

Creación de un Laboratorio Virtual para Optimizar el uso de un Laboratorio de Robótica Real

Rogelio Prieto-Alvarado¹, Ulises Zaldívar-Colado², Roberto Bernal-Guadiana³

Resumen—La enseñanza de la robótica a menudo requiere de costosos laboratorios que están más allá del alcance de la mayoría de las universidades públicas. Los estudiantes están obligados a ir a los laboratorios, que ofrecen instalaciones adecuadas, de acuerdo a un calendario estricto. Por estas razones, se plantea la necesidad de una alternativa para la enseñanza de métodos tales como laboratorios virtuales a través de Internet. En este artículo se presenta la propuesta de un Laboratorio Virtual donde se permite la simulación y la teleoperación mediante Realidad Virtual de un brazo robótico (Scorbot-ER VI), el cual está dirigido a la enseñanza de la robótica en el estado de Sinaloa.

I. INTRODUCCIÓN

EN el Sistema de Educación Superior de nuestro país es cada vez más difícil que las instituciones cuenten con la infraestructura material y los recursos humanos suficientes para soportar de manera eficiente la formación de nuevos ingenieros e investigadores [1], particularmente en áreas como la robótica, que tienen una componente tecnológica fuerte, debido a los altos costos de inversión y operación; y al constante deterioro que demanda un permanente mantenimiento [2].

La educación a distancia es cada vez más prioritaria en las universidades, entre sus objetivos es minimizar costos en la formación del estudiante; tiene como uno de sus retos encontrar formas de garantizar que el estudiante en línea tenga una experiencia educativa equivalente a la del estudiante en el campus en la medida de lo posible.

Por ello, una de las estrategias complementarias para la formación y para el aprovechamiento de instalaciones es implementar laboratorios virtuales. Los programas educativos que incluyen en su formación prácticas de laboratorio imponen exigencias únicas a la educación en línea que actualmente se están atendiendo como prioridad en las universidades [3-4]. Los laboratorios virtuales contribuyen a una formación integral de educación tecnológica. La experiencia directa de la manipulación de los artefactos tecnológicos enseña al estudiante mucho más sobre las tecnologías que hacerlo solamente mediante las

descripciones o modelos de los sistemas de información.

Así también, la *Association for Computer Machinery* (ACM) ha reconocido la importancia de estrategias de educación a distancia en la evolución de su propuesta de diseño curricular [5].

Este artículo se centra en el diseño y desarrollo de un Laboratorio Virtual de Robótica (LVR) accesible por Internet usando Realidad Virtual, con el fin de que las instituciones de educación superior del estado de Sinaloa estén en posibilidades de usarlo en la formación de profesionales y en el desarrollo de proyectos de investigación.

El LVR surge como un proyecto colaborativo entre el laboratorio de Robótica denominado Laboratorio de Manufactura Flexible Asistido por Computadora (LMFAC-CCS) ubicado en el Centro de Ciencias de Sinaloa y el Centro de Investigación Aplicada en Tecnologías de Información y Comunicaciones (CIATIC-UAS) de la Facultad de Informática Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

Entre los problemas más interesantes que se resuelven con un Laboratorio Virtual de Robótica está la telepresencia visual y su utilización en la actualización de los espacios virtuales remotos [6], la generación de programas para puestos de trabajo robotizados y su simulación usando modelos gráficos tridimensionales [7]. También destaca la teleoperación vía Internet [2], [8] y la utilización de la plataforma en la solución de problemas reales de manipulación robotizada inteligente asistida por visión artificial [9].

II. SOLUCIÓN PROPUESTA

A. Laboratorio de Manufactura Flexible Asistida por Computadora – Situación Actual

En el CCS se cuenta con un Laboratorio de Manufactura Flexible Asistida por Computadora (LMFAC-CCS), creado en 1992, donde se dispone de una celda de Manufactura apropiada para la enseñanza en áreas de ingeniería y tecnología [10].

