

# Esquema Tipo-PD más Impedancia Modificado para Teleoperación Bilateral de un Robot Móvil considerando Retardos de Tiempo

Slawiński Emanuel<sup>1,3</sup>; Santiago Diego<sup>1</sup>; Chavez Danilo<sup>2</sup>; Mut Vicente<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CONICET, Argentina y Universidad Nacional de San Juan, Argentina

<sup>2</sup> Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Quito, Ecuador

<sup>3</sup> Investigador Prometeo de SENESCYT

**Resumen:** Este trabajo propone un esquema de control modificado, basado en una estructura tipo-PD más impedancia, aplicado a la teleoperación bilateral de un robot móvil considerando retardos de tiempo. El esquema es diseñado para obtener una relación de compromiso entre estabilidad y transparencia, analizando ambas características simultáneamente. El análisis correspondiente toma en cuenta las dinámicas del maestro y del robot móvil tanto como retardos variables y asimétricos. Finalmente, se muestran los resultados de pruebas de teleoperación bilateral realizados incluyendo el controlador propuesto de manera de verificar el resultado teórico alcanzado.

**Palabras clave:** teleoperación bilateral, retardo de tiempo, robot móvil, estabilidad, transparencia

## Modified PD-like plus Impedance Scheme for Delayed Bilateral Teleoperation of a Mobile Robot

**Abstract:** This paper proposes a modified PD-like plus impedance controller for delayed bilateral teleoperation of a mobile robot. The scheme is designed to get a trade-off between transparency and stability, analyzing both features simultaneously. The corresponding analysis takes into account the dynamics of the master and mobile robot as well as asymmetric time-varying delays. Finally, experimental results of a bilateral teleoperation including the proposed control scheme are shown in order to verify the achieved theoretical result.

**Keywords:** bilateral teleoperation, time delay, mobile robot, stability, transparency.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de teleoperación permiten realizar un trabajo físico a distancia, separando y aislando así al operador humano de tareas posiblemente peligrosas, nocivas o incluso imposibles de ejecutar por él. Dentro de estos sistemas, una clase que es de particular interés para la comunidad científica involucra a los sistemas de teleoperación bilateral de robots, donde un usuario genera comandos para manejar un robot localizado en un lugar remoto para ejecutar una tarea dada mientras recibe simultáneamente y permanentemente una realimentación de fuerza basada en la interacción robot - entorno remoto que aumenta el sentido de presencia en el sitio remoto al adicionar sentido táctil al usuario (Sheridan, 1992). Las aplicaciones para sistemas de teleoperación de robots son cada vez mayores, involucrando telemedicina, exploración, entretenimiento, tele-servicios, tele-manufactura, educación, entre otros. Sin embargo, la presencia de retardos de tiempo variables puede causar inestabilidad o en general un pobre desempeño en la ejecución de la tarea a través del uso del sistema de teleoperación (Richard, 2003; Hokayem y Spong,

2006) tanto como una inadecuada transparencia (Lawrence, 1993) lo cual afecta negativamente la percepción del operador humano acerca del trabajo físico que se realiza.

En la literatura, se encuentran muchos esquemas de control dirigidos a una teleoperación con retardo de tiempo usando dos robots manipuladores denominados maestro y esclavo (Hokayem y Spong, 2006; Varkonyi et al, 2014). En los últimos años, las investigaciones se han orientado al empleo de simple esquemas de control tipo Proporcional más amortiguamiento ya que se obtiene un funcionamiento estable incluyendo coordinación de posición. Además, se asegura estabilidad asintótica si un amortiguamiento (*damping*) suficientemente alto es inyectado en el maestro y esclavo considerando un comportamiento pasivo del operador humano. Es decir que una fricción viscosa alta permite compensar el efecto negativo causado por retardos constantes o variantes en el tiempo y asimétricos. Las contribuciones científicas se orientan al análisis de estabilidad, el cual da como resultado cómo se deben calibrar los parámetros de este tipo de controlador clásico para asegurar un comportamiento

danilo.chavez@epn.edu.ec

Recibido: 28/01/2016

Aceptado: 02/08/2016

Publicado: 20/01/2017

estable (Nuno et al, 2008; Ryu et al, 2010; Hua y Liu; 2010; Slawiński y Mut, 2014).

Por otro lado, el estado del arte para sistemas de teleoperación bilateral con retardo de robots móviles involucra diferentes estrategias (Ma y Schilling, 2007) donde la incompatibilidad entre el maestro (robot tipo manipulador) y el robot móvil causa un análisis diferente respecto a un sistema clásico de teleoperación tipo maestro-esclavo (ambos robots tipo manipulador). Los esquemas de control propuestos para teleoperación de robots móviles incluyen impedancia (Xu et al, 2009), control basado en un modelo del operador humano (Slawiński et al, 2007), control basado en pasividad (Lee y Spong, 2006; Lee y Xu, 2011; Van Quang et al, 2012), estructuras tipo-PD (Penizzotto et al 2014; Slawiński et al, 2016), entre otras. Sin embargo, la mayoría de los trabajos no analizan en forma explícita la transparencia del sistema. En general, los esquemas de control son diseñados de acuerdo a criterios de pasividad o estabilidad, mientras el nivel de transparencia solamente se menciona o se analiza en forma superficial. Es decir, comúnmente el diseño del controlador se basa exclusivamente en estabilidad descuidando otros aspectos tal como la transparencia, concepto fundamental el cual generalmente no es utilizado en la fase de diseño. Bajo este contexto, es recomendable que el diseño del controlador sea realizado considerando la estabilidad y transparencia simultáneamente a pesar que son características contrapuestas entre sí, es decir la mejora de una ocasiona el empeoramiento de la otra (Lawrence, 1993; Slawiński et al 2012A), de manera de obtener sistemas de teleoperación que obtengan un mejor desempeño en la práctica.

Este trabajo propone un esquema de control aplicado a un sistema de teleoperación bilateral de un robot móvil considerando los retardos de tiempo asimétricos y variantes en el tiempo adicionados por el canal de comunicación, dispuesto como nexo entre el sitio local y el sitio remoto. La propuesta incluye una estructura de control tipo-PD más un lazo externo de impedancia basado en una fuerza ficticia modificada de manera tal de mejorar el nivel de transparencia alcanzado por este típico y simple esquema de control. El esquema propuesto, a diferencia del funcionamiento alcanzado hasta el momento por este tipo de esquema, permite evitar y/o empujar objetos de forma natural de acuerdo a la decisión del operador humano sin el uso de conmutación. La estabilidad y la transparencia son analizadas como parte del proceso de diseño, considerando la presencia de retardos de tiempo asimétricos y variantes en el tiempo. Luego, para verificar el resultado teórico alcanzado, se realizan pruebas de teleoperación bilateral y se evalúan los resultados obtenidos.

