

## **Tema A3b Mecanismos y Robótica: Teleoperación en robótica**

### **“Teleoperación aplicada a transporte de materiales, utilizando un pantógrafo y un manipulador vía Wi-Fi”**

***Dr. Víctor Javier González Villela<sup>a\*</sup>, Ing. Daniel Haro Mendoza<sup>a</sup>, Gael Pineda Martínez<sup>a</sup>***

*<sup>a</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecatrónica, Av. Universidad #3000, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, México*

*\*Autor contacto. Dirección de correo electrónico: vjgv@unam.mx*

---

#### **RESUMEN**

El transporte de materiales constituye gran parte de las actividades que se llevan a cabo en la industria, así como en la vida cotidiana de cualquier persona. Aprovechando las cualidades intrínsecas de los seres humanos para transportar materiales, se aplica el paradigma de teleoperación para controlar un manipulador robótico. Siendo su principal fin, el de controlar un elemento a distancia ubicado en un ambiente inaccesible. Con base en lo anterior, el transporte de materiales peligrosos o dañinos para el ser humano disminuye la probabilidad de accidentes, dado que las tareas de manipulación se llevan a cabo en un ambiente controlado. En este documento se desarrolla el concepto de la teleoperación para traslado de materiales, usando un pantógrafo instrumentado electrónicamente con 5 grados de libertad (GDL) para controlar un manipulador robótico de 5 GDL y realizar tareas de traslado de materiales de un punto a otro.

#### **ABSTRACT**

The transport of materials is a large part of the activities that take place in the industry, as well as in the daily life of any person. Taking advantage of the intrinsic qualities of human beings to transport materials, the teleoperation paradigm is applied to control a robotic manipulator. The main objective is the control of a remote element located in an inaccessible environment. Based on the above, the transport of hazardous or harmful materials to humans, the probability of accidents, the management tasks are carried out in a controlled environment. In this document, the concept of teleoperation for the transfer of materials is developed, using an electronically instrumented pantograph with 5 degrees of freedom (GDL) to control a robotic manipulator of 5 GDL and perform tasks of moving materials from one point to another.

---

#### **1. Introducción**

En el Mechatronics Research Group de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se está estudiando la Robótica intuitiva, adaptable, reactiva, híbrida y móvil aplicada al servicio, al rescate y a la medicina. En este documento se presenta el trabajo desarrollado para el transporte de materiales en Robótica teleoperada.

Dado el prefijo “tele” proveniente del griego y con significado: a distancia. La palabra teleoperación alude a la acción de controlar u operar a distancia. En el presente trabajo la teleoperación se usa como herramienta para el estudio de transporte de materiales, teniendo como base experimental un pantógrafo instrumentado (maestro) con 5

grados de libertad, y un manipulador robótico (esclavo) de igual grados de libertad. En las siguientes secciones se abundará más acerca de estos temas mencionados.

Se está proyectando que el valor de este trabajo se potencialice aplicándose en la Industria 4.0, que actualmente se encuentra en desarrollo por grandes compañías internacionales. Las principales áreas de investigación donde trascenderá este artículo son a grandes rasgos dos: Robótica colaborativa e Intuitiva, esto implica que el robot estará dotado de modelos reactivos, así como planeados que permitirán que éste tome decisiones propias.

### 1.1. Teleoperación

Como ya se mencionó con anterioridad la palabra teleoperación significa: controlar a distancia. Según Thomas B. Sheridan, quien dice que la teleoperación es “la extensión de los sentidos humanos y sus habilidades de manipulación hacia una ubicación remota acoplados a sensores y actuadores artificiales” [1, 2]. Para el estudio que se está realizando, el sistema teleoperado consta de 3 partes principales, como se puede observar en la figura 1:

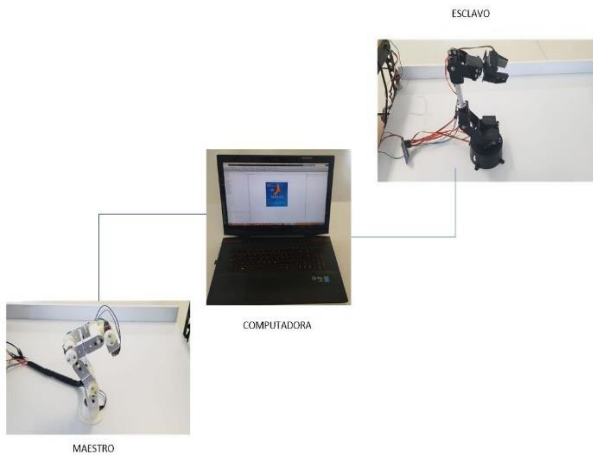


Imagen 1. Partes de las que consta un sistema de teleoperación:  
1.- Maestro, 2.- Computadora y 3.- Esclavo

