

**PROGRESS IN THE DESIGN OF A PLATFORM FOR THE REMOTE  
CONTROL OF A PARALLEL STRUCTURE THROUGH LAN****AVANCES EN EL DISEÑO DE UNA PLATAFORMA PARA EL CONTROL  
REMOTO DE UNA ESTRUCTURA PARALELA VÍA LAN****MSc. (c) Edison Martínez, PhD. César A. Peña Cortéz  
Ing. (c) Duber Contreras, Ing. (c) Juan Morgado****Universidad de Pamplona**

Facultad de Ingenierías y Arquitectura.

Departamento de Ingeniería mecánica, industrial y mecatrónica.

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tel.: (577) - 568 5303, Fax: (577) - 568 5303, Ext. 144.

E-mail: edionmartinez@unipamplona.edu.co, cesarapc@unipamplona.edu.co,  
dmcontreras20@hotmail.com, juan.estars@hotmail.com

**Abstract:** An experimental platform allows studying the functioning of a complex system, which would otherwise be difficult to access, much less manipulate. This paper shows the development of a platform for the study of remote control of a parallel structure with three degrees of freedom, comprising low-level control of actuators, modes of operation, the communication with the remote system, and a description of the structure of high-level control such as teleoperation. The platform allows the development of control and teleoperation practices from simple to complex, considering the communication delay and its influence on the remote control.

**Keywords:** Control, teleoperation, experimental platform, parallel structure

**Resumen:** Una Plataforma experimental permite estudiar de forma controlada el funcionamiento de un sistema complejo, al que de otra manera sería difícil acceder, y mucho menos manipular. Este artículo muestra el desarrollo de una plataforma para el estudio del control remoto de una estructura paralela de tres grados de libertad, abarcando el control a bajo nivel de los accionamientos, los modos de operación y la comunicación con el sistema remoto, así como la descripción de la estructura del control a alto nivel por ejemplo teleoperación. La plataforma permitirá el desarrollo de prácticas de control y teleoperación desde las básicas, hasta complejas, en las que se pueda tener en cuenta el retardo de la comunicación y su influencia en el control remoto.

**Palabras clave:** Control, teleoperación, plataforma experimental, estructura paralela.

## 1. INTRODUCCIÓN

La plataforma experimental está orientada al desarrollo de prácticas de control y teleoperación de una estructura paralela de tres grados de libertad, este banco didáctico de control permitirá el desarrollo de prácticas de diferentes niveles de complejidad en un ambiente supervisado.

Este tipo de plataformas se convierten en un elemento clave en la formación, ya que permite la verificación de los conceptos teóricos, las estrategias y algoritmos de control y dan acceso al estudio de las interfaces electrónicas y mecánicas del sistema real.

A través de la teleoperación se le permite a una persona interactuar con objetos a distancia por medio de un manipulador o herramienta sin entrar en contacto directo con él, ya sea porque existe una distancia grande entre los dos o por que el objeto se encuentra en un ambiente que no es apto para el ser humano.

La teleoperación de robots consiste en incorporar al ser humano dentro de la estructura del control como se muestra en el esquema (Fig. 1), de manera que en el nivel superior, la planeación y la toma de las decisiones son realizadas por la persona y el robot responde de acuerdo a la implementación electrónica y mecánica (Siciliano y Khatib, 2008).

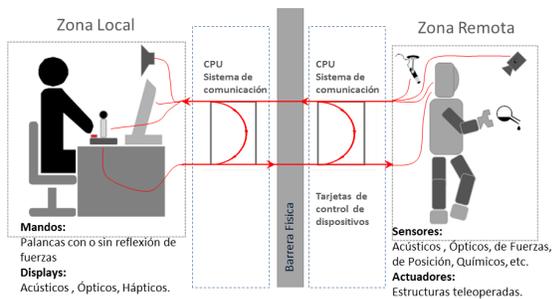


Fig. 1. Esquema general de teleoperación

En la actualidad el gran desarrollo de las redes de comunicación e Internet obliga al estudio de estrategias de control a través de éstas, así, se han dado avances en la implementación del control remoto sobre estas redes, y parte del estudio se concentra en el manejo de los tiempos de retardo producido en los diferentes elementos de la red: servidores, enrutadores, y ordenadores (Mirfakhrai y Payandeh, 2001; Ye *et al*, 2002; Oboe, 2003).

