

Control y Manipulación de un Brazo Robótico Utilizando un Sistema de Comunicación Inalámbrico con Módulos Xbee

Robot Arm Control and Manipulation using a Wireless Communication System with Xbee Modules

Ana María Gil Restrepo, Héctor Fabio Jiménez Saldarriaga, Santiago Gómez Estrada
Facultad de Tecnologías, Programa de Tecnología Eléctrica, Grupo de Investigación LIDER, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
 {amgil, hfjimenez, sagomez}@utp.edu.co

Resumen— El siguiente artículo pretende mostrar cómo se desarrolló el control y manipulación de un brazo robótico de 5 grados de libertad usando un sistema de comunicaciones inalámbrico, mediante el diseño y creación de un prototipo experimental. El control de este brazo robótico utiliza un sistema embebido que tiene un microcontrolador PIC18F4550, también se describen las pruebas realizadas en cada una de las etapas, como la configuración de los módulos XBee, pruebas realizadas al Brazo Robótico, diseño de interfaces, circuitos electrónicos y los diferentes aspectos que se tuvieron en cuenta para el diseño del prototipo.

Palabras clave— *Microcontroladores, Comunicaciones Inalámbricas, Brazos Robóticos, Sistemas Embebidos.*

Abstract— The following article aims to show how to develop a robot arm control and manipulation platform using a wireless communication system, through design and construction of an experimental prototype. This development makes use of a PIC18F4550 microcontroller to process and control the robot arm, besides that we describe the tests performed in each step of the design, which include XBee settings, test of the each articulation of robot arm, Design of interfaces such as electronic circuits, and the different aspects that were taken into account in the main goal of the prototype.

Key Words — *Microcontrollers, Wireless Communication, Robotic Arms, Embedded Systems.*

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas robóticos programables y multifuncionales diseñados para mover materiales, objetos, o piezas especializadas son cada vez más utilizados e integrados a nivel industrial y doméstico. Según la Federación Internacional de Robótica (*"International Federation of Robotics"*) uno de los primeros desarrollos industriales de un brazo robótico fue la implementación realizada por Devol y

Engelberger [1], aunque finalmente el ingeniero mecánico Victor Scheiman fue quien desarrollo un brazo robótico articulado completamente programable que fue llamado PUMA [6] (*"Programmable Universal Manipulation Arm"*) [2] [3].

Los robots y sus componentes especialmente las articulaciones han tenido un amplio progreso y su aplicación en diferentes campos, como en el campo de la medicina, los brazos robóticos son utilizados en procedimientos de cirugía invasiva mínima [4] [5], transporte de muestras biológicas o químicas entre instrumentos tales como incubadoras, manejadores de líquidos y lectores; en el campo militar, se usan robots y sus articulaciones para la eliminación, destrucción de elementos peligrosos [7]. También se usan, en la limpieza de residuos tóxicos, la minería, la búsqueda y rescate de personas, la exploración del fondo oceánico y la exploración espacial, entre muchas otras aplicaciones [8]. Existen algunas situaciones en las que un operario debe tomar y poner objetos de un lugar a otro donde puede afectar directamente la salud. Por ejemplo en una planta de tratamiento químico donde se debe realizar la mezcla de dos componentes, la desactivación de una mina o artefacto explosivo, etc.

En el pasado se han visto implementaciones que utilizan medios de comunicación inalámbrico como lo realizó Ming Chung [9] utilizando módulos RF, también se han realizado implementaciones utilizando módulos Bluetooth [10]. Para este proyecto se realiza el control de un brazo robótico utilizando módulos XBee Pro S1 y el estándar 802.15.4, Los movimientos del robot son controlados en todas las direcciones y la combinación de ellas para hacer determinados movimientos (Adelante, Atrás, Derecha, Izquierda). El sistema embebido de procesamiento de las señales analógica hace uso de un microcontrolador PIC18F4550 y la tarjeta SSC-32 para

controlar la posición de los servomotores que componen el brazo robótico.

