

INTERFAZ GESTUAL PARA LA MANIPULACIÓN DE SISTEMAS ROBÓTICOS

GESTURAL INTERFACE FOR ROBOTIC SYSTEMS MANIPULATION

Erick Martín Rodríguez Baeza

Tecnológico Nacional de México / ITS de Zacapoaxtla, México
erick_martin96@hotmail.com

Angel Vergara Betancourt

Tecnológico Nacional de México / ITS de Zacapoaxtla, México
avergarabetancourt@gmail.com

Iván Osorio Verde

Tecnológico Nacional de México / ITS de Zacapoaxtla, México
f40.i.v.a.n@gmail.com

Recepción: 13/enero/2022

Aceptación: 7/marzo/2022

Resumen

Este artículo expone el desarrollo de una interfaz gestual electrónica que permite manipular de forma remota, un sistema robótico de 3 grados de libertad. Este proyecto surge en el contexto de ofrecer una herramienta simple para manipular y programar robots. Se pretende proporcionar a las personas que carecen de un conocimiento experto en lenguajes de programación de robots, una alternativa para controlar los movimientos de un manipulador, grabar posiciones y generar rutinas y trayectorias que representen una tarea específica, tanto en el campo académico y de investigación, como en el ámbito industrial.

El sistema consiste en un sensor inercial MPU9250 que detecta los movimientos gestuales de la mano, de un microcontrolador PIC18F4550 que procesa esta información y la envía por bluetooth, y de un sistema de actuación conformado por servomotores, que le permiten a un pequeño manipulador reproducir tales movimientos.

Palabras Clave: Instrumentación, interfaz gestual, MPU9250, PIC18F4550, Robótica.

Abstract

This paper exposes the development of an electronic gestural interface, that allow to manipulate a robotic system with 3 degrees of freedom. This project arises in the context of offering a simple tool to manipulate and to program to robots. The intention is to give to the people without knowledge in robotics programming languages, an alternative to control the movements of a manipulator, to record positions and to generate routines and trajectories for a specific task., so in the academic and research field, as in the industrial ambit. This system consists of an MPU9250 inertial sensor that detects the gestural movements of the hand, besides of a PIC18F4550 microcontroller that process the information and send it through Bluetooth, and also for an actuation system conformed by servomotors that allow to a little manipulator to reproduce such movements.

Keywords: *Gestural interface, Instrumentation, MPU9250, PIC18F4550, Robotics.*

1. Introducción

A partir de los años 60's los robots fueron introducidos en los procesos de manufactura [Østergaard, 2018], desde entonces, su avance no se ha detenido y en la actualidad la robótica está inmersa en casi cualquier ámbito de la vida del ser humano (industria, educación, transporte, medicina, alimentación, agricultura, exploración, etc.). Con este crecimiento, los retos tecnológicos también aparecen, por lo que se exige de la ingeniería un mayor desarrollo tecnológico en las diferentes áreas que intervienen en el campo de los robots.

En este sentido, la manipulación y programación de servomecanismos no es un tema menor, y disponer de métodos de fácil programación representa un avance significativo en el camino evolutivo de la robótica; más aún, cuando estos forman parte esencial de la industria 4.0 [Sachon, 2018]. De manera muy particular, el surgimiento de los Cobots (robots colaborativos) representan un reto en cuanto a la interacción hombre-máquina [Østergaard, 2018], [Kadir, 2018], además de que también serán parte fundamental de la industria 5.0, ya que en este concepto se pretende que la mayoría de las soluciones estén centradas en la persona [Nahavandi, 2019].

Una parte esencial en el desarrollo de estos robots, han sido los sistemas de visión y detección de movimiento. Así por ejemplo se han reportado trabajos en los cuales, se han propuesto una diversidad de soluciones para la interacción con el ser humano. En este sentido [LaViola Jr., 2013] presenta un estudio del estado del arte de las diferentes formas en las que se puede recolectar datos de una interacción gestual en 3D, mientras que, en [Broccia, 2011] se expone el control de un robot humanoide utilizando un sistema de visión basado en una cámara RGB-D de Microsoft Kinect. De igual forma en [Serafimov, 2012], se menciona la posibilidad de interactuar con un robot jugador de soccer, utilizando el acelerómetro de un teléfono móvil.

Las unidades de medición inercial (IMU), también han jugado un papel muy importante en el desarrollo de la robótica. Por ejemplo: industria, rehabilitación médica, deportes, navegación, robótica, realidad aumentada, etc. [Ahmad, 2013]. En la robótica móvil, los dispositivos IMU también han sido fundamentales, así como en aquellos sistemas en los cuales se requiere de un análisis cinemático, calibración y teleoperación de robots [Yavuz, 2021], [Du, 2013].

Con base en lo reportado en la literatura y el análisis del estado del arte de la robótica, se hace evidente que existe la necesidad de desarrollar métodos y técnicas de manipulación y programación de robots que puedan ser accesibles a un mayor número de usuarios. Por ejemplo, personas con una amplia experiencia en procesos industriales pero un conocimiento limitado en métodos avanzados de programación, tanto de bajo como de alto nivel. O bien para incidir de manera directa en la enseñanza de la robótica en los diferentes niveles académicos y educativos.