Este laboratorio puede ser utilizado por todas las instituciones públicas del estado bajo un control de horarios y reservaciones estricto, lo cual limita a que su uso sea en las instalaciones y en los horarios disponibles para tal fin.

El LMFAC cuenta con 4 estaciones de trabajo para integrar la celda de manufactura. Una estación cuenta con un

¹ Estudiante de la Maestría en Informática Aplicada – Facultad de Informática Culiacán – Universidad Autónoma de Sinaloa. Josefa Ortiz de Domínguez S/N. Ciudad Universitaria, Culiacán, México.

² Investigador del Departamento de Bibliotecas Mazatlán – Universidad Autónoma de Sinaloa. Av. Leonismo Internacional S/N, C.P. 82000, Mazatlán, México.

³ Estudiante de Doctorado en Educación – Universidad Autónoma de Durango, Campus Culiacán. Culiacán, México.

torno de CNC EMCOTURN 120P y un robot ESHED Scorbot-ER VII, otra es conformada por una fresadora vertical de CNC VMC 100 y un robot ESHED Scorbot-ER VII, se cuenta también con un sistema de visión compuesto por una cámara de video y un robot tipo SCARA ER14, y la última estación se compone por un almacén y un robot ESHED Scorbot-ER VII. Además de las 4 estaciones de trabajo, se cuenta con un sistema de control central para ejecutar y coordinar todas las estaciones.

B. Laboratorio Virtual de Robótica

Se propone ampliar las posibilidades que tienen los estudiantes e investigadores para el uso de este equipo por medio del uso de la realidad virtual.

Se plantea extender las funciones del LMFAC para que el robot Scorbot-ER VII sea utilizado desde Internet y se incremente su aprovechamiento por medio del diseño y la implementación de un LVR que permita su **Programación Automática** y su **Teleoperación** desde un ambiente virtual interactivo (Figura 1).

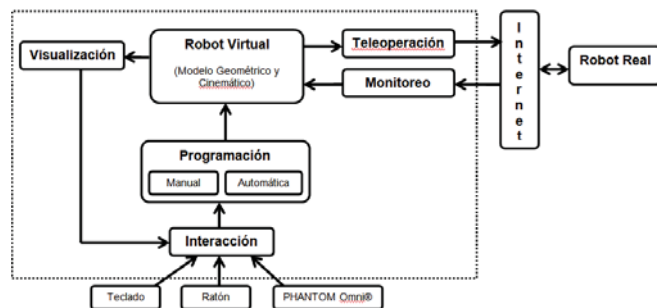


Fig. 1. Esquema del LVR propuesto.

El LVR, compuesto de un Ambiente Virtual Interactivo, contendrá una versión simulada en 3D del robot Scorbot-ER VII, el cual permite la programación y simulación de tareas industriales reales a través de su interacción.

Los mecanismos de comunicación entre el puesto de trabajo real y el LVR, a través de internet, permiten la **Programación** del **Robot Real** de forma **Manual** y **Automática** mediante la manipulación del **Robot Virtual** por parte del usuario. Las técnicas de **Interacción** desarrolladas permiten realizar esta manipulación, así como realizar la **Teleoperación** en línea y fuera de línea del **Robot Real**. Durante la **Teleoperación** y ejecución de tareas en el puesto de trabajo del **Robot Real** es posible su Monitoreo y **Visualización** en el ambiente virtual.

III. ARQUITECTURA DEL LVR

Para la creación del LVR se hace uso de una gama de aplicaciones y herramientas de software para el modelado y la programación. Se utiliza un estilo modular para la programación, lo cual permite ejecutar y probar algunos bloques del sistema independientemente. Las herramientas de software, los módulos del sistema y la infraestructura de

hardware utilizada, y el robot Scorbot-ER VII son descritos en esta sección.