II. CONTENIDO

Para el desarrollo de este prototipo experimental, decidimos realizar una división en la composición total del sistema en tres subsistemas que son:

- Sistema Mecánico.
- Sistema Embebido.
- Sistema de Comunicaciones.

Cada uno de estos subsistemas presenta una codependencia para su funcionamiento integral.

A. Sistema Mecánico

El sistema mecánico está conformado principalmente por el brazo robot, el cual cuenta con movimientos en diferentes direcciones efectuados o realizados por servomotores¹, estos servomotores representan entonces lo más cercano a la articulaciones de un brazo humano, realizando movimientos de desplazamiento y de giro. En términos técnicos ¿cómo se puede identificar cuantas articulaciones tiene un brazo robótico?, Para responder esta pregunta se introduce el concepto de *grados de libertad*.

- Grados de Libertad (GDL)*: un grado de libertad se refiere a la cantidad de movimientos que puede realizar una articulación o junta con respecto a otra. Así, dependiendo del número de articulaciones se tiene una configuración de robot diferente.

En este caso en particular se estudió y diseño un robot con 5 grados de libertad, (5 servomotores), diseñado para la recolección o toma de objetos en tres posiciones específicas, definidas en un rango de 180 grados. Por consiguiente, los movimientos ejecutados por estos deben llevar una secuencia lógica finita.

A pesar de tener una semejanza con los movimientos del brazo humano este carece de conocimiento del entorno. Por lo tanto, las coordenadas en las cuales el brazo va a desplazarse se definieron previamente para evitar colisión entre los servomotores simultáneamente.

Finalmente, este brazo está compuesto por: una base ó cuerpo, el hombro, el codo, la muñeca, y la pinza o mano sujetadora.

- Características de Servomotores*. La fuerza, la velocidad, las posiciones de los servomotores son parámetros muy importantes que no pueden ser elegidos al azar,

dependiendo de la aplicación deben ser estratégicamente seleccionados. De esta manera, se evita que los servomotores sean deteriorados por esfuerzos o movimientos fuera de su rango. Para el brazo implementado se utilizaron tres tipos de servomotores el HS-755HB ver Figura 1, el cual se utilizó para el hombro, el HS-645MG ver Figura 2 ,

- Tabla 2 , para el codo, y finalmente el HS-422 ver
- Tabla 2. *Características técnicas del servomotor HS-645MG*. Tomado de [17]
- Tabla 3, para tres articulaciones base, muñeca y gripper.



Figura 1: Servomotor HS-755HB. Tomado de [16]

1x HS-755HB (HOMBRO)	
Tipo de Motor :	3 Pole
Tipo de rodamiento	Dual Ball Bearing
Velocidad (4.8V/6.0V):	0.28 / 0.23
Torque oz./in. (4.8V/6.0V):	153 / 183
Torque kg./cm. (4.8V/6.0V):	11.0 / 13.2
Tamaño en pulgadas:	2.32 x 1.14 x 1.96
Tamaño en milímetros:	58.93 x 28.96 x 49.78
Peso en gramos:	110
Tipo de piñonería	Karbonita

Tabla 1. Características técnicas del servomotor HS-755HB. Tomado de [16]



Figura 2. Servomotor HS 645MG. Tomado de [17]

1x HS 645MG (CODO)	
Tipo de Motor :	3 Pole
Tipo de rodamiento	Dual Ball Bearing
Velocidad (4.8V/6.0V):	0.24sec/ 0.20sec
Torque oz./in. (4.8V/6.0V):	107/133.33
Torque kg./cm. (4.8V/6.0V):	(7.7kg.cm/9.6kg.cm
Tamaño en pulgadas:	(1.59x0.77x1.48in)
Tamaño en milímetros:	40.6x19.8x37.8mm
Peso en gramos:	55.2g(1.94oz)
Tipo de piñonería	Metálica

Tabla 2. Características técnicas del servomotor HS-645MG. Tomado de [17]

¹ Servomotor: Un servomotor (o servo) es un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ser controlado en posición. Es capaz de ubicarse en cualquier posición dentro de un rango de operación (generalmente de 180°) y mantenerse estable en dicha posición.