Las estructuras robóticas paralelas se conocen desde hace mucho tiempo, pero en las últimas décadas se están usando para diferentes tareas las más comunes van desde dos a seis grados de libertad (Siciliano y Khatib, 2008), los robots paralelos en configuración Delta (Clavel, 1989) tienen como principal característica que sus tres grados de libertad son de tipo rotacional, lo que permite la utilización de motores en su operación. Este tipo de Robot ha encontrado aplicaciones en campos como: líneas de empaquetado y ensamble gracias a sus características como alta velocidad, precisión y capacidad de carga, siendo producidos comercialmente por compañías como Bosch, ADEPT, ABB Robotics, durante los últimos años. Se debe tener en cuenta que aún se debe profundizar como se muestra en varios estudios (Merlet 2004; Dehghani *et al*, 2005; Mustafa *et al*,

2008; Angel *et al*, 2005; Vivas 2005, 2006; Staicu 2009) en el análisis de la cinemática, dinámica, el diseño y el control de los robots tipo Delta.

El desarrollo de sistemas de control remoto es un conocimiento necesario que debe ser adquirido en nuestras universidades de manera que el diseño de esta plataforma experimental permitirá la profundización en las áreas de accionamientos, control, comunicaciones, y teleoperación.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La plataforma para el control remoto (ver Fig. 2) está compuesta por una estación esclavo que se encarga del control a bajo nivel de los accionamientos del robot, de forma que estos se posicionen de acuerdo a las referencias y de la misma forma retornar las medidas tomadas por los sensores. Cuenta también con un sistema de protección que se encarga localmente de evitar que se produzcan choques en el movimiento del robot, estos algoritmos están escritos en C lo cual permite agilizar su ejecución.



Fig. 2. Esquema de la plataforma

La estación maestro se encarga de ejecutar los algoritmos de control a alto nivel, cuya complejidad depende de las estrategias que se deseen implementar como por ejemplo la teleoperación. Los algoritmos de control se pueden programar en MatLab® y usar también Simulink® que tiene la ventaja del uso de bloques y una interfaz gráfica que agiliza la implementación de las estrategias de control permitiendo de forma rápida la conexión de diferentes dispositivos de entrada, como palancas y punteros.

El sistema de comunicación Maestro-Eslavo se realiza usando el protocolo de datagramas de usuario (Comunicación UDP), y se puede dar en tres modos de operación; en el modo local el programa que controla la estación esclavo y la estación maestro se ejecutan en el mismo computador lo que disminuye los retardos en la comunicación (haciendolos casi despreciables para algunas aplicaciones), el modo remoto donde se

tienen dos computadores conectados a una misma red local LAN o donde las estaciones local y remota se comunican a través de internet desde cualquier lugar del mundo.

### 3. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA PARALELA

La estructura paralela a controlar consiste en un robot con configuración delta (ver Fig. 3), este robot está compuesto por una plataforma fija, sobre la cual se instalan los motores distribuidos en ángulos de  $120^\circ$ , y una plataforma móvil, unidas entre sí por tres estructuras de barras idénticas conformadas por un brazo operado cada uno de los motores y por un antebrazo, unido al brazo y a la plataforma móvil por medio de articulaciones esféricas.