Una solución a lo anterior es el desarrollo de métodos de programación gestual de robots, como se ha propuesto en [Voyles, 1999]. Este método, consiste en una interacción directa humano-robot y el reconocimiento e interpretación de los movimientos del usuario, mediante algún tipo de sensor o dispositivo de visión, como se expone en [Tsarouchi, 2016]. De esta manera, con la información recolectada, se analiza y se codifica para posteriormente ser transmitida para que esta pueda ser reproducida por un manipulador [Padilla, 2020]. Para lograr una interacción gestual con los robots, existen diferentes opciones de hardware y

software. Algunas con mayores prestaciones funcionales, pero con un alto grado de complejidad en su implementación o mayor costo, y otras técnicamente más simples o económicas, pero con un desempeño pobre o limitado. Por esta razón, en este trabajo se ha propuesto una interfaz de bajo costo para la programación gestual de robots, basada en un sensor inercial MPU9250 y un microcontrolador PIC18F4550. El objetivo es diseñar y desarrollar un sistema de adquisición de señales basado en el sensor inercial MPU9250, que permita registrar los movimientos de la mano de un usuario y con ello determinar la posición y orientación de esta, para posteriormente enviar esta información a un dispositivo de procesamiento de señales, como lo es el microcontrolador PIC18F4550. Posteriormente la información codificada es enviada de forma inalámbrica hacia un manipulador, el cual la decodificará y reproducirá los movimientos de la mano, como se esquematiza en la figura 1.

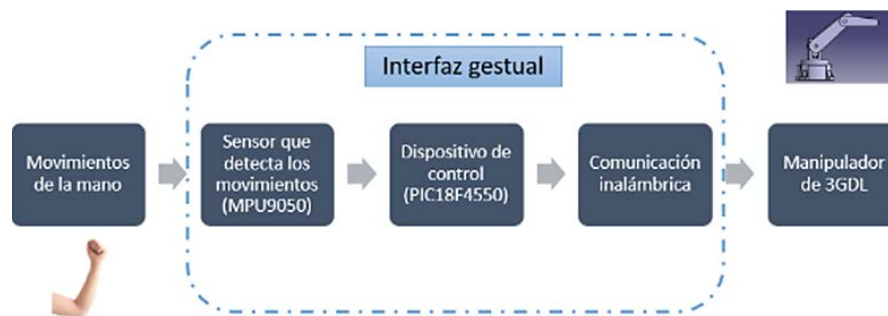


Figura 1 Diagrama esquemático de la interfaz gestual de robots.

De esta manera, se logró obtener una interfaz remota, de manipulación y control de un prototipo robótico, con la cual se logran registrar movimientos de articulaciones humanas y grabar las posiciones de cada movimiento. De esta forma, fue posible realizar trayectorias y rutinas, que son programadas de forma gestual en el manipulador o brazo robot.

2. Métodos

El desarrollo de este proyecto sigue el Método Hipotético – Deductivo – Experimental. Es decir, se parten de principios generales del funcionamiento de

dispositivos electrónicos y sistemas mecánicos y partir del desarrollo experimental de prototipos, se logra la deducción de comportamientos en sistema mecatrónicos ante diferentes situaciones de prueba. El proyecto se estructuró en cuatro etapas, las cuales se esquematizan en la figura 2.

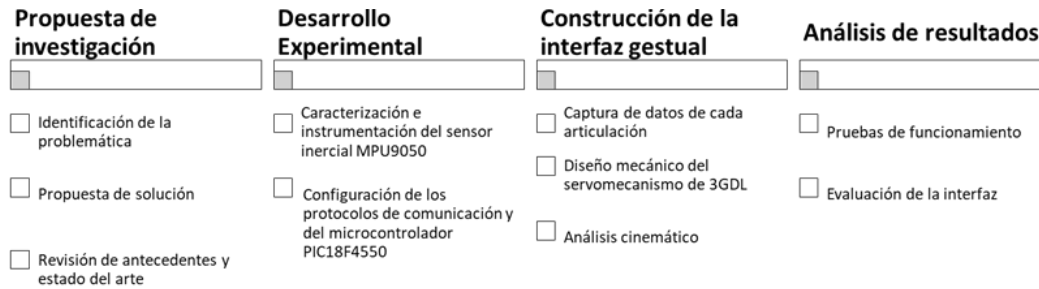


Figura 2 Proceso metodológico del proyecto.

En la primera etapa, se inicia con la identificación de una necesidad (desarrollar sistemas de interacción simple con un robot) y se formula una posible solución (desarrollar una interfaz gestual de programación de robots). Entonces, se establecen las especificaciones del sistema y su factibilidad de desarrollo. A continuación, se realiza una búsqueda de antecedentes y estado del arte que sustenten la propuesta de solución y se propone un primer diseño mecánico y electrónico del sistema, tal y como se muestra en la figura 3.