Figura 3. Servomotor HS-422HD. Tomado de [18]

1x HS 422HD (MUÑECA-BASE-GRIPPER)	
Tipo de Motor :	3 Pole
Tipo de rodamiento	Dual Ball Bearing
Velocidad (4.8V/6.0V):	0.21sec/0.20sec
Torque oz./in. (4.8V/6.0V):	42 oz/in/56.93 oz/in.
Torque kg./cm. (4.8V/6.0V):	3.3 kg.cm/4.1 kg.cm
Tipo de piñonería	Nylon

Tabla 3. Características técnicas del servomotor HS-422HD. Tomado de [18]

Estos tres tipos de servomotores son ideales para el funcionamiento del brazo robótico ya que tienen la velocidad y el torque para soportar el peso de la pieza a sujetar y a su vez soportar el peso de la armazón del mismo brazo, así, se reducen las probabilidades de un deterioro o inclusive un daño irremediable en los mismos.

B. Composición Sistema Embebido

Un sistema embebido según la definición de Wilmschurst [12] y Kamal [11] es aquella implementación de hardware y software que se encuentra basada en microcontroladores o microprocesadores que poseen una gran cantidad de dispositivos para el procesamiento de señales eléctrica, con la posibilidad de estos ser autónomos e independientes ó elementos de un gran conjunto, tienen la posibilidad de tratar diferentes variables físicas y en diversos entornos pero utilizadas en aplicaciones específicas.

Microcontrolador PIC18F4550

Un micro controlador es un circuito integrado que incluye en su interior las tres unidades funcionales de una computadora:

- Unidad central de procesamiento
- Memoria
- Periféricos de entrada y salida.

Los microcontroladores son diseñados para ser utilizados en aplicaciones específicas y así reducir el costo económico y el consumo de energía. Su tamaño es directamente proporcional por eso el tamaño de la unidad central de procesamiento, la cantidad de memoria y los periféricos incluidos en él. Los microcontroladores PIC18 están categorizados como gama alta que cuenta con un set de instrucciones RISC, tienen memoria de programa tipo FLASH, un repertorio de 77 instrucciones de 16 bits. La memoria de programa puede ser de hasta 2MB (220 bytes ó 210 palabras de 16 bits), y la

memoria de datos puede llegar hasta 4 k (4096) registros de 8 bits cada uno.

Además poseen una pila de 31 niveles de profundidad, así como un sistema de interrupciones muy elaborado provenientes de los dispositivos de entrada y salida integrados en el microcontrolador, y tres interrupciones externas, se posee una gran variedad de dispositivos de entrada y salida integrados como el convertidor de señales analógicas utilizadas en este proyecto, comparador de señales, generadores de señal PWM, soporte para aplicaciones que requieran uso de USB 2.0 entre otros.

En este caso en particular fue muy importante hacer uso de una característica significativa en los microcontroladores, las interrupciones externas o internas. Estas interrupciones permiten desempeñar un proceso cualquiera, con una ejecución de instrucciones normal y secuencial hasta que se presenta un acontecimiento que puede ser una señal externa, o interna del microcontrolador, cuando esto sucede el microcontrolador automáticamente deja de hacer la tarea que se encontraba realizando y ejecuta el bloque de código que este determinado por la interrupción. Este método es muy utilizado para disminuir el consumo de energía del microcontrolador pues es posible que este se encuentre en modo *sleep* o *standby* y salir de él solo cuando sea necesario realizar una acción, también es posible interrumpir la ejecución de programa actual para ejecutar una tarea que presenta mayor prioridad.

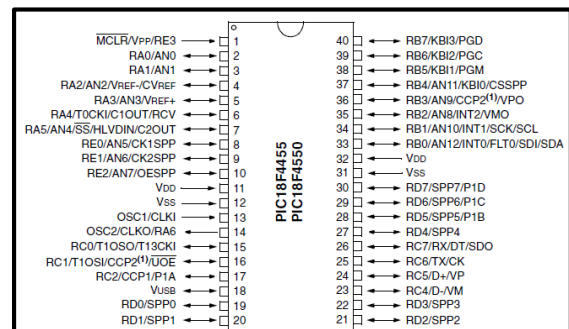


Figura 4. Diagrama de Pines Microcontrolador PIC18F4550.

