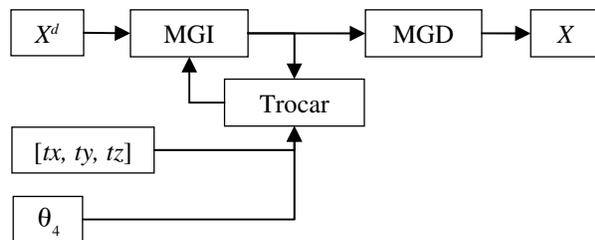


Figura 11. Diagrama de prueba de los modelos geométricos.

Donde:

- $X_d$  representa las posiciones cartesianas deseadas.
- $tx, ty, tz$  es la posición de la incisión en el espacio cartesiano.
- $\theta_4$  es el ángulo fijo de la cuarta articulación.
- Trocar* contiene las ecuaciones de restricción espacial.
- $X$  representa las posiciones cartesianas de salida.

Al realizar la simulación del comportamiento de LapBot para seguir diferentes trayectorias se obtiene un buen

seguimiento manteniendo el punto de pivot. Una de las trayectorias que se observa en la Figura 12, se trata de un círculo realizado sobre el plano xy con radio de 0.15 m, centro en (0.25 m, 0.25 m, 0 m),  $\theta_4 = \pi/4$  radianes,  $tx = 0.2$  m,  $ty = 0.2$  m,  $tz = 0.1$  m, y un tiempo de simulación de 3 segundos. Se ha graficado la ubicación del robot en diferentes instantes de tiempo para observar su movimiento.

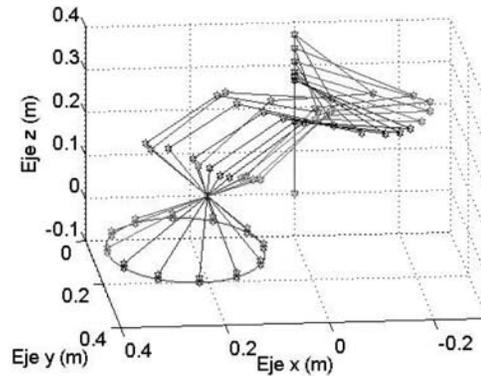


Figura 12. Seguimiento de una trayectoria circular usando los modelos geométricos.

### DISEÑO DE LOS CUERPOS DEL ROBOT LAPBOT

Para obtener los valores aproximados de los parámetros de base y de las dimensiones geométricas de LapBot se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

1. La pared abdominal sube entre 0.15 y 0.2 m debido al gas  $CO_2$  que se inyecta al paciente [29].
2. Una camilla estándar grande tiene un ancho de 0.6 m y una altura mínima respecto al piso de 0.5 m [30].
3. La parte del robot que se introduce en la cavidad abdominal debe alcanzar una distancia máxima entre 0.24 y 0.30 m desde el punto de incisión [19], [31].
4. Emplear motores especiales para robots usados en cirugía, dado que deben ser livianos y pequeños pero con suficiente par mecánico, confiables, de baja fricción interna, con compatibilidad electromagnética y la posibilidad de control de posición [19, 32].
5. Los materiales de las herramientas y los cuerpos del robot que están dentro del paciente deben ser de

acero quirúrgico inoxidable 410 [33], para poderlos esterilizar y reutilizar. Pero para los cuerpos externos se puede usar aluminio [19, 31], que es más liviano y económico.

- El diámetro del cuerpo que pasa a través del punto de incisión es de entre 0.005 m a 0.01 m [18-19].

De acuerdo con lo anterior se pueden escoger las siguientes dimensiones:  $R3 = 0.01$  m (tamaño de la punta de la pinza),  $R2 = 0.3$  m y 0.008 m de diámetro (cuerpo que pasa por el trocar). Como el cuerpo de longitud  $R1$  es aquel que permite posicionar al robot por encima del abdomen del paciente, para que el resto de los cuerpos no colisionen, la mínima dimensión de  $R1$  será de 0.2 m.

Ahora, teniendo en cuenta que se colocarán dos brazos de LapBot a lado y lado de la camilla a no más de 0.05 m de su orilla, y suponiendo que la incisión al paciente no se realizará a más de 0.3 m de la base del robot, la posición que se presenta en la Figura 13 es la que exige la mayor elongación de LapBot. Como se observa, el cuerpo  $R2$  queda casi totalmente retraído lo cual indica que la suma de  $D1$ ,  $D2$  y  $R1$  es aproximadamente 0.65 m. Como  $R1 = 0.2$  m, entonces  $D1+D2 = 0.45$  m. Luego para darle mayor versatilidad y espacio de trabajo sobre la camilla se escoge  $D1 = 0.25$  m y  $D2 = 0.20$  m.