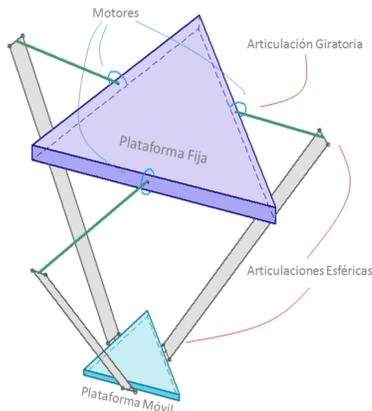


Fig. 3. Estructura: Robot tipo Delta

El problema cinemático en un robot consiste en encontrar la relación entre la posición del efector final, y los ángulos (o posiciones) de las articulaciones. En el caso del robot tipo delta, el análisis cinemático inverso consiste en encontrar los ángulos de las articulaciones ubicadas en la plataforma fija dada la posición del actuador final ubicado en el centro de la plataforma móvil (ver Fig. 4).

Este problema se presenta cuando se conoce la posición espacial (con respecto al robot) de un objeto que se desea recoger y se requieren los ángulos que se le deben suministrar a los motores para su correcto posicionamiento.

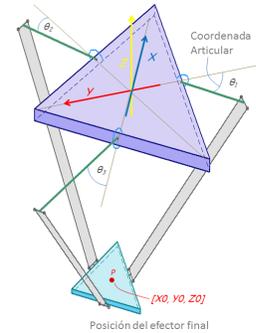


Fig. 4. Relaciones cinemáticas Robot tipo Delta

La cinemática directa busca encontrar la posición de la plataforma móvil conociendo las coordenadas articulares tomadas de los sensores. Este problema se presenta cuando se requiere verificar la posición del efector final por ejemplo en el seguimiento de una trayectoria, o para evitar un obstáculo. Una consideración con respecto al análisis cinemático directo es que se puede tener varias soluciones (en algunos puntos singulares), lo que lleva a diferentes enfoques para determinar la correcta.

Para resolver el problema cinemático inverso y directo se desarrollaron las ecuaciones necesarias y se programaron unas aplicaciones en Matlab® que permiten verificar la validez de los modelos.

Posterior al cálculo de las soluciones a la cinemática inversa y directa se desarrollaron los modelos dinámicos directo e inverso que se usan para el cálculo de pares, fuerzas, algunos parámetros en la obtención de consumo de energía y establecer las estrategias y algoritmos de control.

Las dimensiones para el diseño de la estructura paralela, se obtuvieron de un proceso de optimización, que busco reducir el tamaño de las barras a su mínimo tamaño, cumpliendo con un espacio de trabajo semiesférico preestablecido, los resultados se muestran a continuación. (Ver fig. 5).

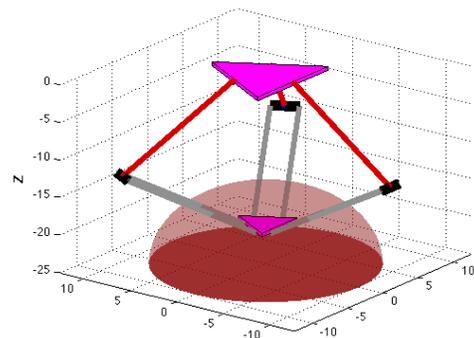


Fig. 5. Cálculo óptimo de las dimensiones del robot

La función objetivo en el proceso de optimización es:

$$f(x) = \frac{3x_1 \tan(30)}{2} + \frac{3x_2 \tan(30)}{2} + 3x_3 + 6x_4$$

Las variables aplicadas en la ecuación, y los resultados del proceso de optimización se muestran en la tabla 1. El rango de longitudes se estableció entre 1 y 100. No se plantearon unidades específicas debido a que los resultados pueden ser escalables.