Para este prototipo se utilizaron dos tipos de interrupciones, una por activación de las *Flags* del dispositivo USART, en modo de recepción o transmisión de un dato, e interrupción externa mediante una entrada digital o análoga con la cual se leen las teclas del joystick o palanca de mando del brazo robótico.

C. Sistema De Comunicaciones Inalámbricas

El sistema de comunicaciones inalámbricas (**SCI de ahora en adelante**) al igual que los otros sistemas utilizados en el desarrollo final del prototipo experimental se basó en el diseño de máquinas y robots modulares [14] donde existiera la posibilidad que cada subsistema pudiera ser reemplazado por módulos con características similares, es claro que el SCI puede ser reemplazado por otros dispositivos de

comunicaciones que utilicen una interfaz SPI, USART, o UART de diferentes alcances, aplicaciones y costos.

La motivación para la implementación de este SCI es la reducción de gastos, ya que no es necesario realizar el cambio del cableado de datos, fácil integración, permitiendo la movilidad y cobertura en una gran área. Para el desarrollo de este se decidió utilizar hardware estándar y posicionado en el mercado, y que tuviera soporte del estándar *IEEE 802.15.4* por su flexibilidad de red, bajos costos, bajo consumo de energía, fiabilidad en la transmisión de datos ya que utilizar protocolos muy sofisticados como el estándar IEEE 802.11 (WLAN) [13] afectaría directamente en el consumo energético, y capacidad de procesamiento del módulo de comunicación [13].

Se utilizaron los módulos XBee, de *Digi International* una empresa pionera constituida legalmente en Estados Unidos, ellos cuentan con al menos 30 versiones diferentes para la implementación en redes inalámbricas de dispositivos industriales, entre ellas la variación del alcance, tipos de antena, firmware's disponibles, potencia de transmisión etc.

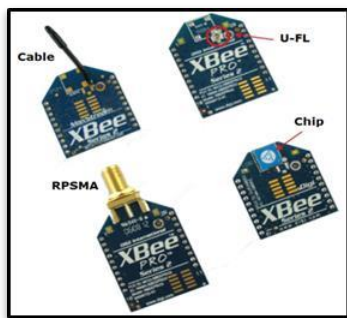


Figura 5: Versiones de Antena, Módulos XBee. Tomado de [15]

Actualmente en el mercado hay dos variedades de este tipo de módulos que son:

- XBee Serie 1.
- XBee Serie 2.

Los **XBee Serie 1** utilizan un microchip creado y desarrollado por Freescale, para realizar todo tipo de conexiones entre los módulos, además hacen uso de un protocolo para la formación de redes mesh propietaria Digi conocido como Digimesh un protocolo muy similar al Zigbee².

Los **XBee Serie 2** utilizan un microchip desarrollado por Ember Networks, este tiene más versatilidad en cuanto a los protocolos utilizados por la red mesh, hace uso de diferentes estándares, principalmente Zigbee.

Hay que mencionar que a pesar de que los módulos son del mismo fabricante, estas dos versiones no son compatibles entre sí mismas³.

III. METODOLOGÍA

Con el fin de reducir tiempo, aumentar eficiencia y lograr buenos resultados se planteó la división de todo el sistema en diferentes subsistemas, de forma tal que el análisis y desarrollo se tornara un poco más sencillo de realizar. A continuación se dará a conocer cuáles fueron las pruebas a esos subsistemas y como finalmente se acoplaron en un solo conjunto.