A. Herramientas de Software utilizadas

Para modelar los objetos 3D que son representados en el mundo virtual, se utiliza la herramienta de diseño por computadora *Solidworks*TM, cuyo propósito es el modelado de piezas mecánicas. Estas piezas son exportadas al formato *STL* (estereolitografía). Posteriormente la herramienta de conversión de formatos *DeepExploration*TM es utilizada para obtener un formato de archivo temporal (.tmp) y finalmente la aplicación *Maketri*, desarrollada en [11], nos permite obtener una malla poligonal de los archivos en formato .tri.

La aplicación del LVR permite leer este formato de archivos para generar los Modelos Geométricos en el ambiente virtual. Estos modelos pueden transformarse en la escena (posición y orientación) por medio de la herramienta *PhysX*, que calcula el comportamiento dinámico de los objetos o por medio de las librerías de *HopenHaptics*, que realizan la interacción entre la interfaz *Phantom Omni*TM y el LVR. La herramienta *OpenGL* es utilizada para la visualización de los modelos 3D y toda la escena virtual. Toda la programación y el uso de las herramientas se desarrolló en la plataforma de programación *Microsoft Visual C++ 2008 Express Edition*. La figura 1 presenta las herramientas de software utilizadas en el sistema.

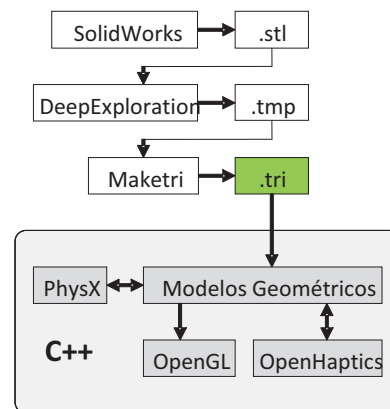


Fig. 2. Herramientas de software utilizadas en el desarrollo del LVR.

B. Esquema modular e infraestructura del LVR

Para el diseño del LVR se consideró un esquema cliente-servidor con el fin de realizar la interconexión entre el mundo virtual y el laboratorio real (figura 3). El *Servidor* contiene un módulo de comunicación que permite realizar la conexión con el cliente vía internet, y el **Teach Pendant Virtual** asegura la comunicación con el controlador del robot. El protocolo de comunicación desarrollado es el mismo que utiliza el Teach Pendant Real.

En la parte del cliente se tiene un Teach Pendant Remoto (TPR), el cual se comunica con el servidor a través del módulo Comunicación. El TPR se comunica con el módulo

de Monitoreo, enviándole los valores de las variables articulares recibidas desde el Servidor. Los datos recibidos en Monitoreo son comunicados al Mundo Virtual, los cuales son utilizados para la visualización del Robot Virtual. El Mundo virtual contiene además el módulo Modelo Geométrico, que contiene todos los modelos 3D de los objetos existentes en la escena virtual. Las coordenadas geométricas de los modelos 3D del robot Virtual son recibidas, también, desde el módulo Modelo Cinemático, que se encarga de calcular estas coordenadas en función de la interacción del usuario y del módulo Restricciones Geométricas. El módulo Comportamiento Dinámico (aún no implementado en el LVR) se encarga de realizar un modelado basado en física para los objetos existentes en la escena. Lo anterior permitirá aumentar el grado de realismo de la interacción con el usuario.

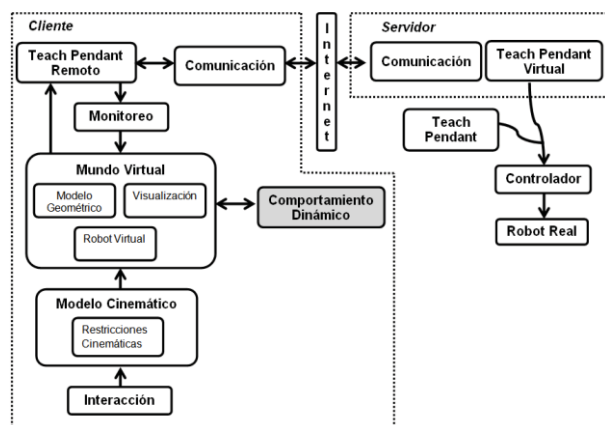


Fig. 3. Esquema modular del LVR

C. Descripción del Scrobot-ER VII

El Scrobot-ER VII es un manipulador de cinco grados de libertad cilíndricos, creado con fines educativos y es representante de los robots manipuladores usados regularmente en procesos industriales [12]. En los diagramas de la figura 4 se muestran los eslabones del Scrobot-ER VII (izquierda) y las articulaciones del brazo mecánico (derecha).

