

# Sistema de telerobótica para entrenamiento en asistencia quirúrgica

## Tele-robotic system for surgical assistant training

Germán Buitrago Salazar, Olga Lucía Ramos Sandoval, Darío Amaya Hurtado

Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería en Mecatrónica, Bogotá, Colombia

Correo electrónico: [gedabusa@gmail.com](mailto:gedabusa@gmail.com)

Recibido: 15 de enero de 2016      Aceptado: 3 de julio de 2016

### Resumen

En este artículo, elaboró un novedoso prototipo de sistema teleoperado para asistencia y entrenamiento quirúrgico, utilizando dos manipuladores industriales y dos dispositivos de control de seis y tres grados de libertad. El sistema maestro-esclavo cuenta con un sistema de visión para la supervisión de la celda de trabajo, una interfaz de usuario para la interacción del usuario con el ambiente de los robots y etapas de filtrado de señal y de control, que disminuyen los errores posicionales y el retardo de las señales, convirtiéndolo en un sistema con trabajo en tiempo real. Los

resultados obtenidos de este trabajo después de testearse con tres usuarios diferentes, verifican la facilidad de maniobrabilidad del sistema, la practicidad como elemento de aprendizaje y el alto nivel de performance obtenido durante las pruebas, siendo mayor del 87 %.

**Palabras claves:** telerobótica, Asistencia Robótica Quirúrgica, Sistema Maestro-Esclavo, aprendizaje.

### Abstract

This document exhibits a new prototype of teleoperated system for surgical assisting and surgical learning, using two industrial manipulators and two control devices of six and three grades of freedom. Master-slave system has a vision system for supervising the work cell, a user interface for the user can interact with environment of the robot and various filtering and control stages that reduce the positional errors and signal delay, presenting the system as a suitable model for working in real time. The results

obtained, after of the testing of the system with three different operators, verify the simple of control the system, the facility to be used as an element of learning and estimating a performance over 87 % during the testing.

**Key words:** telerobotic, Surgical Robotic Assistance, Master-Slave System, learning.

### Introducción

Cuando se habla de robótica médica, se referencia a todas las contribuciones que se han realizado para proponer nuevos instrumentos y dispositivos, con el fin de mejorar técnicas y procedimientos médicos en sus diferentes ramas. Las investigaciones se han enfocado principalmente en resolver problemas presentes en las áreas de la cirugía, la rehabilitación de pacientes, la asistencia a personas con discapacidad o avanzadas de edad, el entrenamiento de personal médico y la diagnosis de síntomas y signos característicos de enfermedades.

Específicamente en las áreas de la cirugía y el entrenamiento de personal, la robótica se orienta a la creación de plataformas que puedan intervenir quirúrgicamente a un paciente, mientras que un cirujano lo asiste controlando sus movimientos desde una estación de trabajo acondicionada, de tal forma que se monitoree en tiempo real, cada suceso que ocurre en la sala de operación. Robots como DaVinci, Zeus y AESOP [1], entre otros, han demostrado las ventajas de utilizar este tipo de sistemas en la mejora de la destreza y la precisión del cirujano, al igual que la disminución del área afectada por las incisiones que se realizan durante la operación, convirtiéndolos, en muchos casos, en cirugías con menores percances [2].

Trabajos realizados en el campo de la robótica médica han demostrado las ventajas de la implementación de los robots, proponiendo la simulación de plataformas con el fin de reemplazar a futuro mecanismos La paroscópicos que se usan principalmente en operaciones de acceso a la región abdominal, a través de un orificio diminutivo en el paciente [3]. Este desarrollo testeó parámetros de evaluación, en cuanto a su viabilidad, control por parte del operador, estabilidad del sistema, respuesta a prueba de fallos, tiempo de respuesta y simplicidad del mecanismo.

Otra experiencia demostrativa de la utilidad de los sistemas robóticos para asistencia quirúrgica se presenta en [4], que adicional a lo mencionado anteriormente, también ha fomentado la práctica con simuladores de entrenamiento y laboratorios de realidad virtual en sistemas quirúrgicos, con la capacidad de integrarse entre sí para la enseñanza didáctica y supervisada de los estudiantes de cirugía. Está aplicación también ayudó a la disminución de riesgos que se puedan registrar durante la intervención, especialmente en el campo de la ginecología.

Igualmente, otro caso de éxito se refleja en el estudio realizado por [5], quienes demuestran el potencial de la robótica en la medicina, su uso como herramienta de trabajo y los resultados favorables en las cirugías,

principalmente las maxilofaciales, las craneales, las orales y las realizadas en la parte posterior de la cabeza. En general, los resultados de estas pruebas han mostrado como el diseño e implementación de estas plataformas han facilitado la realización de cirugías mínimamente invasivas, con un mejor rendimiento comparadas con las tradicionales [6].