*Tabla 1. Dimensiones óptimas del robot*

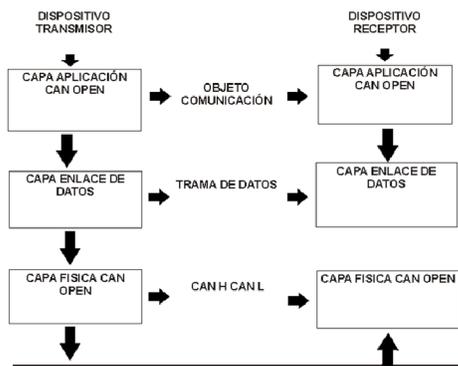
$x_1$ : Longitud del lado del triángulo de la base del robot	1
$x_2$ : Longitud del lado del triángulo del efector final del robot	1
$x_3$ : Longitud del primer eslabón de cada uno de los brazos	7.5
$x_4$ : Longitud del segundo eslabón de cada uno de los brazos (eslabones paralelos)	15
Valor mínimo de la función objetivo	114.2321

#### 4. DESCRIPCIÓN DE LOS ACCIONAMIENTOS

##### 4.1 Red CAN

La palabra CAN es un acrónimo del inglés Controller Area Network (CAN), es un protocolo de comunicación desarrollado por la firma inglesa Bosch, basado en una topología bus para la transmisión de mensajes en entornos distribuidos, además ofrece una solución a la gestión de comunicación entre múltiples ordenadores.

Este es un protocolo orientado a mensajes es decir la información que se va a intercambiar se descompone en mensajes, a los cuales se les asigna un identificador y se encapsulan en tramas para su transmisión.



*Fig. 6. Protocolo capas de interacción modelo CAN Maxonmotor*

La figura 6 ilustra el protocolo de las capas de interacción del modelo de comunicación CAN, el cual consta de tres capas esenciales: capa física, capa enlace de datos, y capa de aplicación.

Existen diferentes estándares que definen la capa de aplicación; algunos son muy específicos y están relacionados con sus campos de aplicación. Entre las capas de aplicación más utilizadas cabe mencionar CAL, CANopen, DeviceNet, SDS (*Smart Distributed System*), OSEK, CANkingdom.

##### 4.2 EPOS

Las EPOS (Fig. 7) son pequeñas tarjetas con un completo controlador digital de movimiento inteligente, poseen alta eficiencia y una etapa de potencia flexible para controlar motores con sensores hall y encoder. Están especialmente diseñadas para ordenar un nodo esclavo del protocolo CANopen en la red, además ofrece la posibilidad de ser controlada desde cualquier puerto a través del protocolo de comunicación RS-232.



*Fig. 7. Montaje tarjetas EPOS.*

La programación de estas tarjetas es flexible y se puede realizar en lenguaje C usando librerías de Windows, creando librerías propias, o manejándolas desde otro software como LabView. En la plataforma se usan las tarjetas de control de movimiento Maxonmotor EPOS 24/1

##### 4.3 Los motores

Se usan tres motores sin escobillas de la compañía Maxonmotors conectados cada uno a su respectiva tarjeta de control (EPOS 24/1) y comunicados con el ordenador a través la red CAN usando el protocolo de CANopen ya que se tienen varios dispositivos EPOS.

### 5. DESCRIPCIÓN DEL CONTROL REMOTO A BAJO NIVEL

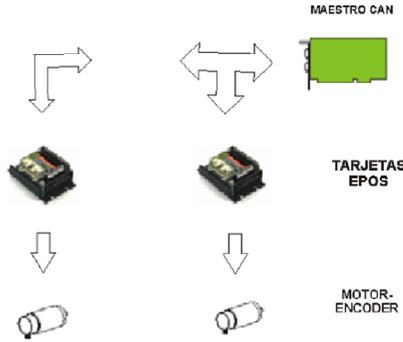


Fig. 8. Protocolo de comunicación CAN - EPOS Maxonmotor

En la figura 8 se puede ver la estructura de comunicación utilizada para el desarrollo del control de los actuadores, partiendo desde el protocolo de comunicación general en la red CAN, estableciéndose el modelo maestro esclavo guiado hasta las tarjetas de control mediante bus, en donde se procesa la información y las instrucciones de control establecidas para el adecuado funcionamiento de los actuadores en el control a bajo nivel.