Un sistema general de teleoperación está constituido por un maestro, un esclavo y una computadora. El usuario u operador del sistema es el que controla directamente al maestro, adquiriendo por medio de sensores características del movimiento que está realizando el operador. Dichas características van desde: velocidad, aceleración, posición, orientación, fuerza, etc. Una vez capturadas estas características se transforman en información computacional que se convierten en la entrada de la siguiente etapa. El procesamiento lógico-matemático, implementado en una computadora, como salida de esta etapa se tiene información computacional alterada de tal forma para realizar una tarea muy específica. Esta información se vuelve a transformar en energía por la última etapa, que es el esclavo, para llevar a cabo la tarea por la que fue diseñado, la imagen 2 muestra gráficamente el procedimiento explicado anteriormente, donde se ve el flujo de energía y de información que se lleva a cabo en un sistema de teleoperación.

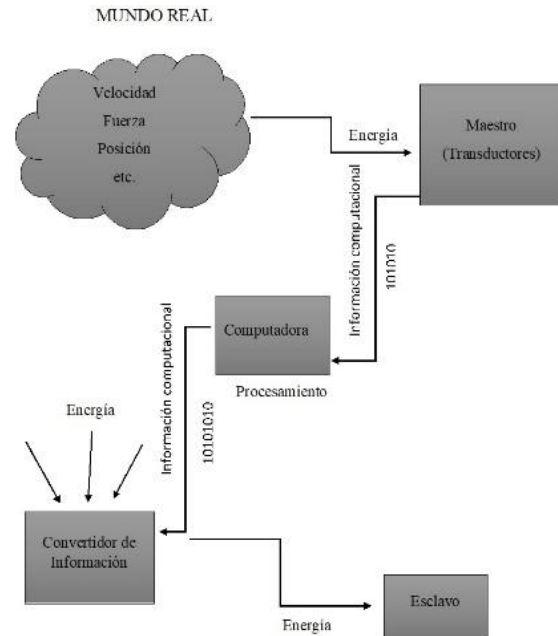


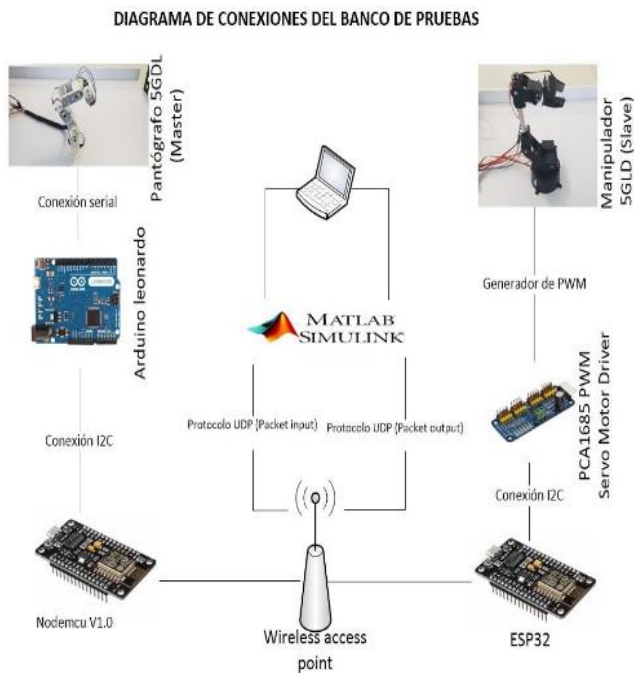
Imagen 2. Diagrama de flujo de información y energía para el sistema de teleoperación

Una implementación del sistema descrito en el anterior párrafo la propone I. Aliaga en [3], donde propone un robot maestro conducido directamente por el operador desde su lugar de trabajo, mientras que el robot esclavo es aquel que está ubicado en el entorno remoto, listo para seguir cualquier trayectoria que el operador ordene por el movimiento del robot maestro.