No obstante, la aplicación de estas soluciones robóticas, económicamente hablando, ha sido obstaculizada por los altos precios para su adquisición, los cuales no pueden ser asumidos por todos los centros de enseñanza y de cirugías asistidas [7]. Según lo expuesto en [8], el futuro de la investigación de la cirugía robótica debe estar enfocado en la construcción de mecanismos para la enseñanza y el uso práctico. Esto ha conllevado a un futuro más incierto en la robótica médica, condicionándola a que un limitado número de personas y de centros investigativos puedan tener acceso a esta tecnología. Es por eso que la ingeniería sobre esta rama, también ha tendido a la fabricación de sistemas de bajo costo, pero que puedan cumplir cada una de estas necesidades.

Tomando un caso específico de lo mencionado anteriormente, se observa que a nivel pediátrico, diferentes cirugías La paroscópicas y urológicas fueron practicadas sobre pacientes utilizando dos métodos: aquellas que utilizaban la asistencia robotizada y aquellas que no la usaban. Resultados demuestran que a pesar de que los pacientes intervenidos en cirugías asistidas por robots, tuvieron menos deficiencias durante su fase postoperatoria, los costos hospitalarios fueron muy superiores respecto a las otras [9]. De acuerdo a esto, las nuevas tecnologías deben ser enfocadas en reducir estos niveles económicos para que toda persona pueda tener acceso a ellas.

Es por eso que se hace necesaria la construcción de nuevas plataformas para realizar el entrenamiento a los residentes, utilizando brazos manipuladores industriales que trabajen entre sí de forma cooperativa. Para controlar en tiempo real los movimientos de los manipuladores, el sistema debe ser de tipo maestro-esclavo, mientras que un sistema de visión ubicado dentro del área de trabajo de los robots, se emplee para captar las diferentes posiciones en planos proyectados. Todo este sistema se debe controlar desde una interfaz de usuario que interactúe con el usuario y permita supervisar los dispositivos, aún sin estar la estación maestro en el mismo sitio de la estación de trabajo.

Basados en las anteriores afirmaciones, en este trabajo se presenta las pruebas y resultados obtenidos de un prototipo de sistema de asistencia quirúrgica robotizada para incisiones sobre la articulación de la rodilla cuando se realizan operaciones por lesiones en ligamentos y meniscos. El sistema consta de dos manipuladores industriales acondicionados con herramientas del ámbito quirúrgico; de un conjunto de cámaras ubicados de tal forma que, existan diferentes perspectivas del área afectada y del espacio de trabajo en general, y de dispositivos maestros para manejar la posición y orientación de los robots. El documento está particionado en una sección para la explicación metodológica del sistema y sus materiales; otra sección para la descripción de las pruebas y finalmente, las secciones de discusión y de conclusiones.

## Metodología

Los sistemas de teleoperación de dispositivos robóticos, generalmente se componen de una unidad esclavo ubicada en un lugar diferente a una unidad maestro. Para este trabajo, la unidad esclavo se constituye de dos brazos robóticos industriales de 6 grados de libertad, DOF por sus siglas en inglés, *Degree of freedom*, ubicados dentro de una misma celda de trabajo, de tal forma que las colisiones entre ambos fuesen nulas. Uno de los robots utiliza como herramienta de trabajo un escalpelo, mientras que el otro posee una herramienta similar a una pinza, que inmoviliza cualquier elemento que sujeta.

La estación maestro se compone de dos dispositivos hápticos, uno de 6 DOF, que controla la posición y orientación del escalpelo de acuerdo a los requerimientos del cirujano, y otro de 3 grados de libertad, que mueve la pinza de sujeción del otro manipulador. Cada manipulador es conectado a la estación maestro, a través de un protocolo Ethernet, mientras que para supervisar los movimientos de los robots, la celda de trabajo también cuenta con tres cámaras, de las cuales, la primera es un dispositivo *Kinect* que otorga la vista superior de la celda de trabajo. La segunda es una cámara de visión estereoscópica colocada sobre uno de los brazos, proporcionando la vista más cercana de la herramienta que hace las incisiones y el área donde serán realizados. Finalmente, la última cámara se colocó de tal forma que las imágenes tomadas con ella, den una vista frontal de la celda. La [figura 1](#) presenta la arquitectura del prototipo de entrenamiento en asistencia quirúrgica, mostrando la ubicación de cada uno de los elementos anteriormente descritos.

