

# Diseño e implementación de un guante sensorizado para el control teleoperado de un prototipo de brazo robótico para aplicaciones de manejo de materiales peligrosos

Edison Herrera, Wellington Zambrano, Franklin Silva

*Departamento de Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga  
Latacunga, Ecuador*

n.ando.2501@hotmail.com

wel\_zambrano@hotmail.com

framasims@hotmail.com

**Resumen**— En este artículo se presenta una investigación sobre el diseño e implementación de una interfaz para operar a distancia un prototipo de manipulador robótico y de este modo realizar tareas de manejo de materiales peligrosos y manipulación de objetos en entornos no estructurados. La interfaz mencionada es un guante instrumentado con sensores capaces de medir los movimientos de las articulaciones del brazo del operador para traducirlos a un sistema mecánico, que en el caso del presente trabajo es un manipulador robótico de 5 grados de libertad a pequeña escala.

El módulo de teleoperación está constituido principalmente por dos estaciones, la primera denominada estación local donde el operador con la interfaz de teleoperación se ubica en una posición completamente independiente al lugar donde se encuentre el robot; y la segunda la estación remota, donde se encuentra ubicado el robot que interactúa directamente con el material peligroso y su entorno. Además se desarrolla un HMI capaz de controlar el brazo robótico de manera adicional.

Para su implementación se partió por ubicar sensores inerciales sobre el guante, las señales obtenidas mediante los mismos son tratadas en un microcontrolador y haciendo uso de módulos de tecnología inalámbrica XBee, la información es transmitida y posteriormente receptada. Esta información es tratada mediante un algoritmo en un nuevo microcontrolador para obtener las señales de posicionamiento que son enviadas a la tarjeta controladora de servomotores y esta última se encarga de posicionar el robot manipulador.

El módulo implementado es una contribución para el sector educativo de tercer nivel, ya que con ello se aportan conocimientos y principios sobre teleoperación y robótica, así como sus tecnologías y aplicaciones; además el trabajo se enfoca en el uso de tecnologías modernas, pudiendo ser aplicado en el sector industrial para tareas de manipulación de materiales.

**Abstract**— In this paper is presented an investigation about the design and implementation of an interface used for remotely operating a prototype robotic manipulator and this way realize hazardous materials management tasks and handling of objects in unstructured environments. The above interface is a glove instrumented with sensors that measure the movements of the arm operator joints to translate it in a mechanical system, which in the case of this work is a robotic manipulator with 5 degrees of freedom in small scale.

The teleoperation module consists in two stations, the first called local station where the operator with the teleoperation interface is located in a completely independent position to where the robot is, and the second the remote station, where

the robot is located and it interacts directly with the hazardous material and its environment. Further an HMI to control the robotic arm additionally was developed.

The sensorized glove implementation starts placing the inertial sensors on the glove, the signals obtained are treated in a microcontroller and using XBee wireless modules the information is then transmitted and receipted. This information is processed by an algorithm into a new microcontroller, it obtain the positioning signals that are sent to the servo controller card and later it is responsible for positioning the robot manipulator.

The implemented module is a contribution to the third level education sector, providing knowledge and principles on teleoperation and robotics, as well as its technologies and applications. The work also focuses on the use of modern technologies and it can be applied in industry for materials handling tasks.

**Palabras clave** - Teleoperación; guante sensorizado; acelerómetro; manipulador robótico; brazo robótico; robot; XBee.

## I. INTRODUCCIÓN

Los brazos humanos sin duda, son mecanismos enormemente adaptables con capacidad de movimiento muy preciso; es debido a ello que el ser humano ha inventado dispositivos y mecanismos que asemejen su movimiento y mejoren sus características, un claro ejemplo de ello son los brazos robóticos.

A pesar de que existe gran semejanza entre estos mecanismos y el brazo humano, los brazos robóticos fueron diseñados principalmente para ser programados en tareas cíclicas. Con el auge de la teleoperación se han desarrollado también interfaces de diferentes tipos para realizar el control de los robots manipuladores en diferentes tareas no repetitivas. Las que más destacan son aquellas que utilizan tecnologías que aprovechan la excelente capacidad que posee el ser humano de percibir información externa.

Por lo tanto, y debido también a que el ser humano posee la excelente capacidad de control de movimiento de sus extremidades, se decide desarrollar una interfaz capaz de captar los movimientos del brazo humano para traducirlos

en movimientos de un brazo robótico y combinado con la capacidad de percepción visual de un operador, obtener un sistema de teleoperación de excelentes prestaciones, intuitivo e innovador. Es necesario para la total comprensión de este trabajo el conocimiento de varios conceptos fundamentales que se exponen a continuación.

Un robot industrial se define como un manipulador articulado de tres o más ejes, servo-controlado, con control automático, reprogramable, destinado a ser usado en aplicaciones de automatización industrial, capaz de posicionar y orientar objetos siguiendo trayectorias variables. Es multifuncional y puede ser gobernado directamente por un operador humano o mediante dispositivos lógicos. [1]

Se entiende por teleoperación a la extensión de las capacidades sensoriales y destrezas humanas a una localización remota. También, se habla de telemanipulación cuando el operador controla un dispositivo específico de manipulación, tal como un brazo articulado con una pinza, en una localización remota. [2]

Un sistema de teleoperación consta de los siguientes elementos: El operador o teleoperador es un ser humano que se encuentra en la zona local y realiza a distancia el control de la operación. El dispositivo teleoperado es la máquina que trabaja en la zona remota y que está siendo controlada por el operador. La interfaz es el conjunto de dispositivos que permiten la interacción del operador con el sistema de teleoperación. El control y canales de comunicación son el conjunto de dispositivos que modulan, transmiten y adaptan el conjunto de señales que se transmiten entre la zona remota y la zona local. Los sensores son el conjunto de dispositivos que recogen la información, tanto de la zona local como de la zona remota, para ser utilizada por la interfaz y el control. [3]

