

# Teleoperated Robotic System with Application in Laparoscopic Training: Peg Transfer Test

G. M. Bilgerig, J. R. Martínez, S. A. Salinas, V. Z. Pérez, J. J. Padilla, *Member, IEEE*, M. J. Betancur, *Member, IEEE*

**Abstract**— This paper presents a teleoperated robotic system that can be used for tele-surgery training wherein surgeons could make basic laparoscopic training exercises from a remote location. The system has visual feedback and a master interface which is manipulated by the surgeon to command a remote robotic arm. Experiments about data transmission and peg transfer were made using an Internet connection between two separated cities by 288 km. Data obtained from video transmission times and control rates demonstrated system reliability for training tasks. Furthermore, a potential application in laparoscopic surgery training is shown with a training basic test called peg transfer.

**Keywords**— Teleoperation, Teletraining, Robotics, Laparoscopy, Surgical training, Telecommunications.

## I. INTRODUCCIÓN

LOS PROCESOS de simulación y entrenamiento son muy útiles en la formación de personal acreditado y certificado en diversas tareas como aviación y cirugía. Los pilotos, por ejemplo, requieren aproximadamente 250 hrs de vuelo para obtener la licencia de piloto privado, de las cuales 40 pueden ser en simulador [1]. Algunas empresas se han especializado en plataformas de entrenamiento para este tipo de actividades dando la posibilidad de crear una sensación de inmersión en maniobras similares a las que el usuario enfrentará en la práctica [2].

La mejor forma en la cual los residentes de cirugía en el área de cirugía mínimamente invasiva (*MIS*, del inglés *Minimally Invasive Surgery*) adquieren las habilidades necesarias para su práctica médica es el entrenamiento, lo cual se hace tradicionalmente usando cadáveres, animales, objetos inanimados y pacientes vivos. El uso de cadáveres en la práctica quirúrgica no se ha popularizado, en gran medida, porque los tejidos y la anatomopatología del ser humano cambian mucho con las condiciones de conservación del cuerpo inerte. La práctica en animales conlleva gran rigurosidad desde la parte ética, por lo cual muchas instituciones no la utilizan. Por tanto, se prefieren los objetos inanimados como maniqués, cajas torácicas de entrenamiento

o simuladores virtuales que pueden impregnarse de realismo parcial, antes de pasar a la práctica en pacientes vivos [3].

Los simuladores de tareas quirúrgicas en *MIS* se han popularizado a nivel mundial, especialmente porque son sistemas adaptables a la curva de aprendizaje del usuario, comenzando por entrenamiento de habilidades básicas de cirugía laparoscópica (*FLS*, del inglés *Fundamentals of Laparoscopic Surgery*), y culminando con procedimientos quirúrgicos completos donde el cirujano debe ir minimizando sus errores y perfeccionando la técnica [3].

Los sistemas de simulación actuales, sin embargo, cuentan con dos inconvenientes principales. En primer lugar no permiten realizar entrenamiento a distancia, restringiendo de esta manera el uso de los recursos a un grupo limitado de personas ubicadas en una única localidad o institución. En segunda instancia, la cirugía robótica está incursionando cada vez más en las instituciones de Latinoamérica y los residentes no cuentan, en muchos casos, con herramientas que les permitan capacitarse para el uso de esta tecnología; por lo cual, deben hacer posteriormente, cuando se relacionen con un sistema robótico para cirugía, una curva de aprendizaje adicional.

Los dos problemas anteriores se mitigan con el desarrollo de un sistema robótico de tele-entrenamiento que le permita al usuario obtener las habilidades básicas en la práctica de procedimientos laparoscópicos y, al mismo tiempo, adquirir herramientas para la interacción con manipuladores robóticos.

Con el análisis de dichas necesidades de entrenamiento a distancia y proponiendo realizar la identificación de las características que este tipo de sistemas deben cumplir, se planteó como objetivo del presente trabajo el desarrollo de un sistema de teleoperación para hacer la conexión entre dos ciudades de Colombia, con fines de entrenamiento para cirugía laparoscópica.

El presente artículo se divide en las siguientes secciones: la sección 2 presenta el concepto de sistemas de tele-entrenamiento aplicado a *MIS* indicando sus partes y algunos ejemplos, la sección 3 presenta la metodología que se usó para el desarrollo del sistema de teleoperación, la sección 4 muestra los resultados tanto del montaje del sistema como de las comunicaciones y la aplicación al ejercicio de transferencia de aros, en la sección 5 se hace la discusión de los resultados y la sección 6 contiene las conclusiones del trabajo.