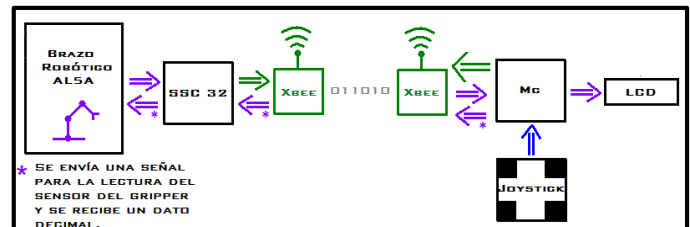


Figura 6. Diagrama de bloques conexión, Microcontrolador y brazo robótico.

A. Brazo robótico enlazado a tarjeta SSC32

En esta etapa de trabajo se procedió a ensamblar el brazo elegido AL5A, compuesto por 5 servomotores como se especificó previamente, fabricado con componentes de aluminio anodizado negro y tubos de aluminio, el cual soporta un peso de sujeción de 4 oz con el brazo totalmente extendido.

Un vez ensamblado se realizan pruebas de la tarjeta SSC32 el cual tiene integrado un microcontrolador de ATMEL específicamente el ATMEGA168-20PU, apta para manejar el funcionamiento de 32 servomotores, también es programable mediante puerto serial o comunicación inalámbrica utilizando un microcontrolador. Se envía una trama de datos específica con el fin de controlar la posición de cada uno de los servomotores mediante señales PWM⁴ que son evidenciadas por el movimiento de los servos.

En esta etapa, se observaron los movimientos de los servomotores comunicando la tarjeta por el puerto serial, programándola con el software oficial de *Lynxmotion*. Así se determinaron los rangos de cada uno de ellos, y a su vez se establecieron los límites inferiores y superiores, los cuales son muy importantes a la hora de desarrollar el programa principal en lenguaje C para el Microcontrolador que es encargado de enviar las tramas por cada movimiento del joystick.

³ http://knowledge.digi.com/articles/Knowledge_Base_Article/The-Major-Differences-in-the-XBee-Series-1-vs-the-XBee-Series-2/?l=en_US&fs=RelatedArticle, Compatibilidad.

⁴ Las señales PWM utilizadas para controlar los servos están formadas por pulsos positivos cuya duración es proporcional a la posición deseada del servo y que se repiten cada 20ms (50Hz)

² http://www.digi.com/pdf/wp_zigbeevsdigimesh.pdf, Comparación entre DigiMesh y Zigbee.

En la Fig. 7 se observa el brazo ensamblado con su tarjeta SSC32.

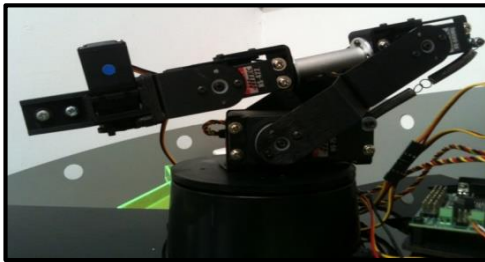


Figura 7: Brazo robótico AL5A y tarjeta SSC32.

B. Programación de Microcontrolador

Para la programación del microcontrolador PIC 18F4550 se utilizó como entorno de desarrollo el oficial ofrecido por la misma empresa Microchip, el MPLAB X⁵ en su versión 2.10 cuenta con capacidad para gestionar múltiples proyectos, herramientas de depuración simultánea, editor avanzado, soporte de herramientas de desarrollo como el Picket3 entre otros.

El programa del microcontrolador fue escrito en lenguaje C, utilizando el compilador gratuito C18 versión 3.40, algunas características son:

- Optimización para uso de memoria microcontrolador.
- Alta compatibilidad con ANSI C.
- Soporte oficial y de la comunidad.
- Librerías de código abierto.
- Versión de prueba para estudiantes.
- Facilidad para la portabilidad de código a otros a micros de gama media.
- Recursividad, entre overlays.

En las Fig. 8, Fig. 9, se puede ver el call graph y diagrama de flujo del algoritmo implementado, donde hace uso recursivo del convertidor ADC y de las interrupciones por cambio de estado.