Al Scrobot-ER VII utilizado en este trabajo, se le ha integrado una pinza (*gripper*) como órgano terminal, por tanto es considerado como un robot de 6 seis grados de libertad (figura 5-izquierda).

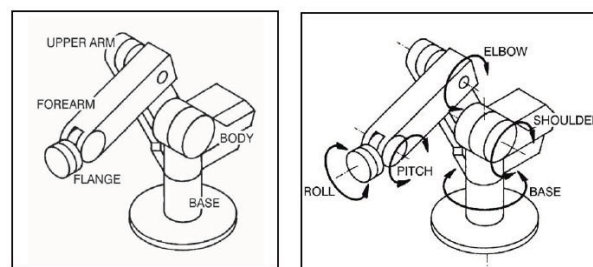


Fig. 4. A la izquierda los eslabones, a la derecha las articulaciones del brazo mecánico.

El diseño del Scrobot-ER VII permite que el efector final sea posicionado y orientado arbitrariamente en un amplio espacio de trabajo. En la figura 5-derecha se presenta el esquema cinemático del Scrobot-ER VII con sus 5 grados de libertad.

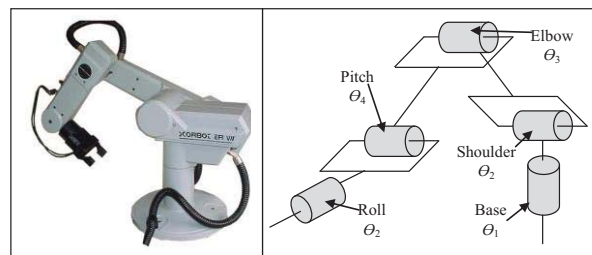


Fig. 5. Robot Scrobot-ER VII (izquierda) y su esquema cinemático de 5 GDL.

La longitud de los eslabones y los grados de rotación de las articulaciones determinan el alcance del robot. La figura 6 muestra las dimensiones y el alcance del Scrobot-ER VII.

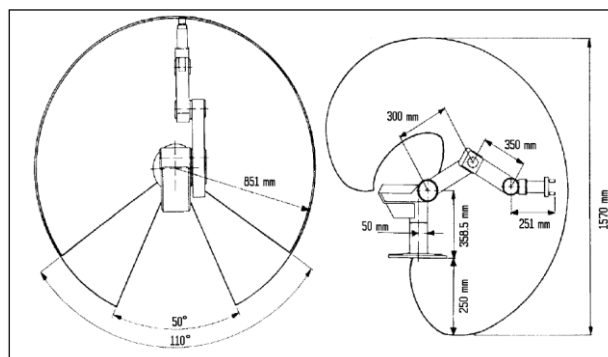


Fig. 6. Dimensiones y alcance del Scrobot-ER VII.

D. Interfaz Háptica Phantom Omni™

Phantom Omni® es un dispositivo háptico, fabricado por *SensAble technologies*, que permite tocar y manipular objetos virtuales. Es sensible a posiciones de hasta seis grados de libertad y proporciona retorno de fuerza en los ejes *x,y,z*. Físicamente la comunicación o conectividad se realiza mediante puerto paralelo y *Firewire* [13].

En la versión actual del LVR no se hace uso del retorno de fuerza del Phantom Omni™, sino que sólo se utiliza para manipular al robot virtual. El esquema cinemático del Phantom Omni™ se presenta en la Figura 7.