## II. SISTEMAS DE TELE-ENTRENAMIENTO

Los sistemas de tele-entrenamiento corresponden a la modalidad de sistemas teleoperados en los cuales se identifica una zona local, donde se encuentra un operador manipulando

G. M. Bilgerig, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, guy.bilgerig@gmail.com.

J. R. Martínez, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, joser.martinez@upb.edu.co.

S. A. Salinas, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, sergio.salinas@upb.edu.co.

V. Z. Pérez, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, vera.perez@upb.edu.co.

J. J. Padilla, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, jhon.padilla@upb.edu.co.

M. J. Betancur, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, manuel.betancur@upb.edu.co.

una interfaz o dispositivo maestro, que envía información de comandos de movimiento a una zona remota, en la cual se encuentra un sistema esclavo que replica los movimientos del maestro e interactúa con el ambiente. La zona remota está siendo monitoreada a través de un sistema de video, que permite enviar imágenes de vuelta a la zona local, en donde un sistema de proyección de video mostrará el ambiente remoto al operador [1] [4]. Un diagrama en bloques de este tipo de sistemas, aplicado a MIS, se presenta en la Fig. 1, en la cual el operador es el cirujano o estudiante que requiere perfeccionar sus destrezas, el dispositivo maestro es la interfaz electromecánica que el cirujano toma en sus manos para hacer el ejercicio o procedimiento propuesto, el esclavo es el robot que se encuentra a distancia replicando el movimiento del maestro y el ambiente son los objetos y superficies con los que interactúa el robot y, por ende, el cirujano [5].

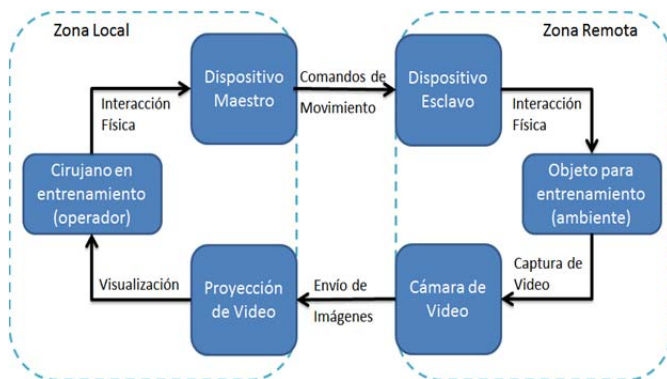


Figura 1. Diagrama en bloques de un sistema de tele-entrenamiento en MIS.

Existen trabajos que evidencian la posibilidad de realizar tele-entrenamiento en laparoscopia, como el de Mitchell J.H. Lum [6], quien realizó experimentos a diferentes distancias con el robot RAVEN como esclavo e interfaces Omni Phantom como maestras. Igualmente son significativos los desarrollos realizados con el sistema DLR (Centro Aeroespacial Alemán) MiroSurge, el cual tiene la posibilidad de usar varios maestros y realizar el entrenamiento con el robot esclavo real o uno simulado por computador [7]. Más aún, King y otros [8], demostraron, usando el ejercicio de transferencia de aros de la FLS, la posibilidad de realizar diferentes conexiones entre esclavos y maestros (30 combinaciones) por medio de una red de datos basada en Internet y un Protocolo Interoperable de Teleoperación (ITP).

Teniendo en cuenta los desarrollos existentes y las necesidades propias del medio, en tele-entrenamiento robótico, se plantea el desarrollo de un sistema de teleoperación para hacer la conexión entre dos ciudades de Colombia.

### III. METODOLOGÍA

Se identificaron los criterios y las estrategias metodológicas de diseño para un sistema de tele-entrenamiento teniendo en cuenta que hay diferencias importantes entre tele-entrenamiento y tele-cirugía, siendo la tele-cirugía de mayor exigencia desde el punto de vista técnico puesto que involucra vidas de personas. Los criterios y estrategias definidos para la

implementación del sistema de tele-entrenamiento se basaron en gran medida en el estado del arte y fueron los siguientes:

- Realimentación visual a través de video con retardo máximo de 500 ms: de acuerdo con la revisión del estado del arte se requiere una frecuencia mínima de 20 Hz para ver de forma fluida un video y un retardo entre 80 ms y 500 ms para asegurar una teleoperación confiable [4], a pesar que los seres humanos son capaces de adaptarse a retardos de hasta 1000 ms [5]. De hecho, para tele-entrenamiento en cirugía, se han realizado diferentes pruebas con resultados convergentes pero no iguales, por ejemplo, en pruebas con el sistema de tele-entrenamiento dV-Trainer [9], se demostró que los errores en el desempeño son exponencialmente proporcionales al tiempo de latencia, y que este tiempo debe ser menor a 200 ms para obtener un desempeño óptimo; en [5] se describen retardos de comunicación en aplicaciones de telecirugía de alrededor de 66 ms; y en [6] se exponen pruebas con el ejercicio de transferencia de aros con diferentes tiempos de retardo y se concluye que no necesariamente es la principal variable que puede afectar el error o los tiempos en los ejercicios de entrenamiento.

- Medio de comunicación robusto y tolerante a fallas: el enfoque está en protocolos de comunicación seguros como el VPN (Virtual Private Network), teniendo en cuenta que los tiempos de latencia pueden variar debido a los protocolos TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) y a los algoritmos de enrutamiento pero que la mayoría de los sistemas usan precisamente este protocolo. De acuerdo con la revisión del estado del arte en teleoperación, bajo condiciones regulares una conexión a 10 Mbps es adecuada, sin embargo, en el caso de alta definición o equipos multimodales, se requerirían dos canales a 40 Mbps [5]. Dentro del desarrollo del presente trabajo, se realizaron 5 pruebas y un análisis de media estadística similar al realizado en [6] para calcular el tiempo RTT (Round Trip Time) en tele-entrenamiento para cirugía, que es el tiempo que necesita un paquete de datos para ir y volver por un canal, teniendo en cuenta que, en el caso del video, el retardo depende tanto de las transmisiones como de los algoritmos de compresión y descompresión.