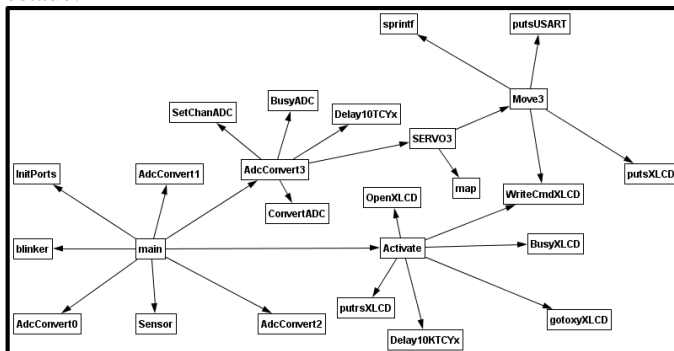


Figura 8: Call Graph, Progreso en llamadas de funciones.

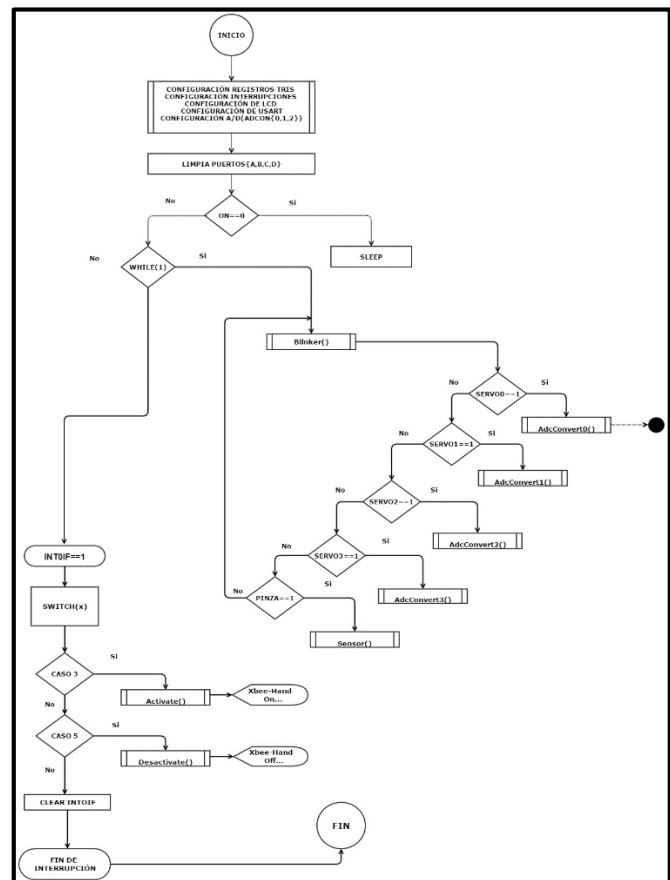


Figura 6: Diagrama de Flujo, algoritmo recursivo implementado.

C. Control de mando o Joystick

Existen diversas formas para la manipulación de un brazo robótico. Sin embargo, se implementó un control de mando que simulara visualmente el mismo movimiento de brazo. El joystick tiene una forma ergonómica muy cómoda para su manejo, es estable y además de la palanca tiene una variedad de teclas digitales, que pueden ser utilizadas inclusive para controlar cada servomotor.

El joystick puede ser conectado a través de una conexión USB, o como en este caso personalizarlo para obtener una señal independiente de la palanca y de cada tecla.

En esta etapa se configuró el joystick, de tal manera que los potenciómetro de la palanca y las teclas digitales se tomaran independientemente, se conectaron al microcontrolador y a través de programas de prueba se capturaron dichas señales, unas analógicas y otras digitales.

Para observar claramente que el microcontrolador sí tomaba las señales, se dispuso de una pantalla de cristal líquido o LCD 16x2, la cual permite visualizar mensajes. Los mensajes no son significativos, lo importante es que al presionar una tecla se pueda ver el mensaje programado o al mover la palanca sea leído el valor de su posición. En la Figura 8 se

⁵ Entorno de desarrollo ofrecido por Microchip, <http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/family/mplabx/>

puede observar el joystick utilizado y las teclas seleccionadas para los movimientos de cada servomotor, ver Tabla 4.