Los primeros guantes electrónicos se crearon con la intención de reducir las limitantes que los elementos periféricos de las computadoras imponían en el uso de las manos; sin embargo, el desarrollo de esta tecnología permitió darles aplicación principalmente en áreas de telemanipulación, realidad virtual, medicina, visualización científica y videojuegos. Las técnicas iniciales de registro de movimientos de la mano empleaban elementos magnéticos, posteriormente se desarrollaron guantes basados en la idea de dispositivos fotoeléctricos. Hoy en día también se utilizan bandas resistivas flexibles con lo cual se facilita el sensado de datos obteniéndose una buena resolución sin un hardware complicado. [4]

Un sensor inercial es un dispositivo capaz de sensar los movimientos físicos que puede adoptar un objeto y que pueden relacionarse con la aceleración, y se utiliza en aplicaciones de captura y análisis de movimiento. Los sensores inerciales comprenden: acelerómetros, que miden la fuerza específica, y giroscopios, que miden la velocidad angular, ambos sin una referencia externa. Dispositivos que miden la velocidad, la aceleración, o la velocidad angular de un cuerpo con respecto a las características del entorno no son sensores inerciales. El desarrollo actual del sensor inercial se centra en la tecnología MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Los sensores MEMS son pequeños, ligeros, y muestran una mayor tolerancia a los golpes que los diseños convencionales mecánicos. [5]

## II. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN LOCAL

### A. Selección de los sensores.

Para la selección de los sensores se debe determinar previamente cuáles son los movimientos a sensarse en el brazo humano y cuáles son sus semejantes con un robot manipulador de 5 grados de libertad. Se opta por determinar mediante el guante la variación de los ángulos  $\theta_2$ ,  $\theta_5$ ,  $\theta_6$  y  $\theta_7$  que se muestran en la Figura 1 y así relacionarlos con los movimientos de las articulaciones *Hombro*, *Codo*, *Inclinación Muñeca* y *Rotación Muñeca* del robot manipulador de la figura 2, respectivamente.

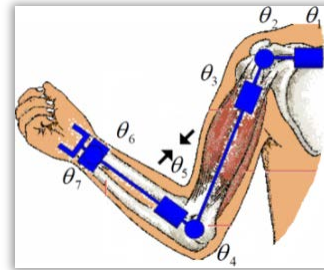


Figura 1: Representación angular de los movimientos de las articulaciones de un brazo humano.



Figura 2: Brazo robótico Lynxmotion AL5D con sus articulaciones.

El ángulo  $\theta_1$  es el correspondiente a la articulación *Base* del robot manipulador, pero ya que realizar este movimiento del hombro en el brazo humano mientras se coordina el movimiento de las demás articulaciones resulta muy complejo, se decide incluir un dispositivo para la mano izquierda que incluya el control de la *Base* del robot.

Para sensar el movimiento de los ángulos anteriormente descritos se utilizan acelerómetros. Estos sensores inerciales pueden ser usados para sensar aceleración, vibración, inclinación, golpe y rotación (Figura 3). Donde todas son, en realidad, manifestaciones diferentes de una aceleración durante períodos de tiempo distintos. [6]

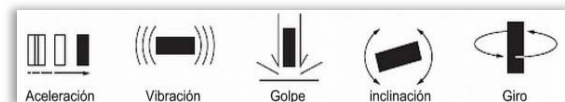


Figura 3: Movimientos básicos asociados a la aceleración.

Se adquiere tres acelerómetros de tres ejes de medición MMA7361L montados en una PCB marca SparkFun (Figura 4), su tamaño de 1.4x2.2cm se presta beneficiosamente para su inclusión en el guante. En el caso particular de este trabajo se utilizan los acelerómetros para sensar inclinación (aceleración estática), la cual es detectada al medir el efecto que la fuerza de la gravedad (1g) ejerce

sobre los ejes del acelerómetro que estén expuestos a esta acción en función de su posición en el espacio.

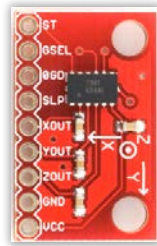


Figura 4: Acelerómetro MMA7361L montado en la PCB.

El acelerómetro opera con una alimentación de 3.3Vcc, posee una sensibilidad de 800 mV/g, al medir inclinación entrega una señal de voltaje por cada eje que varía de 0.85V en 90° a 2.45V en -90°, la figura 5 muestra con más detalle el funcionamiento del sensor al medir aceleración estática.

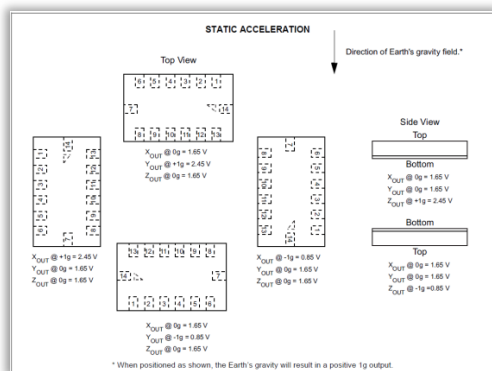


Figura 5: Comportamiento estático del acelerómetro MMA7361L.

Además de los acelerómetros se adquiere también el sensor flexoresistivo de la figura 6, usado en el guante para sensar la apertura y cierre de la mano y traducir tal movimiento como control del efector final del robot manipulador.

El sensor flex es de 10KOhms en estado nominal y funciona de tal manera que al ser flexionado su resistencia aumenta y posee un ciclo de vida de más de un millón de flexiones. La decisión de adquirir este sensor recae en la necesidad de utilizar un dispositivo con un perfil físico sencillo que pueda ser colocado en un lugar pequeño, se pueda deformar sin dificultad y posea alta durabilidad.