Dentro de la teleoperación se tienen 2 clasificaciones o niveles de teleoperación, éstos fueron presentados por Thomas B. Sheridan en [1, 2]. El primero es **sin autonomía** y el segundo **semiautonomía**. Y dentro de cada categoría existen otras dos divisiones, el esquema completo queda:

- Teleoperación directa (sin autonomía): es donde los movimientos del maestro son copiados exactamente por el esclavo, sin ningún tipo de procesamiento computacional.
- Teleoperación directa computarizada (sin autonomía): Se presenta un procesamiento matemático en un computador.
- Teleoperación con control compartido (semiautonomía): Este tipo conmuta entre la directa y la computarizada.
- Teleoperación con control supervisor (semiautonomía): La parte del maestro genera comandos de alto nivel que son interpretados y procesados por el esclavo.

Los dos últimos requieren de un cierto grado de autonomía, como su nombre lo refiere. Ya que el sistema esclavo debe de ser capaz de tomar decisiones con base en estímulos o condiciones particulares del entorno en el que vive. Dichas acciones “autónomas” se consideran reactivas, si ningún estímulo externo aparece, el esclavo seguirá con la tarea planeada que se tiene para él.



**Imagen 3.** Esquema del sistema completo del banco de pruebas, se observa el maestro, computadora y el esclavo. Los 3 elementos conectados vía inalámbrica e independiente.

Dentro del Mechatronics Research Group se están analizando, modelando e implementando los comportamientos reactivos, para dotarle al esclavo de cierto nivel de autonomía. Esto, tiene como fin y medio dotar a robots (no sólo en teleoperación) de algoritmos de **intuición artificial y de adaptabilidad**. Específicamente los algoritmos de intuición artificial se están aplicando a la teleoperación para ambos fines: 1) Captar, y así poder modelar la intuición artificial y 2) Desarrollar robots esclavos, que puedan ejecutar tareas de alto nivel de precisión y puedan tomar decisiones intuitivas. Logrando con esto, que la tarea que realiza sea más eficiente.

Para Carolina Passenberg, utilizando teleoperación y también para tareas de transporte, el objetivo más importante es garantizar la estabilidad al realizar movimientos en entornos altamente restringidos [4], esto último nos abre el panorama para definir las implicaciones que se tienen en el transporte de materiales.

### 1.2. Transporte de materiales

La manipulación de materiales es transportar un objeto de un punto a otro con cierta orientación y posición.

La cual se compone de 5 elementos, que son: sujeción, traslado, evasión (se puede llegar a prescindir de esta), orientación y el material en cuestión. Por lo cual tenemos que las 4 primeras representan el orden en el que comúnmente se manipula un material.

Los materiales se pueden clasificar en dos grandes grupos, regulares e irregulares. Los regulares suelen tener formas cúbicas, cilíndricas y esféricas.

**Sujeción.** La sujeción de un objeto depende de diversos factores como son las propiedades del material y la geometría. En consecuencia, el efector final del robot estará en función del objeto, además que los algoritmos de sujeción son específicos para la tarea a realizar. Aunque la liberación podría entenderse como el evento inverso de la sujeción, en ocasiones, una posición de sujeción requiere que el material sea sujetado, se libere y se sujete de nuevo [5].

**Orientación.** La orientación del efector final está disponible cuando el robot posee los grados de libertad necesarios para tal propósito. Además, hay que distinguir a la orientación del objeto que es el resultado de la orientación del efector final, sumada a la orientación en que fue sujetado el objeto. Convirtiendo a la orientación en una parte de la tarea altamente específica a la necesidad que se está resolviendo en ese instante. En general, debido a la incertidumbre de estos sistemas, comandos de movimiento simples no son suficientes; en su lugar, puede ser necesaria una estrategia de movimiento que incluya varios comandos de movimiento que usen información sensorial de entrada. Tanto la orientación como la posición del efector final y el objeto deben ser seleccionadas, además una trayectoria dirigida a la posición, debe ser generada. La posición debe ser accesible, debe ser estable y robusta para resistir algunas fuerzas externas [5].

**Traslado.** Es el movimiento descrito por el efector final durante un cambio de posición sin tomar en cuenta su orientación, ni otras fracciones de la tarea de manipulación, y se compone de tres elementos de movimiento en el espacio, siendo los tres ejes de posición: x, y, z. El traslado puede estar contenido en cada uno de estos ejes independientemente (x, y, z) o una combinación de ellos (xy, xz, yz, xyz). El traslado requiere de dos especificaciones: a) los puntos en el espacio por los que pasará (Lugar Geométrico) y b) la información de velocidad y aceleración que se debe cumplir. El traslado se manifiesta en todas las tareas y es necesario para que se pueda decir que la tarea existe [5].

