

**CONTROL OF TELEOPERATION SYSTEMS WITH DELAY IN THE  
COMMUNICATION CHANNEL****CONTROL DE SISTEMAS DE TELEOPERACIÓN CON RETARDO EN EL  
CANAL DE COMUNICACIONES****MSc. Pedro Cárdenas\*\*\*, Ph.D. César Augusto Peña Cortez\*\*\*,  
Ph.D. Eugenio Yime Rodríguez\*\*\*\*****\*Universidad Nacional de Colombia**, Bogotá, Colombia.  
Cra. 30 No. 45-03, Edificio 453; E-mail: pfcardenash@unal.edu.co.**\*\*Universidad Politécnica de Madrid**, Madrid, España.  
Calle José Gutiérrez Abascal 2, 28006.**\*\*\*Universidad de Pamplona**, Pamplona, Colombia.  
Ciudadela Universitaria, E-mail: cesarapc@unipamplona.edu.co.**\*\*\*\*Universidad del Atlántico**, Barranquilla, Colombia.  
Km 7, Ant. via Pto. Colombia; E-mail: eyime@uniatlantico.edu.co.

**Abstract:** This paper presents a study of a teleoperation system with time delays in the communication channel, using several control techniques in order to confirm the most suitable. It explains the main advantages and disadvantages of techniques applied. It illustrates and analyzes the result set of several simulations varying the control parameters and introduced the delay in the canal communication.

**Keywords:** Teleoperation, Time Delay, Telerobotics.

**Resumen:** Este artículo presenta un estudio sobre un sistema de teleoperación con retardos en el canal de comunicaciones, utilizando diversas técnicas de control con fin corroborar la de mejor desempeño. Se explican las principales ventajas y desventajas de las técnicas aplicadas. Se ilustran y analizan los resultados de diversas simulaciones variando los parámetros de control e introduciendo retardo en el canal de comunicación.

**Palabras clave:** Teleoperación, Retardo de Tiempo, Telerobótica.

**1. INTRODUCCIÓN**

Los sistemas de teleoperación hoy en día juegan un papel crucial en el campo de robótica. El continuo y acelerado desarrollo de robots espaciales, robots submarinos, robots con aplicaciones medicas tales como el Da Vinci o robots encargados de realizar tareas en lugares que pueden ser perjudiciales para los humanos lo demuestra.

Uno de los principales retos que surgen en el diseño de sistemas de teleoperación es el retardo en la comunicaciones por esta razón en este artículo se

realiza un estudio comparativo de la aplicación de diversas técnicas de control, tales como el esquema fuerza posición, esquemas basados en modelos energéticos y variables de onda con el fin de evaluar la más idónea para un caso en particular. En (Hokayem y Spong 2006) se puede encontrar un estado del arte de las técnicas de teleoperación más representativas.

Las técnicas utilizadas en este trabajo son implementadas a nivel articular de tal forma que el control se realiza entre cada par de articulaciones maestro-esclavo originando un sistema desacopla-

do. Por esta razón estas técnicas pueden ser aplicada a cualquier sistema de teleoperación cuyos robots maestros y esclavos posean cinemáticas homotéticas.

## 2. GENERALIDADES DE UN SISTEMA TELEOPERADO

Un sistema telemanipulado está compuesto por un robot maestro, un robot esclavo un canal de comunicaciones y algunos dispositivos de realimentación (opcionalmente), ver Figura 1. El robot maestro funciona como dispositivo de entrada al captar la posición y/o la fuerza señalada por el operador. Este a su vez permite acutar como dispositivo de realimentación en caso el que refleje fuerzas al operador con el fin de emular el entorno remoto. Adicionalmente junto al robot maestro se suelen utilizar otros dispositivos de realimentación tales como pantallas, dispositivos de reflexión táctil, dispositivos de audio, etc. El robot esclavo es el dispositivo teleoperado que realiza las tareas en el entorno remoto. Este robot contiene una serie de sensores que le permiten captar la información relevante del entorno remoto y así enviarla al operador en la zona local.