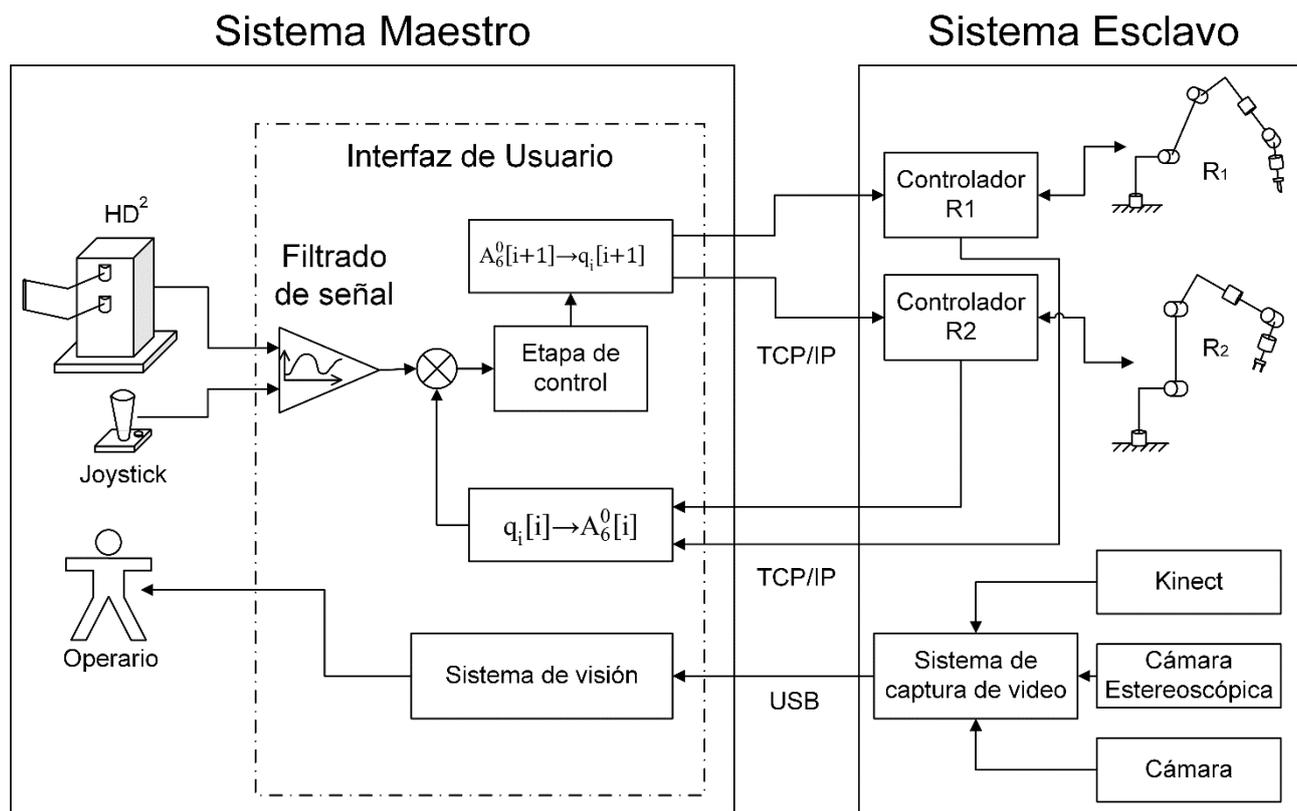


Fig. 1. Arquitectura del prototipo de teleoperación para asistencia y entrenamiento quirúrgico

En esta sección, se detalla los modelos matemáticos desarrollados para el control de movimiento de los manipuladores, el filtrado de las señales obtenidas de los dispositivos para dirección de los robots y la etapa de control de posición y velocidad.

### Modelado del movimiento de los dispositivos de control

Para controlar la posición y orientación de los brazos robóticos, el manipulador que tiene la herramienta de trabajo con el escalpelo (nombrado  $R_1$ ), debe ser manejado por un dispositivo de control que no limite sus grados de libertad cuando realiza las incisiones. Basado en lo anterior, se utilizó un *Quanser High Definition Haptic Device* ( $HD^2$ ), un dispositivo con 6 DOF, que de acuerdo a [10], el espacio de trabajo de su efector final es lo suficientemente amplio para que no restrinja el trabajo del operario. No obstante, para el manipulador con la pinza de sujeción (nombrado  $R_2$ ), debido a la orientación de la mesa de cirugías, su orientación se restringe para que siempre sea la misma y la más apropiada antes y durante la operación, para lo cual se implementó un dispositivo joystick con 3 DOF.

Para modelar la cinemática del Quanser  $HD^2$ , el dispositivo debe representarse como un sistema robótico paralelo de 6 DOF, tomando el centroide de su efector como su posición final. De acuerdo a la representación geométrica del dispositivo, la cual se detalla en [10], los parámetros de *Denavit-Hartenberg* se muestran en la [tabla 1](#). Sabiendo que los valores describen el movimiento de la articulación próxima respecto a la anterior y usando  $A_{i+1}^i$ , que es la matriz de transformación homogénea observada en la [ecuación 1](#), la posición final del efector respecto a la base del dispositivo se estima por la multiplicación de cada una de sus matrices de transformación, similarmente a la observada en la [ecuación 2](#), donde  $R$  es la matriz rotacional y  $T$  es el vector posicional.