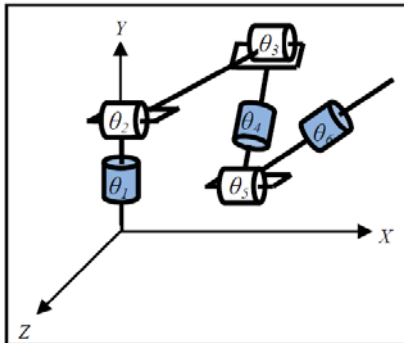


Fig. 7. Esquema cinemático del Phantom Omni™.

IV. MODELADO DEL AMBIENTE VIRTUAL

Para modelar el ambiente virtual se utilizaron las librerías de *OpenGL*, y la programación se realizó en la plataforma *Microsoft Visual C++ Express Edition*. Para brindar un mejor grado de realismo al mundo virtual, se utilizaron texturas para mejorar el aspecto de los objetos, así como la proyección de sombras y reflejos de los mismos. En la escena se visualiza una sala de 3 muros, un piso que refleja los objetos de la escena y el Scorbot-ER VII (figura 8).

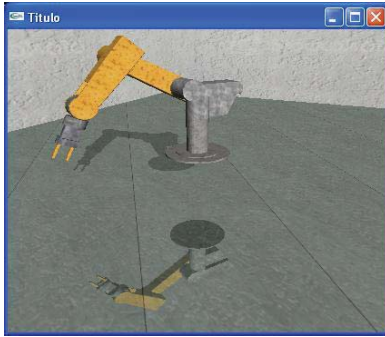


Fig. 8. Ambiente Virtual

A. Modelado 3D de las partes del robot

Cada una de las piezas que conforman al Scorbot-ER VII fueron modeladas en *SolidWorks™*, y posteriormente exportadas a mallas poligonales para ser importadas en el ambiente virtual utilizando el procedimiento descrito en la sección III.A. Un ejemplo del modelado de una pieza del robot se presenta en la figura 9.

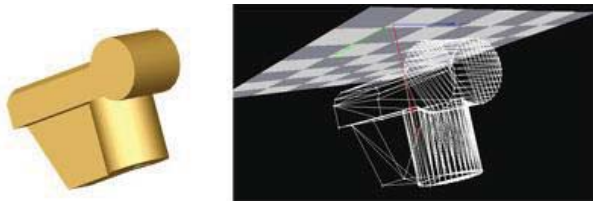


Fig. 9. A la izquierda el modelo 3D de la base del robot realizado en *SolidWorks*. A la derecha, el modelo 3D en formato STL (malla poligonal) visualizado en *DeepExploration*.

B. Cinemática directa del robot

Una vez que se modelaron todos los componentes del Scorbot-ER VII y se importaron en el ambiente virtual, fue necesario obtener su modelo cinemático directo con el fin de representar gráficamente los modelos en la escena en su posición y orientación correspondiente [14-15].

Cada articulación del robot está definida por una matriz de transformación ${}^{J_{i-1}}M_{J_i}$, que representa la posición y la orientación de la articulación J_i en con respecto al marco de referencia (sistema de coordenadas) de la articulación anterior J_{i-1} . En el caso de la primera articulación J_1 , que corresponde a la Base del robot, sus coordenadas geométricas están definidas en el marco de referencia global del mundo virtual W , por lo tanto su matriz de transformación es ${}^WM_{J_1}$.

La matriz de transformación ${}^{J_{i-1}}M_{J_i}$, está compuesta por:

$$\begin{bmatrix} {}^{J_{i-1}}R_{J_i} & {}^{J_{i-1}}T_{J_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde ${}^{J_{i-1}}R_{J_i}$ es la matriz de rotación que representa la orientación de J_i con respecto a J_{i-1} , la cual es obtenida por:

$${}^{J_{i-1}}R_{J_i} = R(\text{Ang}(q_i), \text{Axis}(x, y, z)) \quad (2)$$

Donde $\text{Ang}(q_i)$ es el ángulo de rotación de la articulación y $\text{Axis}(x, y, z)$ es el vector que define el eje sobre el cuál va a rotar la articulación.