El trabajo se organiza como sigue: la Sección 2 presenta el marco teórico, incluyendo en su subsección 2.A algunos aspectos preliminares tales como la notación empleada, modelos dinámicos del sistema, y las propiedades y suposiciones utilizadas. En 2.B, se propone un esquema de control para sistemas de teleoperación bilateral con retardo de tiempo asimétrico y variante en el tiempo aplicado a un robot móvil. Luego, en 2.C y 2.D se exponen tanto el análisis de estabilidad como el análisis de transparencia del sistema de teleoperación a lazo cerrado. La Sección 3 muestra resultados

de pruebas realizadas para verificar el resultado teórico alcanzado. Finalmente, en la Sección 4, se brindan las conclusiones de este trabajo.

## 2. MARCO TEÓRICO

La Figura 1 muestra un diagrama ilustrativo de un sistema de teleoperación bilateral de un robot móvil ideado en este trabajo para esquivar y/o empujar diferentes objetos localizados en un sitio remoto.

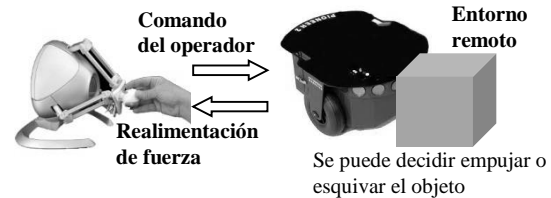


Figura 1. Diagrama simplificado de un sistema de teleoperación de un robot móvil.

### 2.A Modelos

A continuación, se describen la notación empleada, así como también los modelos, suposiciones y propiedades que serán usados en este trabajo.

En general, se utiliza una notación estándar en todo el documento. Esto es, si  $x$  es un escalar,  $\mathbf{w}$  un vector e  $\mathbf{Y}$  una matriz, entonces  $|x|$  representa el valor absoluto de  $x$ ,  $\mathbf{w}^T$  indica el transpuesto de  $\mathbf{w}$ ,  $\mathbf{Y}^T$  es la matriz transpuesta de  $\mathbf{Y}$ ,  $|\mathbf{x}|$  representa la norma Euclídea de  $\mathbf{x}$ ,  $|\mathbf{Y}|$  es la norma inducida de  $\mathbf{Y}$ ,  $\mathbf{Y} > 0$  e  $\mathbf{Y} < 0$  significa que  $\mathbf{Y}$  es definida positiva o definida negativa. Además,  $\|\mathbf{w}\|_1$ ,  $\|\mathbf{w}\|_2$  y  $\|\mathbf{w}\|_\infty$  representan las normas  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_\infty$  de  $\mathbf{w}$ , respectivamente. Respecto al dispositivo maestro, se utiliza el modelo dinámico no-lineal típico para representar el mismo, el cual es descrito en la Ecuación (1),

$$\mathbf{M}_m(\mathbf{q}_m)\ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{C}_m(\mathbf{q}_m, \dot{\mathbf{q}}_m)\dot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{g}_m(\mathbf{q}_m) = \boldsymbol{\tau}_m + \mathbf{f}_h \quad (1)$$

Donde  $\mathbf{q}_m(t) \in R^{n \times 1}$  es la posición articular del maestro;  $\dot{\mathbf{q}}_m(t)$  es el vector de velocidad articular;  $\mathbf{M}_m(\mathbf{q}_m) \in R^{n \times n}$  es la matriz de inercia;  $\mathbf{C}_m(\mathbf{q}_m, \dot{\mathbf{q}}_m)$  representa los pares producidos por fuerzas centrípetas y de Coriolis;  $\mathbf{g}_m(\mathbf{q}_m)$  es el par causado por la fuerza de la gravedad;  $\mathbf{f}_h$  es el par provocado por la fuerza ejercida por el operador humano y  $\boldsymbol{\tau}_m$  representa la acción de control aplicada al robot maestro.

En el caso del robot móvil, se considera el modelo dinámico tipo-uniciclo (dos ruedas traseras actuadas y una rueda delantera denominada loca que sirve para estabilidad mecánica), ver (Lee and Spong, 2006). Es decir, el robot posee tracción diferencial y es representado de la siguiente manera

en la Ecuación (2):

$$\mathbf{D}\dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{Q}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\tau}_s + \mathbf{f}_e \quad (2)$$

Donde  $\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$  es el vector de velocidad del robot móvil con  $v$  y  $\omega$  representando la velocidad lineal y angular del mismo,  $\mathbf{f}_e$  es la fuerza causada por los elementos del entorno del robot,

$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$  es la matriz de inercia y  $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0 & -ma\omega \\ ma\omega & 0 \end{bmatrix}$  es

la matriz de Coriolis donde  $m$  es la masa del robot móvil,  $i$  es la inercia rotacional, y  $a$  es la distancia entre el centro de masa del robot y el centro geométrico. La acción de control

$\boldsymbol{\tau}_s = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$  aplicada al robot móvil es compuesta por una fuerza

$u_1$  y un par  $u_2$ . Además, una señal  $\mathbf{z}$  es utilizada, la cual representa la aceleración del robot móvil  $\dot{\boldsymbol{\eta}}$  en un infinitesimal de tiempo antes que  $t$ , es decir cómo se muestra en la Ecuación (3):

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{z} + \gamma\dot{\mathbf{z}} \quad (3)$$

con  $\gamma \rightarrow 0^+$ . En la práctica  $\mathbf{z} \approx \dot{\boldsymbol{\eta}}$  ya que  $\mathbf{z}$  generalmente se obtiene de la salida de un observador que estima en línea  $\dot{\boldsymbol{\eta}}$  a partir de la información pasada y actual disponible, o también podría representar directamente la aceleración del robot medida con sensores inerciales.

Además, el canal de comunicación adiciona un retardo de tiempo de ida  $h_1$  (aplicado a los datos transmitidos desde el maestro hacia el esclavo) y un retardo de vuelta  $h_2$  (adicionado a los datos enviados desde el esclavo hacia el maestro). Generalmente, estos retardos son variantes en el tiempo y diferentes entre sí (retardos de tiempo asimétricos).

Por otro lado, las siguientes conocidas propiedades, suposiciones y lemas serán utilizados en este trabajo (Lee y Spong, 2006; Hua y Liu, 2010; Slawiński et al, 2016):

**Propiedad 1:** Las matrices de inercia  $\mathbf{M}_m(\mathbf{q}_m)$  y  $\mathbf{D}$  son simétricas definidas positivas. La matriz  $\mathbf{D}$  se considera constante.

**Propiedad 2:** La matriz  $\dot{\mathbf{M}}_m(\mathbf{q}_m) - 2\mathbf{C}_m(\mathbf{q}_m, \dot{\mathbf{q}}_m)$  es anti-simétrica.

**Suposición 1:** Los retardos de tiempo  $h_1(t)$  y  $h_2(t)$  son acotados. Por lo tanto, existen escalares positivos  $\bar{h}_1$  y  $\bar{h}_2$  tales que  $0 \leq h_1(t) \leq \bar{h}_1$  y  $0 \leq h_2(t) \leq \bar{h}_2$  para todo  $t$ .