**Evasión.** Es un área esencial en robótica y debe ejecutarse para evitar colisiones y por ende daños al equipo. El principio requerido por la evasión, es que debe proveerse una distancia entre el robot o el efector-final, y los obstáculos; los cuales pueden ser estáticos o móviles. Debido a que la evasión no forma parte de la tarea (a menos que así se indique) y tampoco implica que mejore la precisión, puede o no manifestarse durante la tarea.

Cabe destacar que las habilidades que el ser humano ha desarrollado y perfeccionado a lo largo del tiempo en cuanto a la manipulación de materiales, han sido observadas, modeladas matemáticamente, e implementadas a un robot manipulador.

## 2. Metodología de experimentación

Nuestro principal objetivo es aplicar teleoperación directa computarizada (sin autonomía) en el traslado de materiales, implementándolo con un banco de pruebas. En la sección 2.1 se hará un análisis de los elementos de los que consta tal banco de pruebas.

La hipótesis de esta investigación es: Es posible trasladar un objeto regular cúbico de un punto a otro, usando la técnica de teleoperación directa computarizada en un pantógrafo instrumentado y un manipulador robótico.

### 2.1. Banco de pruebas (Maestro-Eslavo)

La figura 3 muestra el esquema del banco de pruebas donde se probó la hipótesis de estudio, que es la razón de ser del presente artículo. En los siguientes párrafos se abunda en los componentes utilizados para la construcción del banco de pruebas.

El banco de pruebas construido para el estudio del transporte de materiales, consta de un pantógrafo de 5 GDL instrumentado con potenciómetros rotatorios, un robot manipulador de 5 GDL con servomotores *Power HD 1501MG*, una tarjeta Arduino 'Leonardo', una tarjeta *Nodemcu V1.0*, una tarjeta *ESP32*, el controlador de servomotores *PCA9685*, una fuente de energía y un par de mesas para su montaje.

Los datos del pantógrafo instrumentado son obtenidos por el Arduino 'Leonardo' y enviados al *Nodemcu V1.0* vía I2C, se procede a enviar, vía Wi-Fi, los datos de 5 sensores de posición angular y un sensor para abrir y cerrar la pinza del manipulador. Las 5 posiciones angulares corresponden a la posición angular de los 5 eslabones de los que consta el pantógrafo. El protocolo de comunicación inalámbrico se implementó con UDP (User Data Protocol). Se utiliza el software de *MatLab®* con su herramienta *Simulink®*, en tiempo real, para recolectar los datos de los 6 sensores y se continúa mapeando las posiciones angulares del pantógrafo con las respectivas posiciones angulares que corresponden para cada eslabón del manipulador. Una vez obtenidos éstos valores son enviados, vía Wi-Fi, a una tarjeta de desarrollo *ESP32*. Esta tarjeta controla vía I2C a un *driver* que se encarga de posicionar a cada servomotor del manipulador robótico.

## 3. Resultados

La imagen 4 y 5 muestra el laboratorio donde se implementó la experimentación, así como la distribución de los elementos del banco de pruebas. En estas imágenes se puede observar los tres elementos básicos de un sistema teleoperado: El maestro (dispositivo ubicado en la parte izquierda de la imagen), la computadora (ubicada en la parte central) y por último el esclavo o manipulador robótico (a la derecha de la imagen), las pruebas que se llevaron a cabo fueron la traslación de un cubo de plástico con el tamaño adecuado para la pinza de sujeción del esclavo.



Imagen 4. Laboratorio donde se llevó a cabo el proyecto, así como la distribución de los componentes para la teleoperación