${}^{J_{i-1}}T_{J_i}$ es el vector de translación de la articulación, definido por:

$${}^{J_{i-1}}T_{J_i} = \{x, y, z\} \quad (3)$$

Finalmente tenemos las siguientes matrices de transformación para todas las articulaciones del robot:

$${}^WM_{J_1}, {}^{J_1}M_{J_2}, {}^{J_2}M_{J_3}, {}^{J_3}M_{J_4}, {}^{J_4}M_{J_5}, {}^{J_5}M_{J_6}$$

Para representar en el ambiente virtual cada uno de los modelos geométricos, es necesario obtener su matriz de transformación con respecto al mundo virtual W . Por tanto es necesario calcular:

$${}^WM_{J_1}, {}^WM_{J_2}, {}^WM_{J_3}, {}^WM_{J_4}, {}^WM_{J_5}, {}^WM_{J_6}.$$

Para lo anterior es necesario realizar el siguiente conjunto de operaciones:

$$\begin{aligned}
 {}^w M_{J_2} &= {}^w M_{J_1} \cdot {}^{J_1} M_{J_2} \\
 {}^w M_{J_3} &= {}^w M_{J_2} \cdot {}^{J_2} M_{J_3} \\
 {}^w M_{J_4} &= {}^w M_{J_3} \cdot {}^{J_3} M_{J_4} \\
 {}^w M_{J_5} &= {}^w M_{J_4} \cdot {}^{J_4} M_{J_5} \\
 {}^w M_{J_6} &= {}^w M_{J_5} \cdot {}^{J_5} M_{J_6}
 \end{aligned} \quad (4)$$

C. Restricciones cinemáticas

Es necesario establecer restricciones cinemáticas para que los movimientos del robot virtual lo protejan de posibles manipulaciones erróneas por parte del usuario, o para evitar el intento de alcance de posiciones extremas o imposibles por parte del robot. Estas restricciones pueden llegar, incluso, a garantizar la seguridad del robot real. En la versión actual del LVR se está trabajando en la definición y desarrollo de estas restricciones cinemáticas.

V. MANIPULACIÓN

Actualmente han sido desarrolladas dos técnicas de manipulación del robot virtual, las cuáles se realizan mediante el dispositivo háptico Phantom Omni™ y teclado.

La implementación de estas librerías OpenHaptics permiten la comunicación con el Phantom Omni™ con el ambiente virtual.

A. Manipulación por Phantom Omni™

Considerando que la arquitectura cinemática del Phantom Omni™ cuenta con 6 GDL cilíndricos (figura 7), y el Scorbob-ER VII cuenta con 5 GDL cilíndricos, se realizó una asociación de articulaciones entre ambos. En la siguiente tabla se muestra la asociación realizada:

TABLA I
RELACIÓN ENTRE LAS ARTICULACIONES DEL PHANTOM OMNI Y EL SCORBOT-ER VII

Phantom	Scorbob-ER VII
θ_1	θ_1
θ_2	θ_2
θ_3	θ_3
θ_5	θ_4
θ_6	θ_5

B. Manipulación por Teclado

Se implementó el teclado como dispositivo de manipulación alterno del robot virtual. Para ello, se asignó el valor de ± 1 de rotación a ciertas teclas pulsadas. Las teclas asignadas para interactuar con el robot se muestran en la siguiente tabla:

TABLA II
ASIGNACIÓN DE TECLAS PARA MANIPULACIÓN DE LAS ARTICULACIONES

Tecla	Valor	Articulación
1	+1	θ_1
q	-1	θ_1
2	+1	θ_2
w	-1	θ_2
3	+1	θ_3
e	-1	θ_3
4	+1	θ_4
r	-1	θ_4
5	+1	θ_5
t	-1	θ_5

VI. COMUNICACIÓN

Se implementaron mecanismos de comunicación en el LVR para realizar la teleoperación del robot real. En esta versión sólo se permite la teleoperación del robot en línea, pero se tiene contemplado la transmisión de programas para su ejecución fuera de línea. Se desarrollaron e implementaron dos mecanismos de comunicación: mediante el puerto serie y mediante el protocolo TCP/IP.