- Sistema maestro-esclavo unimanual: A pesar que para realizar tareas de teleoperación bimanual se requieren 2 sistemas maestros y 2 sistemas esclavos de las mismas características, como lo muestran la mayoría de las aplicaciones para MIS [6], es posible también realizar experimentos con una sola mano, a través de ejercicios fundamentales que permitan evaluar aspectos técnicos relacionados con el proceso de tele-operación [8]. El desarrollo que se muestra en el presente artículo, contempla la práctica de un ejercicio que el cirujano puede realizar con una sola mano mientras desarrolla habilidades básicas, relacionadas con la práctica de la MIS. De acuerdo con la revisión de la literatura, se tuvieron en cuenta algunas observaciones relacionadas con el sistema maestro en tele-entrenamiento: a) los sistemas de seguridad, como pedales de aceptación de comandos hacia el esclavo [6] y detección de usuario son requeridos para tele-cirugía pero se puede prescindir de ellos en tele-entrenamiento, por lo tanto el

sistema maestro que se utiliza sólo requiere de una interfaz manual, b) se encuentran varios desarrollos que no usan la realimentación de contactos y esfuerzos mecánicos (háptica), lo que sugiere que no es un requerimiento esencial, en la actualidad, para tele-cirugía ni para tele-entrenamiento, c) al lado del maestro debe existir una interfaz gráfica o visual de usuario donde el cirujano pueda conectarse con la zona donde se encuentra el esclavo [6].

- Culminación de un ejercicio de tele-entrenamiento básico: para demostrar el potencial uso del sistema de teleoperación desarrollado, se analizaron los diferentes ejercicios clásicos en el entrenamiento para cirugía laparoscópica según *FLS* y se seleccionó la transferencia de aros unimanual, donde el cirujano toma un aro que se encuentra ubicado en una posición 1 rodeando una barra y lo lleva a una posición 2, donde rodea a otra barra. Se escogió la transferencia de aros como ejercicio de experimentación porque de acuerdo con [6] son el “estándar de oro” en la evaluación de habilidades quirúrgicas. Las pruebas que se realizaron para la transferencia de aros, con una sola mano, las desarrolló un técnico con experiencia previa en dicho ejercicio en particular.

- Desarrollo de software propio: existen métodos para videoconferencia que han sido usados en variados experimentos de tele-entrenamiento, como por ejemplo los mostrados en [8], en donde se estableció la comunicación usando Skype, y se reportaron complicaciones en la realimentación de video por latencias de transmisión y calidad. Por esta razón, y dado que, entre los sistemas maestro y esclavo, existe un puerto *TCP* dedicado, se optó por desarrollar una aplicación por computador para realizar el enlace cliente-servidor y de esta forma lograr toda la transmisión y recepción de información, tanto de video como de comandos. Las metodologías empleadas para el diseño fueron: arquitectura cliente-servidor [10] para comunicar el maestro y el esclavo; el concepto *MVC (Model-View-Controller)* [11] para el desarrollo de los algoritmos de la Interfaz Gráfica de Usuario ubicada en el lado del maestro; y un diseño cíclico o en espiral. De esta forma se alcanzaron diferentes versiones mejoradas de cada sección del proyecto [12].

A partir de los criterios de diseño establecidos se realizó la configuración del sistema maestro-esclavo y se implementaron pruebas de funcionamiento del sistema que cobijan comunicación Cliente – Servidor y Medición del Retardo en la Realimentación del Video, incluyendo subrutinas en el código para hacer dichas mediciones.

#### IV. RESULTADOS

Los resultados del trabajo tienen los siguientes tres componentes, los cuales se detallarán en esta sección: a) La descripción de la configuración implementada que incorpora un sistema maestro-esclavo con realimentación visual, basado en dispositivos comerciales, donde se presenta la estructura mecánica utilizada y el software desarrollado para la comunicación y realimentación visual. De igual manera se incluyen los detalles relacionados con cada uno de los subsistemas. Dicho desarrollo cumple con los criterios

mencionados en la sección de Metodología; b) La presentación de la forma en que se estableció la comunicación cliente-servidor y la medición de retardo en la realimentación del video; c) La presentación de la adaptación realizada al sistema para realizar el experimento de transferencia de aros unimanual, como potencial aplicación del sistema en tele-entrenamiento para laparoscopia y la implementación del ejercicio por una persona ubicada en un lugar remoto.

##### A. Desarrollo del Sistema Robótico Maestro - Esclavo con Realimentación Visual

Se implementó un sistema maestro-esclavo robótico que consta de una zona local ubicada en la ciudad de Bucaramanga, donde el operador interactúa con un dispositivo Geomagic Touch [13] especialmente diseñado para control robótico y formación/evaluación de habilidades manuales. La zona remota se ubicó en la ciudad de Medellín, a 288 km de distancia, donde se encuentra el dispositivo esclavo, un brazo robótico KUKA KR6, que interactúa con un sistema de transferencia de aros. Adicionalmente, el sistema posee cámara web, en la zona remota, que captura imágenes del ambiente y que son transmitidas a la zona local. Tanto el sistema Geomagic como la cámara web se comunican por puerto *USB* con los computadores respectivos de cada una de las zonas, y se utiliza el protocolo *TCP* para la transmisión de datos e imágenes del ambiente de trabajo a la zona local, a través de Internet; por lo cual no es necesario agregar bits para detección de errores a las tramas de comunicación, debido a que el protocolo *TCP* tiene incorporado el control de errores. El diagrama de bloques del sistema implementado se aprecia en la Fig. 2.