**Lema 1:** Para funciones vectoriales  $\mathbf{a}(\cdot)$  y  $\mathbf{b}(\cdot)$ , y un escalar variante en el tiempo  $h(t)$  que cumple para todo tiempo que  $0 \leq h(t) \leq \bar{h}$ , la siguiente desigualdad es válida, Ecuación (4)

$$\begin{aligned} & -2\mathbf{a}^T(t) \int_{t-h(t)}^t \mathbf{b}(\xi) d\xi - \int_{t-h(t)}^t \mathbf{b}^T(\xi) \mathbf{b}(\xi) d\xi \\ & \leq h(t) \mathbf{a}^T(t) \mathbf{a}(t) \leq \bar{h}(t) \mathbf{a}^T(t) \mathbf{a}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

**Suposición 2:** El entorno remoto es descrito por la Ecuación (5):

$$\mathbf{f}_e = -\alpha_e \boldsymbol{\eta} + \mathbf{f}_{a_e} \quad (5)$$

Donde  $\alpha_e$  representa el coeficiente de amortiguamiento del entorno, y  $\mathbf{f}_{a_e}$  es una componente acotada (no pasiva)

$|\mathbf{f}_{a_e}| \leq \bar{f}_{a_e}$ , siendo  $\bar{f}_{a_e}$  un valor constante positivo.

**Suposición 3:** El comportamiento del usuario es representado por un modelo pasivo del operador humano más una perturbación, lo cual es descrito por la Ecuación (6):

$$\mathbf{f}_h = -\alpha_h \dot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{f}_{a_h} \quad (6)$$

Donde  $\alpha_h$  representa el coeficiente de fricción viscosa asociado al sistema neuro-muscular del operador humano, y

$\mathbf{f}_{a_h}$  es una componente acotada no pasiva que verifica

$|\mathbf{f}_{a_h}| \leq \bar{f}_{a_h}$  siendo  $\bar{f}_{a_h}$  un valor constante positivo.

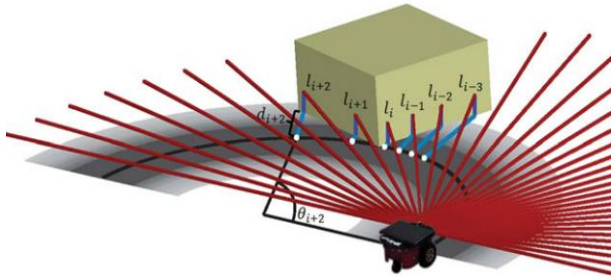
## 2.B Control basado en estabilidad y transparencia

Los controladores tipo-PD son simples estructuras que generalmente poseen un buen desempeño en la práctica para diversas aplicaciones. En el caso de sistemas de teleoperación, su aplicación obtiene un comportamiento estable tanto en sistemas de teleoperación de robots manipuladores (Nuno et al, 2008; Hua y Liu, 2010; Slawiński y Mut, 2014) como en teleoperación bilateral de robots móviles (ver Slawiński et al, 2016; y las referencias citadas en el mismo). Además, es conocido que la adición de un lazo externo de impedancia basada en fuerza real o virtual aumenta las prestaciones del esquema cuando existe interacción con objetos (Diolaiti y Melchiorri, 2002; Slawiński et al 2012B). En este trabajo, se propone modificar un esquema de control tipo-PD más impedancia de manera de mejorar el nivel de transparencia alcanzado y además evitar colisiones y/o empujar objetos sin emplear una estrategia de conmutación (en este caso implicaría activar o desactivar el control de impedancia). El esquema propuesto tiene como salidas las señales de control  $\boldsymbol{\tau}_m$  y  $\boldsymbol{\tau}_s$ , las cuales se calculan como sigue en la Ecuación (9):

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_m &= -k_m(k_g \mathbf{q}_m(t) - \boldsymbol{\eta}(t-h_2)) - \alpha_m \dot{\mathbf{q}}_m - k_p \mathbf{q}_m + \mathbf{g}_m(\mathbf{q}_m) \\ \boldsymbol{\tau}_s &= k_s(k_g \mathbf{q}_m(t-h_1) - \boldsymbol{\eta} + \Delta(\mathbf{f}_v)) - \sigma_s \mathbf{z} + \mathbf{Q}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\eta} \end{aligned} \quad (9)$$

Donde los parámetros  $k_s$  y  $\sigma_s$  son valores constantes positivos que representan una ganancia proporcional y un amortiguamiento dependiente de la aceleración adicionado por un controlador de velocidad tipo PD;  $\alpha_m, k_p$  son el coeficiente

de fricción viscosa y constante elástica inyectados en el robot maestro; y  $k_m$  representa una ganancia de escalado empleada para mapear la fuerza ejercida por el robot móvil hacia un rango de fuerza compatible con el dispositivo maestro. Por otra parte, el parámetro  $k_g$  mapea de forma lineal la posición del maestro hacia una referencia de velocidad del robot móvil y  $\Delta$  representa una función utilizada para evitar colisiones del robot móvil con eventuales obstáculos. Este último término depende de una fuerza ficticia virtual  $\mathbf{f}_v$  computada a partir de la interacción dinámica entre el robot y los objetos cercanos a él. La señal  $\mathbf{f}_v$  se calcula en línea basado en una predicción de movimiento del robot móvil más los datos proporcionados por un escáner láser 2D montado sobre el robot. Primero, se computa un camino 2D que se predice para el robot móvil considerando que  $v$  y  $\omega$  permanecen constantes. Luego, el escáner 2D obtiene  $n$  mediciones de distancia  $l_i$  entre el robot móvil y los obstáculos cercanos a él. Cada medida adquirida se asocia a una dirección  $i$  relativa a la posición y orientación actual del robot móvil. A partir de esto, se obtienen los puntos ( $o_i$ ) más cercanos a las posiciones  $l_i$  localizadas sobre el camino que se predice para el robot móvil. La distancia entre  $o_i$  y  $l_i$  es llamada  $d_i$ . Para cada  $o_i$ , se obtiene el ángulo  $\theta_i$  medido desde el punto central del camino tipo-circunferencia de radio  $r(t)$  definido por la velocidad actual del robot. A continuación, se calcula la distancia a lo largo del camino  $s_i = r(t)\theta_i$  desde la posición actual del robot móvil hasta  $o_i$ .



**Figura 2.** Fuerza virtual basada en un escáner 2D y una predicción del movimiento del robot móvil.

Por otro lado, se define un factor de peso  $p_i$  en función de  $d_i$ , en la Ecuación (7):

$$\begin{cases} p_i = 1 & \text{if } d_i \leq \frac{c}{2} \\ p_i = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{\delta}\left(d_i - \frac{c}{2}\right)\right) & \text{if } \frac{c}{2} < d_i < \delta + \frac{c}{2} \\ p_i = 0 & \text{if } d_i \geq \delta + \frac{c}{2} \end{cases} \quad (7)$$

donde  $c$  es el ancho del robot. Si  $d_i < \delta + \frac{c}{2}$ , se establece

$p_i = 1$  ya que en este caso el robot colisionaría con el obstáculo. En caso contrario, se disminuye  $p_i$  cada vez más a medida que los puntos se encuentran más lejos del camino.