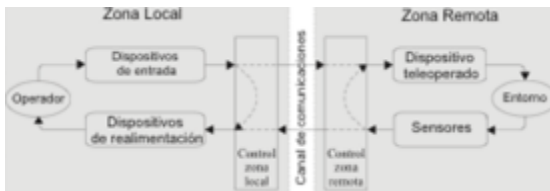


Fig. 1: Elementos básicos de un sistema de teleoperación

La descripción dinámica del maestro se observa en la ecuación (1) y la del esclavo en la ecuación (2).

$$M_m \ddot{x}_m(t) + B_m \dot{x}_m(t) + K_h x_m(t) = -K_f f_{op} + f_{md} \quad (1)$$

$$M_s \ddot{x}_s(t) + B_s \dot{x}_s(t) = f_s(t) \quad (2)$$

De las ecuaciones (1) y (2) se deduce que es un esquema de control fuerza posición, donde la interacción entre el maestro y el esclavo está regida por la ecuación.

$$\begin{aligned} f_s(t) &= K_h (x_m - x_s) \\ \tau_m(t) &= K_f f_s \end{aligned} \quad (3)$$

Donde:

- $M_m$  y  $M_s$  corresponden a la masa asociada a cada dispositivo.

- $B_m$  y  $B_s$  corresponden a los factores de amortiguamiento de cada dispositivo.
- $K_h$  representa el modelo del operador. Operador rígido.
- $K_f$  Representa el modelo del entorno. Entorno rígido.

Un ejemplo con valores dentro de los rangos típicos de un sistema de teleoperación (tanto del maestro como del esclavo), puede ser el descrito en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del modelo del sistema dinámico

	Maestro	Esclavo
$M_m$	1	$M_s$ 1
$B_m$	20	$B_s$ 20
$K_m$	1	$K_f$ 100
$K_h$	100	

En la Figura 2 se ilustra esquema de control bilateral fuerza-posición. Sus primeras investigaciones se realizaron en los años 60 por Carl Flautau del Brookhaven National Laboratory. En este esquema el esclavo posee un lazo de control que toma como referencia tanto la SRMFLyn del maestro como la del esclavo, sin embargo el lazo de control maestro toma como referencia la fuerza proveniente del sensor en el eje del esclavo. Generalmente esta señal de fuerza es atenuada para mantener o mejorar la estabilidad del conjunto.

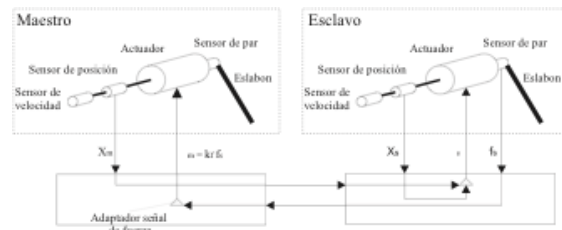


Fig. 2: Esquema de control bilateral fuerza-posición

En la figura 3 se representa gráficamente el esquema de control fuerza posición de sistema telerobótico descrito (1), (2) y (3), se hace uso de Simulink de Matlab.

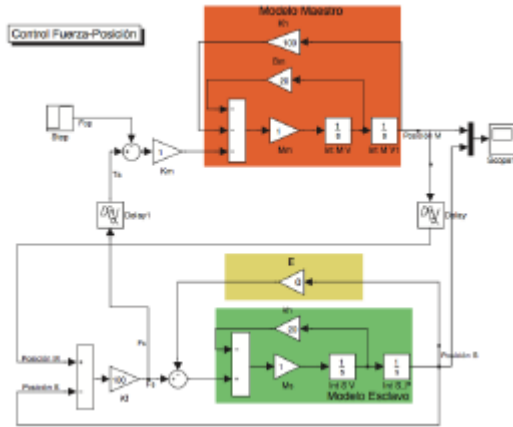


Fig. 3: Modelo maestro-esclavo en configuración fuerza posición

Los sistemas teleoperados reciben comandos provenientes de un operador humano el cual realiza tareas en una zona local originando que estas tareas se reproduzcan en un entorno remoto, por lo cual es preciso el envío de información del estado del robot ubicado en la zona remota y su entorno nuevamente al operador para cerrar el lazo de control del sistema teleoperado.