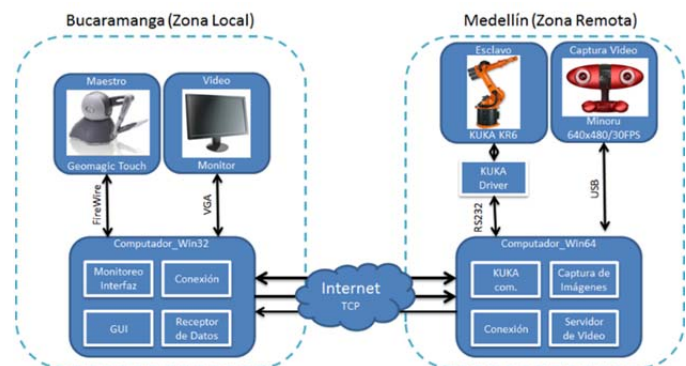


Figura 2. Diagrama en bloques del sistema de tele-entrenamiento implementado.

A continuación, se describen los componentes principales del sistema:

- Sistema esclavo

Usa un brazo manipulador KUKA KR6 de tipo antropomórfico, el cual posee 6 grados de libertad, con un campo de trabajo esférico, encargado de seguir los movimientos que son enviados desde la interfaz maestra.

Para la manipulación del brazo robótico, se desarrolló una trama de datos con la estructura presentada en la Tabla I, y se estableció la conexión física que se aprecia en la Fig. 3, que

comunica el robot con un computador externo, por medio del protocolo RS232. El sistema responde a comandos como: movimientos en los ejes coordenados (X, Y, Z), movimientos alrededor de ellos, apertura y cierre de pinza, cambio de movimiento (lineal o punto a punto), cambio de velocidad y botón de inicio y parada de emergencia.

TABLA I  
TRAMA SERIAL DE DATOS Y COMANDOS PARA EL  
CONTROLADOR KUKA KRC2

X	Y	Z	A	B	C	Pinza	Velocidad	Movimiento	Inicio/Paro
Coordenadas Cartesianas			Giro alrededor de ejes cartesianos			ON/OFF	0-100%	Lineal o Punto a Punto	0/1
Espaciales									

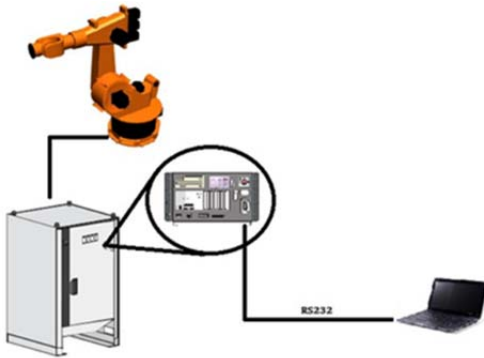


Figura 3. Esquema de comunicación del robot KUKA-KR6.

- Sistema Maestro

El maestro tiene el objetivo principal de enviar información al esclavo sobre la posición cartesiana deseada. La interfaz Geomatic Touch, actuando como sistema maestro, permite al operador enviar la información sobre la posición cartesiana (X, Y, Z), la orientación (A1, A2, A3) deseada y el estado (abierto, cerrado) para el efector final del brazo robótico esclavo; en total se envían 17 bytes.

El computador de la zona local, donde se encuentra conectado el maestro, ejecuta una interfaz gráfica de usuario que permite observar el video que se envía desde la zona remota, realizar la conexión por Internet y monitorear los valores de las variables de las interfaces. Desde el punto de vista de programación se usó el concepto *MVC*, donde el Modelo contiene los datos y el procesamiento de los mismos, la Visualización hace la representación de los datos en la interfaz del usuario, y el Control inicia y controla el flujo del programa. Se construyeron las clases que se presentan en la Fig. 4, en las cuales se diseñaron e implementaron funciones que pueden ejecutarse en hilos diferentes, por lo tanto, se utilizó un sistema de comunicación entre hilos del tipo *Signal-Slot* [14]. El diagrama de clases se muestra tal cual se programó y cada clase pertenece a algún concepto *MVC*; por ejemplo, la clase *Form* hace parte de la Visualización.

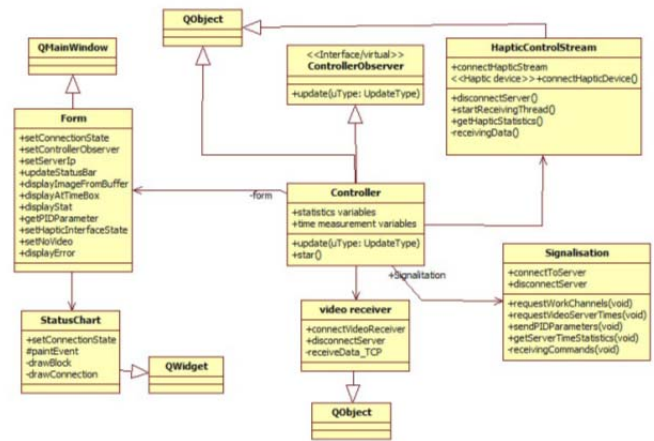


Figura 4. Diagrama de clases.