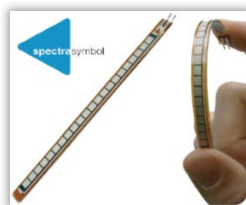


Figura 6: Flex Sensor de Spectra Symbol.

### B. Ubicación de los sensores en el guante.

Debido a que los acelerómetros serán ubicados para sensar el movimiento de todo el brazo humano, el dispositivo *guante sensorizado* está conformado de dos elementos: un guante diestro y una codera. Ambos elementos textiles se adquieren tomando en cuenta factores de comodidad, flexibilidad y confort.

El acelerómetro 1 se ubica en la muñeca para que sea capaz de sensar los movimientos de flexión y extensión con el eje X, pronación y supinación con el eje Y.

El acelerómetro 2 se ubica en el antebrazo, éste sensor utiliza únicamente el eje X para detectar la inclinación del antebrazo en los movimientos de flexión y extensión del codo.

El último sensor también utiliza el eje X y se ubica en el brazo para determinar la inclinación del mismo únicamente mientras se encuentra en flexión, ya que la extensión del brazo se realiza hacia atrás y este movimiento no es necesario para el control del robot. En la figura 7 se puede apreciar la disposición final de los acelerómetros montados sobre el dispositivo *guante*.



Figura 7: Acelerómetros ubicados sobre el guante.

Como se observa en la figura 7, el sensor flex se coloca en el guante sobre el dedo índice, para que de esta manera sea posible sensar el cierre y la apertura de la mano.

### C. Dispositivo de control para la mano izquierda.

Se implementa un dispositivo para ser utilizado por la mano izquierda del operador. El dispositivo elegido es un control de videojuegos conocido como *Nunchuk* que se aprecia en la figura 8, el cual en el presente trabajo tiene dos finalidades, la primera es la lectura del movimiento en el eje Y del stick analógico, utilizada para controlar el servomotor de la *Base* del robot. Y la segunda es la utilización del botón Z como pulsador de *hombre-muerto* para el sistema. Este botón funciona de manera que mientras se encuentre presionado se enviarán los datos de la estación local a la estación remota, es decir, el robot será teleoperado únicamente mientras se mantenga presionado el pulsador de *hombre-muerto*.



Figura 8: Nunchuk utilizado en la estación local.

### D. Diseño de la placa electrónica de la estación local PCI 1

La placa diseñada para usarse en la estación local (Figura 9), de manera general está compuesta de tres secciones principales: acondicionamiento de señales, disposición de pines del microcontrolador y transmisión inalámbrica. Cada una de estas secciones se compone de diversos elementos

electrónicos que se encuentran integrados en una única tarjeta electrónica con diseño a doble lado con unas dimensiones de 68x34mm.

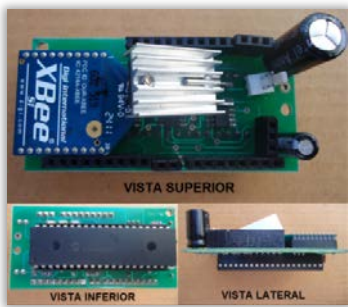


Figura 9: Placa electrónica de la estación local.

La energía necesaria para el funcionamiento de la tarjeta electrónica PCI 1 es suministrada por una batería recargable de Litio-Polímero de dos celdas marca Turnigy de 7.4 V y 2200 mAh. (Figura 10). La batería se implementa con un circuito regulador de tensión para obtener los voltajes de alimentación constantes requeridos por los dispositivos de la tarjeta, los cuales son 5V y 3.3V.



Figura 10: Fuente de alimentación de la placa PCI 1.

Cada señal de los acelerómetros del guante sensorizado antes de conectarse al microcontrolador, pasa por un circuito de desacoplamiento de impedancias para evitar caídas de tensión y falsas lecturas de los acelerómetros.

El microcontrolador PIC18F452 de esta placa maneja todas las señales del guante sensorizado. En total al microcontrolador se conectan siete entradas análogas y cuatro elementos I/O del puerto B, en la Tabla 1 se detallan estas conexiones.

Tabla 1: Descripción de I/O utilizadas en el microcontrolador de la PCI 1.

Número de pin	Descripción del pin	Señal Conectada
2	AN0	Acel. 1 eje Y / Mano (Y1)
3	AN1	Acel. 1 eje X / Mano (X1)
4	AN2	Acel. 2 eje Y / Codo (Y2)
5	AN3	Acel. 2 eje X / Codo (X2)
7	AN4	Acel. 3 eje X / Hombro (X3)
8	AN5	Sensor Flex (Pinza)
9	AN6	Stick Analógico (Joy)
33	RB0	Pulsador Hombre-Muerto
36	RB3	LED 1
37	RB4	LED 2
38	RB5	LED 3

La comunicación entre el Xbee y el microcontrolador no utiliza ningún estándar de transmisión serial debido a que la distancia entre estos dos es sumamente corta. Sin embargo,

ya que los dos elementos operan en diferentes niveles de voltaje, se implementa un circuito que cambia el nivel de voltaje lógico alto de 5V a 3.3V.

#### E. Implementación del Hardware de la estación local.

La circuitería electrónica se ubica en un compartimiento plástico de 13x7x4.7cm, al cual se adhiere un elemento de sujeción tipo clip para que el operador pueda colocarse el sistema en su cintura de manera cómoda. La figura 11 muestra el sistema final de la estación local junto con el guante sensorizado y todos sus dispositivos.



Figura 11: Operador colocado el guante sensorizado.

### III. DISEÑO E IMPLEMENTACION DE LA ESTACIÓN REMOTA

#### A. Adecuación del área de trabajo en la estación remota.

La estación remota es el área de trabajo exacta dónde el peligro es inminente si el operador se encuentra manipulando directamente el material peligroso.

Para simular un ambiente no estructurado y apartado del operador, se construye una estructura en aluminio con paredes de vidrio con dimensiones de 114x83x69cm para blindar dicha zona de peligro y así precautelar la integridad de las personas encargadas de la operación del material peligroso.