Tabla 1. Parámetros geométricos por Denavit Hartenberg del Quanser  $HD^2$

Articulación	$\theta_i$	$\theta_{i\text{inicial}}$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1$	0	$d_1$	0	$\pi/2$
2	$\theta_2$	0	0	$a_2$	0
3	$\theta_3$	0	0	0	$\pi/2$
4	$\theta_4$	$\pi/2$	$d_4$	0	$\pi/2$
5	$\theta_5$	$-\pi/2$	0	$a_5$	$\pi/2$
6	$\theta_6$	0	$-d_6$	0	0

$$A_{i+1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A_6^0 = A_1^0 A_2^1 \dots A_6^5 = \begin{bmatrix} R_6^0 & T_6^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Para modelar el *joystick*, el dispositivo se consideró como un mecanismo de 3 DOF, complementando el movimiento de la palanca bidimensional con una que se mueva en un solo eje. La información obtenida del dispositivo es multiplicada por un factor incremental ( $k_J$ ), puesto que el valor de la señal era diminuto respecto a los valores trabajados por el manipulador. De esta forma, la posición final del *joystick* para cada instante de tiempo  $i$  ( $T_J[i]$ ) está dada por la [ecuación 3](#), donde  $I_J$  es la información obtenida del equipo de control en cada período.

$$T_J[i] = k_J I_J = k_J \begin{bmatrix} I_{J_x}[i] \\ I_{J_y}[i] \\ I_{J_z}[i] \end{bmatrix} \quad (3)$$

## Filtrado de las señales de los dispositivos de control

Un inconveniente que se presenta en los sistemas teleoperados es el ruido en las señales de los dispositivos de control, causado por la sensibilidad del sistema y los temblores fisiológicos por parte del operario. Estos factores se ven reflejados sobre los manipuladores cuando ellos no realizan una trayectoria acorde a la trazada con el dispositivo, afectando la calidad de la cirugía y la vida del paciente. Para eliminar estos ruidos, se propone la aplicación de un filtro aplicado en la salida de los dispositivos de control.

Basados en la investigación realizada en [11], donde se afirma que la banda de trabajo del temblor fisiológico está dentro del rango de los 6 a 13 Hz, se propuso un filtro *Butterworth* pasabajos con una frecuencia de corte igual a 8 Hz. Usando la expresión de la [ecuación 4](#), donde se expone una función generalizada de los filtros en términos de una ecuación diferencial, fueron calculados los coeficientes  $a_k$  y  $b_k$  de cada uno de los términos cuando el filtro es de grado 3.

$$y[i] = \sum_{k=0}^N b_k x[i-k] - \sum_{k=1}^M a_k y[i-k] \quad (4)$$

Para el cálculo de los términos, se aplicó el procedimiento propuesto en [12], quienes proponen un método que diseña los filtros *Butterworth* de forma generalizada. Combinando la [ecuación 4](#) con la matriz de transformación homogénea final para cada instante de tiempo del  $HD^2(A_{HD^2_6^0}[i])$ , se dice que el valor filtrado para cada uno de los componentes ( $A_{HD^2_{f_6}^0}[i](l,m)$ ) está dado por la [ecuación 5](#).

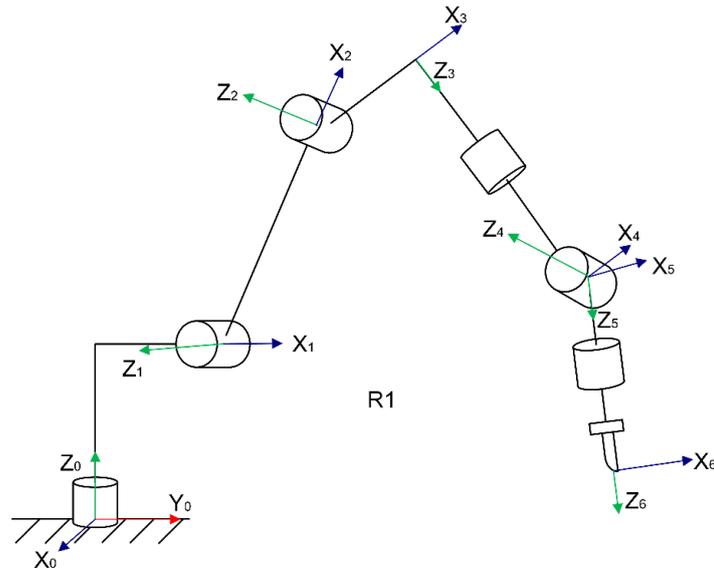
$$A_{HD^2_{f_6}^0}[i](l,m) = \sum_{k=0}^N b_k A_{HD^2_6^0}[i-k](l,m) - \sum_{k=1}^M a_k A_{HD^2_{f_6}^0}[i-k](l,m) \quad (5)$$

Mientras que para la matriz traslación del Joystick, la señal filtrada es obtenida de la misma forma que el anterior, diferenciando que solamente se considera la componente posicional, [ecuación 6](#).

$$T_{J_f}[i](l) = \sum_{k=0}^N b_k T_{J_f}[i-k](l) - \sum_{k=1}^M a_k T_{J_f}[i-k](l) \quad (6)$$

## Modelado de los manipuladores industriales

Una vez obtenida la información de los dispositivos de control, es necesario realimentar la posición actual de los manipuladores al módulo maestro del sistema teleoperado. Esta información, recibida desde los controladores de los robots, se encuentra en el dominio articular, de modo que debe ser transformada al dominio cartesiano usando sus modelos de cinemática inversa y directa. Como la diferencia entre ambos robots es solamente la geometría de sus partes, el modelo de los robots se basó en una única representación, como se observa en la [figura 2](#), calculando sus parámetros de Denavit-Hartenberg y mostrándolos en la [tabla 2](#).