En cuanto a los parámetros inerciales mostrados en las Tablas 2 y 3, se realizó el cálculo construyendo los cuerpos del robot en el software CAD SolidEdge®, usando aluminio con 2.712 g/cm<sup>3</sup> de densidad para los cuerpos que están fuera del paciente y acero inoxidable 410 de 7.75 g/cm<sup>3</sup> de densidad para los cuerpos que están dentro del paciente.

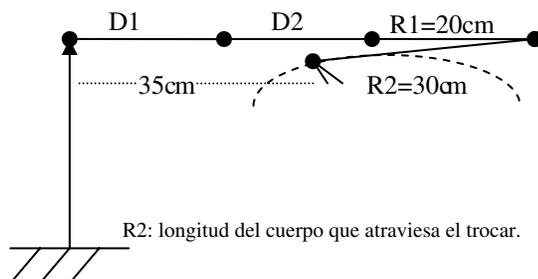


Figura 13. Máxima elongación para LapBot.

Además se utilizarán los motores Maxon EC Powermax 30 especialmente diseñados para robots quirúrgicos, los cuales pesan aproximadamente 0.165 kg [33]. En la Tabla 4 se resumen los valores de los parámetros inerciales de base para LapBot, con  $\theta_4 = \pi/4$  radianes.

Tabla 4. Valores de los parámetros inerciales de base del robot LapBot.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
XX5R	545e-9	MX7	0
XX6R	2.8e-3	MX8	0
XX7R	2.1e-9	MX9R	0
XX8R	131e-9	MY3R	6e-9
XX9R	-1.6e-9	MY5R	0
ZZ2R	50.6e-3	MY6R	-13.4e-3
ZZ3R	18e-3	MY7R	0
ZZ5R	13.415e-6	MY8R	2.215e-6
ZZ6R	2.8e-3	MY9R	0
ZZ7R	892.1e-9	M1R	5.98
ZZ8R	132.7e-9	Ia1	2e-6
ZZ9R	2.1e-9	Ia3	2e-6
MX3R	68.7e-3	Ia7	2e-6
MX5	0	Ia8	2e-6
MX6	0	Ia9	2e-6

Las unidades para los elementos del tensor de inercia son kg.m<sup>2</sup>, para el primer momento de inercia son kg.m, y para la inercia del accionador son kg.m<sup>2</sup>.

### CONTROL POR PAR CALCULADO (CTC)

El control por par calculado (*CTC: computed torque control*) utiliza el modelo dinámico inverso para linealizar y desacoplar la compleja dinámica de un robot, asegurando teóricamente un comportamiento uniforme en cualquier configuración de manera que es posible aplicar una técnica de control lineal [26], [34-35].

La ecuación (1) puede ser reescrita de la siguiente forma, donde la matriz  $H$  incluirá los términos de Coriolis, fuerzas centrífugas y términos gravitacionales:

$$\Gamma = A(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) \quad (4)$$

Asumiendo que las matrices  $A$  y  $H$  se pueden estimar por medio de  $\hat{A}$  y  $\hat{H}$ , la siguiente linealización es propuesta:

$$\Gamma = A(q)w(t) + H(q, \dot{q}) \quad (5)$$

Donde  $w(t)$  representa la nueva señal de control. Si el sistema es conocido con cierta precisión, es decir,  $\hat{A} = H$  y  $\hat{H} = H$ , la señal de control  $w(t)$  puede ser definida como:

$$w(t) = Kp(q^d - q) + Kv(\dot{q}^d - \dot{q}) \quad (6)$$

Donde  $K_p$ ,  $K_v$  son las ganancias proporcional y derivativa respectivamente, y  $q^d$  y  $\dot{q}^d$  las posiciones y velocidades deseadas.

En la Figura 14 se muestra el esquema del control CTC, donde el bloque del modelo geométrico inverso (MGI) se encarga de convertir la consigna cartesiana deseada en consigna articular.