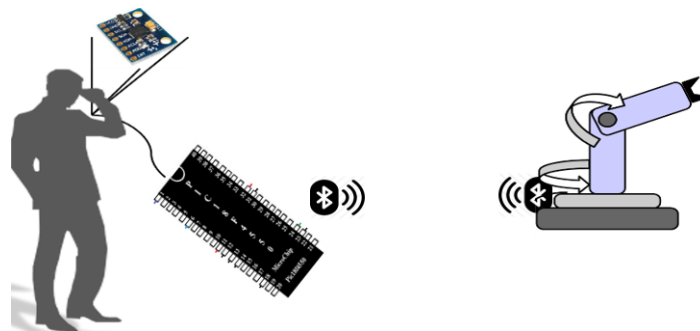


Figura 3 Interfaz gestual de robots con conexión remota.

En una segunda etapa, se realiza el desarrollo experimental. Esta etapa resulta fundamental para el desarrollo del proyecto, pues es aquí, donde se configura y calibra el sensor inercial MPU9050, que es mostrado en la figura 4. Este dispositivo

electrónico se utiliza para medir y analizar los movimientos lineales y angulares de un cuerpo [InvenSense, 2021]. Está conformado por acelerómetros, giroscopios y magnetómetros, mientras que los acelerómetros miden la aceleración lineal, los giroscópicos determinan la velocidad angular y el magnetómetro permite conocer la orientación de un cuerpo en función del norte magnético. Por esta razón, una adecuada instrumentación y acondicionamiento de las señales captadas por el sensor forman parte de un correcto diseño.

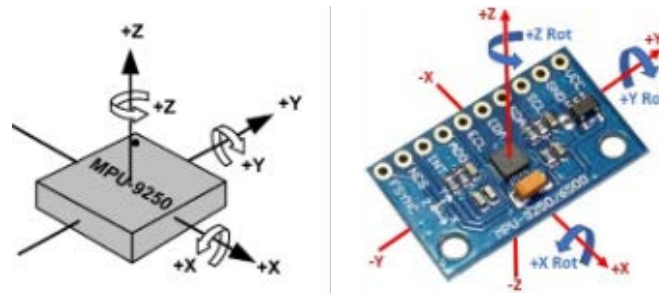


Figura 4 Sensor inercial IMU MPU9050.

Este sensor cuenta con tres convertidores de analógico a digital (ADC) de 16 bits para digitalizar las salidas del giroscopio, tres ADC de 16 bits para digitalizar las salidas del acelerómetro y tres ADC de 16 bits para digitalizar las salidas del magnetómetro. Además, el dispositivo incluye filtros digitales programables que ayudan a rechazar los efectos de ruido durante la medición, un reloj de precisión, un sensor de temperatura integrado e interrupciones programables. En cuanto a la comunicación, se tienen interfaces seriales I²C y SPI y un rango operativo de VDD de 2.4 a 3.6 V. La instrumentación de sensor inercial que consiste principalmente en el acondicionamiento de la señal del sensor inercial MPU9250, se lleva a cabo utilizando el microcontrolador PIC18F4550 [Microchip, 2021]. La comunicación entre el sensor y el microcontrolador se realiza a través de una interfaz basada en el protocolo de comunicación I²C, que solo requieren dos líneas de bus, uno para la transmisión de datos en serie (SDA) y otro para la señal de reloj (SCL). Además, cada dispositivo conectado al bus es direccionable por software por una dirección única y en todo momento existen simples relaciones maestro / esclavo, ya sea como emisores o como receptores.

Para el proceso de comunicación entre el sensor y el microcontrolador, el MPU9250 funciona como elemento esclavo, mientras que el PIC18F4550 que es el procesador del sistema, se configura como el maestro. De esta forma se realiza la lectura del giroscopio y el acelerómetro a lo largo de los ejes X, Y y Z con comunicación bajo el protocolo I²C y con velocidad máxima del bus de 400 kHz. Las lecturas del giroscopio en grados por segundo (dps) y las lecturas del acelerómetro en grados por segundo al cuadrado (unidad). Importante mencionar que la librería I²C ocupada en este proyecto fue tomada de la plataforma “*electronicwings*” [ElectronicWings, 2020] la cual es de uso libre. El diagrama de flujo de la figura 5, contiene el algoritmo de la comunicación entre el MPU y el microcontrolador.

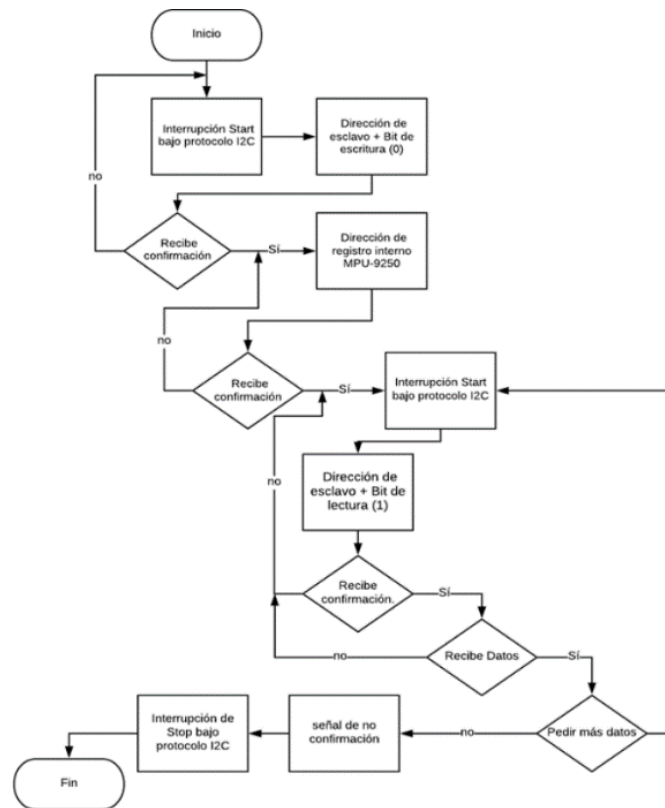


Figura 5 Diagrama de flujo para comunicación MPU9050-PIC18F4550.