**Fig. 2.** Representación por Denavit-Hartenberg del brazo robótico industrial

**Tabla 2.** Parámetros geométricos de Denavit-Hartenberg de los robots utilizados

Articulación	$\theta_i$	$\theta_{i\text{inicial}}$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1$	0	$d_1$	$a_1$	$-\pi/2$
2	$\theta_2$	$-\pi/2$	0	$a_2$	0
3	$\theta_3$	$-\pi/2$	0	$a_3$	$-\pi/2$
4	$\theta_4$	0	$d_4$	0	$\pi/2$
5	$\theta_5$	0	0	0	$-\pi/2$
6	$\theta_6$	0	$d_6$	0	0

Luego, usando las [ecuaciones 1](#) y [2](#) para cada instante de tiempo, se estimaron las matrices de transformación final de ambos manipuladores. Para  $R_1$ , la matriz de orientación y posición siguiente del manipulador ( $A_{R_1 6}^0[i+1]$ ) es dependiente del avance de  $HD^2$  y de su posición actual, como se observa en la [ecuación 7](#).

$$A_{R_1 6}^0[i+1] = A_{R_1 6}^0[i] + A_{HD^2 f_6}^0[i] \quad (7)$$

Asimismo, debido a que el movimiento de  $R_2$  solamente tiene componentes traslacionales, la orientación del manipulador es constante en todo momento. Tomando el vector de la traslación actual de  $R_2$  como  $T_{R_2 i}$ , la posición siguiente está dada por la [ecuación 8](#).

$$T_{R_2}[i+1] = T_{R_2}[i] + T_{J_f}[i] \quad (8)$$

Tomando la [ecuación 2](#) y la [ecuación 8](#), la matriz homogénea para  $R_2$  es ([ecuación 9](#)):

$$A_{R_2 6}^0[i+1] = \begin{bmatrix} R_{R_2}[0] & T_{R_2}[i+1] \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

### Etapa de control del sistema teleoperado

Un inconveniente adicional que se encuentra en los sistemas de control teleoperado es el ocasionado por los retardos, causando que los movimientos del manipulador no se realicen en tiempo real y el operador pierda el control sobre ellos. Además, los retardos también disminuyen la precisión del cirujano, resultando en la afectación de áreas que no deben ser comprometidas durante el proceso operatorio y la realización de cortes no uniformes con respecto a las guías de trabajo.

Para solucionar esta problemática, se propuso una matriz de control que trata las señales filtradas recibidas de los dispositivos de control con controladores PID. De acuerdo a [13] un controlador PID en términos de la iteración ( $i$ ) y su ganancia proporcional ( $k_p$ ) se representa como se ve en la [ecuación 10](#), donde  $t_s$  es el período de muestreo de las señales, mientras que  $t_d$  y  $t_i$  son los tiempos derivativo e integral respectivamente.

$$u[i] = k_p \left[ e[i] + \frac{t_s}{t_i} \sum_{j=0}^i e[j] + \frac{t_d}{t_s} [e[i] - e[i-1]] \right] \quad (10)$$

Para una aplicación más simple dentro del sistema, la [ecuación 10](#) se simplifica a la expresión mostrada en, usando los conceptos planteados en [14] y estimando la ganancia integral ( $k_i$ ), y la ganancia derivativa ( $k_d$ ) como se observa en la [ecuación 12](#).

$$u(n)=u(n-1)+(k_p+k_i+k_d)e(n)-(k_p+2k_d)e(n-1)+k_d e(n-2) \quad (11)$$

$$k_i=k_p \frac{t_s}{t_i}, \quad k_d=k_p \frac{t_d}{t_s} \quad (12)$$

La sintonización de cada uno de los controladores se realizó con la aplicación del primer método de Ziegler Nichols, usando la metodología de [15] y estimando cada coeficiente como se muestra en la [tabla 3](#). El tiempo de retardo del sistema  $L$  y la constante de tiempo  $A$  se deducen experimentalmente, para una respuesta subamortiguada con un tiempo de estabilización por debajo de 500 ms.