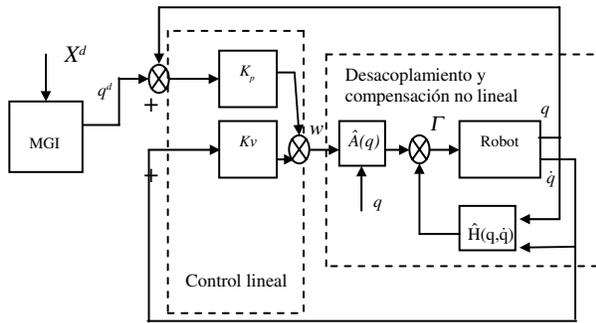


Figura 14. Esquema general del control CTC.

Sin embargo, para aplicar la estrategia de control al robot LapBot, es necesario adicionar las restricciones por el punto de incisión como se muestra en la Figura 15. Obsérvese que se utiliza también el modelo geométrico directo (MGD) para obtener el movimiento del robot en el espacio cartesiano  $X$  y verificar que está siguiéndose la trayectoria deseada  $X^d$ .

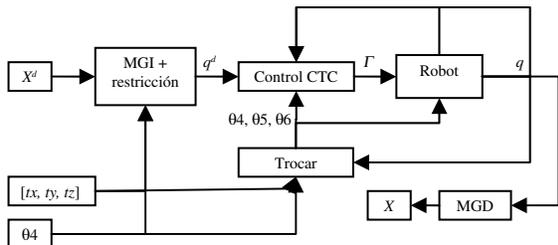


Figura 15. Control CTC con modificaciones para el robot LapBot.

La posición cartesiana deseada  $X^d$  del efector final pasa por el bloque de ecuaciones del modelo geométrico inverso (MGI) y de las restricciones definidas por la incisión, con el fin de obtener las variables articulares deseadas ( $q^d$ ), de tal forma que el controlador CTC garantice un mínimo error entre  $q$  y  $q^d$ , así como un mínimo error entre  $X$  y  $X^d$ . El bloque *Trocar* contiene las ecuaciones para obtener los valores de las articulaciones pasivas ( $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ ).

Se realizó la sintonización del controlador PD por el método manual planteado en [36], obteniéndose los valores de ganancias presentados en la Tabla 5, los cuales se refieren sólo a las articulaciones activas (motorizadas).

Tabla 5. Ganancias para el controlador PD.

$j$	1	2	3	7	8	9
$K_p$	8e4	20e4	15e4	5e4	20e4	14e4
$K_v$	200	350	270	150	300	300

### SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS

Después de sintonizar el controlador se probó su funcionamiento con las siguientes trayectorias, todas con el punto de incisión ubicado en  $t_x = 0.2$  m,  $t_y = 0.2$  m,  $t_z = 0.15$  m,  $\theta_4 = \pi/4$  rad, y un período de muestreo de 0.001s.

1. Círculo sobre el plano xy con radio de 0.05 m, centro en (0.3, 0.3, 0.7) m y un tiempo de simulación de 3 segundos, que se presenta al lado izquierdo de la Figura 16.

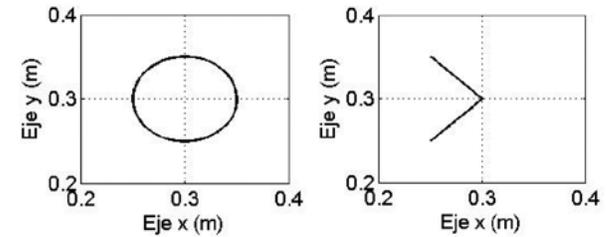


Figura 16. Trayectorias circular (derecha) y lineal (izquierda).

2. Trayectoria lineal con cambio brusco de dirección sobre el plano xy, que comienza en (0.25, 0.35, 0.7) m y termina en (0.25, 0.25, 0.7) m, con tiempo de simulación de 1 segundo. La trayectoria se muestra al lado derecho de la Figura 16.
3. Trayectoria tridimensional que pretende simular una sutura simple realizada en 3 segundos (Figura 17).

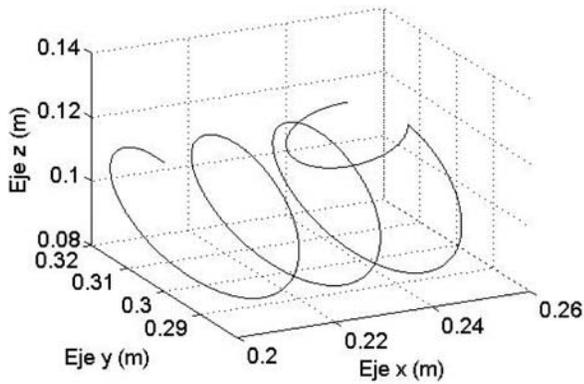


Figura 17. Trayectoria tridimensional.