La zona local es donde se ubica el operador humano, quien controla la ejecución de las tareas de la zona remota. Esta zona dispone de un dispositivo de entrada, que le permite al operador describir o controlar las tareas o acciones de la zona remota. El dispositivo de entrada también debe permitir reflejar la información proveniente de la zona remota tal como la fuerza de interacción con el entorno y/o la posición, etc.

La información es enviada a través de canal de comunicación. Desde la zona local se transmiten comandos hacia la zona remota y la información de realimentación desde la zona remota a la zona local. El canal de comunicación puede ser modelado con o sin retardo, en el caso de utilizar retardo la estabilidad global del sistema se ve afectada (Hirche, 2006).

La zona remota está conformada por el dispositivo de salida (robot manipulador) y los sensores. El robot es el encargado de realizar la tarea y es controlado por el operador. Los sensores permiten conocer el estado del esclavo, del entorno y de la tarea realizada, con el fin de controlar el manipulador y brindar dicha información a la zona local para su respectivo control del robot maestro.

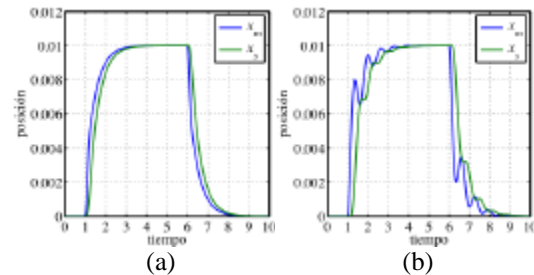


Fig. 4: Modelo del Maestro-Esclavo en configuración fuerza posición. (a) Respuesta de posición sin retardo. (b) Modelo del Maestro-Esclavo en configuración fuerza posición.

Con el objetivo de lograr un funcionamiento adecuado de los sistemas de teleoperación y mantener las condiciones de estabilidad del sistema varios autores han implementado diferentes esquemas de control como los que se muestra en (Hokayem y Spong, 2006).

Esquemas como reflexión de fuerzas (*Force Reflection*) se pueden observar en (Eusebi y Melchiorri, 1998) y (Kim, 1990). Técnicas basadas en la convergencia de estados como es el caso de (Azorin et al., 2007), (Barrio et al., 2006) y (Hirche et al., 2006). Técnicas de control que garantizan la estabilidad bajo condiciones de retardo en el canal de comunicaciones en (Ñuño E. 2008).

Para este análisis se toma un par de articulaciones, una del dispositivo maestro y otra el manipulador esclavo (un grado de libertad). En el esquema de control tradicional de reflexión de fuerza (RF), el esclavo contiene un lazo de control de posición, que toma como referencia la posición del maestro.

El objetivo del control por RF, es lograr que la posición del esclavo sea controlada por la fuerza ejercida por operador en el dispositivo maestro. La interacción con el entorno remoto se ve afectada por el error de la posición entre el maestro (deseada) y la lograda por el esclavo que interactúa con el entorno.

La fuerza ejercida por el manipulador al entorno o viceversa, depende del error de posición. Esta información es enviada al maestro, quien refleja la fuerza al operador en lazo abierto, como se observa en la figura (3).

Las variables transmitidas a través del canal de comunicación, que se han supuesto sin retardo, son la posición del maestro  $x_m$  (enviada), y la fuerza de interacción con el esclavo  $f_s$  (reflejada). Se aplica una señal de fuerza al modelo en  $t=1s$ . La respuesta

del esquema de control bilateral fuerza posición sin retardo se aprecia en la figura 4(a). Se observa como el esclavo sigue la posición dada como referencia por el maestro con un pequeño retardo. A los 4s se llega a un estado estable, y el esclavo llega a la posición deseada con un error despreciable.