Dentro de la estructura mostrada en la Figura 12 se encuentran ubicados pequeños tubos de ensayo que contienen el material peligroso y también herramientas denominadas gradillas las cuales sostienen los tubos y así facilitan el manejo y almacenaje de los mismos. De manera esencial, el manipulador robótico que interactúa directamente con el contenedor del material peligroso se encuentra ubicado, en una posición que le permita su máximo alcance dentro del área de trabajo.

Además se incorpora sobre la base de la estructura unas planchas metálicas y sobre las gradillas unos imanes, que suponen un modo de fijación no permanente, con lo cual se provee de facilidad para simular un ambiente no estructurado con respecto a la ubicación de las gradillas y el contenedor del material peligroso.



Figura 12: Área de trabajo de la estación remota.



### B. Controladora serial de 16 servos marca Pololu.

La Figura 13 muestra el driver de servomotores utilizado para emitir las señales de control de posición a los seis actuadores que se encargan de mover las articulaciones del robot AL5D.

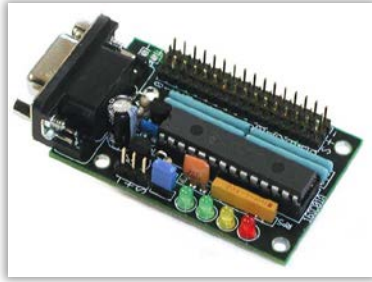


Figura 13: Tarjeta controladora de Servomotores POLOLU

La controladora de servomotores recibe las señales de posición que deben adoptar los actuadores, dicha información procedente de los algoritmos de control implementados en el microcontrolador de la estación remota (PIC18F452).

Dentro de todos los dispositivos que necesiten transmitir información dentro del módulo de teleoperación, se configura el uso de comunicación serial en forma 8N1, que es la abreviatura de la configuración del puerto serie en modo asíncrono donde hay ocho bits de datos, ningún bit de paridad y un bit de parada.

La controladora de servomotores tiene una resolución de 1 microsegundo (0.1 grado) y opera con una velocidad de transmisión de 9600 baudios, misma velocidad de transmisión para todo el trabajo.

El motivo principal del uso de este dispositivo para el control de los actuadores del robot se debe a la flexibilidad que brinda al controlar varios servomotores a la vez, tan solo con una línea de transmisión serial del microcontrolador (TX).

La controladora es muy versátil y permite su cometido de manera más simple, ya que con el uso de los modos de operación del driver se evita desarrollar algoritmos complejos que reducirían la memoria y potencialidad del microcontrolador, el mismo que ya está enfocado para algoritmos referentes a cumplir el objetivo de teleoperación.

### C. Robot manipulador AL5D marca Lynxmotion

Parte principal de la estación remota es el manipulador robótico, el mismo que tiene contacto directo con el entorno de peligro. El robot se constituye principalmente de piezas de aluminio y plástico para ganar flexibilidad y aligerar su peso. El brazo robótico (Figura 2) tiene un peso aproximado de 850 g, alcanza una altura máxima de 529 mm, levanta una carga neta de 300 g y una carga máxima con el brazo extendido de 130 g. Además la apertura máxima del gripper es de 31 mm.

El robot se encuentra constituido por servomotores de marca HITEC, los mismos que son alimentados con 6V, ya que con ello se concibe un mejor valor de torque como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Características de servomotores HITEC del Robot.

ARTICULACIÓN	SERVOMOTOR	VOLT	TORQUE (kg-cm)	VELOCIDAD (SEC/60°)
BASE	HS-485HB	4.8V	4.8	0.22
		6.0V	6.0	0.18
HOMBRO	HS-805BB	4.8V	19.80	0.19
		6.0V	24.70	0.14
CODO	HS-805MG	4.8V	19.8	0.19
		6.0V	24.7	0.14
INCLINACIÓN DE LA MUÑECA	HS-645MG	4.8V	7.7	0.24
		6.0V	9.6	0.20
ROTACIÓN DE LA MUÑECA	HS-485HB	4.8V	4.8	0.22
		6.0V	6.0	0.18
GRIPPER	HS-311	4.8V	3.0	0.19
		6.0V	3.5	0.15

Además el manipulador robótico se encuentra instrumentado en la parte lateral interna del efector final mediante un sensor de fuerza FSR (Figura 14), usado para precisar la fuerza de cierre del gripper; con ello se indica al microcontrolador que un objeto fue atrapado y así se evita forzar el servomotor de la pinza una vez que ya se encuentra sujeto el objeto.

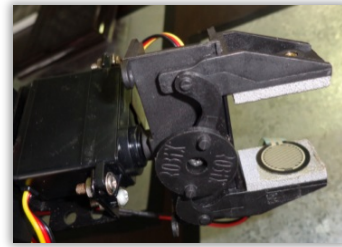


Figura 14: Sensor FSR sobre efector final del robot.

## IV. ESTRUCTURA DE CONTROL

### A. Software de control de la estación local.

Las señales de los sensores, en especial de los acelerómetros son muy sensibles a pequeños movimientos del brazo humano, es por ello que dichas señales son reguladas mediante filtros digitales implementados en el algoritmo de control de la estación local. El algoritmo del microcontrolador de la placa PCI 1 se encuentra estructurado como se indica en la figura 15.

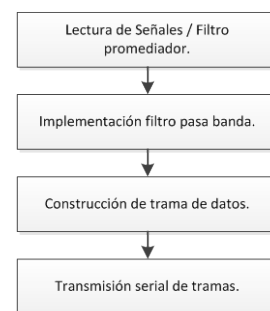


Figura 15: Estructura del algoritmo del microcontrolador de la tarjeta PCI 1.