En la figura 9 se observa la estructura de los lazos de control utilizados en el desarrollo del control de los actuadores partiendo de los valores de demanda y pasando por los diferentes lazos de control hasta habilitar el dispositivo, el cual le dara paso a ejecutar la regulacion pre-establecida sobre los motores.

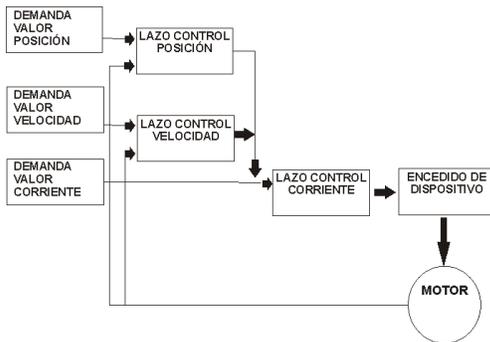


Fig. 9. Estructura de los lazos de control

#### 5.1 Modos de operación

En esta parte del proceso se debe tener en cuenta ciertos aspectos de importancia antes de empezar la programación y el control de los actuadores, estas

consideraciones tienen que ver con los parámetros o características de configuración.

##### 5.1.1 Modo de operación perfil posiccion

el procedimiento comienza con el establecimiento de el modo de operación, y de los parámetros de configuracion, se procede a habilitar el dispositivo para, se establece el valor de la posiccion deseada, y asi proseguir con el posicionamiento, puede definir la posición objetivo: obtenida del regulador o ingresarse directamente. El esquema de este modo de operación de muestra en la figura 10.

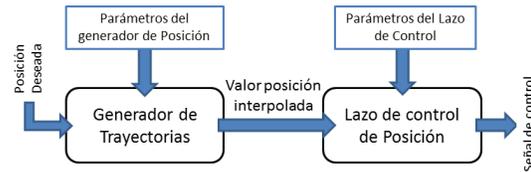


Fig. 10. Modo de operación perfil posiccion

##### 5.1.2 Modo de operación perfil velocidad

El esquema mostrado en la figura 11a ilustra el procedimiento para operar los actuadores en modo de perfil de velocidad similar al de posición pero el valor de la demanda de la velocidad se puede ajustar directamente.

##### 5.1.3 Modo de operación corriente

En el modo de operación decorriente 11b se activa este lazo y se establece un limite en el nivel de velocidad, el resto de la operación se realiza como en los modos descritos antes.

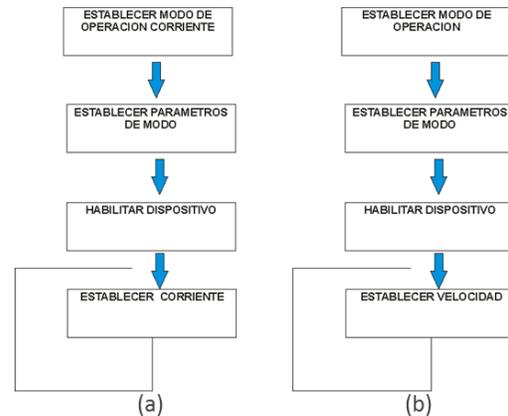


Fig. 11. a) Modo de operación perfil velocidad. b) modo de operación corriente

## 5.2 Diagrama de estados

En la tabla 2 se especifica la forma como se desarrollan la transición de los estados y el la figura 12 se muestra el diagrama de estados de forma gráfica.