La realimentación visual permite al usuario la observación de las actividades que realiza a distancia y las implicaciones o efectos que van teniendo esas acciones al pasar el tiempo. Dado que se realizaron dos lazos de programación diferentes para la Interfaz Gráfica de Usuario y la recepción de los paquetes del esclavo, se diseñó una comunicación entre lazos usando punteros e interrupciones por programación, como se muestra en la Fig. 5.

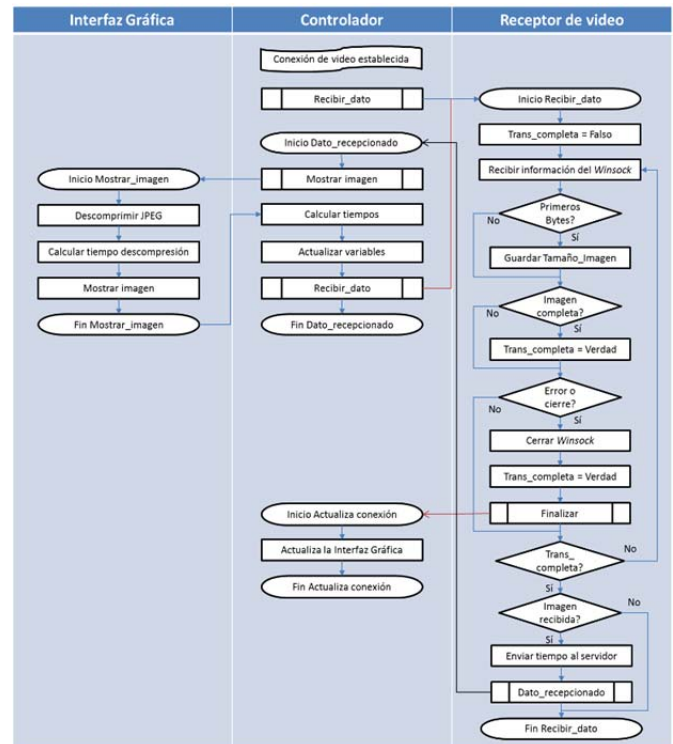


Figura 5. Sistema de video para el sistema de tele-entrenamiento.

El lazo de *Interfaz Gráfica* se encarga de mostrar en pantalla la imagen que se encuentra en el *buffer* de imágenes. El lazo de *Controlador* tiene diferentes funciones que permiten realizar tareas como: abrir el canal de comunicación de video, activar el comienzo de recepción de imágenes, medir los tiempos de transporte del video y cerrar el canal de comunicación. El lazo *Receptor de video* es el encargado de



extraer la información de la imagen de video desde el paquete de comunicación, enviar la imagen recibida al lazo *Controlador*, enviar información de tiempos y revisar si existen fallas en la conexión.

### B. Comunicación Cliente-Servidor y Medición de Retardo en la Realimentación del Video

Se realizó una comunicación bidireccional entre el dispositivo Geomatic Touch como interfaz de control remoto y el tablero KUKA KR C2 para el control local de un brazo robótico KUKA KR6.

La conexión se realizó bajo el concepto de cliente-servidor, donde el servidor es el computador localizado en la zona remota, lado del esclavo, y el cliente es el computador de la zona local. Para lograr una comunicación organizada, se utilizaron tres canales a través de tres puertos diferentes así:

1. Señalización: se encarga de realizar el empaquetado de información que se desea transmitir en cualquiera de las dos direcciones, servidor a cliente o cliente a servidor. Usa un byte de comando, un byte que indica el tamaño de los datos y hasta 256 bytes de información.

2. Video: El envío de paquetes de información de video se hace por protocolo *TCP* con el algoritmo Nagle desactivado, es decir que no se espera a que los paquetes de información estén llenos para enviarlos, sino que se van enviando de acuerdo a la necesidad del programa. Esto acelera la actualización de información. Además del video, por este canal se envía información de *RTT*, para realizar mediciones de retardo en el envío y recepción de datos.

3. Interfaz: también usa una conexión *TCP*, por donde se envía información de la posición cartesiana deseada desde el sistema maestro y se miden los tiempos de retardo de transmisión del canal.

En la Fig. 6, se puede observar un diagrama del proceso de comunicación, donde los tres canales son dependientes en el inicio del establecimiento de la conexión, pero luego pueden funcionar en forma independiente de tal forma que una falla en el video no afecta el canal de la interfaz y viceversa. Para finalizar la conexión, el canal de señalización toma el mando y fuerza a los otros canales a terminar.

Existen diferentes lazos que pueden ser activados durante la recepción de comandos en el servidor, dependiendo de la tarea que es solicitada por el cliente, estos lazos se comunican entre sí para definir las variables que deben ser modificadas y los procesos a ejecutarse, lo que permite acelerar las actividades en el sistema esclavo, buscando el control del mismo y su visualización en tiempo real.