Finalmente, el vector de fuerza virtual  $\mathbf{f}_v$  se define de acuerdo a  $p_i$  y  $s_i$  en la Ecuación (8):

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_v &= \boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\eta}(t) + \mathbf{d}(t) \\ \boldsymbol{\beta} &= \begin{bmatrix} \beta_v & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_v(t) \\ 0 \end{bmatrix} \\ d(t) &= \frac{k}{n} \sum_{i=1}^n p_i (s_{\max} - s_i) \geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

donde  $n$  es la cantidad de mediciones proporcionadas por el escáner láser 2D,  $s_i = r(t)\frac{\pi}{2}$ ,  $k > 0$  es una ganancia para escalar la fuerza virtual, y  $\beta > 0$  pondera la velocidad del robot móvil. Es importante remarcar que  $\mathbf{f}_v \geq \mathbf{0}$ .

Para tareas de navegación evitando a su vez posibles colisiones con obstáculos, una condición deseada relacionada a la percepción del usuario implica que la realimentación de fuerza ficticia  $\mathbf{f}_v(t-h_2)$  sea similar a la fuerza ficticia actual sobre el sitio remoto  $\mathbf{f}_v(t)$  y también es útil que la fuerza recibida por el usuario  $\mathbf{f}_v(t-h_2)$  sea similar a la fuerza  $\mathbf{f}_v(t-h_1-h_2)$  vinculada con el comando  $\mathbf{q}_m(t-h_1)$  que arriba al sitio remoto ya que dicha fuerza incluye los retardos de ida y vuelta adicionados por el canal de comunicación. Unificando ambas condiciones, es deseable obtener  $\mathbf{f}_v(t-h_1-h_2) = \mathbf{f}_v(t)$  para mejorar el nivel de percepción (transparencia bilateral) (Slawiński et al, 2012A). A partir de esto, se propone incluir en la Ecuación (9) el término de control de la Ecuación (10):

$$\Delta(\mathbf{f}_v) = k_c(t)(-\mathbf{f}_v(t) + \mathbf{f}_v(t-h_1-h_2)) \quad (10)$$

La última ecuación representa un controlador proporcional dependiendo del error de transparencia. El objetivo siguiente es analizar cómo  $k_c(t)$  debería ser establecido basado en un criterio dual tanto de estabilidad como de transparencia.

## 2.C Análisis de estabilidad

Para el análisis de estabilidad, se propone un funcional definido positivo de la forma  $V(\mathbf{q}_m, \dot{\mathbf{q}}_m, k_g \mathbf{q}_m - \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\eta}, \mathbf{z}) = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6$ . Se analizará su evolución a lo largo de las trayectorias del sistema de teleoperación con retardo con el objetivo de inferir el tipo de estabilidad que presenta el equilibrio de interés. Se asume que la condición inicial es finita. Luego, los primeros cinco sub-funcionales son propuestos en las Ecuaciones (11, 12, 13, 14 y 15):

$$V_1 = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{M}_m(\mathbf{q}_m) \dot{\mathbf{q}}_m \quad (11)$$

$$V_2 = \frac{1}{2} \frac{k_m}{k_g} (k_g \mathbf{q}_m - \boldsymbol{\eta})^T (k_g \mathbf{q}_m - \boldsymbol{\eta}) \quad (12)$$

$$\dot{V}_3 = \frac{1}{2} \alpha_e \frac{k_m}{k_s k_g} \boldsymbol{\eta}^T \boldsymbol{\eta} \quad (13)$$

$$\dot{V}_4 = \frac{1}{2} \gamma \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \mathbf{D} \mathbf{z} \quad (14)$$

$$\dot{V}_5 = \frac{1}{2} k_p \mathbf{q}_m^T \dot{\mathbf{q}}_m \quad (15)$$

La derivada de la Ecuación (11) a lo largo de la dinámica del maestro Ecuación (1), tomando en cuenta las propiedades 1 y 2, es lo descrito en la Ecuación (16):

$$\dot{V}_1 = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_m^T \dot{\mathbf{M}}_m \dot{\mathbf{q}}_m + \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{q}}_m = \dot{\mathbf{q}}_m^T (\boldsymbol{\tau}_m + \mathbf{f}_h - \mathbf{g}(\mathbf{q}_m)) \quad (16)$$

Luego, si se incluye en la Ecuación (16) la acción de control  $\boldsymbol{\tau}_m$  en la Ecuación (9) y el comportamiento del usuario  $\mathbf{f}_h$  en la Ecuación (6) considerando también la Ecuación (3),  $\dot{V}_1$  puede ser escrito como en la Ecuación (17),

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \dot{\mathbf{q}}_m^T (\boldsymbol{\tau}_m - \mathbf{g}_m(\mathbf{q}_m)) + \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{f}_h \\ &= \dot{\mathbf{q}}_m^T (-k_m(\mathbf{q}_m - \boldsymbol{\eta}(t - h_2)) - \alpha_m \dot{\mathbf{q}}_m - k_p \mathbf{q}_m) \\ &\quad + \dot{\mathbf{q}}_m^T (\mathbf{f}_{a_h} - \alpha_h \dot{\mathbf{q}}_m) \\ &= -(\alpha_m + \alpha_h) \dot{\mathbf{q}}_m^T \dot{\mathbf{q}}_m - k_m \dot{\mathbf{q}}_m^T (k_g \mathbf{q}_m - \boldsymbol{\eta}) - k_p \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{q}_m \\ &\quad - k_m \dot{\mathbf{q}}_m^T \int_{t-h_2}^t \mathbf{z}(\xi) d\xi - \gamma k_m \dot{\mathbf{q}}_m^T \int_{t-h_2}^t \dot{\mathbf{z}}(\xi) d\xi + \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{f}_{a_h} \end{aligned} \quad (17)$$

A continuación, se obtiene  $\dot{V}_2$  derivando la Ecuación (12) y considerando la relación de la Ecuación (3). Como resultado se obtiene la Ecuación (18):

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \frac{k_m}{k_g} (k_g \mathbf{q}_m - \boldsymbol{\eta})^T (k_g \dot{\mathbf{q}}_m - \dot{\boldsymbol{\eta}}) = k_m (k_g \mathbf{q}_m - \boldsymbol{\eta})^T \dot{\mathbf{q}}_m \\ &\quad - \frac{k_m}{k_g} (k_g \mathbf{q}_m - \boldsymbol{\eta})^T \mathbf{z} - \gamma \frac{k_m}{k_g} (k_g \mathbf{q}_m - \boldsymbol{\eta})^T \dot{\mathbf{z}} \end{aligned} \quad (18)$$