**Tabla 3.** Estimación de parámetros del controlador PID por el método de Ziegler-Nichols

Coeficiente	Estimación por Ziegler-Nichols
Ganancia proporcional ( $k_p$ )	$1.2 \frac{A}{L}$
Tiempo integral ( $t_i$ )	$2 L$
Tiempo derivativo ( $t_d$ )	$0,5 L$

## Resultados

Para las pruebas del sistema de telecirugía, se colocó dentro del espacio de trabajo de los robots manipuladores, una pierna artificial recubierta con un material polimérico que tuviese la misma densidad y comportamiento mecánico que el tejido cutáneo humano. Como el objetivo del experimento fue realizar una incisión que cortará la capa superficial de la rodilla de la pierna, se demarcó sobre ella, una guía que indicaba la longitud del corte y la ubicación exacta en donde se debió cortarse. El robot con la herramienta de corte fue acondicionado con un escalpelo quirúrgico, idéntico al utilizado en cirugías de rodilla. Además,  $R_1$  se ubicó a una distancia vectorial de 200, 350, 180. mm, respecto al centro de la guía dibujada sobre la rodilla con una orientación inicial ortogonal a la superficie de la mesa de trabajo.

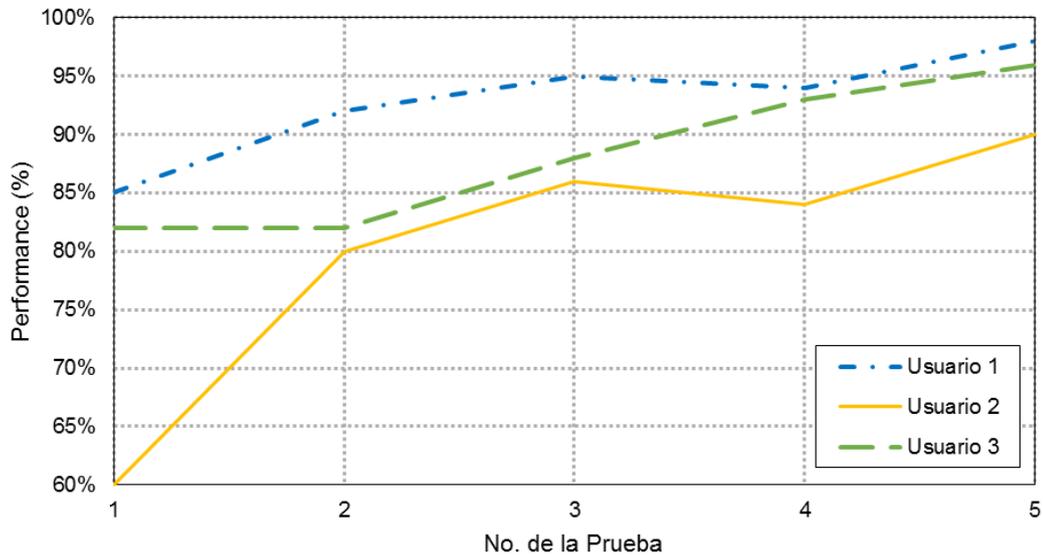
Mientras tanto,  $R_2$  fue acondicionado con una pinza que sujeta plenamente la pierna, inmovilizándola sin lastimar el material que la compone. Asimismo,  $R_2$  fue ubicado en una orientación paralela a la posición de la pierna y con ángulo de elevación del brazo de  $45^\circ$  respecto a la superficie de la celda de trabajo. Por otro lado, para la realización de las pruebas, se programó una interfaz que visualiza en tiempo real la información obtenida con las tres cámaras del sistema teleoperado, procesa la información obtenida de los dispositivos de control y realiza la comunicación dentro del sistema maestro-esclavo. Adicionalmente, puesto que este sistema es una plataforma construida en un principio para la enseñanza y entrenamiento en técnicas quirúrgicas, las pruebas fueron realizadas por tres personas diferentes, siendo una de ellas, un especialista en el área de la ortopedia.

En la primera parte de las pruebas, se evaluaron las especificaciones técnicas del sistema teleoperado por parte de cada uno de los operarios. Cada uno de ellos mostró su punto de vista respecto a la maniobrabilidad por parte del usuario, el sistema de visión, la operatividad del sistema, entre otros. Los resultados de dichas pruebas son mostrados en la [tabla 4](#), compactando los comentarios de cada uno en una sola valoración.