A. Comunicación - Puerto Serie

Se desarrollaron métodos para establecer comunicación mediante el puerto serie. Las 2 aplicaciones desarrolladas son: la aplicación cliente, del lado del robot virtual, que permite el envío de instrucciones al robot real; y la aplicación servidor, del lado del laboratorio real, para permitir la recepción de estas instrucciones. En la figura 10 se muestra la arquitectura utilizada para esta tarea.

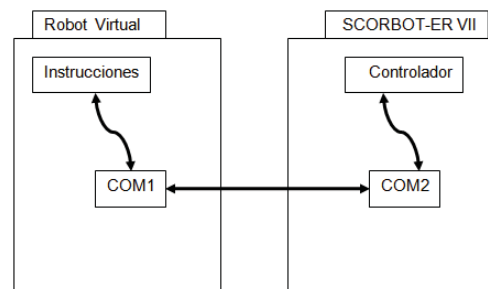


Fig. 10. La arquitectura utilizada para la comunicación vía puerto serie.

Fue posible lograr la teleoperación mediante los dispositivos de interacción especificando la articulación deseada y enviando el valor correspondiente a asignar a la articulación.

En la versión actual del LVR la comunicación solo permite enviarle comandos de movimiento al robot real mediante la especificación de la articulación que se desea mover y la cantidad de grados a rotar. Actualmente se está trabajando en el desarrollo de un protocolo de comunicación que permita realizar todas las funciones deseadas en el laboratorio virtual, como la transmisión de programas entre otras.

B. Comunicación - TCP/IP

Uno de los objetivos del LVR es que se permita la comunicación vía internet para lograr la teleoperación del robot real.

Como una primera versión para lograr esta comunicación, se estableció un puente de comunicación que conecta el puerto serie con el protocolo TCP/IP. De esta manera, se utilizó la configuración del puente serie-TCP/IP del lado del cliente y del lado del servidor, y utilizando las mismas aplicaciones que en la sección VI.A, se realizó la teleoperación vía internet.

El software utilizado para realizar esta configuración es Com2tcp™, el cual permite utilizar, vía Internet, dos aplicaciones que se enlazan por puerto serie. La figura 11 muestra la arquitectura utilizada.

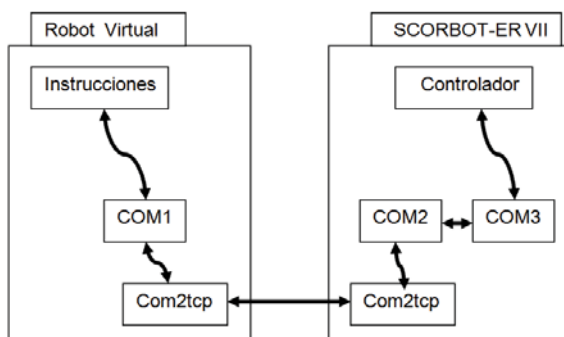


Fig. 11. La arquitectura utilizada para la comunicación TCP/IP.

VII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El LVR se plantea como una alternativa de educación a distancia para la enseñanza de métodos a través de Internet y permite que se realice la teleoperación del robot Scorbot-ER VII desde un ambiente virtual interactivo.

Actualmente se ha logrado la manipulación del robot por medio del teclado y del Phantom Omni™, en donde se obtienen los valores de sus variables articulares para mover al robot virtual. No se ha hecho uso de una característica muy importante del Phantom Omni™, que es la capacidad de comunicar fuerzas al usuario que lo manipula. En futuras versiones del LVR se espera incorporar el “retorno de fuerzas”.