Para un fácil manejo de los datos, la información de los sensores es enviada serialmente mediante dos tramas tipo *string* estructuradas convenientemente. En la figura 16 se observa las tramas utilizadas, donde los símbolos son usados como banderas indicadoras.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
*			3	5	8	@				3	3	1	%				3	3	0	#	
muñ. inclin.							muñ. giro							codo							

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
*			3	3	4	!				5	1	7	)			1	0	2	0	(	
hombro							base/stick							pinza/flex							

Figura 16: Estructura de los vectores tipo texto usados para enviar los datos.

### B. Software de control de la estación remota.

El microcontrolador de la estación remota es el encargado de procesar las señales de los sensores y convertirlas en información sobre el posicionamiento de los servomotores del robot.

Se utiliza un sistema de control directo, donde dependiendo del valor de la señal de los sensores se calcula el correspondiente valor de posición y velocidad para cada servomotor independientemente. El algoritmo opera en un lazo de control abierto debido a que no son necesarias señales de realimentación sobre posición de los actuadores ya que estos son servomotores.

Se implementa también un sistema de seguridad para evitar colisiones con el suelo, utilizando teoría de cinemática directa se calcula la posición en el eje Z del efector final en todo momento [7]. Además el algoritmo también tiene la capacidad de controlar el robot mediante la información del HMI. En la figura 17 se observa el diagrama de flujo del algoritmo de control de la estación remota.

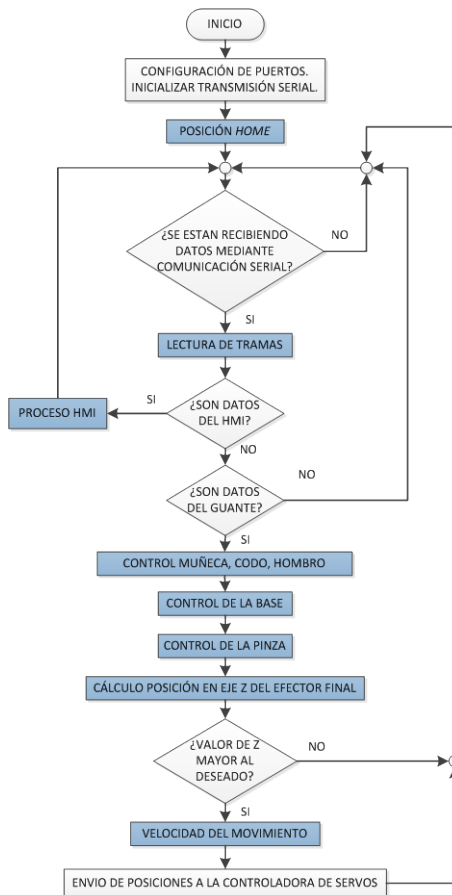


Figura 17: Diagrama de flujo del algoritmo de control del microcontrolador de la estación remota.

## V. TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE DATOS

Existen tres módulos XBee utilizados en todo el sistema. El XBee de la estación local recibe información de manera serial desde el microcontrolador PIC 1 y la envía inalámbricamente mediante una trama de radio frecuencia hacia el módulo XBee ubicado en la estación remota. De igual manera el módulo XBee del computador puede enviar inalámbricamente hacia la estación remota la información recibida desde el HMI. Para comunicar este último con el computador, se utiliza la placa XBEE EXPLORER de la figura 18.

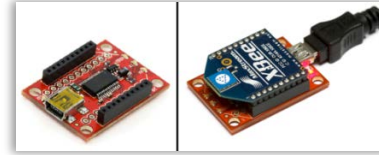


Figura 18: Placa XBee Explorer.

### A. Modo de funcionamiento implementado.

Debido a los sencillos requerimientos de comunicación entre las estaciones, todos los módulos XBee utilizados trabajan en modo Transparente, mediante una topología de comunicación punto a punto.

En este modo, todo lo que ingresa por el pin *Data in*, es guardado en el buffer de entrada y luego transmitido inalámbricamente, y todo lo que ingresa como paquete RF es guardado en el buffer de salida y luego enviado por el pin *Data out*.

### B. Direccionamiento.

Se utiliza el direccionamiento de 16 bits en cada uno de los módulos XBee, esta configuración se realiza mediante el software X-CTU haciendo uso de la tarjeta XBee Explorer.

En este software mediante la pestaña *Modem Configuration* que se indica en la figura 19 es posible visualizar, editar y guardar parámetros de configuración del módulo XBee.

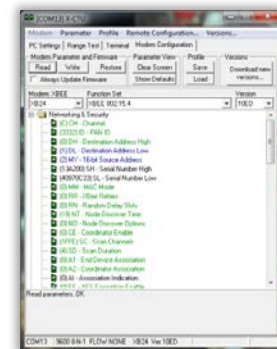


Figura 19: Interfaz X-CTU de configuración de módulos XBee.

El parámetro MY, define un número de 16 bits como dirección del módulo dentro de la red, su posible rango se encuentra entre 0x0 y 0xFFFFE, para definirlo se ingresa el número en formato decimal. Para el direccionamiento de 16 bits el parámetro DH debe ser 0x0. Mientras que el parámetro DL, permite definir un número de 16 bits como dirección del módulo de destino dentro de la red al cual se va a realizar la comunicación, su rango debe estar entre 0x0 y 0xFFFFE. La Tabla 3 indica los valores de las direcciones configuradas para cada módulo XBee.

Tabla 3: Parámetros de configuración para las direcciones de los XBee.

	Parámetro MY	Parámetro DL
XBee estación local	1603	2501
XBee HMI	1625	2501
XBee estación remota	2501	1625

## VI. INTERFAZ HMI (INTERFAZ HUMANO MÁQUINA)

Además de la implementación del guante sensorizado como medio principal de teleoperación del manipulador robótico, se desarrolla una interfaz amigable que permite interactuar a distancia al operador humano con el robot, haciendo uso de un computador.