En la figura 4(b) se aprecia la respuesta del sistema de teleoperación cuando se incluye un retardo de  $T=100\text{ms}$  en el canal de comunicaciones. Durante el transitorio se observan pequeñas oscilaciones tanto en la posición del maestro como del esclavo, el retardo en el seguimiento de la posición del maestro ha aumentado. Sin embargo luego del transitorio se logra la misma posición en los dos dispositivos.

Debe tenerse presente que incrementos muy altos del retardo en la comunicación ocasiona la inestabilidad del sistema como se vera más adelante. En estos casos se suele utilizar técnicas de control supervisado para evitar dichas inestabilidades (Sheridan 1992).

## 2. MODELO ENERGÉTICO DEL SISTEMA TELEOPERADO

La inclusión de retardos en el canal de comunicación puede ocasionar inestabilidad en los sistemas de teleoperación (Hirche et. al., 2006). La inestabilidad ocasiona oscilaciones cuando el esclavo se encuentra en contacto con superficies del entorno remoto. Por tal motivo se propone obtener un modelo de teleoperación donde la información que se envía y se refleja este asociada a fenómenos físicos, como en el caso de los circuitos eléctricos con el voltaje, la corriente y la potencia. Esto se logra a través de la teoría de modelos de dos puertos, donde se usan dos variables a cada lado de la red logrando hacer una representación del sistema. El esquema del modelo híbrido de dos canales se observa en la figura 5. En la figura se observa que es necesario reflejar la impedancia de entrada al sistema y la impedancia de salida. El modelo híbrido permite relacionar variables de flujo y de esfuerzo.

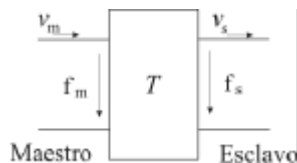


Fig. 5: Modelo de teleoperación Híbrido

En el modelo energético de teleoperación, es necesario tener la información que se envía a través del canal de comunicaciones en términos de variables de flujo y esfuerzo. Por consiguiente se modifica el sistema de teleoperación dado en la figura 3.

En la zona local se envía la velocidad del dispositivo de entrada y se refleja la fuerza de interacción del entorno remoto. En la zona remota se recibe la velocidad del maestro y se refleja la fuerza de interacción del esclavo con el entorno. La información transmitida a través del canal puede verse como la “energía mecánica del sistema”. Por consiguiente la información que se envía por el canal de comunicaciones es directamente transmitida, sin ningún tipo de procesado como se aprecia en en (4).

$$\begin{aligned} \tau_m(t) &= f_s(t - T) \\ v_s(t) &= v_m(t - T) \end{aligned} \quad (4)$$

En el caso de modelar los retardos (de por si inevitables en las comunicaciones) se originina inestabilidad, la cual es debida a que en cualquier instante de tiempo las variables de energía (fuerza y velocidad) en ambos puertos del canal de comunicaciones no son físicamente consistentes, porque se refieren a fenómenos físicos en instantes de tiempo distintos.

Por consiguiente la energía que está presente en la entrada del canal (zona local) no es la misma energía que esta presente en la salida (zona remota) en el mismo tiempo, haciendo que el canal almacene energía, y según la teoría de pasividad hace al sistema inestable.

En la figura 6 se observa el resultado de los ajustes realizados al modelo, para obtener un modelo energético del sistema, pero sin corregir los problemas de estabilidad ocasionados por el retraso en las comunicaciones.

En la figura 7 se observa la respuesta del sistema teleoperado para diferentes condiciones de retardo. Se presentan los resultados de la simulación con y sin retardo cuando se utiliza el modelo energético de sistemas de teleoperación.

En la figura 7(a) y 7(b) se observa la respuestas del sistema con retardo  $T=0$ . La posición del esclavo presenta un error en estado estacionario mientras la fuerza del maestro y del esclavo son las mismas.