Una vez que los datos son recabados por el sensor inercial, se almacenan y codifican a datos tipo entero por microcontrolador PIC18F4550, para posteriormente, procesarlos mediante algoritmos computacionales. Por otra parte,

para realizar la comunicación inalámbrica, se dispuso de los módulos bluetooth HC-05, los cuales, siguiendo los diagramas de flujo de la figura 6 son configurados uno como maestro y el otro como esclavo.

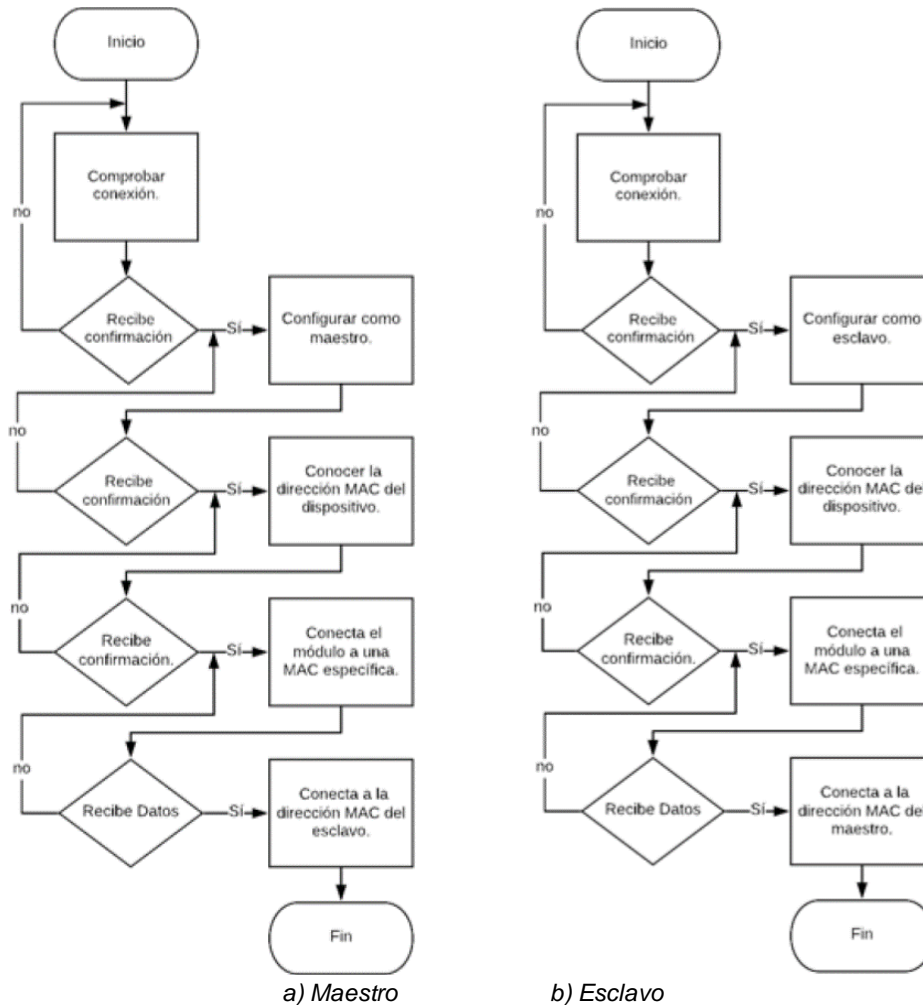


Figura 6 Diagrama de flujo para configuración de modulo bluetooth.

El dispositivo que envía los datos obtenidos del sensor se configura como maestro y se agrega una ruta única de emparejamiento, para posteriormente el dispositivo que se encuentre como esclavo se empareje con el dispositivo emisor. El esquema de la conexión entre el HC-05 y microcontrolador PIC18F4550 se muestra en la figura 7. Con el valor angular de cada articulación en el microcontrolador, es posible transmitir con el módulo de bluetooth HC-05, estos datos por medio de PWM a cada servomotor del manipulador de 3GDL, el cual está conformado por 3 servomotores

MG995 de la marca Tower Pro. Para relacionar los movimientos de la mano, con el movimiento de los actuadores del manipulador, resulta necesario determinar matemáticamente la posición y movimientos del manipulador, por esta razón, se utiliza el análisis de la cinemática del brazo robot, a través del análisis de Denavit-Hartenberg y método geométrico.