La aplicación es desarrollada en el software *LabVIEW 12.0* (2012) en forma de un menú interactivo (Figura 20) desde el cual se invoca a dos *SUBVIs*: el primero que permite supervisar la interacción del brazo robótico dentro de su entorno por medio de tres cámaras web ubicadas estratégicamente en la estación remota y el segundo que tiene implementado una serie de algoritmos que permiten el control del brazo robótico por medio del computador.



Figura 20: Menú interactivo del HMI

Mediante la aplicación HMI se puede controlar al manipulador robótico mediante dos métodos de operación, los cuales utilizan herramientas que provee el módulo de robótica de LabVIEW.

### A. Método de operación Ejes Específicos (°).

El método de operación por ejes específicos permite desplazar en forma independiente cada uno de los ejes o articulaciones del robot, en dirección horaria o anti horaria mediante los controles slider mostrados en la Figura 21.

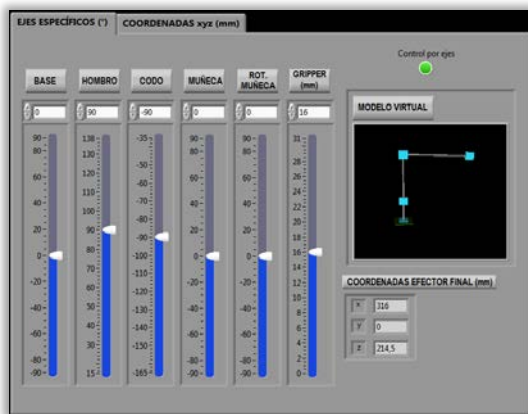


Figura 21: Método de operación Ejes Específicos

En este modo de operación (ejes específicos) se hace uso de la herramienta *Forward Kinematics VI*, el mismo que resuelve el problema cinemático directo y permite conocer la posición en la que se encuentra el gripper tras cada variación angular que se realice.

### B. Método de operación Coordenadas XYZ (mm).

El método de operación por Coordenadas XYZ básicamente resuelve el problema cinemático inverso mediante la herramienta *Inverse Kinematics VI* y con ello se permite al usuario desplazar el punto central del efector final en dirección positiva o negativa a lo largo de los ejes del sistema de coordenadas situado al pie del robot, de la misma manera se utiliza controles slider como en el método anterior (Figura 22).

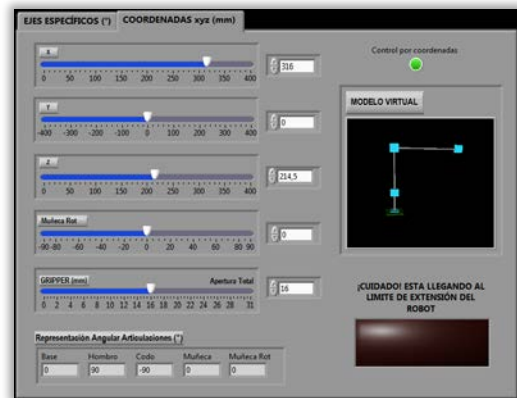


Figura 22: Método de operación Coordenadas XYZ

Para hacer uso de las herramientas del módulo de Robótica de LabVIEW primero se determinan los parámetros de Denavit-Hartenberg de la cadena cinemática del robot (Figura 23), que para el caso del presente trabajo es tomada como una cadena cinemática de cuatro grados de libertad para facilidad de cálculos y debido a que el movimiento de rotación de la muñeca no se encarga de posicionar el elemento terminal del robot sino de orientarlo, además no se considera a la pinza como parte de la cadena cinemática del manipulador.

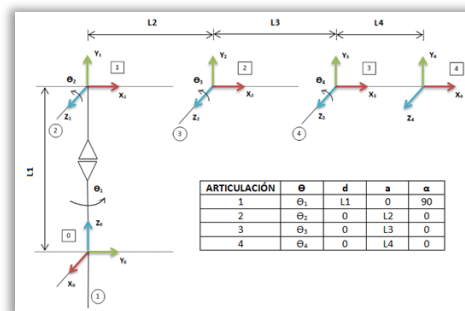


Figura 23: Cadena cinemática de 4GDL del robot y parámetros D-H

## VII. PRUEBAS DEL SISTEMA

### A. Pruebas de posicionamiento mediante el guante sensorizado.

En primer lugar es necesario representar la posición *HOME* del robot manipulador con una posición adecuada del brazo humano. A partir de esta posición del brazo humano el operador será capaz de realizar el control del brazo robótico. Mediante pruebas se determina que la mejor

posición para el inicio de la teleoperación y que represente el *HOME* del robot es la que se indica en la figura 24.



Figura 24: Posición brazo humano /HOME robot manipulador.

Dependiendo de la inclinación del brazo, antebrazo y mano del operador se tendrá una respuesta similar en la posición de los eslabones del robot, pero ya que la forma del brazo humano que representa el *HOME* del robot no es idéntica físicamente se debe verificar las posiciones que tome el robot manipulador dependiendo de las diferentes configuraciones del brazo del operador humano.

A continuación en la tabla 4 se puede apreciar el resultado del control con el guante de datos probando las diferentes posiciones del brazo del operador.

Tabla 4: Posiciones del brazo humano para la teleoperación del robot manipulador.

A	B	C
Brazo recto inclinado	Brazo recto horizontal	Brazo recto declinado
D		E
Brazo con doblez de codo arriba		Brazo con doblez de codo abajo

De manera especial se determina, que si el operador desea acercar el efector final del robot hacia la base, éste debe doblar y elevar el codo de su brazo; caso contrario si desea alejar el efector final de la base del robot, el operador debe doblar y bajar el codo de su brazo. Combinando los cinco movimientos de la tabla se obtiene un control total del robot manipulador.

Para verificar el funcionamiento y fiabilidad del algoritmo de seguridad en el eje Z del robot se realizan pruebas que consisten en posicionar al robot mediante el HMI y medir físicamente el valor en Z de la punta del efector final y así calcular el error relativo.