**Tabla 4.** Parámetros valorados y comentarios obtenidos de los operarios en la fase de evaluación

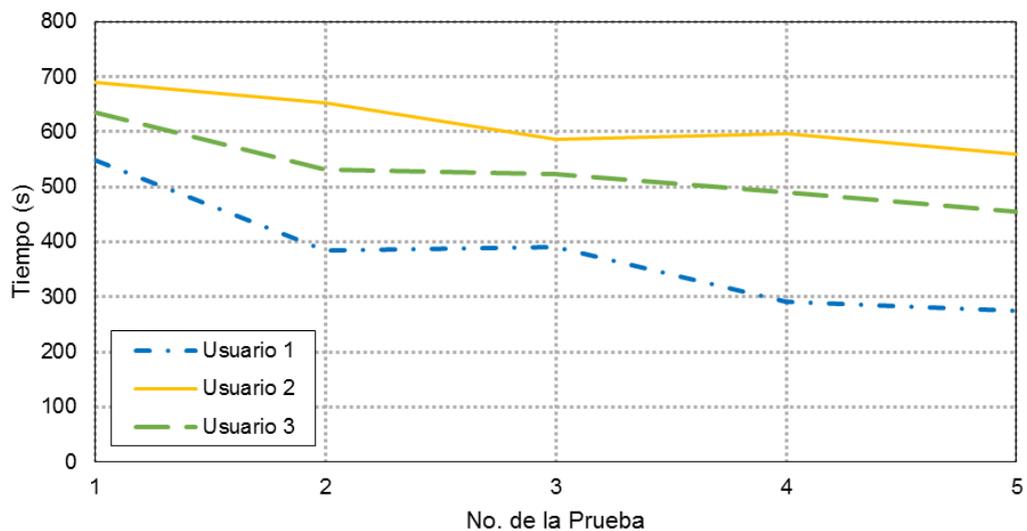
Especificación Técnica	Descripción	Valoración
Maniobrabilidad del usuario	Facilidad de usar el dispositivo	Control de todos los DOF del robot, facilitando hacer movimientos longitudinales y profundos con la herramienta de trabajo.
Operatividad del sistema	Control en tiempo real del sistema	Manipulación en tiempo real de los robots con un tiempo de retardo en el rango de los milisegundos.
Estabilidad	Robustez del sistema para evitar fallos	Sistema que detiene su operación cuando no detecta una comunicación <i>on-line</i> en el sistema maestro-esclavo. Comunicación con respaldo a prueba de fallos.
Integración del sistema	Funcionalidad del sistema después del ensamble final	Prototipo que integra cada uno de los aspectos importante de un sistema de teleoperación. No hay suficiente comodidad para ser usado por personas que no dominan la mano derecha.
Sistema de visión	Supervisión visual de la celda de trabajo	Sistema que abarca todos los espacios de la celda de trabajo. Visión en tiempo real del espacio de trabajo.
Interfaz de control	Facilidad de interacción del usuario con el programa final	Interfaz amigable con el usuario, de fácil uso y que muestra totalmente cada una de las variables del sistema.

En la segunda prueba se estimó la capacidad de aprendizaje y el desempeño de los operarios para realizar un corte sobre la pierna, siguiendo la guía demarcada anteriormente. Cada operario realizó 5 veces la prueba con el sistema, donde tenían que cortar una guía de longitud 100 mm. En el primer ensayo, la prueba fue realizada de forma intuitiva, y de acuerdo a esos resultados, en las siguientes repeticiones se dieron las indicaciones de uso y las recomendaciones que se deben tener en cuenta para un buen funcionamiento. El performance de los ensayos es mostrado en la [figura 3](#).



**Fig. 3.** Resultados de los rendimientos obtenidos durante las pruebas

Igualmente, el tiempo empleado en cada una de las pruebas fue medido para determinar la velocidad en que se realizaba cada corte. Los tiempos medidos se presentan en la [figura 4](#).



**Fig. 4.** Tiempos medidos para realizar cada una de las pruebas por los operarios

## Discusión

De acuerdo a lo mostrado en [8], un tema de interés, particularmente en el área de la medicina y la cirugía, es cómo el uso de la robótica puede ser usado como medio de aprendizaje y herramienta de trabajo para el entrenamiento de futuros cirujanos y cuáles son las ventajas respecto a su no implementación. Para eso se decidió iniciar y proponer en este trabajo, un prototipo de sistema teleoperado. Es sabido que un sistema debe cumplir con mínimas expectativas de seguridad que minimicen los problemas durante su periodo de ejecución. Además, para una mejor maniobrabilidad por parte del usuario, la máquina debe ser fácil de usar, mientras que da comodidad durante su uso.

Si se revisan los resultados de la [tabla 4](#), se constata que los dispositivos de control, en este caso, dos dispositivos hápticos adaptados para este fin, entregan una mayor comodidad al usuario para moverse con un mayor control de la herramienta de trabajo. Adicionalmente, el uso del sistema de visión de máquina como elemento de apoyo para supervisar y estimar la posición de los robots, evidenció la utilidad de cada uno de los componentes usados y como la integración de cada parte fue fundamental durante el desarrollo del proyecto.

Comparando estos resultados con los expuestos en [3], es observable que la operatividad y la estabilidad de conectividad son más altas que las presentadas por ellos, cumpliendo uno de los requisitos mencionados anteriormente. La comodidad de control y habilidad para usar este dispositivo, obtenida por una calificación cuantitativa por cada uno de los operarios, es de 28/10, superando también la registrada en el otro trabajo. A pesar de eso, la durabilidad del sistema es dependiente de la vida útil de cada uno de los elementos, la cual no supera, en caso de los robots y los sistemas hápticos, de 5 años de uso, por las actualizaciones y la manutención que se necesita en cada una de las partes.