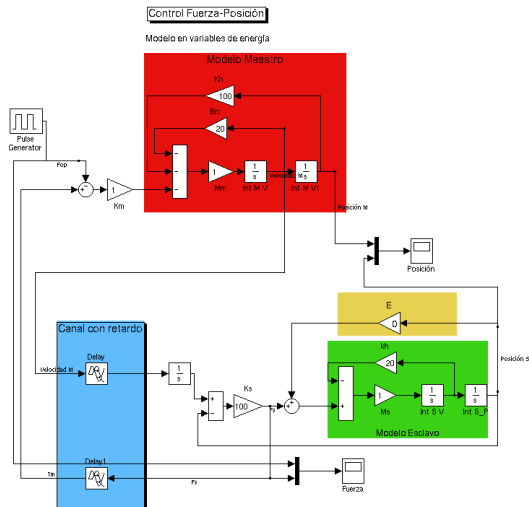


Fig. 6: Modelo de teleoperación con variables de energía y retardo en el canal de comunicación

En la figura 7(c) y 7(d) se observa la respuestas de la simulación del sistema cuando el canal de comunicación tiene un retardo de  $T=100\text{ms}$ . La posición del maestro y el esclavo presentan oscilaciones adicionales durante el transitorio. En estado estable el error de posición es cero. De igual forma la fuerza tanto de maestro como la del esclavo se encuentran superpuestas, pero presentan oscilaciones, aumentando el tiempo de establecimiento.

En la figura 7(e) y 7(f) se observa la respuesta de la simulación del sistema cuando el canal de comunicación cuando tiene un retardo de  $T=2\text{s}$ . La posición del esclavo esta esta retrasada de la posición deseada por el maestro, y luego de 3 segundos el esclavo logra llegar a la posición de referencia, nuevamente a los 6 segundos, existe otro cambio en la posición del maestro donde se aprecia el retardo en el esclavo.

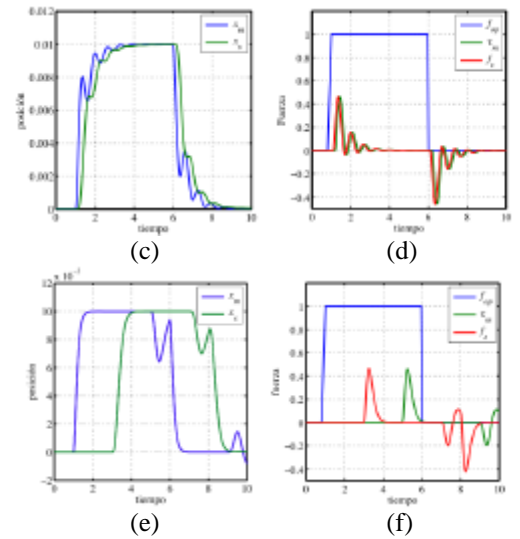
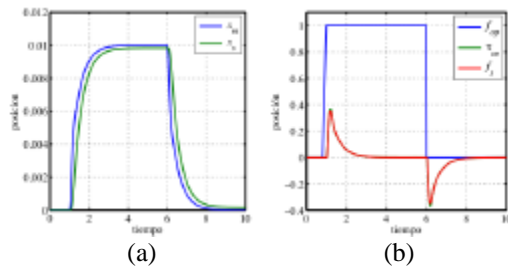


Fig. 7: Modelo energético del Maestro-Esclavo.  
(a) Respuesta de posición sin retardo. (b) Respuesta de fuerza sin retardo. (c) Respuesta de posición con retardo de 100ms. (d) Respuesta de fuerza con retardo de 100ms. (e) Respuesta de posición con retardo de 2s. (f) Respuesta de fuerza con retardo de 2 seg

La fuerza aplicada por el operador al dispositivo de entrada tarda 2 segundos en llegar al esclavo. La fuerza de interacción del esclavo con el entorno tarda dos segundos en ser reflejada al maestro. El tiempo total desde que el operador realiza una acción y percibe la reacción dada por la interacción del esclavo con el entorno remoto es de 4 segundos. El retraso en la comunicación ocasiona acciones correctivas por parte del operador que no son debidas a la ejecución de la tarea en el entorno remoto, y que por el contrario inducen oscilaciones en el sistema de teleoperación ocasionando la saturación del canal de comunicaciones.