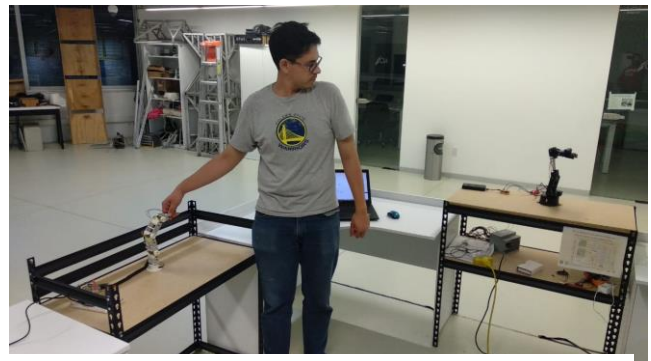
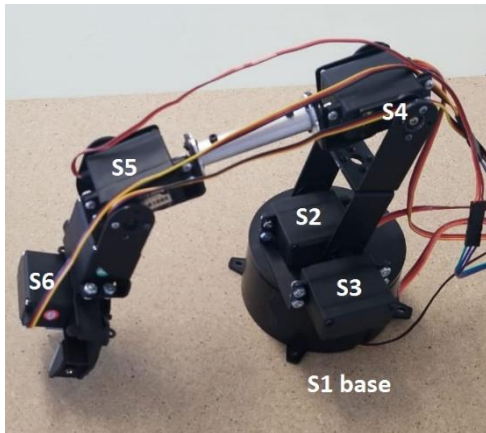


Imagen 5. Realización de pruebas con el pantógrafo y el manipulador, repetibilidad de movimientos

A partir de la hipótesis mencionada en el apartado de metodología de experimentación, nuestro objetivo es trasladar un objeto cúbico con los elementos descritos en el párrafo anterior, dicha acción la lleva a cabo un operario manipulando el maestro (pantógrafo). Como primera instancia del proyecto el operario es el que decide como se tiene que mover el esclavo. Sabiendo de ante mano que, si el pantógrafo adopta cierta postura el esclavo, debido a la disposición mecánica de sus eslabones, también deberá adoptar la postura del pantógrafo. Observe que, para que suceda esto debe de existir una manipulación computacional que interprete el mundo donde vive el maestro y se adapte al mundo donde vive el esclavo. A pesar que el maestro y el esclavo son mecanismos seriales de 5 GDL, no implica que



la configuración cinemática sea la misma, que es el caso actual de estudio.



**Imagen 6. Disposición numérica de cada servomotor de los que consta el manipulador robótico.**

El agente que entrelaza ambos mundos es la computadora, que procesa los datos obtenidos del pantógrafo y realiza un mapeo acorde a los servomotores del esclavo. Debido a los sensores utilizados en el pantógrafo, se debe realizar una conversión analógica a digital, es decir de niveles de tensión de 0 a 5 volts a una palabra digital de 10 bits (0-1024). El maestro cuenta con seis sensores, 5 corresponden a los 5 GDL y el sexto es el control de apertura o cierre de la pinza del esclavo.

**Tabla 1. Valores obtenidos de la caracterización de cada servomotor, donde el valor para posicionar al servo en 0° o 180° está acorde con la librería de Arduino.**

No. de Servomotor	Valor mínimo digital para 0°	Valor máximo digital para 180°
1	90	620
2	100	540
3	185	590
4	180	540
5	90	540
6	110	585

Mientras tanto el esclavo consta de 6 servomotores, ya que al segundo grado de libertad se le dotó de dos servomotores para soportar la masa de las siguientes cadenas cinemáticas, cabe mencionar que cada servomotor requiere de una caracterización individual y es única a los demás servomotores, esto debido a las propiedades intrínsecas de este tipo de motores. En la figura 6 se muestra cómo está la disposición numérica de cada servomotor, mientras que la tabla 1 muestra el resultado de la caracterización realizada para cada motor. En esta tabla, se muestra el valor que se debe usar para posicionar a cada servomotor ya sea en 0° o 180°, cada uno de los valores mostrados corresponde al

formato para ser usado en la librería de Arduino llamada: Adafruit\_PWMServoDriver.h

Esta caracterización se programa en el dispositivo ESP8266 que controla el driver de los servomotores, el resultado de la manipulación computarizada son valores entre 0° y 180°, para los valores intermedios entre 0-180° se usó una interpolación lineal con los valores digitales mínimos y máximos de la tabla 1, dicha interpolación se aprecia en la ec. (1).

$$\text{valor digital} = \frac{(\text{valor digital máximo} - \text{valor digital mínimo})}{(180^\circ - 0^\circ)} (180^\circ - 0^\circ) + \text{valor digital mínimo} \quad (1)$$