Ahora,  $\dot{V}_3$  se computa derivando la Ecuación (13) considerando nuevamente la Ecuación (3), de la siguiente manera Ecuación (19):

$$\dot{V}_3 = \alpha_e \frac{k_m}{k_s k_g} \boldsymbol{\eta}^T \dot{\boldsymbol{\eta}} = \alpha_e \frac{k_m}{k_s k_g} \boldsymbol{\eta}^T \mathbf{z} + \gamma \frac{\alpha_e k_m}{k_s k_g} \boldsymbol{\eta}^T \dot{\mathbf{z}} \quad (19)$$

Además,  $\dot{V}_4$  a lo largo de la dinámica del robot móvil de la Ecuación (2) puede ser escrita incluyendo  $\boldsymbol{\tau}_s$  en la Ecuación (9),  $\mathbf{f}_e$  en la Ecuación (5),  $\boldsymbol{\Delta}$  en la Ecuación (10) y  $\mathbf{f}_v$  en la Ecuación (8) en la derivada de las Ecuación (14), como sugiere en la Ecuación (20):

$$\dot{V}_4 = \gamma \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \mathbf{D} \dot{\mathbf{z}} = \gamma \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \mathbf{D} \left( \frac{\dot{\boldsymbol{\eta}}}{\gamma} - \frac{\mathbf{z}}{\gamma} \right)$$

$$\begin{aligned} &= -\sigma_s \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \mathbf{z} + \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \mathbf{f}_e \\ &\quad + \frac{k_m}{k_g} \mathbf{z}^T (k_g \mathbf{q}_m(t - h_1) - \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\Delta}) - \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \mathbf{D} \mathbf{z} \\ &= -\sigma_s \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \mathbf{z} + \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \mathbf{f}_e - \frac{k_m k_c(t)}{k_g} \mathbf{z}^T (\mathbf{f}_v - \mathbf{f}_v(t - h_1 - h_2)) \\ &\quad + \frac{k_m}{k_g} \mathbf{z}^T (k_g \mathbf{q}_m - \boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m + k_g \mathbf{q}_m(t - h_1)) - \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \mathbf{D} \mathbf{z} \\ &= -\sigma_s \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \mathbf{z} + \frac{k_m}{k_g} \mathbf{z}^T (k_g \mathbf{q}_m - \boldsymbol{\eta}) - \alpha_e \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \boldsymbol{\eta} \\ &\quad + \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \mathbf{f}_{a_e} - \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \mathbf{D} \mathbf{z} - k_m \mathbf{z}^T \int_{t-h_1}^t \dot{\mathbf{q}}_m(\xi) d\xi \\ &\quad - \frac{k_m k_c(t)}{k_g} \mathbf{z}^T \boldsymbol{\beta} (\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}(t - h_1 - h_2)) - \frac{k_m k_c}{k_g} \mathbf{z}^T (\mathbf{d} - \mathbf{d}(t - h_1 - h_2)) \\ &= -\sigma_s \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \mathbf{z} + \frac{k_m}{k_g} \mathbf{z}^T (k_g \mathbf{q}_m - \boldsymbol{\eta}) - \alpha_e \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \boldsymbol{\eta} \\ &\quad + \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \mathbf{f}_{a_e} - \frac{k_m}{k_s k_g} \mathbf{z}^T \mathbf{D} \mathbf{z} - k_m \mathbf{z}^T \int_{t-h_1}^t \dot{\mathbf{q}}_m(\xi) d\xi \\ &\quad - \frac{k_m k_c}{k_g} \mathbf{z}^T \boldsymbol{\beta} \int_{t-h_1-h_2}^t \mathbf{z}(\xi) d\xi - \gamma \frac{k_m k_c}{k_g} \mathbf{z}^T \boldsymbol{\beta} \int_{t-h_1-h_2}^t \dot{\mathbf{z}}(\xi) d\xi - \frac{\bar{d} k_m k_c}{k_g} \mathbf{z} \end{aligned} \quad (20)$$

Continuando con el desarrollo matemático, se obtiene  $\dot{V}_5$  a partir de la Ecuación (15) como sigue en la Ecuación (21),

$$\dot{V}_5 = k_p \mathbf{q}_m^T \dot{\mathbf{q}}_m \quad (21)$$

Es posible apreciar en las Ecuaciones (17) y (20) que el análisis de estabilidad se complica debido a que hay términos con variables que no dependen del tiempo actual  $t$  sino que dependen de un instante de tiempo pasado (señales con retardo de tiempo). Para resolver esto,  $V_6$  se propone como sigue en la Ecuación (22):

$$\begin{aligned} V_6 &= \int_{-h_2}^0 \int_{t+\theta}^t \mathbf{z}(\xi)^T \mathbf{z}(\xi) d\xi d\theta \\ &\quad + \int_{-h_1}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{\mathbf{q}}_m(\xi)^T \dot{\mathbf{q}}_m(\xi) d\xi d\theta \\ &\quad + \int_{-h_1-h_2}^0 \int_{t+\theta}^t \mathbf{z}(\xi)^T \mathbf{z}(\xi) d\xi d\theta \end{aligned} \quad (22)$$

A partir de la ecuación (22), y considerando la suposición 1,  $\dot{V}_6$  se puede expresar de la siguiente manera en la Ecuación (23):

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_6 &\leq \bar{h}_2 \mathbf{z}^T \mathbf{z} - \int_{t-h_2}^t \mathbf{z}^T(\xi) \mathbf{z}(\xi) d\xi \\
 &+ \bar{h}_1 \dot{\mathbf{q}}_m^T \dot{\mathbf{q}}_m - \int_{t-h_1}^t \dot{\mathbf{q}}_m^T(\xi) \dot{\mathbf{q}}_m(\xi) d\xi \\
 &+ (\bar{h}_1 + \bar{h}_2) \mathbf{z}^T \mathbf{z} - \int_{t-h_1-h_2}^t \mathbf{z}^T(\xi) \mathbf{z}(\xi) d\xi
 \end{aligned} \quad (23)$$

Ahora, los términos con integrales de la Ecuación (23) pueden ser vinculados por conveniencia con el cuarto término de la Ecuación (17), sexto término de la Ecuación (20) y el séptimo término de la Ecuación (20) usando Lema 1 en la Ecuación (4), lo cual da como resultado las siguientes desigualdades Ecuaciones (24, 25, 26):

$$\begin{aligned}
 &- \int_{t-h_2}^t \mathbf{z}^T(\xi) \mathbf{z}(\xi) d\xi - k_m \dot{\mathbf{q}}_m^T \int_{t-h_2}^t \mathbf{z}(\xi) d\xi \\
 &\leq \frac{1}{4} \bar{h}_2 k_m^2 \dot{\mathbf{q}}_m^T \dot{\mathbf{q}}_m
 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned}
 &- k_m \mathbf{z}^T \int_{t-h_1}^t \dot{\mathbf{q}}_m(\xi) d\xi - \int_{t-h_1}^t \dot{\mathbf{q}}_m^T(\xi) \dot{\mathbf{q}}_m(\xi) d\xi \\
 &\leq \frac{1}{4} \bar{h}_1 k_m^2 \mathbf{z}^T \mathbf{z}
 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned}
 &- k_c \frac{k_m}{k_g} \mathbf{z}^T \mathbf{p} \int_{t-h_1-h_2}^t \mathbf{z}(\xi) d\xi - \int_{t-h_1-h_2}^t \mathbf{z}^T(\xi) \mathbf{z}(\xi) d\xi \\
 &\leq \frac{1}{4} (\bar{h}_1 + \bar{h}_2) k_c^2 \beta_v^2 \frac{k_m^2}{k_g^2} \mathbf{z}^T \mathbf{z}
 \end{aligned} \quad (26)$$