### 3. MODELO BASADO EN VARIABLES DE ONDA

Es necesario garantizar la estabilidad del sistema de teleoperación y dado que la inestabilidad depende en gran medida de las características energéticas del canal de comunicación. Es necesario introducir el concepto de pasividad para garantizar la estabilidad del canal de comunicación y por ende la estabilidad global del sistema. Por lo tanto, el modelo energético de dos puertos no se comporta como un sistema pasivo y puede originar inestabilidades en el sistema global (Lee y Spang, 2006).



Al introducir la matriz de scattering, ésta permite conectar las variables de flujo y esfuerzo presentes en los extremos del puerto, como se observa en la figura 8. La matriz de scattering permite transformar las variables energéticas (f y v) en variables de onda. La transformación de variables energéticas en variables de onda se define en (5) y (6). De esta forma las variables de onda son transmitidas por el canal de comunicaciones en lugar de las variables de energía.

$$u_m = \frac{1}{\sqrt{2b}}(f_m + bv_m) \quad u_s = \frac{1}{\sqrt{2b}}(f_s - bv_s) \quad (5)$$

$$w_m = \frac{1}{\sqrt{2b}}(f_m - bv_m) \quad w_s = \frac{1}{\sqrt{2b}}(f_s + bv_s) \quad (6)$$

$u_m, u_s$  son las ondas de entrada y  $w_m, w_s$  la onda de salida.  $b$  es la impedancia característica del canal de comunicaciones. En términos de variables de onda, la pasividad basada en el canal de comunicaciones se describe en la ecuación (7). La transformación incluyendo el retardo se puede observar en la figura 8(a).

$$\tau_m(t) = bv_m(t) + \sqrt{2b}w_s(t) \quad (7)$$

$$v_s(t) = -\frac{1}{b}[f_s(t) - \sqrt{2b}u_s(t)] \quad (8)$$

Dado que se modifica la impedancia de entrada y de salida del canal, es necesario acoplar dichas impedancias. Por esta razón se utiliza la impedancia característica  $B$ , del canal de transmisión libre de pérdidas. En la ecuación (9) se describe la transformación.

$$v_m^*(t) = v_m(t) - \frac{1}{b}\tau_m \quad (9)$$

$$f_s^*(t) = f_s(t) + bv_s(t) \quad (10)$$

En la figura 8 se aprecia el esquema de transformación de las variables energéticas a las variables de onda. En la figura 8(a) se observa el modelo de adecuación sin compensación y en la figura 8(b) se realiza la compensación de la impedancia del sistema. El valor del parámetro  $b$  se asigna a prueba y error, de hay la dificultad para la adecuación y transformación de las señales energéticas en variables de onda.

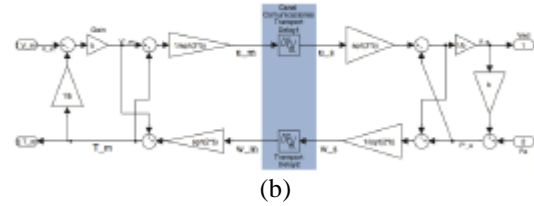
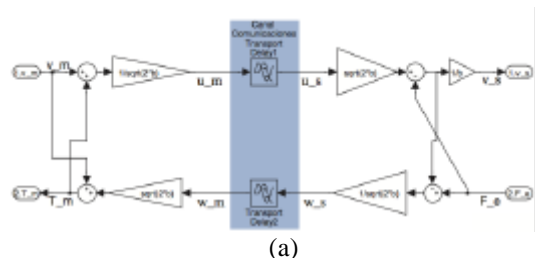


Fig. 8: Canal de comunicaciones basado en pasividad. (a) Sin compensación de impedancia. (b) Con compensación de impedancia.