El seguimiento de estas trayectorias se presenta en las Figuras 18, 19 y 20, donde se puede observar que LapBot respeta el punto de incisión en todos los casos. Se ha graficado la ubicación del robot en diferentes instantes de tiempo para representar dicho movimiento.

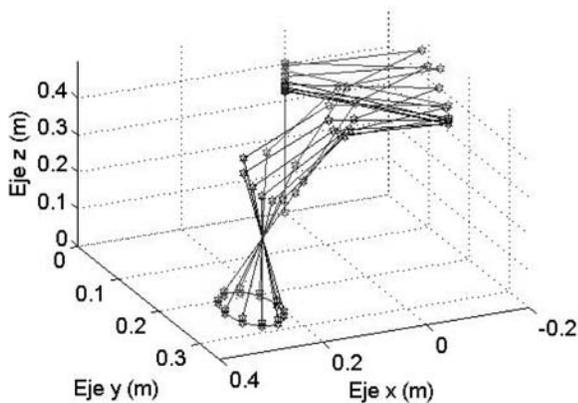


Figura 18. Seguimiento del círculo.

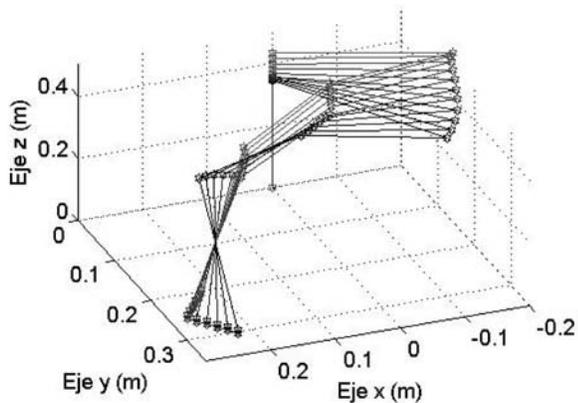


Figura 19. Seguimiento del cambio de dirección.

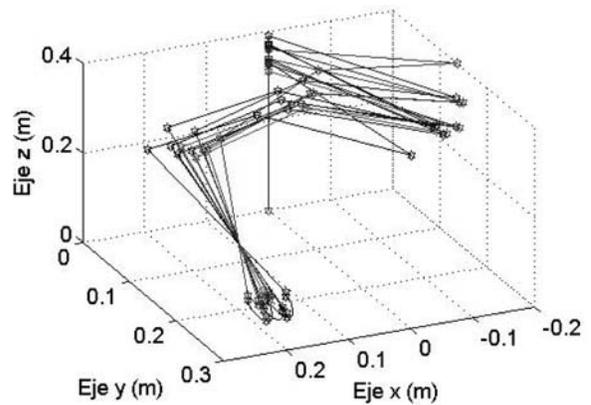


Figura 20. Seguimiento trayectoria tridimensional.

Los errores de posición cartesiano que se obtienen para cada trayectoria se pueden visualizar en las Figuras 21, 22 y 23, donde se observa que para el círculo el error máximo es de 0.00027 m, para el cambio de dirección es de 0.00046 m, para el movimiento de sutura es de 0.00048 m y en todos los casos el error de estado estacionario tiende a ser menor a 0.000007 m. Esto demuestra que el robot diseñado es capaz de realizar movimientos complejos dentro del paciente, con un error muy pequeño de seguimiento y respetando el paso a través de la incisión practicada.

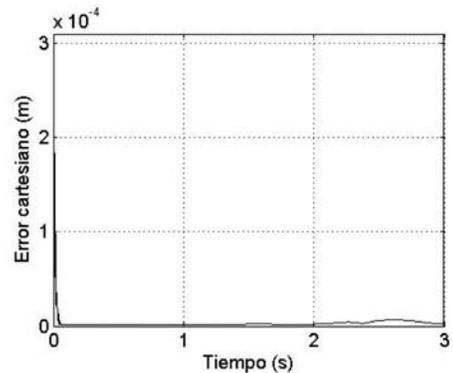


Figura 21. Error de seguimiento cartesiano para el círculo.