Figura 8: Joystick implementado.

RELACIÓN SERVOMOTOR - JOYSTICK.	
Servo 0 "base"	Potenciómetro Lateral + Botón1
Servo 1 "Hombro"	Potenciómetro Frontal + Botón2
Servo 2 "Codo"	Potenciómetro Muñeca + Botón3
Servo 3 "Muñeca"	Potenciómetro Muñeca + Botón4
Servo 4 "Gripper"	Botón Gatillo.

Tabla 4: Relación movimiento de servos por medio del joystick.

D. Programación de Xbee Pro S1

Para programar el firmware de estos módulos se debe utilizar un software facilitado por el fabricante llamado **X-CTU**, esto también es posible realizarlo por medio comandos AT pero se hace dispendioso, además del recurso del software se debe poseer una interfaz serial como medio físico para la sobre escritura de los parámetros del firmware del módulo XBee, en el mercado hay diferentes interfaces USB o seriales.

Se realiza la modificación de todos los parámetros (*Pan id, Key, Serial Interface, Api's .etc.*) las pruebas de comunicación se llevaron a cabo en tres etapas que fueron:

- Modificación de parámetros de Firmware.
- Puesta en Marcha de diferentes topologías.
- Selección de Conexión útil para la implementación.

Se evidencio que era posible actualizar los firmware de los módulos XBee, se hicieron pruebas con topología punto a punto, estrella, clúster tree, determinando que para nuestra implementación lo más sencillo seria utilizar una conexión punto a punto, aunque sería posible utilizar cualquier otra topología estableciendo prioridades entre los nodos.

E. Resultados.

Una vez ejecutados todos los subsistemas se procede a unir cada uno de ellos en un solo sistema obteniendo un brazo robótico de 5 grados de libertad, el cual realiza movimientos de desplazamiento y giro en tres posiciones previamente definidas para la obtención de una pieza. Estos giros tienen un

alcance máximo de 180° respetando el rango de cada servomotor.

El control es realizado por un joystick, comunicado de forma inalámbrica a través de los módulos Xbee. Adicionalmente, se pueden observar mensajes cortos en la LCD que indican si el sistema esta encendido, apagado, o en movimiento.

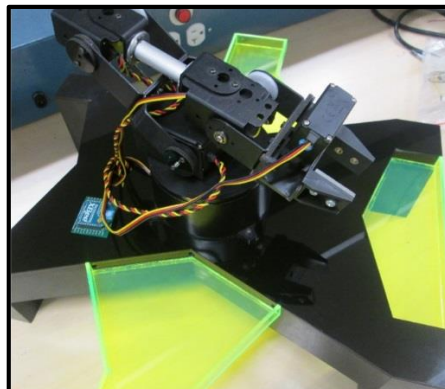


Figura 1. Ejemplo de figura en un artículo.



Figura 1. Ejemplo de figura en un artículo.

F. CONCLUSIONES

Hemos presentado un proyecto en el cual se realizó una implementación y control, manipulación de un brazo robótico de cinco grados de libertad, utilizando como módulos de comunicación los XBee Pro S1 presentando una confiable despliegue y puesta en marcha para el sistema de comunicaciones inalámbrico. Se alcanzaron a desarrollar todos los objetivos del proyecto en la transmisión inalámbrica de datos, el acople de los diferentes subsistemas del desarrollo, que requirió de la pericia y destreza para la integración de diversas áreas del conocimiento, como la electrónica, desarrollo de software, sistemas embebidos basados en microcontroladores PIC, diseño de circuitos impresos mediante software CAD, conocimiento de brazos robóticos y el trabajo en equipo. Se espera que en un futuro este brazo robótico permita a estudiantes, e investigadores en el área de la robótica explorar como implementar un brazo que

permita tomar y desplazar objetos en la forma mas rápida y fácil.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación y desarrollo de prototipo experimental fue financiado por la Universidad Tecnológica de Pereira, a través del grupo de investigación L.I.D.E.R del programa de Tecnología Eléctrica. Los autores desean agradecer a esta institución y al programa por haber permitido cumplir a cabalidad con la construcción del prototipo. También expresar su mayor gratitud con todos aquellos profesores que aportaron y dieron sugerencias, Jhon Jaime Robby Goetz, Edison Duque Cardona, Sigilfredo Arregoces Campo.