En la figura 9 se presenta el esquema del sistema teleoperado con canal de comunicación pasivo y con adaptación de impedancia. El bloque canal pasivo dentro la figura 9 es un canal de comunicación donde se transforman las variables energéticas a variables de onda, con adaptación de impedancias y corresponde con el esquema de la figura 8(b).

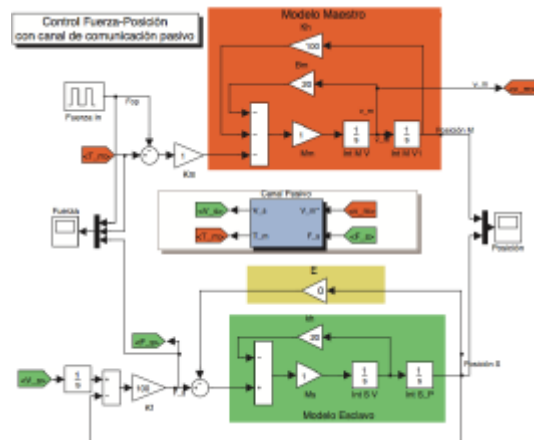


Fig. 9: Modelo del sistema de teleoperación con variables de onda

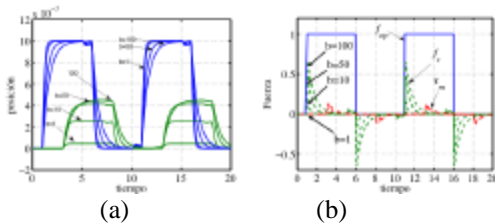


Fig. 10: Respuesta de sistema teleoperado ante variaciones de  $b$ . (a) Respuesta de posición con retardo de 2s. (b) Respuesta de fuerza con retardo de 2s.

La inserción de elementos de transformación modifica la red utilizada para controlar los dispositivos maestro y esclavo, aunque estén descritos en términos de variables de onda o variables energéticas. En especial se modifica las

características de estabilidad y transparencia. La transparencia se obtiene cuando las sensaciones que el operador percibe (por medio del maestro) son las mismas, como si él estuviera presente en el entorno remoto. La transparencia se logra si las propiedades mecánicas del entorno remoto son reflejadas exactamente al operador. Las propiedades mecánicas de un entorno pueden ser representadas por su impedancia mecánica  $Z$ , que relaciona la velocidad ( $v$ ) de contacto con la fuerza ( $f$ ) de interacción con el entorno, mediante:

$$f = Zv \quad (11)$$

En la figura 11 se aprecian los resultados de posición del maestro y del esclavo, la fuerza de entrada, la realizada por el esclavo y la reflejada al maestro. En la figura 10 se observa la respuesta de posición y fuerza para diferentes valores de  $b$ .

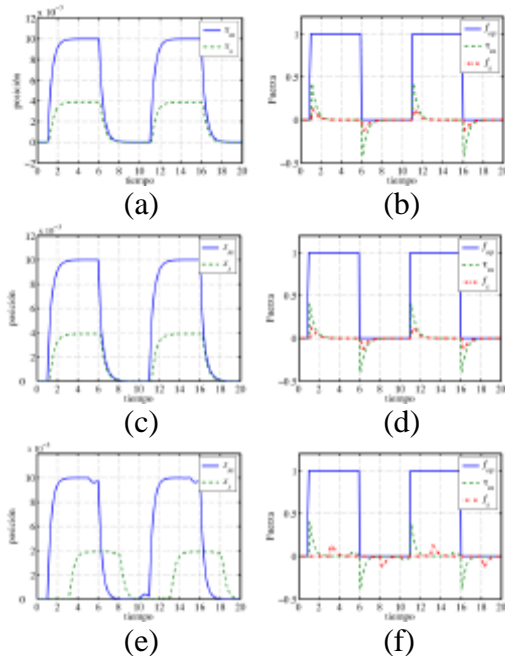


Fig. 11: Respuestas dinámica del sistema de teleoperación, con transmisión de variables de onda. (a) Respuesta de posición sin retardo. (b) Respuesta de fuerza sin retardo. (c) Respuesta de posición con retardo de 100ms. (d) Respuesta de fuerza con retardo de 100ms. (e) Respuesta de posición con retardo de 2s. (f) Respuesta de fuerza con retardo de 2s.