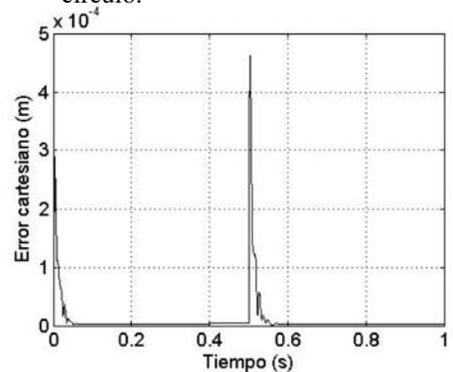


Figura 22. Error de seguimiento cartesiano para el cambio de dirección.

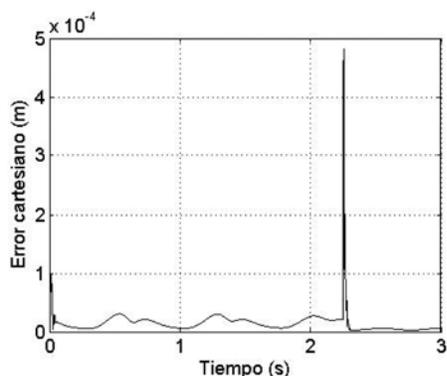


Figura 23. Error de seguimiento cartesiano para la trayectoria tridimensional.

### CONCLUSIONES

Este artículo presentó un nuevo diseño de robot asistente para operaciones de laparoscopia. Para realizar este diseño se realizó un estudio de los principales robots asistentes en cirugías miniinvasivas que existen en el mundo, con el fin de especificar una serie de requerimientos que debe tener un manipulador de este tipo. Con base en estos requerimientos se realizó el diseño de la arquitectura del robot LapBot (robot para laparoscopia).

Se obtuvo el modelo cinemático y dinámico del robot diseñado y se modeló igualmente la restricción matemática que se impone al robot para que pase por una incisión fija realizada en la cavidad abdominal del paciente.

Los modelos del robot fueron probados implementando una estrategia de control por par calculado. La efectividad del control propuesto fue igualmente probada con diversas trayectorias cartesianas del tipo de aquellas que pueden encontrarse en una intervención quirúrgica. Los errores de seguimiento obtenidos fueron bastante buenos, corroborándose las potencialidades del robot propuesto para realizar operaciones de laparoscopia.

Trabajos futuros simularán el robot LapBot en un ambiente gráfico en computador, utilizando trayectorias quirúrgicas reales, para en una etapa posterior proceder a la construcción de un primer prototipo de robot quirúrgico.

### REFERENCIAS

- [1] J. Patiño y J. Cervantes. "Cirugía Laparoscópica y Toracoscópica". McGraw-Hill Interamericana. México DF, México. 1997.
- [2] G. Kelling. "Die Tamponade der Bauchhöhle mit Luft zur Stillung lebensgefährlicher Intestinalblutungen". Munch Med Wochenschr. Vol. 48, pp. 1480-1483. 1901.
- [3] P. Mouret. "How I developed laparoscopic cholecystectomy". Annals of the Academy of Medicine Singapore. Vol. 25, pp. 744-747. 1996.
- [4] A.T. Spaw, E.J. Reddick and D.O. Olsen. "Laparoscopic laser cholecystectomy: analysis of 500 precedures". Surgical Laparoscopy & Endoscopy. Vol. 1, pp. 2-7. 1991.
- [5] M. Jacobs, M. Gagner and J. Cueto-García. "Laparoscopic Surgery". New York. McGraw-Hill, pp. 35-40. 2003.
- [6] D.B. Jones. "Laparoscopic Surgery: Principles and Procedures". New York. Marcel Dekker, pp. 1-6. 2004.
- [7] D. Camarillo, T. Krummel and K. Salisbury. "Robotic technology in surgery: past, present, and future". The American Journal of Surgery. Vol. 188, pp. 2-14. 2004.
- [8] G.H. Ballantyne and F. Molle. "The Da Vinci telerobotic surgical system: the virtual operative field and telepresence surgery". Surgical Clinics of North America. Vol. 83, pp. 1293-1304. 2003.
- [9] J. Marescaux and F. Rubino. "The Zeus robotic system: experimental and clinical applications". Surgical Clinics of North America. Vol. 83, pp. 1305-1315. 2003.
- [10] S. Dharia and T. Falcone. "Robotics in reproductive medicine. Fertility and Sterility". Vol. 84, pp. 1-11, 2005.
- [11] B. Sánchez, C. Mohr, J. Morton, B. Safadi, R. Alami and M. Curet. "Comparison of totally robotic laparoscopic Roux-en-Y gastric bypass and traditional laparoscopic Roux-en-Y gastric bypass". Surgery for Obesity and Related Diseases. Vol. 1, pp. 549-554. 2005.
- [12] S. Schwartz y J. Hunter. "Principios de Cirugía". 7a Edición. McGraw-Hill Interamericana. México DF, México. Capítulo 44. 1999.