REFERENCIAS

- [1]. B. Malone. (2011, Sept.). George Devol: A life Devoted to Invention, and Robots. *IEEE Spectrum*. [Online]. Available: <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/george-devol-a-life-devoted-to-invention-and-robots>.
- [2]. E. Wise, *Robotics Demystified*, vol. I. New York: McGraw-Hill, 2005.
- [3]. R. M. Murray, Z. Li, S. S. Sastry, "A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation", 1st ed, CRC Press, 1994, pp 3-4.
- [4]. D. B. Camarillo, T. M. Krummel, J. K. Salisbury Jr, "Robotic technology in surgery: Past, present, and future", *The American Journal of Surgery*, 188, Oct. 2004.
- [5]. C. Platasa, E. Zouliasb, "Impacts of Robotic Assisted Surgery on Hospital's Strategic Plan", *3rd International Conference on Integrated Information (IC-ININFO)*. Vol. 147, pp 321-326, Aug. 2014.
- [6]. G. C. DEVOL JR., "Programmed Article Transfer," U.S. Patent 2 988 237 A, Jun. 13, 1961.
- [7]. A. Unluturk, O. Aydogdu, "Design and implementation of a mobile robot used in bomb research and setup disposal," presented at Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), International Conference on, Pitesti, Romania, 2013.
- [8]. R. C. Luo, K. L. Su, "A multi agent multi sensor based real-time sensory control system for intelligent security robot". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, 2003, pp.2394-2399.
- [9]. T. Ming Chun, "Autonomous Robot Navigation using Radio Frequency". Bs Project. Thesis. Universiti Teknologi Malaysia, Skudai, 2005.
- [10]. M. H. Gama, I. G. Villaseñor, C. Mondragón, M. Sánchez, A. E. Martínez, "Remote Control of a Robotic Arm via Bluetooth," CETYS Universidad, CITEDI-IPN, Tijuana, Baja California, 2010.
- [11]. R. Kamal, *Embedded Systems*, Second Edition. New Delhi: McGraw Hill, 2008, p. 3-4.
- [12]. T. Wilmhurst, *Designing Embedded Systems With Pic Microcontrollers, Principles and Applications*, Second Edition. Great Britain: Newnes, 2010, p. 4-9.
- [13]. C. Saad, E. A. Cheikh, H. Abderrahmane, B. Mostafa, "Comparative Performance Analysis of Wireless Communication Protocols for Intelligent Sensors and Their Applications". (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 5, No. 4, 2014, pp. 77-78.
- [14]. J. A. Jiménez Builes, J. F. Ramírez Patiño, J. J. González España, "Sistema Modular de Robótica Colaborativa Aplicado en Educación," *Rev.fac.ing.univ. Antioquia*. 2011, n.58, pp. 163-172.
- [15]. R. Faludi, *Building Wireless Sensor Networks: A Practical Guide to the ZigBee Mesh Networking Protocol*, First Edition. Oreilly Media, New York, 2010
- [16]. D. Electronics, «Dynamo Electronics,» [En línea]. Available: http://www.dynamo-electronics.com/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.product_details&flypage=dynamo.tpl&category_id=112&product_id=949&Itemid=58. [Último acceso: 08 2015].
- [17]. D. Electronics, «Dynamo Electronics,» [En línea]. Available: http://www.dynamo-electronics.com/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.product_details&flypage=dynamo.tpl&category_id=111&product_id=188&Itemid=58. [Último acceso: 08 2015].
- [18]. D. Electronics, «Dynamo Electronics,» [En línea]. Available: http://www.dynamo-electronics.com/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.product_details&flypage=dynamo.tpl&category_id=110&product_id=195&Itemid=58. [Último acceso: 08 2015].