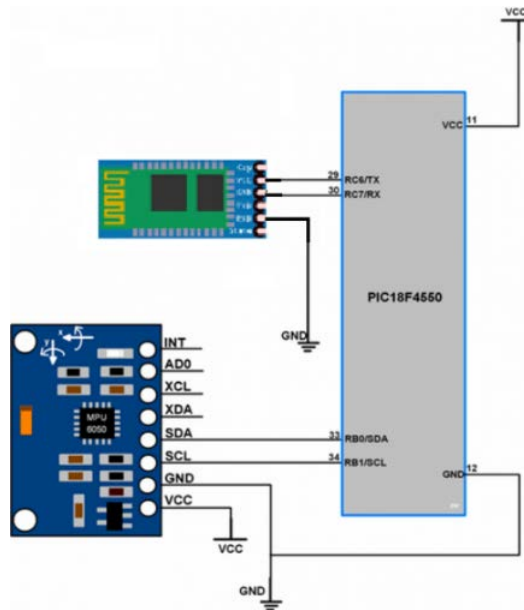
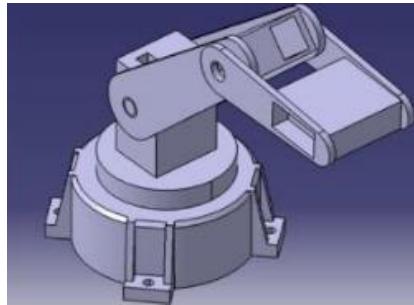
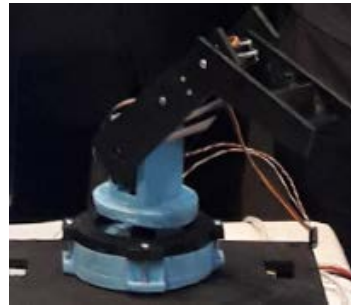


Figura 7 Diagrama de conexión MPU9050-PIC18F4550-bluetooth.

La base del robot o eslabón cero, tiene medidas de 10 cm de diámetro y 4.5 cm de altura. Sobre esta base se coloca el primer servomotor que representa la primera articulación del robot. Posteriormente se une la pieza asociada al eslabón 1, la cual tiene dimensiones de 9 cm de diámetro y 7.5 cm de altura. Al extremo de este eslabón se coloca el segundo servomotor que representa la segunda articulación. A continuación, se tiene el eslabón 2, con medidas de 13.5 cm de largo por 5.5 cm de ancho. De igual manera al caso anterior, en el extremo se coloca el tercer servomotor que dota al robot de la tercera articulación. Finalmente se anexa el eslabón 3, con dimensiones de 10.5 cm de largo, por 5.5. cm de ancho. En este diseño el robot no cuenta con efector final o herramienta alguna, sin embargo, en el diseño original se deja la posibilidad de incluir dicho efector. En la imagen de la figura 8, se observa el diseño y construcción final del servomecanismo de 3GDL.



a) Diseño en CAD



b) Diseño en físico

Figura 8 Diseño del servomecanismo de 3GDL.

3. Resultados

A partir del diseño del manipulador, es posible realizar el análisis cinemático del robot. En primer lugar, se realiza el análisis de la cinemática directa, mediante los parámetros de Denavit-Hartenberg (PDH) [Barrientos, 2007], [Craig, 2006]. De esta manera y con base en la figura 9, se obtienen los parámetros PDH y se registraron en la tabla 1.

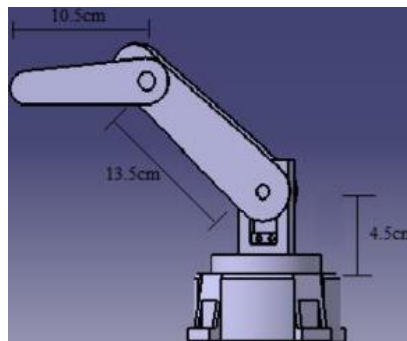


Figura 9 Esquema del servomecanismo para la obtención de los PDH.

Tabla 1 Parámetros Denavit-Hartenberg, para el servomecanismo de 3GDL de la figura 8.

Art.	θ	d	a	α
1	$\theta_1 = q_1$	$d_1 = 4.5 \text{ cm}$	$a_1 = 0$	$\alpha_1 = 90^\circ$
2	$\theta_2 = q_2$	$d_2 = 0$	$a_2 = 13.5 \text{ cm}$	$\alpha_2 = 0^\circ$
3	$\theta_3 = q_3$	$d_3 = 0$	$a_3 = 10.5 \text{ cm}$	$\alpha_3 = 0^\circ$

Posteriormente, con base en la matriz de la ecuación 1, se establecen las matrices de transformación homogénea de cada eslabón y posteriormente se multiplican,

como se muestra en la ecuación 2, para obtener una sola matriz que relacionara el extremo del robot con la base de este.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} & p_x \\ r_{yx} & r_{yy} & r_{yz} & p_y \\ r_{zx} & r_{zy} & r_{zz} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2) \quad {}^0_3T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T$$

De esta manera se obtienen la ecuación 3 que relacionan las posiciones x, y, z del robot, con base en los movimientos angulares de las articulaciones.

$$\begin{aligned} p_x &= a_3 \cdot c_1 c_2 c_3 - a_3 \cdot c_1 s_2 s_3 + a_2 \cdot c_1 c_2 \\ p_y &= a_3 \cdot s_1 c_2 c_3 - a_3 \cdot s_1 s_2 s_3 + a_2 \cdot s_1 c_2 \\ p_z &= a_3 \cdot s_2 c_3 + a_3 \cdot c_2 s_3 + a_2 \cdot s_2 + d_1 \end{aligned} \quad (3)$$

Con las expresiones de la ecuación 3, se define la posición que el efector final del robot deberá tomar, en función de los movimientos angulares de la mano. Es decir, se registran en el microcontrolador los valores que cada acelerómetro proporciona y los asocian a cada articulación del manipulador $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$, entonces, se determina el giro de los servomotores del manipulador. En la figura 10, se muestra el diagrama de flujo de este proceso.