De esta forma, los términos con integrales de  $\dot{V}$  son reemplazados por términos cuadráticos dependiendo de alguna de las variables de estado. Finalmente,  $\dot{V}$  puede ser construida y representada, uniendo las Ecuaciones (17-21) y (23) considerando las relaciones de las Ecuaciones (24-26) y despreciando los términos que incluyen  $\gamma$  (debido a que éste factor tiende a cero), como sigue en la Ecuación (27):

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3 + \dot{V}_4 + \dot{V}_5 + \dot{V}_6 \\
 &\leq \dot{\mathbf{q}}_m^T \left[ -(\alpha_m + \alpha_h) \mathbf{I} + \bar{h}_2 \mathbf{I} + \frac{1}{4} \bar{h}_2 k_m^2 \mathbf{I} \right] \dot{\mathbf{q}}_m \\
 &+ \mathbf{z}^T \left[ \frac{k_m}{k_s k_g} (-\sigma_s \mathbf{I} - \mathbf{D}) + (2\bar{h}_1 + \bar{h}_2) \mathbf{I} + \frac{1}{4} \bar{h}_1 k_m^2 \mathbf{I} \right. \\
 &\left. + \frac{1}{4} (\bar{h}_1 + \bar{h}_2) k_c^2 \beta_v^2 \frac{k_m^2}{k_g^2} \mathbf{I} \right] \mathbf{z} + \frac{k_m}{k_g} \left( \frac{\bar{f}_{a_e}}{k_s} + \bar{d} k_c \right) |\mathbf{z}| + \bar{f}_{a_h} |\dot{\mathbf{q}}_m|
 \end{aligned} \quad (27)$$

Si los dos primeros términos de la Ecuación (27) son definidos negativos (coeficientes de amortiguamientos  $\alpha_m$  y  $\sigma_s$  suficientemente altos), entonces el sistema de teleoperación

bilateral con retardo de tiempo es finalmente acotado y por lo tanto las variables  $\mathbf{q}_m, \dot{\mathbf{q}}_m, k_g \mathbf{q}_m - \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\eta}, \mathbf{z} \in L_\infty$ .

Observando la Ecuación (27), si  $k_c \rightarrow 0$  entonces la condición de estabilidad es mejor. Este resultado se debe a que la inclusión de un lazo externo de impedancia cambia la velocidad del robot móvil para evitar colisiones contra objetos pero con el costo de perder el sincronismo entre el maestro manejado por el usuario y el robot móvil.

## 2.D Análisis de transparencia

Si se asume que se tiene un muy buen controlador de movimiento para manejar la velocidad del robot móvil, entonces la velocidad actual del robot se puede considerar similar a su referencia.

Primero, si se utiliza un lazo externo de impedancia tradicional basado en fuerza ficticia, se tiene que el comando del usuario es modificado en el sitio remoto como sigue en la Ecuación (28):

$$k_g \mathbf{q}_m(t-h_1) - k_z \mathbf{f}_v(t) = \boldsymbol{\eta}(t) \quad (28)$$

Incluyendo la Ecuación (8) en la Ecuación (28), se tiene la Ecuación (29):

$$\frac{k_g \mathbf{q}_m(t-h_1)}{\left(\frac{1}{\beta} + k_z\right)} + \frac{d(t)}{\beta} = \mathbf{f}_v(t) \quad (29)$$

Si  $k_c \gg \frac{1}{\beta}$  en la Ecuación (29), se puede escribir la Ecuación (30) de la siguiente manera,

$$\frac{k_g \mathbf{q}_m(t-h_1)}{k_z} + \frac{d(t)}{k_z \beta} = \mathbf{f}_v(t) \quad (30)$$

De la Ecuación (30) se puede concluir que, si  $k_z \rightarrow \infty$  entonces  $\mathbf{f}_v(t) \rightarrow \mathbf{0}$

Por otro lado, si el esquema de control propuesto es aplicado, se puede escribir la siguiente expresión Ecuación (31):

$$k_g \mathbf{q}_m(t-h_1) + k_c (\mathbf{f}_v(t-h_1-h_2) - \mathbf{f}_v(t)) = \boldsymbol{\eta}(t) \quad (31)$$

Reemplazando la Ecuación (8) en la Ecuación (31), se tiene la Ecuación (32):

$$\frac{k_g \mathbf{q}_m(t-h_1)}{\left(\frac{1}{\beta} + k_c\right)} + \frac{k_c \mathbf{f}_v(t-h_1-h_2)}{\left(\frac{1}{\beta} + k_c\right)} + \frac{d(t)}{\left(\frac{1}{\beta} + k_c\right)} = \mathbf{f}_v(t) \quad (32)$$

Si  $k_c \gg \frac{1}{\beta}$ , la Ecuación (32) puede ser representada por la

Ecuación (33):

$$\frac{k_g \mathbf{q}_m(t-h_1)}{k_c} + \mathbf{f}_v(t-h_1-h_2) + \frac{d(t)}{k_c \beta} = \mathbf{f}_v(t) \quad (33)$$

Aún más, analizando la Ecuación (33), si  $k_c \rightarrow \infty$  entonces  $\mathbf{f}_v(t) \rightarrow \mathbf{f}_v(t-h_1-h_2)$ . Es decir, el esquema de control propuesto causa una disminución del error de transparencia, lo cual aumenta la percepción del operador humano sobre la tarea realizada a través del sistema de teleoperación.