Tabla 2: Transición de los estados

ESTADO	TRANSICION EN EL DIAGRAMA DE ESTADOS	ESTADO DESPUES DEL COMANDO	FUNCIONALIDAD
Inicialización	0	pre-operacion	Inicio del sistema, parametros de configuración.
entrada pre-operación	3,6	pre-operacion	Comunicación
resetear comunicación	1,8,9	Inicilaizacion cambio automatico a pre-operacion	Reset de comunicación regreso a inicio
resetear nodo	1,8,9	Inicilaizacion cambio automatico a pre-operacion	Genera un reset general hacia inicio
inicio nodo remoto	2,5	Operación	Ejecuta orden desde parada o pre-operación
parada nodo remoto	4,7	Parada	Detiene proceso ya sea desde operación o pre-operacion

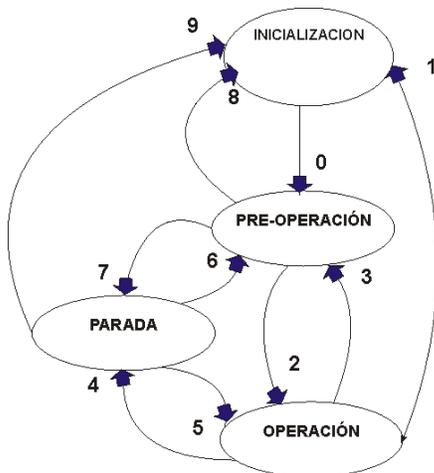


Fig. 12. Diagrama de transición de estados.

## 5.3 Generador de trayectorias

Dentro del control de los motores se encuentra una herramienta de generación de trayectorias, este generador de trayectorias se puede utilizar en algunos de los modos de operación de las EPOS, en los que se debe seleccionar el modo y los parámetros de operación y definir la entrada del generador, este suministrara al lazo de control los valores de demanda para el modo específico en el que se está trabajando.

En la figura 13 se observan las trayectorias y los perfiles utilizados: trapezoidal y sinusoidal.

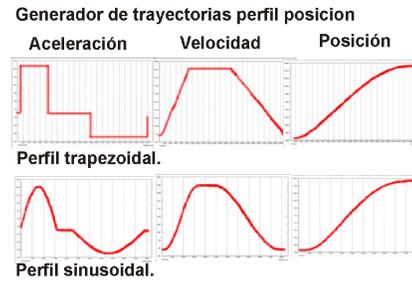


Fig. 13. Generador de trayectorias perfil posición

## 5.4 Control visual

El esquema des usados para este control se muestra en la figura 14.

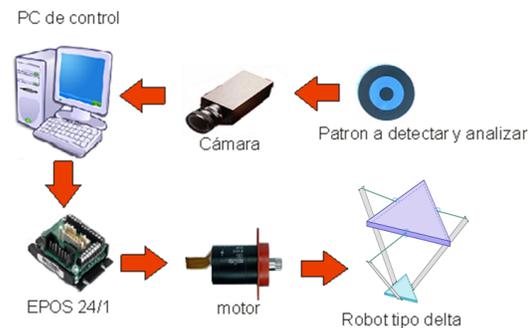


Fig. 14 Esquema del sistema de control visual

El control visual se usa dentro del funcionamiento de la plataforma para corroborar los resultados del cálculo de la cinemática directa, porque como se mencionó en la sección 2 se pueden producir varias soluciones desde el punto de vista matemático, y se requiere de una estrategia en este caso de un sensor auxiliar que permita encontrar la solución correcta, y esta es una forma rápida de hacerlo. La selección de la solución correcta usando visión permite manejar con facilidad los puntos singulares que de otra forma requeriría un manejo algebraico o numérico tedioso.

Como beneficio adicional toda la infraestructura desarrollada se puede usar para llevar a cabo prácticas de visión artificial, relacionadas con identificación de parámetros y seguimiento de trayectorias.

## 6. RESULTADOS

La plataforma experimental permite desarrollar práctica didáctica en los temas de control, robótica, automatización, visión y teleoperación. Se pueden crear diversas estrategias de control tanto en bajo nivel como alto nivel. De acuerdo a la arquitectura

seleccionada se pueden controlar los accionamientos por medio de diferentes métodos tales como posición, velocidad y corriente. De igual forma el robot paralelo puede manejarse de forma local o remota (LAN o Internet).