### Medición de retardo en la realimentación de video

Para probar la realimentación del video se midió el *RTT*, teniendo en cuenta que este tiempo es el que necesita un paquete para ir y volver por un canal. Se realizaron pruebas de medición de los tiempos de transmisión del video con la confirmación de recepción del mismo, tal como se observa en la Fig.7, con la ecuación

$$RTT = ts_1 - ts_0 - (tc_1 - tc_0) \quad (1)$$

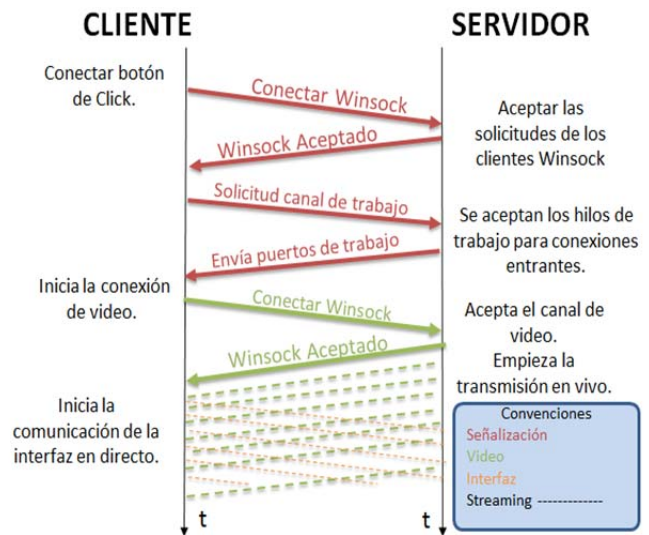


Figura 6. Diagrama del proceso de conexión.

donde  $ts_0$  es el tiempo en el cual es enviada la imagen de video desde el servidor al cliente,  $tc_0$  corresponde al tiempo en el cual el cliente recibe la imagen, tardando hasta  $tc_1$  para responder sobre la recepción exitosa y  $ts_1$  se mide cuando la confirmación de recepción llega al servidor.

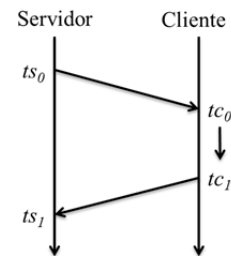


Figura 7. Representación de la forma de medir *RTT*.

Se extrajeron cinco datos de *RTT*, donde cada uno corresponde al valor promedio de cinco pruebas realizadas, tal como se observa en la Tabla II, obteniendo un valor promedio total de 40.54 ms.

TABLA II  
DATOS PROMEDIO DEL *RTT* EN VEINTICINCO PRUEBAS

Número de prueba realizada	Tiempo (ms)
<i>RTT1</i>	40.6
<i>RTT2</i>	40.5
<i>RTT3</i>	41.6
<i>RTT4</i>	40.5
<i>RTT5</i>	39.5
<b><i>RTT</i> promedio</b>	<b>40.54</b>

### C. Transferencia de aros a distancia

Para la evaluación de las posibilidades de uso del sistema en tele-entrenamiento para cirujanos se realizó la prueba de transferencia de aros, simulando entrenamiento de coordinación ojo-mano para cirugía mínimamente invasiva. La Fig. 8 muestra el sistema simulado, donde se encuentra el esclavo con una pinza adaptada mecánicamente a su última articulación, además de una caja transparente tipo *pelvitrainer* que contiene los aros para el ejercicio a realizar. Este proceso simulado se realizó antes de implementar experimentalmente el ejercicio.

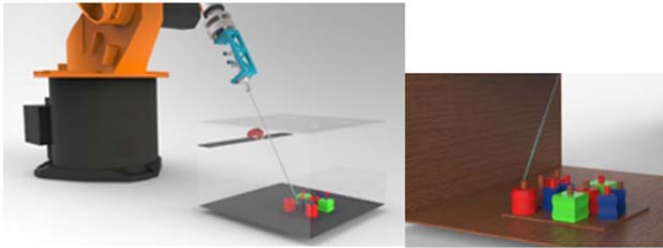


Figura 8. Sistema de tele-entrenamiento simulado.

En la prueba física, se usaron 4 aros de silicona con 8 mm de diámetro interno cada uno, que al inicio de la prueba se encontraban incrustados en 4 barras de acrílico forradas con termoencogible con dimensiones de 4 mm x 4 mm cada una, cada aro en una barra diferente. Adicionalmente estaban libres 4 barras más del mismo material. Las 8 barras se distribuyeron de forma equidistante en una tabla de madera de 128 mm x 165 mm. El operador, remotamente (a 288 km) y con ayuda del sistema maestro (Fig. 9a), realizó la transferencia de cada aro a alguna de las 4 barras no ocupadas en la tabla. (Fig. 9b).



Figura 9. Sistema de tele-entrenamiento físico. a) Zona local donde el operador controla el sistema con joystick. b) Zona Remota reproduciendo las maniobras del maestro.

El operador demoró alrededor de cinco minutos en realizar la transferencia de todos los aros, tiempo durante el cual se realizaron mediciones del *RTT* del video realimentado, obteniéndose un *RTT* máximo de 470 ms, un mínimo de 39 ms y promedio de 162.23 ms, como se observa en la gráfica de la Fig. 10.