### 2.E Diseño de $k_c(t)$

El criterio de diseño para establecer  $k_c(t)$  es obtener una relación de compromiso entre estabilidad ( $k_c \rightarrow 0$ ) y transparencia ( $k_c \rightarrow \infty$ ). Aún más,  $k_c(t)$  podría ser asignada en línea de acuerdo a la situación actual. Una simple alternativa es priorizar fuertemente el error de sincronismo (relacionado a estabilidad) estableciendo  $k_c(t) = 0$  cuando  $\mathbf{f}_v(t) < \mathbf{f}_v(t-h_1-h_2)$  ya que la situación asociada al comando del usuario ( $\mathbf{f}_v(t-h_1-h_2)$ ) es peor que la situación actual  $\mathbf{f}_v(t)$ . En cambio, si  $\mathbf{f}_v(t) \geq \mathbf{f}_v(t-h_1-h_2)$  entonces  $k_c(t)$  debería actuar para disminuir el error de transparencia al costo de momentáneamente perder el sincronismo entre el maestro y el robot móvil. En el último caso, se establece  $k_c(t) = k_h > 0$ . Como resultado se tiene una ganancia  $k_c(t)$  variante en el tiempo que permite asignar en línea una mayor prioridad a estabilidad o a transparencia según la situación actual.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, se prueba experimentalmente el esquema de control propuesto. En la prueba, un operador humano conduce un simulador 3D de un robot móvil a través de un dispositivo maestro de bajo costo modelo Novint Falcon que incluye realimentación de fuerza. El motor de la dinámica y colisión se simula utilizando el entorno de V-REP. La Figura 3 ilustra cómo se implementa el esquema de teleoperación vinculando MATLAB / SIMULINK y V-REP e introduciendo al operador humano en el lazo de control.

En las pruebas, el objetivo es evitar el objeto rojo y luego empujar el objeto azul hasta la zona marcada sobre el piso con color verde, lo cual se aprecia en el primer sub-imagen de la Figura 4. Los retardos de tiempo se establecen arbitrariamente en  $h_1(t) = 0.5 + 0.2 \sin(0.1\pi t)$  y  $h_2(t) = 0.5 + 0.1 \cos(0.2\pi t)$ .

Por otro lado, los parámetros del robot móvil se establecen para emular un robot móvil Pioneer modelo P3dx mientras que los parámetros de ganancias del controlador  $k_m, k_g, k_p, k_s$  se calibran por prueba y error para el caso sin retardo manteniendo nulos los coeficientes de amortiguamientos  $\alpha_m, \sigma_s$ .

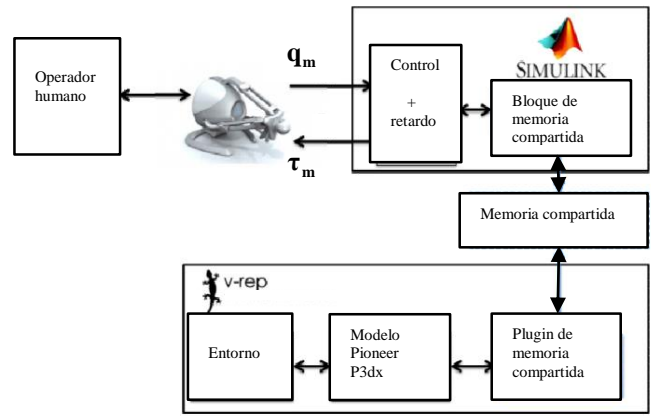


Figura 3. Implementación del esquema de control.

Luego, de este proceso de calibración, se ajustan dichos coeficientes de forma de mantener negativos los términos cuadráticos de la Ecuación (27) considerando  $k_c = 0$ . Una fricción viscosa controlada de acuerdo al análisis teórico realizado, permite quitar suficiente energía cinética del sistema con el objeto de lograr un funcionamiento estable. Finalmente, la ganancia  $k_h$  de  $k_c(t)$  se calibra para obtener una adecuada relación de compromiso entre estabilidad y transparencia para la tarea que se ejecuta.

Respecto a los resultados experimentales alcanzados, se destaca que la tarea se realiza satisfactoriamente a pesar de la presencia de retardo variable en el tiempo, como se muestra en la secuencia de imágenes montadas en la Figura 4, cuyo experimento se puede ver a través del enlace siguiente: <https://youtu.be/inQuntZYLlc>

La Figura 5 muestra las componentes asociadas a la velocidad lineal de las señales  $\Delta(t), k_g \mathbf{q}_m(t) - \boldsymbol{\eta}(t)$  y  $\mathbf{f}_v(t) - \mathbf{f}_v(t-h_1-h_2)$ . Se puede apreciar que el error de transparencia y el error de sincronismo (estabilidad) se mantienen acotados, lo cual está en concordancia con el resultado teórico alcanzado. Además, se remarca que se evita la conmutación que debe utilizarse en el caso de usar una impedancia  $k_z$  ya que algunos objetos son esquivados y otros empujados.

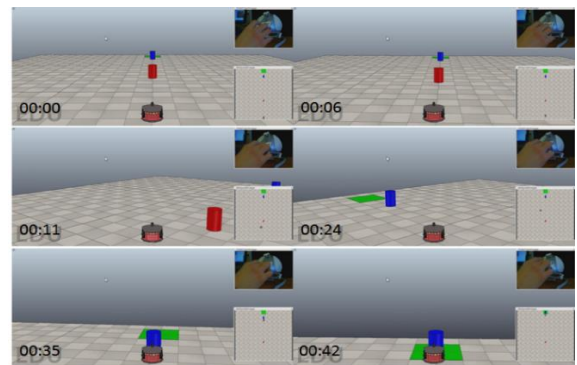
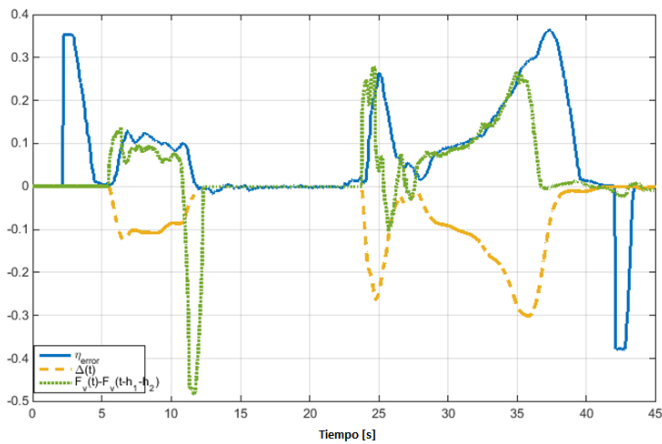


Figura 4. Secuencia de imágenes captadas del experimento de teleoperación realizado.



**Figura 5.** Evolución del error de sincronismo (estabilidad) y del error de transparencia

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se propone un esquema de control aplicado a un sistema de teleoperación bilateral de un robot móvil incluyendo retardos de tiempo asimétricos y variantes en el tiempo. El criterio de diseño presentado y aplicado obtiene como resultado una relación de compromiso entre estabilidad y transparencia, aprovechando las características de cada propiedad dependiendo de la situación actual. Además, la estrategia presentada permite evitar o empujar un objeto dispuesto sobre el sitio remoto por medio del sistema de teleoperación bilateral, donde el usuario puede elegir en línea cual acción tomar. También se muestran resultados de simulaciones con el operador en el lazo, es decir no se simula el usuario. En estas pruebas, se evalúan simultáneamente tanto el error de sincronismo (estabilidad) entre el maestro y el robot móvil como el error de transparencia. Finalmente, se remarca la necesidad de idear y diseñar esquemas de control no solamente basados en el criterio de estabilidad sino también integrando otros conceptos fundamentales de HRI (interacción hombre-robot) en el diseño tales como transparencia y factores humanos.