Dentro de estas estrategias de control se pueden efectuar prácticas de control cinemático teniendo en cuenta el generador de trayectorias. El tipo de perfil de movimiento se puede establecer como un perfil trapezoidal, sinusoidal o un perfil establecido por el usuario usando interpoladores lineales, cúbicos u otros.

En cuanto a el control dinámico se plantea la posibilidad de realizar el control de manera más avanzada teniendo en cuenta que se puede realizar un control en alto nivel dada la opción de controlar directamente el par de los accionamientos al ser el mismo, proporcional a la corriente. Este tipo de prácticas son realizadas de forma rápida debido a la sencillas de matlab para implementación de los sistemas de control.

Gracias a la posibilidad de variar los retardos en el canal de comunicaciones (modo local o los dos modos remotos) se pueden realizar diferentes prácticas de teleoperación de acuerdo al nivel de complejidad que se requiera. A continuación se ilustran los resultados un de una práctica de teleoperación y control cinemático usando controladores (PID). En esta práctica un estudiante se encargo de controlar los tres actuadores de la plataforma paralela. Las posiciones de referencia las asigna usando un *joystick* (palanca de mando) de 3 grados libertad (ver Fig. 15) con la cual señala la posición del efector final del robot y por medio de los calculos de cinemática inversa obtiene las posiciones de referencia de cada uno de los accionamientos. Se utilizan perfiles de movimiento trapezoidales.

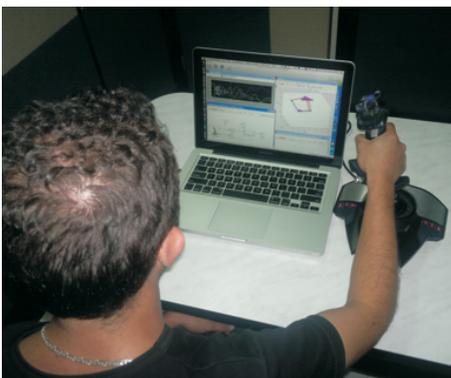


Fig. 15. Usuario generando las señales de referencia desde un Joystick (Usando Matlab®)

En la figura 16 se ilustran los resultados de un experimento usando el modo local (control desde la misma máquina). Se aprecia como los accionamientos siguen rápidamente las señales de referencia.

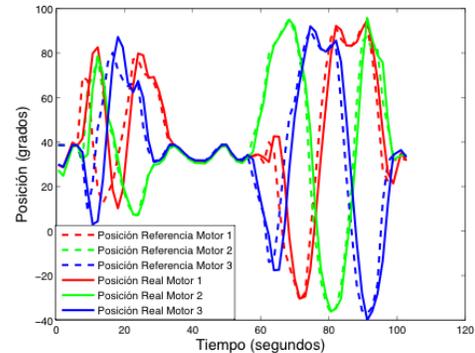


Fig. 16. Posición de referencia y real de los accionamientos del robot usando control local

En la figura 17 se muestran los resultados del experimento usando un modo remoto (LAN). En la figura 18 se ilustran los resultados del experimento usando el modo remoto vía Internet.

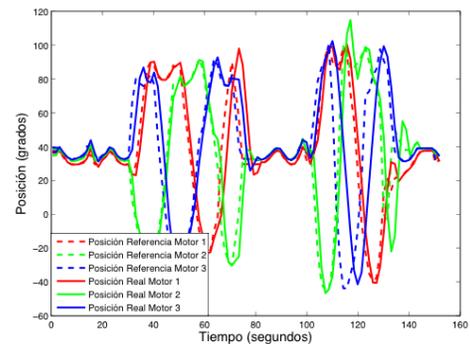


Fig. 17. Posición de referencia y real de los accionamientos del robot usando control remoto (LAN)