Una vez que esto se haya incorporado será necesario diseñar e implementar un procedimiento experimental para evaluar las técnicas de interacción implementadas y la satisfacción del usuario.

Se han desarrollado los módulos de representación geométrica y del modelo cinemático del robot, pero aun falta desarrollar el módulo de restricciones cinemáticas. Estas restricciones son necesarias para que los movimientos del robot virtual protejan al Scorbot-ER VII de posibles manipulaciones erróneas por parte del usuario, o para evitar el intento de alcance de posiciones extremas o imposibles por parte del robot.

El mecanismo de comunicación desarrollado permite la

teleoperación en línea especificando la articulación a mover y el valor deseado; sin embargo en lo sucesivo se trabajará para lograr la teleoperación fuera de línea.

Así también se pretende integrar el modelado basado en física para dotar de comportamiento dinámico al robot y a los otros componentes del LVR y brindar un alto grado de realismo a los usuarios.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido posible gracias a la incorporación del Laboratorio de Manufactura Flexible Asistido por Computadora del Centro de Ciencias de Sinaloa (LMFAC-CCS), que facilita sus instalaciones, incluyendo al Scorbot-ER VII.

Así también, se agradece la participación del Centro de Investigación Aplicada en Tecnologías de Información y Comunicaciones (CIATIC-UAS) que ha brindado las facilidades necesarias para lograr el éxito de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] ANUIES. (2009, 26/11/ 2009). Sitio web ANUIES, sección noticias. Available: <http://www.anui.es.mx/secciones/noticias/index2.php?clave=883>
- [2] F. A. Candelas Herías, et al., "Laboratorio virtual remoto para robótica y evaluación de su impacto en la docencia," *RIAI: Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 1, pp. 49-57, 2004.
- [3] e. c. P.-R. European Commission. 23/11/2009). *Regional Cooperation - Alfa - Case Studies*. Available: http://ec.europa.eu/europeaid/where/latin-america/regional-cooperation/alfa/case_studies_en.htm
- [4] E. Rodríguez Peralta, Sucar Succar Luis Enrique, y Noguéz Monroy Julieta, "Laboratorio virtual remoto de robótica móvil," Master, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) campus Morelos, Cuernavaca, Morelos, México, 2008.
- [5] A. f. C. M. ACM. (2008, 23/11/2009). *ACM, Curricula Recommendations, Proposed standards for the IT curriculum*. Available: <http://www.acm.org/education/curricula-recommendations>
- [6] J. M. Ibarra-Zannatha, et al., "An Approach to Internet Robotics: Generation of Interactive Virtual Worlds and Internet Teleoperation," in *1st International Conference on Information Technology in Mechatronics (ITM'01)*, Istanbul, Turkey, 2001, pp. 108-115.
- [7] J. M. Ibarra-Zannatha, et al., "3D Mapping for Mobile Robots Using Interactive Virtual Worlds and Internet Teleoperation," in *Proceedings of the 15th IFAC World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC'02)*, Barcelona, España, 2002.
- [8] O. a. S. Dongjun Lee and Martinez-Palafox, M.W., "Bilateral Teleoperation of Multiple Cooperative Robots over Delayed Communication Networks: Application," *Robotics Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, 2005.
- [9] B. S. a. O. Khatib, "Introduction," in *Springer Handbook of Robotics*, ed, 2008, pp. 1-4.
- [10] C. d. C. d. Sinaloa. (2009, 24/07/2010). Sitio web Laboratorio de Manufactura Flexible Asistido por Computadora-CCS.
- [11] Z. C. Ulises, "Modelisation de l'environnement virtuel d'assemblage," Université de Versailles, 2009.
- [12] S.-E. V. users manual (1996, Eshed Robotec).
- [13] S. technologies (1996, Specifications for the Phantom Omni).
- [14] D. M. D. Frank L. Lewis, *Robot manipulator control : theory and practice*: Marcel Dekker, 2004.
- [15] M. W. Spong, et al., *Robot modeling and control*. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2006.