La tabla 5 muestra el error obtenido, el cual no representa valores críticos o de preocupación y lo existente se debe a los factores físicos del robot manipulador y no al sistema de control. Los valores de error elevados mientras se encuentra *lejos de la base* se deben al peso de los eslabones del robot.

Tabla 5: Verificación del posicionamiento del robot en el eje Z.

Posición deseada (HMI) x,y,z	Posición real en Z (Medición)	Error Absoluto (mm)	Error Relativo
<b>Cerca de la base</b>			
50,-112, <b>20</b>	21	1	5%
237,0, <b>110</b>	106	-4	3.6%
180,108, <b>200</b>	196	-4	2%
90,160, <b>280</b>	272	-8	2.8%
<b>Lejos de la base</b>			
250,0, <b>20</b>	22	2	10%
170,240, <b>110</b>	117	3	2.7%
163,-195, <b>200</b>	194	-6	3%
80,-162, <b>280</b>	283	3	1%
<b>Muy lejos de la base</b>			
110,-338, <b>20</b>	26	6	30%
324,180, <b>110</b>	84	-36	32.7%
390,-90, <b>200</b>	170	-30	15%
200,322, <b>280</b>	211	-69	24%

Con el sistema de teleoperación en correcto funcionamiento se procede a realizar pruebas que verifican la capacidad de manipulación del robot haciendo uso del guante sensorizado y analizan el nivel de dificultad de cada operación. La tabla 6 indica la capacidad de manipulación de objetos aleatorios por parte de los operadores en un rango de 1 a 10, tomando a 10 como "Imposible de manipular" y 1 como "Completamente fácil de manipular".

Tabla 6: Resultado de las pruebas de teleoperación con objetos aleatorios.

Prueba	Objeto	Peso	Nivel de dificultad	
			Operador 1	Operador 2
A	Servomotor	55 g	2	4
B	Cilindro	29 g	6	7
C	Tarjeta	9 g	8	9
D	Figuras	1 g	4	5
E	Tubo ensayo	12 g	5	6

La prueba A consiste en desplazar de forma simple un servomotor de una ubicación a otra. La prueba B consiste en sujetar un objeto cilíndrico y posicionarlo de forma vertical sobre un lugar específico. En la prueba C se debe sujetar una tarjeta dentro de un compartimento horizontal y colocarla dentro de otro compartimento en forma vertical. En la prueba D se debe ejecutar el transporte de figuras de pequeño tamaño esparcidas en un área y colocarlas dentro de un compartimento ubicado estratégicamente. La prueba E consiste en transportar un tubo de ensayo de una gradilla a otra, de igual manera la tabla 7 muestra los resultados de la manipulación de tubos de ensayo con material peligroso.

Tabla 7: Pruebas de manipulación de material peligroso.

Prueba	Solo Rapidez	Solo Precisión	Distancias entre gradillas	Tiempo de ejecución
1	X		32 cm	34 s
2		X		1min 42s
3	X	X		1min
4	X		60cm	36s
5		X		1min 27s
6	X	X		1min 1s
7	X		75cm	50s
8		X		1min 33s
9	X	X		1min 19s



## B. Pruebas de control y funcionamiento del HMI.

Para verificar el correcto funcionamiento de la operación del HMI, se realizan pruebas de validación de la resolución de los problemas cinemáticos. Se contrasta la resolución de los problemas cinemáticos mediante las herramientas del módulo de robótica de LabVIEW y una aplicación que evalúa las ecuaciones de los problemas cinemáticos, obteniéndose como resultado que en forma virtual la resolución de la cinemática del robot con las herramientas de LabVIEW es muy precisa y no hay variaciones significativas.

Con respecto al sistema de control de posición del manipulador sobre el área de trabajo, se establecen posiciones del extremo del efector final usando el método de operación de coordenadas xyz(mm) del HMI y se las compara con sus respectivas mediciones físicas, con ello se obtiene un error relativo considerable mostrado en la tabla 8; esto debido a varios factores como: misma tolerancia de error, rangos de operación de ancho de pulso con leves imprecisiones y existentes rangos de banda muerta de cada uno de los servomotores; y además de ciertas restricciones mecánicas propias de la constitución del robot como el resorte mecánico, aspectos dimensionales y la distribución del peso de las articulaciones.

Todo lo descrito anteriormente se debe a la implementación del trabajo con un manipulador robótico didáctico que no ofrece las mismas características de precisión de movimientos y estabilidad que provee un robot industrial

Tabla 8: Prueba de posicionamiento del manipulador robótico.

Posición N°	Posiciones deseadas del efector final xyz (mm)	Posiciones reales del extremo del efector final xyz (mm)	Error Relativo Promedio (%)
1	32,-218,149	26,-232,142	9.96
2	263,106,60	275,102,65	5.56
3	146,156,300	135,150,290	4.90
4	124,-233,30	129,-229,24	8.58
5	124,-233,70	118,-225,68	3.71
6	106,308,0	113,305,7	2.53
7	106,308,170	110,299,162	3.80
8	132,-364,20	130,-365,22	3.93
9	197,357,140	195,355,105	8.86
10	316,0,214.5	313,1,214	0.39
			5.22

## VIII. CONCLUSIONES

En este trabajo desarrollado a manera de prototipo se puede apreciar la gran importancia y potencialidad del campo de la teleoperación en aplicaciones que involucren la interacción del ser humano con materiales peligrosos que atenten de alguna manera a la integridad de los mismos.

Mediante el uso de nuevas tecnologías basadas en medición de movimiento con sensores inerciales y sensores flexoresistivos se aborda la problemática de reflejar con precisión los movimientos del brazo de un operador humano a un sistema mecánico.

El transporte de tubos de ensayo con material peligroso mediante teleoperación con el guante sensorizado en el

módulo desarrollado, se ejecuta en tiempo menor a 2 minutos cualquiera que sea la distancia entre la gradillas, siempre y cuando el teleoperador procure precisión en sus movimientos, ya que existe la posibilidad de que al realizar movimientos rápidos con el guante, los sensores del mismo midan aceleración lineal y se produzca un movimiento indeseado en el robot manipulador.