Al realizar la conexión electrónica, se configuran el puerto al que se conectará el FTDI y se establece la velocidad con la que se visualizarán los datos, se obtiene entonces, la respuesta del sensor y que se observa en la figura 11. Como se observa, los datos no son exactos y presentan ruido, lo que lleva a lecturas erróneas a pesar de que el sensor está estático. Por esta razón, se opta por incluir un filtro, denominado “filtro complementario” y que se basa en la expresión de la ecuación 4.

$$\theta = A \cdot (\theta_{prev} + \theta_{giro}) + B \cdot \theta_{acel} \quad (4)$$

El filtro complementario se comporta como un filtro de paso-alto para la medición del giroscopio y un filtro de paso bajo para la señal del acelerómetro. Con la implementación del filtro complementario, las lecturas mejoran, figura 12.

El filtro complementario mejora la respuesta del sensor tanto en estado estático como en movimiento, como se observa en las figuras 13 y 14.

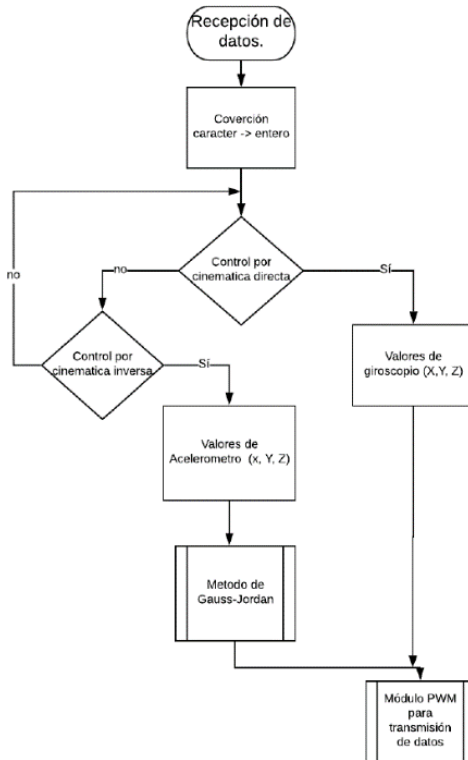


Figura 10 Diagrama de flujo para la cinemática directa e inversa del robot.

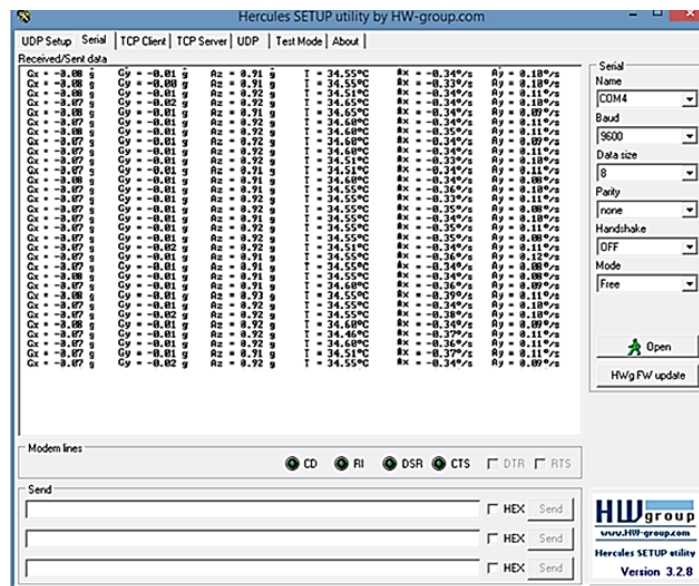


Figura 11 Datos del MPU9050 sin aplicación de un filtro.

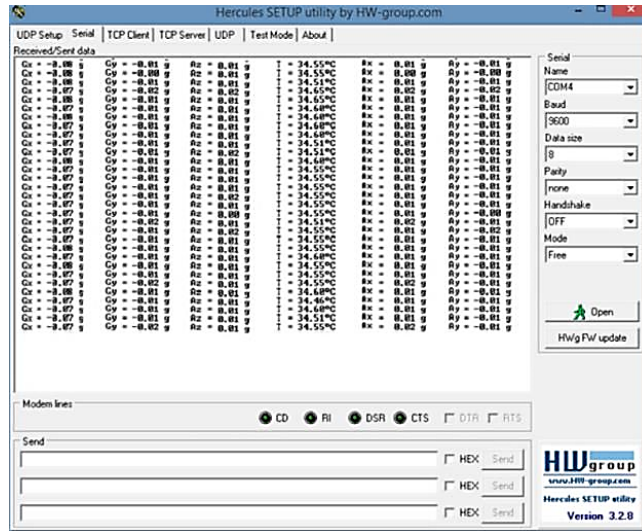


Figura 12 Datos del MPU9050 con el usom del filtro complementario.