A medida que se disminuye  $b$  la respuesta de posición en el esclavo es mucho menor incrementándose el error en estado estacionario. Si se aumenta  $b$  se llega a un valor máximo de

respuesta en la posición de esclavo, pero la respuesta de posición del esclavo se hace mas lenta, por consiguiente la reflexión de fuerza al maestro.

Para las simulaciones realizadas donde se varia el retardo y se observa la estabilidad de la respuesta de posición y fuerza, se toma el acople de impedancias, igual a  $b=35$ . En las figuras 11(a), 11(c) y 11(e) se observa la respuesta de posición del maestro y el esclavo, con retardos de  $T=0$ , 100 ms, 2 s respectivamente. En ninguna de las respuestas de posición se observa oscilaciones, aunque se realice el incremento del retardo en la comunicación, en todas las respuestas se observa un error de estado estacionario.

En las figuras 11(b), 11(d) y 11(f) se observa las fuerzas de interacción del sistema teleoperado. En ninguna de las figuras se observan oscilaciones, aunque se realice el incremento del retardo en la transmisión de la información por el canal de comunicaciones.

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizaron diferentes simulaciones de un sistema teleoperado propuesto, bajo diferentes esquemas de control con el fin de analizar las ventajas y desventajas de los mismos.

El esquema de control fuerza posición, aunque es muy sencillo de aplicar tiene la desventaja de que se pueden presentar oscilaciones y por ende inestabilidad cuando existen retardos en el canal de comunicaciones. Por esta razón obligatoriamente se deben los realizar análisis de estabilidad pertinentes (referenciados previamente).

De igual forma los sistemas teleoperados basados en modelos energéticos pueden llegar a presentar inestabilidad según el retardo en las comunicaciones. Sin embargo al combinar los modelos energéticos con la transformación de scattering que permite convertir las variables energéticas en variables de ondas se logran sistemas estables.

La principal dificultad que presenta el modelo basado en variables de onda es la asignación a prueba y error de la impedancia del canal de comunicaciones, lo que afecta directamente la transparencia del sistema teleoperado.

## REFERENCIAS

- Hokayem P. F. y Spong M. W., (2006). , “*Bilateral teleoperation: An historical survey*” Automatica, Elsevier, Sciencedirect., vol. 42, no. 12, pp. 2035–2057, [Online]. Available: [www.elsevier.com/locate/automatica](http://www.elsevier.com/locate/automatica)
- Eusebiand L. y Melchiorri C, (1998) “*Force reflecting telemanipulators with time - delay: stability analysis and control design,*” Robotics and Automation, IEEE Transactions on, vol. 14, no. 4, pp. 635–640.
- Azorin J. M., Aracil R., Nicolas M. y Perez C., (2007) “Teleoperation Systems Through State Convergence”, Libro Advances in telerobotics, Volumen 31, pp. 271-288.
- Barrio J., Azorin J. M., Aracil, R, Ferre M., Sabater J. M. y Garcia N. M., (2006) “Experimental bilateral control by state convergence,” Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on, pp. 1127–1132.
- Nuño E. (2008), “*Nonlinear Bilateral Control of Teleoperators with Transmission Time-Delay*”. Tesis PhD. Universidad Politécnica de Cataluña.
- W. Kim, (1990) “Shared compliant control: a stability analysis and experiments,” Systems, Man and Cybernetics. Conference Proceedings., IEEE International Conference on, pp. 620–623.
- T. B. Sheridan (1992) “Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control”. MIT Press, Cambridge.
- Hirche S., Ferre M., Barrio J. and Melchiorri C.,(2006) *Bilateral control architectures for telerobotics*. Springer.
- Lee D. y Spong M., (2006) “*Passive bilateral teleoperation with constant time delay*” Robotics, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 22, no. 2, pp. 269–281.