Las pruebas realizadas muestran resultados esperados, a partir del concepto de teleoperación directa computarizada, esto es, que el esclavo se comporte conforme a lo que el maestro ordena mediante la manipulación de un operario. La forma de comprobar los resultados es mediante gráficas tanto de los valores angulares de cada GDL del maestro como el valor de ángulo que debe tomar cada uno de los servomotores del esclavo. Dichas gráficas son obtenidas por el software de Simulink®, que es el elemento intermedio que se encarga de uniformizar la información de ambos mundos (maestro y esclavo), la imagen 7 muestra los valores de cada grado de libertad del maestro en un experimento de 10 segundos, obsérvese que el rango de valores que cada articulación puede tener es entre 0 y 1024, debido a la transformación digital realizada en el dispositivo ESP8266. Mientras que la imagen 8 muestra el resultado del mapeo realizado por la computadora para controlar al esclavo, de forma que tenga el mismo comportamiento que el maestro.

Nótese que el comportamiento de los valores dados por el maestro como los valores de cada servomotor del esclavo coinciden, pero las variables están operando en diferentes marcos de referencia.

Otro ejemplo de manipulación de materiales usando teleoperación computarizada directa se observa en las imágenes 9 y 10, donde el comportamiento del maestro es fielmente seguido por el esclavo, pero obedeciendo a su propio marco de referencia.

#### 4. Discusión

El objetivo de esta investigación fue desarrollar y demostrar la viabilidad de un banco de pruebas para el estudio de la teleoperación vía WI-FI, el principal impacto de este estudio será en la implementación para la Industria 4.0 donde el transporte de materiales constituye una tarea primordial en la vida cotidiana de cualquier empresa que produzca tanto productos como servicios.

En este documento se presentó la forma de manipular un brazo robótico a partir de un mecanismo serial, de forma directa. Sin embargo, el paradigma de teleoperación se puede expandir a cualquier forma de capturar la posición y orientación de los movimientos de un humano y por el otro lado a cualquier forma de transportar materiales, en este punto tanto el maestro como el esclavo podrían ser cualquier mecanismo, robot o configuración mecánica; siempre y cuando cumplan con el fin de obtener características específicas de un humano para el transporte de materiales.

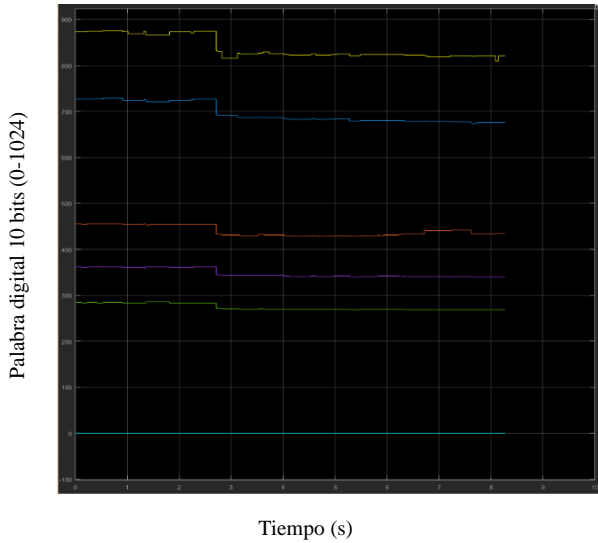


Imagen 7. Valores dados por el maestro de cada articulación en una prueba de 10 segundos