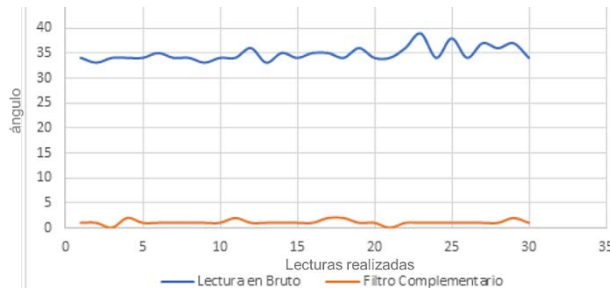


Figura 13 Respuesta del sensor en estado estático.

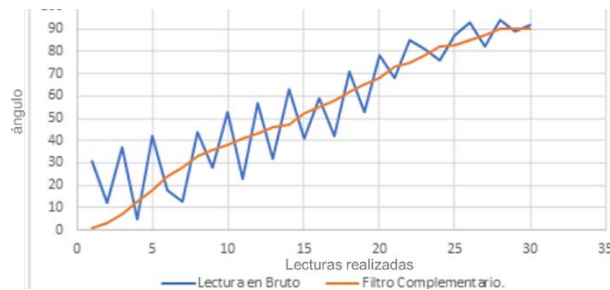
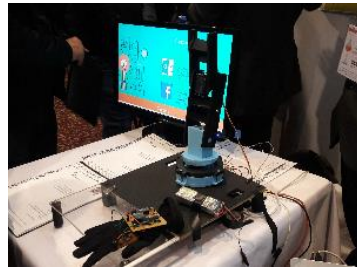


Figura 14 Respuesta del sensor en movimiento.

Una vez resuelto el problema de la lectura del sensor IMU, se procede a implementar el dispositivo de la interfaz gestual y se integra con el servomecanismo para las pruebas finales. El dispositivo completo se muestra en la figura 15. La interfaz final consistió en un guante que contiene el circuito electrónico con los sensores inerciales MPU9050, figura 16.



a) Dispositivo completo.



b) Interacción gestual.

Figura 15 Interfaz gestual.



a) Dispositivo.



b) Movimiento de la mano.

Figura 16 Guante de la interfaz gestual.

El usuario se coloca el guante y ante el movimiento de la mano, dichos movimientos son registrados y enviados por bluetooth hacia el microcontrolador PIC18F4550. Y este a su vez envía la información a través de bluetooth al servomecanismo y mediante codificación PWM, el manipulador reproduce los movimientos del usuario.

4. Discusión

Finalmente, el prototipo es puesto en funcionamiento y se analiza su respuesta ante diferentes condiciones de operación. Se evaluó el desempeño, se realizaron los ajustes pertinentes y se validan los resultados obtenidos. En la figura 17 se muestran la colocación del guante en el usuario y la manipulación de este para registrar datos.

Basados en la matriz de posición obtenida, se encuentran dos formas de controlar gestualmente el sistema robótico:

- Con ayuda del giroscopio se transmiten los datos angulares a cada motor, asignando cada eje (X, Y o Z) para enviar un dato, mostrando la posición del efector final, es decir, se realiza la cinemática directa.

- Con ayuda del acelerómetro se encuentra la posición del efector final y se escoge una de las múltiples soluciones que se generan para la resolución de la ecuación, al hacer esto se obtendrán los valores angulares de los tres motores.



Figura 17 Uso y colocación del guante de la interfaz gestual.

Una vez que el usuario comienza a mover la mano, estos movimientos se registran, se procesan y se envían hacia el servomecanismo, el cual imita los movimientos y los reproduce en tiempo real como se observa en la figura 18.



a) Giro de la tercera articulación.



b) Giro de la primer articulación.

Figura 18 Respuesta de la interfaz gestual.

Los movimientos de la mano son transmitidos hacia el manipulador y este responde siguiendo los movimientos. El sistema presenta un alcance de operación de entre 3 y 5 m. Para evaluar el prototipo, el sistema se probó con diferentes usuarios, como se observa en la figura 19. Los resultados de las pruebas se registran en la tabla 2 y se grafican en la figura 20, tal que sea posible comprobar los movimientos de la mano con el movimiento del robot para diferentes ángulos de giro.

De acuerdo con los datos registrados, se puede observar que el dispositivo responde a los movimientos indicados, sin embargo, aún se presentan errores de exactitud en la posición. Lo cual se explica por una parte por los efectos de ruido e interferencia en los sensores, así como una calibración deficiente en las mediciones de los sensores y las señales que se envían a los servomotores. También se observa que los movimientos en esta etapa aún resultan abruptos y requieren de un sistema de control que suavice los desplazamientos. A pesar de ello, se tiene una respuesta satisfactoria para esta primera etapa de desarrollo.



Figura 19 Evaluación de la interfaz gestual.

Tabla 2 Datos de las pruebas de funcionamiento.