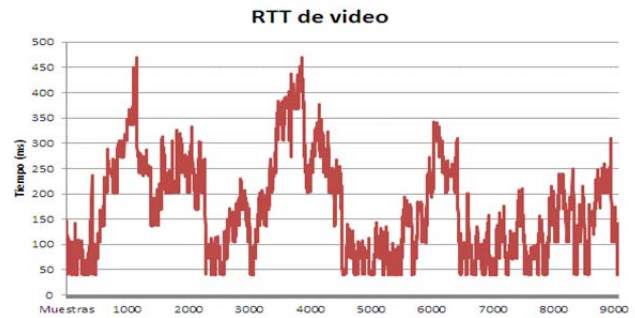


Figura 10. Mediciones realizadas al *RTT* de video mientras se efectuaba el ejercicio de transferencia de aros.

Otras observaciones cualitativas permitieron percibir que los movimientos de la interfaz Geomagic Touch eran más veloces que los del robot, afectando la transparencia del sistema, es decir, que los movimientos que se realizan en el maestro no se ven reflejados de forma inmediata, ni con la misma velocidad, en el esclavo, a menos que los movimientos que se realicen en el maestro sean lo suficientemente suaves. Lo anterior obedece a que el robot KUKA KR6 fue configurado para realizar movimientos a un 30% de su velocidad máxima. Esto fue un requerimiento para la prueba dado que el espacio de trabajo del robot KUKA KR6 es superior al espacio disponible para movimientos en el laboratorio, por lo cual hacer la ejecución a velocidad máxima podría ocasionar una colisión con algunas superficies circundantes, sin opción de respuesta rápida como una parada de emergencia.

### V. DISCUSIÓN

El sistema de teleoperación que se desarrolló fue construido a partir de la adaptación de sistemas comerciales como el robot KUKA y la interfaz Geomagic Touch, así como de la generación de una aplicación software que permite realizar tareas de tele-entrenamiento para cirugía laparoscópica, como el ejercicio de transferencia de aros. Esto permite realizar entrenamiento a distancia, evitando restringir el uso de los recursos a un grupo limitado de personas ubicadas en una única localidad o institución. Una desventaja de usar estos sistemas comerciales, es que no están específicamente diseñados para este tipo de aplicaciones médicas y por tanto sus dinámicas son diferentes entre sí, lo que genera problemas de transparencia de movimientos.

El dato obtenido de *RTT* en las pruebas preliminares de conexión por internet, con un valor promedio de 40.54 ms, indicaron que la imagen proyectada al usuario que manipula el sistema maestro sería suficientemente rápida para asegurar una transmisión de video en tiempo real, lo cual se comprobó en el desarrollo de prueba final de transferencia de aros, donde se obtuvo un *RTT* menor a 500 ms como se proyectó en los requerimientos del sistema. Se puede decir que se tiene un valor *RTT* útil para la aplicación de tele-entrenamiento. Además, la conexión por Internet tuvo suficiente estabilidad en el desarrollo de las pruebas, tanto en la transmisión del video como en los comandos de teleoperación.

Aunque se ha comprobado la aplicación del sistema únicamente para un ejercicio básico de entrenamiento en laparoscopia, se percibe el potencial para expandir a otras

aplicaciones como la cirugía robotizada, la endoscopia y la auscultación, entre otras.

## VI. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de teleoperación robótica con realimentación visual, en donde se pueden observar las tareas de entrenamiento en transferencia de aros que se están realizando con un robot KUKA KR6, usado como sistema esclavo, al operar una interfaz Geomagic Touch, desde el lado del maestro, a través del desarrollo de algoritmos de comunicación, control, manipulación de datos y de una interfaz gráfica de usuario, especialmente diseñados para la aplicación.

A partir de las pruebas técnicas de medición de tiempos de retardo en la realimentación de video y del ejercicio de transferencia de aros realizado, se concluye que es posible utilizar el sistema teleoperado para tareas de tele-entrenamiento de habilidades básicas en laparoscopia, con la condición que los movimientos en el sistema maestro sean lo suficientemente suaves para garantizar una realimentación visual adecuada.

El funcionamiento del sistema de comunicación, entre las zonas remota y local, se logró con una programación por hilos del sistema cliente-servidor, que funcionan independientes en algunos casos y en otros de forma interdependiente; además de utilizar puertos específicos diferentes para los comandos, el video y los datos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, y con el patrocinio del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, COLCIENCIAS, a través de la financiación de uno de sus investigadores. Los autores agradecen el apoyo del diseñador industria Camilo A. Páramo en el proceso de simulación y fabricación de piezas para la realización de las pruebas.