- [13] Y. Kwok, J. Hou, E. Jonckheere and S. Hayall. "A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guide, stereoscopic brain surgery". IEEE Transactions on Biomedical Engineering. Vol. 35 N° 2, pp. 153-161. 1988.
- [14] B. Davies, R. Hibberd, M. Coptcoat and J. Wickham. "A surgeon robot prostatectomy-a laboratory evaluation". Journal of Medical Engineering Technology. Vol. 13, pp. 273-277. 1989.
- [15] D. Stoianovici. "Robotic surgery". World Journal Urology. Vol. 18, pp. 289-295. 2000.
- [16] M. Marohn and E. Hanly. "Twenty-first century surgery using twenty-first century technology: surgical robotics". Current Surgery. Vol. 61, pp. 466-473. 2004.
- [17] Intuitive Surgical. Da Vinci System. URL: <http://www.intuitivesurgical.com/index.aspx>. Fecha de consulta: julio 2008.
- [18] Intuitive Surgical. "In vivo accessories for minimally invasive robotic surgery". United States Patent N° US 7125403B2. 2006.
- [19] A. Madhani. "Design of teleoperated surgical instruments for minimally invasive surgery". PhD Tesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT), 1998.
- [20] Computer Motion Inc. "Method and apparatus for performing minimally invasive surgical procedures". United States Patent. N° US 6436107B1. 2002.
- [21] E. Dombre, P. Pognet, G. Duchemin and F. Pierrot. "Quelques problemes de conception et commande de robots medicaux". Mécanique & Industries. Vol. 4, pp. 559-563. 2003.
- [22] R. Franzino. "The Laprotek surgical system and the next generation of robotics". Surgical Clinics of North America. Vol. 83 N° 6, pp. 1317-1320. 2003.
- [23] Endovia Medical Inc. "Articulated apparatus for telemanipulator system". United States Patent. No. US 6692485B1, 2004.
- [24] H. Kang and J. Wen. "Endobot: a robotic assistant in minimally invasive surgeries". Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol. 2, pp. 2031-2036, Corea del Sur. 2001.
- [25] M. Michelin. "Contribution à la commande de robots pour la chirurgie mini-invasive". PhD Thesis. Université de Montpellier II. France. 2004.
- [26] W. Khalil and E. Dombre. "Modeling, Identification and Control of Robots". Kogan Page Science, London, United Kingdom. 2002.
- [27] W. Khalil and D. Creusot. "Symoro+: A System for the Symbolic Modelling of Robots". Robotica. Vol. 15, pp. 153-161. 1997.
- [28] R. Paul. "Robot Manipulators: mathematics, programming and control". MIT Press, Cambridge, USA. 1982.
- [29] M. Abdel Hadi, H. Zakaria, A. Almulhim, A. Alghamdi, H. Mowafi and A. Hussien. "Gas or Gas-Less Laparoscopic Cholecystectomy?". Kuwait Medical Journal. Vol. 34, pp. 292-295. 2002.
- [30] Narang Medical Limited. Operating Room Tables. URL: [www.narang.com/surgical\\_medical\\_hospital\\_laboratory\\_products/index.php](http://www.narang.com/surgical_medical_hospital_laboratory_products/index.php). Fecha de consulta: febrero de 2008.
- [31] J. Mosso, A. Minor, V. Lara y E. Maya. "Brazo robótico para sujetar y posicionar laparoscopios". Revista Cirugía y Cirujanos. Vol. 69, pp. 295-299. 2001.
- [32] Maxon. Hoja de datos del motor Maxon EC-Powermax 30. URL: [www.maxonmotor.com](http://www.maxonmotor.com) Fecha de consulta: junio 2008.
- [33] Faico. Instrumental quirúrgico. URL: [www.faico.com.ar/servicio.htm](http://www.faico.com.ar/servicio.htm). Fecha de consulta: marzo 2008.
- [34] L. Sciavicco and B. Siciliano. "Modeling and Control of Robot Manipulators". McGraw-Hill, Singapore. 1996.
- [35] J. Slotin and W. Li. "Applied Nonlinear Control". Prentice Hall, New Jersey, USA. 1991.
- [36] C. Smith. "Fundamentals of control theory". Chemical Engineering. Vol. 86, pp. 11-39. 1979.