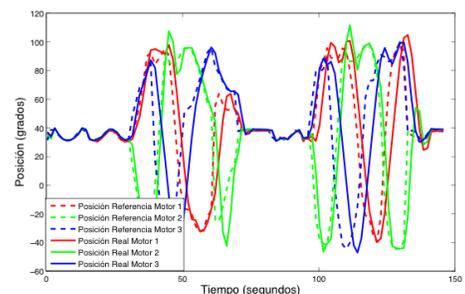


Fig. 18. Posición de referencia y real de los accionamientos del robot usando control remoto (Internet)

Al comparar los resultados se puede apreciar como la variación del retardo en el canal de comunicaciones disminuye la calidad en el seguimiento de las referencias. Es necesario recalcar que este es sólo un ejemplo de una práctica. Los usuarios podrán realizar un gran número de experimentos cuya complejidad puede variar según se desee.

## 7. CONCLUSIONES

El desarrollo de cualquier plataforma experimental implica la integración de varias áreas del conocimiento, haciendo posible, poner a disposición de la comunidad académica de una herramienta para la realización de prácticas, cercanas a la realidad industrial. Se debe ser cuidadoso en el diseño de los sistemas de protección y el desarrollo de modos seguros de operación, considerando que los usuarios de esta plataforma pueden tener diferentes niveles de conocimiento, así, se pueden evitar daños al sistema.

La calidad en el modelado de los sistemas presentes en la plataforma es de gran importancia, para que a través de la misma se pueda corroborar la teoría en las prácticas desarrolladas. En las pruebas realizadas se aprecia la importancia del retardo en canal de comunicación, permitiendo a futuro el desarrollo de estrategias para el manejo del mismo.

El retardo en la comunicación cuando se trabaja desde internet depende de muchos factores, como la hora del día la, ubicación de las estaciones, la tecnología de la red y el tráfico propio de las mismas.

El modo de comunicación entre la plataforma local y remota permite al realización de pruebas por internet, a estudiantes que se encuentren en cualquier lugar del mundo, con el simple intercambio de algunas librerías sencillas y usando Matlab para el control a alto nivel.

## REFERENCIAS

Angel, L.; Saltaren, R.; Sebastian, J.M.; Hansson, A.; Aracil, R.; (2004) "*Robotis: parallel robot with visual control*". IEEE. Automation Congress, 2004. Proceedings. World.

Clavel, R. (1989). "*Une nouvelle structure de manipulateur parallèle pour la robotique légère*". Journal Européen des Systèmes Automatisés, 23 (6), pp. 501-519.

Dehghani, Eghtesad, Safavi, Khayatian, and Ahmadi, (2008) "*Neural Network Solutions for Forward Kinematics Problem of HEXA Parallel Robot*". IEEE. American Control Conference, 2008

Merlet, J. P. (2004). "*Solving the forward kinematics of a Gough-Type parallel manipulator with interval analysis*, *The Int. Journal of Robotics Research*" Vol. 23, No. 3.

Mirfakhrai T. y Payandeh S., (2001) "*A model for time-delays for teleoperation over the internet*". Proceedings of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Alberta, Canada.

Mustafa, M.; Misuari, R.; Daniyal, H.; (2008) "*Forward Kinematics of 3 Degree of Freedom Delta Robot*". IEEE. *Research and Development*.

Oboe R., (2003) "*Force Reflecting Teleoperation over the internet: The JBITproject*". Proceedings of the IEEE, vol. 91, No. 3.

Siciliano B., Khatib O., (Editores) (2008) "*Springer HANBOOK OF ROBOTICS*". Springer - Velag. Berlín.

Staicu S., (2009). "*Recursive modelling in dynamics of Delta parallel robot*". *Robotica*, 27, pp 199-207

Vivas, A. (2005). "*Robótica Paralela: Aplicaciones Industriales, Modelado y Control*". Universidad del Cauca

Vivas, A. y P. Poinet (2006). "*Control predictivo de un robot paralelo*". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 3 (4), pp.45-52.

Ye X., Meng M., Xiaoping P., y Li G., (2002) "*Statistical analysis and prediction of round trip delay for internet based teleoperation*". Proceedings of the IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems. Lausanne, Suiza.