Respecto a la capacidad para ser un banco de enseñanza y entrenamiento en el área de la cirugía médica, los resultados también son óptimos. Si se ve desde el punto de vista del rendimiento por corte de cada uno de los operarios, apreciable en la [figura 3](#), a medida que el usuario comprendía el funcionamiento del sistema teleoperado, la calidad de los cortes y el tamaño de cada uno de ellos hasta llegar al objetivo iba aumentando. Promediando los valores obtenidos, se evidencia que el performance promedio para los tres operadores es de 87 % el cual es bastante bueno, considerando que ninguno de ellos había utilizado un dispositivo de estos anteriormente y que uno de ellos es un cirujano. No obstante, el tiempo requerido en cada prueba, visto gráficamente en la [figura 4](#), se reducía en función de la prueba realizada, significando que el operario estaba asimilando su funcionamiento y controlando de una mejor manera los dispositivos robóticos. De esta forma, se comprende el concepto mostrado por [8], demostrando como las máquinas teleoperadas pueden colaborar en la asistencia quirúrgica y en el aprendizaje de las técnicas quirúrgicas, tomando la práctica de ellas, como el mejor medio para alcanzar los conocimientos necesarios en esta área.

## Conclusiones

En este trabajo fue presentado un sistema teleoperado para asistencia quirúrgica, enfocado en la práctica y el aprendizaje de la robótica médica. La integración de las etapas de control, de visión de máquina, de filtrado de señales y de dirección de los manipuladores en el proyecto fueron diseñados, de tal forma, que fuese robusto a los problemas de desconexión y a las alteraciones de sus movimientos ocasionadas por señales parásitas en los sistemas maestro-esclavo. Además, comparando los precios de fabricación entre este sistema y los comercialmente vendidos, este conjunto es más económico, siendo accesible a un número mayor de la comunidad académica.

Las pruebas realizadas mostraron la capacidad del sistema para ser utilizado como mecanismo de enseñanza, ayudando al usuario a aprender y usar las nuevas tecnologías de la robótica médica, como dispositivos de asistencia. Este método posibilita la interacción del cirujano con el paciente, a través de un conjunto robótico y sin tener que estar presente en el mismo lugar, al igual que provee los conocimientos necesarios al médico para cuando esté en una situación real. No obstante, siendo este un primer prototipo, es necesario integrar otros sistemas de realimentación para aumentar la información recolectada del área del trabajo y mejorar la expectativa de realidad y el nivel de interacción del sistema maestro-esclavo.

## Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada por el apoyo y la financiación del proyecto IMP-ING 1573 en el año 2015, al igual que al Doctor Norman Jaimes y demás usuarios que participaron en las pruebas del sistema teleoperado y dieron su opinión para mejorar el rendimiento del prototipo.

## Referencias

- Pugin F, Bucher P, Morel P. History of robotic surgery: From AESOP and Zeus to da Vinci. *Journal of Visceral Surgery*. 2011;148:3-8.
- Valero R, Ko Y, Chauhan S, et al. Robotic surgery: History and teaching impact. *Actas Urológicas Españolas*. 2011;35(9):540-5.
- Johnston M, Riofrio J, Gettens RTT. Robotic Surgery Simulator. Support, Vision System and Test Subject. En: 40th Annual Northeast Bioengineering Conference. Boston, USA. NEBEC.
- Nezhat C, Lakhi N. Learning Experiences in Robotic-Assisted Laparoscopic Surgery. *Best Practice & Research Clinical Obstetric and Gynaecology*. 2015:1-10.
- De Ceulaer J, De Clercq C, Swennen GRJ. Robotic surgery in oral and maxillofacial, craniofacial and head and neck surgery: A systematic review of the literature. *International Journal of Oral & Maxillofacial Surgery*. 2012;41:1311-24.
- Vitiello V, Lee SL, Cundy TP, et al. Emerging robotic platforms for minimally invasive surgery. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. 2013;6:111-26.
- Gomes P. Surgical robotics: Reviewing the past, analysing the present, imagining the future. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2011;27:261-6.
- Honaker MD, Paton BL, Stefanidis D, et al. Can robotic surgery be done efficiently while training residents? *Journal of Surgical Education*. 2015;72(3):377-80.
- Mahida JB, Cooper JN, Herz D, et al. Utilization and costs associated with robotic surgery in children. *Journal of surgical research*. 2015;199:169-76.
- Lee LF, Narayanan M, Mendel F, et al. Kinematics Analysis of In-Parallel 5 DOF Haptic Device. In: 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics; Montréal, Canadá: 2010.
- Veluvolu KC, Tan UX, Latt WT, et al. Adaptive filtering of physiological tremor for real-time compensation. In: IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics; Bangkok: 2009.

12. Selesnick I, Sidney Burrus C. Generalized digital butterworth filter design. IEEE Transactions on signal processing. 1998;46(5):1688-94.
13. Modern Control Engineering. Prentice Hall. 2010.
14. Patki V, Sonawame D, Ingole D. Design and impementation of discrete augmented ziegler-nichols PID control. Mobile Communication and Power Engineering. 2013;296:262-8.
15. Meshram P, Kanojiya R. Tuning of PID controller using ziegler-nichols mehos for speed control of DC motor. In: International Conference on Advances in Engineering, Science and Management, ; Nagapattiman: 2012.