#### AGRADECIMIENTO

Emanuel Slawiński agradece al proyecto PROMETEO de SENESCYT, Ecuador, y a CONICET de Argentina por su apoyo en este trabajo científico de cooperación.

#### REFERENCIAS

- Diolaiti N. and C. Melchiorri "Haptic teleoperation of a mobile robot," In Proc. of the 7th IFAC SYROCO, pp. 2798-2805, 2003.
- Hokayem P.F. and M.W. Spong. "Bilateral: an historical survey". *Automatica*, 42: 2035-2057, (2006).

- Hua Chang-Chun; Liu, X.P.; "Delay-Dependent Stability Criteria of Teleoperation Systems with Asymmetric Time-Varying Delays," *Robotics, IEEE Trans*, vol.26, no.5, pp.925-932, Oct. 2010.
- Lawrence D.A., "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 9, pp. 624-637, Oct. 1993.
- Lee D. and M. Spong, "Passive bilateral teleoperation with constant time delay" *IEEE Trans. Robot.*, vol. 22, no. 2, pp. 269-281, Apr. 2006.
- Lee D.; D. Xu; "Feedback r-passivity of Lagrangian systems for mobile robot teleoperation", *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, vol., no., pp.2118-2123, 9-13 May 2011.
- Ma L. and K. Schilling, "Survey on bilateral teleoperation of mobile robots," in *Proceedings of the 13th IASTED International Conference on Robotics and Applications*, (Wurzberg, Germany), pp. 489-494, August 2007.
- Nuno E., R. Ortega, N. Barabanov, and L. Basanez, "A globally stable PD controller for bilateral teleoperators", *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 22, no. 3, pp. 753-758, (2008).
- Penizzotto, F.; Slawinski, E.; Mut, V., "Analysis and Experimentation of a Mobile Robot Teleoperation System over Internet," *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, vol.12, no.7, pp.1191,1198, Oct. 2014.
- Richard J.P., *Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems*. *Automatica* 39, pp. 1667-1694 (2003).
- Ryu J.H., J. Artigas, C. Preusche, A passive bilateral control scheme for a teleoperator with time varying communication delay, *Mechatronics*, vol. 20, No. 7, pp. 812823, 2010.
- Sheridan T.B., *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. The MIT Press, Cambridge, MA (1992).
- Slawinski E., V. Mut and J.F. Postigo, "Teleoperation of mobile robots with time-varying delay", *IEEE Trans. on Robotics* 23(5):1071-1082, (2007).
- Slawiński E., V. Mut, P. Fiorini and L. Salinas, "Quantitative Absolute Transparency for Bilateral Teleoperation of Mobile Robots," *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, vol.42, no.2, pp.430-442, March 2012A
- Slawiński E., V. Mut, L. Salinas and S. García (2012B). Teleoperation of a mobile robot with time-varying delay and force feedback. *Robotica*, 30, pp 67-77.
- Slawiński, E. and Mut, V., "PD-like controllers for delayed bilateral teleoperation of manipulators robots", *Int. J. Robust Nonlinear Control*, Article first published online: 4 April 2014, DOI: 10.1002/mc.3177.
- Slawiński E., V. Mut, and D. Santiago (2016). PD-like controller for delayed bilateral teleoperation of wheeled robots. *International Journal of Control*, DOI: 10.1080/00207179.2016.1144234.
- Van Quang H.; Farkhatdinov, I.; Jee-Hwan Ryu, "Passivity of delayed bilateral teleoperation of mobile robots with ambiguous causalities: Time Domain Passivity Approach," *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, vol., no., pp.2635,2640, 7-12 Oct. 2012.
- Varkonyi, T.A.; Rudas, I.J.; Pausits, P.; Haidegger, T., "Survey on the control of time delay teleoperation systems," *Intelligent Engineering Systems (INES), 2014 18th International Conference on*, vol., no., pp.89,94, 3-5 July 2014.
- Xu Z., Ma L, Schilling K. "Passive bilateral teleoperation of a car-like mobile robot". In: *Proceedings of 17th mediterranean conference on control & automation*; 2009. p. 790-6.





Emanuel Slawiński nació en Comodoro Rivadavia Chubut, Argentina en 1975. Él realizó sus estudios de grado y postgrado en la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) en Argentina, en el año 2001 y 2006 respectivamente. Actualmente es profesor asociado en la carrera Ingeniería Electrónica de

la UNSJ en las materias Robótica y Sistemas para Control. Además, es profesor en el programa de postgrado en la materia Control de Robots. Desde el año 2008, él es investigador científico del Consejo Nacional de Ciencia y Técnica CONICET de Argentina. Sus áreas de trabajo incluyen robótica, teleoperación de robots a distancia, interacción hombre-robot, desarrollo de software, sistemas sensoriales y dispositivos haptic.



Diego D. Santiago nació en San Juan, Argentina en 1988. En 2012 se graduó de Ingeniero electrónico en la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), San Juan, Argentina. Actualmente es profesor de la UNSJ y realiza tareas de investigación en el

marco del Doctorado de sistemas de control de la UNSJ y para el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Sus área de investigación es la robótica móvil, Telerobótica, interacción humano robot y desarrollo de software.



Danilo Chavez, Nació en Quito el 1 de abril de 1977. Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el grado de Ingeniero en Electrónica y Control en el año 2001. Obtuvo el grado de Master en Domótica en la Universidad Politécnica de Madrid-España en el año 2007, el grado de Doctor en ingeniería de Sistemas de Control

Automático en la Universidad Nacional de San Juan - Argentina en el 2012. Actualmente se desempeña como docente a tiempo completo en el Departamento de Automatización y Control Industrial tanto a nivel de pregrado como de postgrado, trabajando también en proyectos de investigación como colaborador y como director. Áreas de Interés: Sistemas Hombre - Maquina, Robotica, Sistemas de Control, Innovacion



Vicente A. Mut nació en San Juan, Argentina el 1 de diciembre de 1962. Se graduó con diploma de honor al mejor promedio como Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional de San Juan en 1987. Entre 1990 y 1995 desarrolló su doctorado en Ingeniería de Sistemas de Control en la Universidad Nacional de San Juan,

Argentina con una tesis sobre control de robots con movimiento restringido. Actualmente es Profesor Titular en la Universidad Nacional de San Juan, desarrollando actividades de investigación y de docencia de posgrado en el Instituto de Automática y de docencia de grado en el Departamento de Electrónica y Automática. Además es investigador Independiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) de Argentina. Ha sido calificado como Investigador Categoría I por Ministerio de Educación de la República Argentina. Su área de interés el control y teleoperación de robots manipuladores y móviles, donde posee numerosas publicaciones en revistas y congresos nacionales e internacionales con referato.