## REFERENCIAS

- [1] WikiHow. "Cómo ser un piloto de aerolíneas". Consultado: Julio de 2014. Disponible en: <http://es.wikihow.com/ser-un-piloto-de-aerol%C3%ADneas>
- [2] Airbus. "Simulation". Consultado: Julio de 2014. Disponible en: <http://www.airbus.com/support/training/simulation/>
- [3] S. Tsuda, D. Scott, J. Doyle and D. B. Jones, "Surgical Skills Training and Simulation", *Current Problems in Surgery*, vol. 46, no. 4, pp.271-370, 2009.
- [4] R. Jiménez Moreno, F. A. Espinosa Valcárcel and D. A. Hurtado. "Teleoperated systems: a perspective on telesurgery applications". *Revista Ingeniería Biomédica*, vol. 7, no. 14, pp.30-41, 2013.
- [5] S. Hyuk Baik. *Robot Surgery*. Intech, 2010.
- [6] MJH. Lum. "Quantitative Performance Assessment of Surgical Robot Systems: TeleRobotic FLS". PhD Thesis, University of Washington, 2008.
- [7] R. Konietzschke, A. Tobergte, C. Preusche, P. Tripicchio, E. Ruffaldi, S. Webel and U. Bockholt, "A multimodal training platform for minimally invasive robotic surgery," in *Proc. IEEE RO-MAN*, pp.422, 427, 2010.
- [8] H.H. King, B. Hannaford, K. Ka-Wai, Y. Guang-Zhong, P. Griffiths, A. Okamura, I. Farkhatdinov, R. Jee-Hwan, G. Sankaranarayanan, V. Arikatla, K. Tadano, K. Kawashima, A. Peer, T. Schauss, M. Buss, L. Miller, D. Glozman, J. Rosen and T. Low, "Plugfest 2009: Global interoperability in Telerobotics and telemedicine," in *Proc. 2010 IEEE International Conference Robotics and Automation (ICRA)*, pp.1733, 1738, 2010.
- [9] S. Xu, M. Perez., K.Yang, C. Perrenot, J. Felblinger and J. Hubert, "Determination of the latency effects on surgical performance and the

acceptable latency levels in telesurgery using the dV-Trainer® simulator", *Surgical endoscopy*, vol. 28, no. 9, pp. 2569-2576, 2014.

- [10] I. Sommerville. *Software Engineering*. Ed. Pearson Education, 2005.
- [11] F. Buschmann, R. Meunier, H. Rohnert, P. Sommerlad and M. Stal. *Pattern-oriented software architecture: a system of patterns*. Ed John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [12] D. Budgen, *Software Design*, Ed Pearson, 2003.
- [13] Geomagic, Inc. *Geomagic Touch, Geomagic Touch X, Geomagic Phantom Premium*. 2013. Disponible on line: [http://geomagic.com/files/9313/6906/0229/05\\_16\\_13\\_Haptics\\_4pg\\_A4\\_ESNew\\_Logo.pdf](http://geomagic.com/files/9313/6906/0229/05_16_13_Haptics_4pg_A4_ESNew_Logo.pdf)
- [14] J. Blachette and M. Summerfield. *C++ GUI Programming with Qt 4*. Trolltech Press. Ed Prentice Hall Professional, 2006.



**Guy Matthias BILGERIG**, es Ingeniero de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Suiza (University of Applied Sciences Northwestern, Switzerland). Sus áreas de interés son las ciencias de la computación.



**José Rafael MARTINEZ TORRES** es Ingeniero Electrónico de la Universidad Pontificia Bolivariana – Sede Medellín, Colombia. Especialista en Automática de la Universidad Pontificia Bolivariana – Sede Medellín. Magister(c) en Ingeniería con énfasis en automática de la Universidad Pontificia Bolivariana – Sede Medellín, Colombia. Sus áreas de interés son la ingeniería y la tecnología, específicamente Ingeniería eléctrica, electrónica e informática.



**Sergio Alexander SALINAS** es Ingeniero Electrónico de la Universidad Industrial de Santander, Colombia. Magister en Electrónica y Telecomunicaciones en el área de Robótica Médica de la Universidad del Cauca, Colombia. Actualmente es docente asistente de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga y Líder del Grupo de Investigación en Bioingeniería, Señales y Microelectrónica (BISEMIG). Sus áreas de interés son: Ingeniería Biomédica, Robótica y Rehabilitación.



**Vera Z. PÉREZ** es Ingeniera Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia y Ph.D. en Ingeniería de la misma Universidad. Actualmente es profesora titular de la Universidad Pontificia Bolivariana y coordinadora del Grupo de Investigación en Bioingeniería GIBIOING, categoría A Colciencias. Sus áreas de interés son: Cirugía Robótica Mínimamente Invasiva, Haptics, Teleoperación, Rehabilitación.



**Jhon J. PADILLA A.** Se graduó como Doctor en Telemática por la Universidad Politécnica de Cataluña en el año 2008, como Ingeniero en Electrónica de la Universidad del Cauca en 1993 y como Master en Informática en la Universidad Industrial de Santander en 1998. Actualmente es profesor Asociado en la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga, Colombia y líder del Grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la UPB Bucaramanga. Sus investigaciones se realizan en temas de Ingeniería de Tráfico, Calidad de Servicio, Redes Móviles, Enrutamiento en Internet y Desarrollo de prototipos de Routers y switches con FPGAs.



**Manuel José BETANCUR**, Ing. Electrónico, M.Sc. en Ing., Dr. en Ing. de la Universidad Nacional Autónoma de México; cofundador de Tecnología Apropiada Ltda (1990), de la Asociación Colombiana de Automática (1994) y del Grupo de Investigación en Automática (1998) luego fusionado en el Grupo de Automática y Diseño; investigador asistente en la Université Catholique de Louvain (2003), actualmente profesor titular de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.