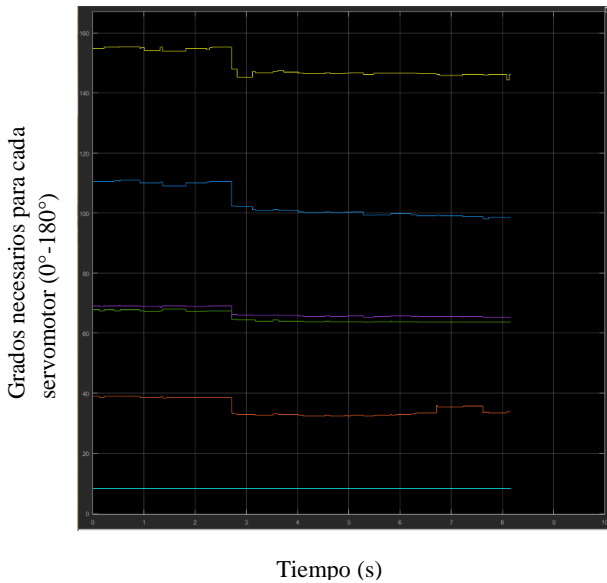


Imagen 8. Valores en grados para cada servomotor, para imitar al maestro

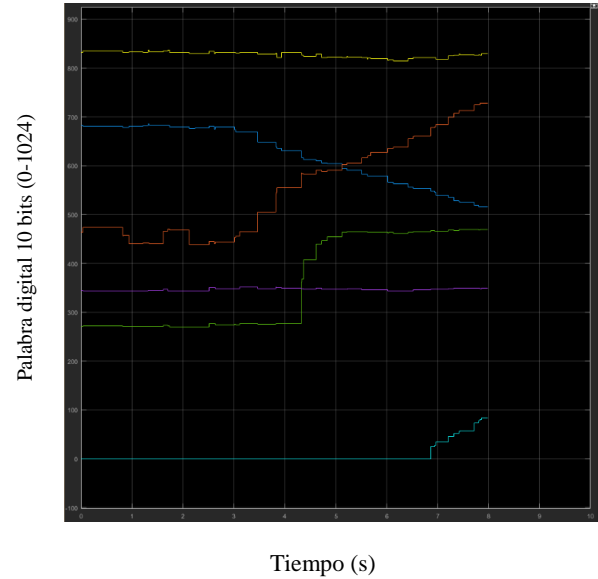


Imagen 9. Valores dados por el maestro de cada articulación en una prueba de 10 segundos

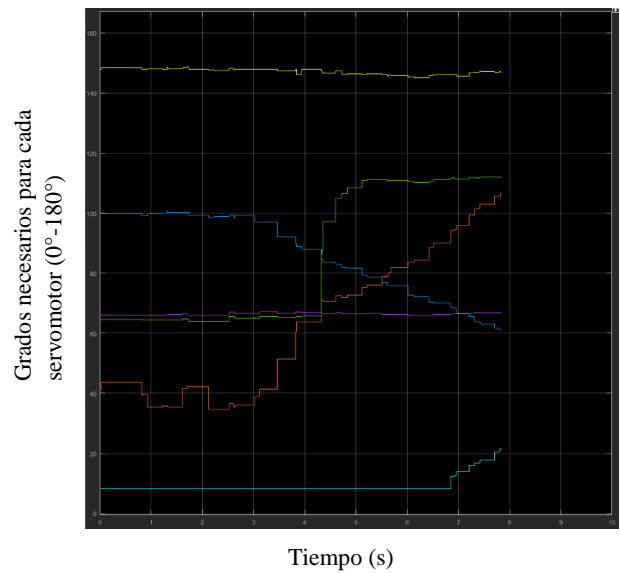


Imagen 10. Valores en grados para cada servomotor, para imitar al maestro

## 5. Conclusión

El manejo de materiales presenta un gran reto para las empresas o compañías que diario deben transportar grandes volúmenes de materia, en muchos casos materiales peligrosos y que pueden significar un daño para los operarios.

En este artículo se muestra una forma de implementar la teleoperación para el manejo de materiales y se llevó a cabo con un pantógrafo instrumentado y un manipulador robótico.

La gran ventaja de este aporte es que forma una base para futuros proyectos, en los cuales la implementación de algoritmos reactivos (intuición artificial y adaptables) serán probados, algoritmos que podrán tomar decisiones sin la intervención de un ser humano, por lo que habrá una deliberación de decisiones.

### **Agradecimientos**

Se agradece en lo que corresponde a DGAPA, por el apoyo brindado para realización de este proyecto, a través del proyecto PAPIIT IN117617: “Robótica intuitiva, adaptable, reactiva, híbrida y móvil aplicada al servicio, el rescate y la medicina”

### **REFERENCIAS**

---

- [1] Sheridan, T.B., *Telerobotics. Automatica*, 1989. 25(4): p. 487-507.
- [2] Sheridan, T.B., *Teleoperation, telerobotics and telepresence: A progress report. Control Engineering Practice*, 1995. 3(2): p.205-214.
- [3] I. Aliaga, Á. Rubio, and E. Sánchez, “Experimental Quantitative Comparison of Different Control Architectures for Master–Slave Teleoperation,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 12, no. 1, 2004.
- [4] C. Passenberg, N. Stefanov, A. Peer, and M. Buss, “Enhancing task classification in human-machine collaborative teleoperation systems by real-time evaluation of an agreement criterion,” in *2011 IEEE World Haptics Conference, WHC 2011*, 2011.
- [5] Latombe, J.C., *Robot Motion Planning*, ed. Kluwer. 1991, USA: Kluwer.