De manera general, la dificultad de teleoperar el robot con el guante sensorizado para manipular objetos depende de la capacidad del operador para manejar el sistema, si el operador no conoce completamente la forma de uso y no ha practicado los movimientos tendrá dificultades para realizar tareas de manipulación.

No es necesario un control en lazo cerrado para el posicionamiento del robot ya que los servomotores se colocan siempre en el lugar deseado dependiendo de las acciones del operador y el correcto posicionamiento de los servomotores depende únicamente del algoritmo de control que interpreta las acciones del operador.

La plataforma de programación visual gráfica LabVIEW dispone de todas las herramientas necesarias para realizar una aplicación HMI que permita el control total de un brazo robótico a través de cualquier computador, siempre y cuando este posea el software y toolkits necesarios que involucren la aplicación desarrollada.

De acuerdo a los resultados de las pruebas desarrolladas, el HMI implementado permite posicionar en el espacio el efector final del brazo robótico con un nivel de precisión aproximado de 90% cuando la posición del mismo es lejana a la base del robot, cuando el robot trabaja en posiciones más cercanas a la base la precisión del mismo varía del 90% al 97.4%. En promedio para cualquier posición dentro del área de trabajo la precisión aproximada de posicionamiento del robot es del 94.7%.

Al ser el brazo robótico un sistema didáctico, este presenta varias condiciones que influyen en el error de posicionamiento mediante el sistema de control del HMI, entre las que están de manera general: imperfecciones en la estructura mecánica, diseño mecánico impreciso, servomotores de modelismo.

Los servomotores de modelismo utilizados en el robot no tienen una relación exactamente lineal entre la señal de control aplicada y la respuesta de posición angular que adopta su eje. A razón de que hay intervalos de señal de control que no producen movimiento al eje del actuador, es decir, el circuito de control interno de los servomotores posee baja sensibilidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Barrientos, L. Peñin, C. Balaguer, & R. Aracil, *Fundamentos de Robótica*, McGraw-Hill, 2007, Pág. 17.
- [2] J. Gómez, A. Ollero, & A. García, *Teleoperación y Telerrobótica*, Pearson Educación S.A., 2006, Pág. 2.
- [3] M. Alencastre, L. Muñoz, & I. Rudomon, "Teleoperating Robots in Multiuser Virtual Environments", procedente de 4<sup>th</sup> Mexican International Conference on Computer Science, México, 2003, Pág. 314.
- [4] J. Ibarra, M. Ramírez, & V. Taboada, "Sensor Fotoeléctrico Aplicado al Movimiento de los Dedos de las Manos", recuperado el 27 de

septiembre del 2012, Disponible:

<http://www.ejournal.unam.mx/cys/vol10-01/CYS10105.pdf>

- [5] P. D. Groves, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Artech House, 2007, pag. 97.
- [6] M. Sacco, "Sensores Inerciales: El mundo en movimiento.", procedente de NeoTeo – Revista de Tecnología, recuperado el 27 de septiembre del 2012. Disponible: <http://www.neoteo.com/-21690-sensores-inerciales-el-mundo-en-movimiento>
- [7] A. Barrientos, L. Peñin, C. Balaguer, & R. Aracil, *Fundamentos de Robótica*, McGraw-Hill, 2007, Pág. 94.
- [8] I. Angulo Martínez, & J. Angulo, *MICROCONTROLADORES PIC. Diseño práctico de aplicaciones*, McGraw-Hill, 2003.
- [9] D. Roldán Martínez, *Comunicaciones inalámbricas. Un enfoque aplicado*, Alfaomega, 2005.
- [10] A. Sabanovic, & K. Ohnishi, *Motion Control Systems*, John Wiley & Sons, 2011.

Se ha desenvuelto en el campo laboral en el área de mantenimiento eléctrico electrónico y de automatización industrial con su propia empresa desde 1990, además por el mismo tiempo ha sido y es hasta la actualidad docente de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Extensión Latacunga, en el Departamento de Eléctrica y Electrónica.

## BIOGRAFÍA



**Edison Herrera.** Nació el 25 de enero de 1989 en Pujilí provincia de Cotopaxi, Ecuador. Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Tecnológico Industrial "Ramón Barba Naranjo" obteniendo el título de bachiller especialidad Electrónica. Es graduado de Ingeniero en Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Extensión Latacunga

en el año 2013. Áreas de Interés: Robótica Industrial, Teleoperación, Programación en Microcontroladores, Programación Industrial en LabView.



**Wellington Zambrano.** Nació el 16 de marzo de 1989 en Santo Domingo provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Nacional "Santo Domingo" obteniendo el título de bachiller en Ciencias especialidad Físico-Matemático. Es graduado de Ingeniero en Mecatrónica de la Universidad de

las Fuerzas Armadas ESPE, Extensión Latacunga en el año 2013. Áreas de Interés: Robótica Industrial, Teleoperación, Programación en Microcontroladores, Programación Industrial en LabView.



**Franklin Silva.** Nació en la Ciudad de Quero, el 22 de Octubre de 1965, sus estudios universitarios los realizó en la Escuela Politécnica Nacional de la Ciudad de Quito en Ecuador, obtuvo el título de Ing. Electrónico con especialidad en Control el año de 1998. Obtuvo además los siguientes títulos:

Diplomado en Gerencia de Marketing en la universidad UNIANDES en 1999. Especialista en Gerencia de Proyectos en la universidad UNIANDES en el 2000. Magister en Dirección de Empresas con Énfasis en Gerencia Estratégica en la universidad UNIANDES de Ambato en el 2006. Diplomado en Redes Digitales Industriales en la Escuela Politécnica del Ejército Extensión Latacunga en el 2009.