No. Prueba	-90°	-45°	0°	45°	90°
1	-86°	-40°	0°	42°	99°
2	-91°	-47°	1°	46°	96°
3	-86°	-44°	0°	45°	96°
4	-90°	-44°	0°	45°	91°
5	-89°	-46°	1°	44°	98°

Por otra parte, es importante mencionar, que el sistema aun presenta algunas imprecisiones que deben considerarse para mejorar el sistema. Por ejemplo, se

observó que, al mover la mano, el manipulador no responde de forma idéntica, a la mano, aunque si se orienta acorde a lo que el usuario le indica, la posición y orientación no es exacta. Así mismo, se observó que la comunicación bluetooth, presentaba algunas deficiencias de comunicación, por lo que, en ocasiones, el sistema no respondía al sistema de forma inmediata.

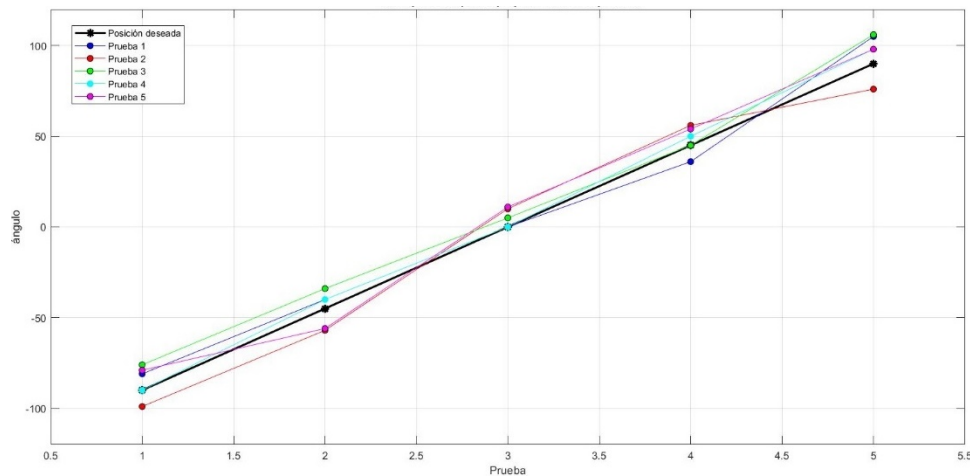


Figura 20 Desempeño de la interfaz gestual para diferentes ángulos de posicionamiento.

Las observaciones anteriores, representan un área de oportunidad de mejora y perfeccionamiento del sistema en cuanto a la exactitud y precisión de los movimientos, Así como en lograr movimientos suaves al momento de enviar los datos al servomecanismo. A pesar de ello, ha sido un gran avance en el desarrollo de la interfaz, ya que ahora el usuario puede interactuar directamente con el dispositivo y manipularlo, sin necesidad de ingresar códigos de programación complejos.

5. Conclusiones

Ha sido posible desarrollar un sistema basado en sensores inerciales, el cual puede leer los movimientos de una mano y enviar esta información codificada hacia un microcontrolador. El microcontrolador también contiene un algoritmo de reconocimiento de gestos basado en la cinemática directa o inversa (según sea el caso) que escribe los valores angulares a cada uno de los servomotores por medio

de modulación por ancho de pulso (PWM) para proporcionar movimiento a un manipulador de 3GDL. Estos servomotores se encuentran acoplados a un sistema robótico diseñado de tal manera que pueda representar los datos generados por el sensor inercial MPU 9250. Además, se ha logrado que este proceso fuera en tiempo real y de forma inalámbrica vía bluetooth, lo que favorece para el control remoto de robots.

Por lo tanto, se concluye que el sistema robótico que aquí se ha descrito, puede ser guiado mediante movimientos establecidos por el usuario de manera remota y fidedigna. Además, de que la interfaz gestual desarrollada permite al sistema ser controlado de manera inalámbrica basándose en sensores inerciales.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Ahmad, N., Raja Ghazilla, R. A., Khairi, N. M., & Kasi, V., (2013). Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications. *International Journal of Signal Processing Systems*, 256-262.
- [2] Barrientos, A., Peñin, L., Blaguer, C., & Aracil, R., (2007). *Fundamentos de Robótica*. McGraw Hill.
- [3] Broccia, G., Livesu, M., & Scateni, R., (2011). Gestural Interaction for Robot Motion Control. *Eurographics Italian Chapter Conferenc*, (págs. 61-66).
- [4] Craig, J. J., (2006). *Robotica*. Pearson, Prentice Hall.
- [5] Du, G., & Zhang, P., (2013). IMU-Based Online Kinematic Calibration of Robot Manipulator. *The Scientific World Journal*, 1-10.
- [6] ElectronicWings, (2020). *ElectronicWings*: <https://www.electronicwings.com/>.
- [7] InvenSense, (2021). *TDK Invensense*: <https://invensense.tdk.com/download-pdf/mpu-9250-datasheet/>.
- [8] Kadir, B. A., Broberg, O., & Souza da Conceição, C., (2018). Designing human-robot collaborations in industry 4.0: explorative case studies. *INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE*, págs. 601-610.
- [9] Padilla, A. F., Peña, C., & Moreno-Contreras, G. G., (2020). Advances in industrial robots programming applying gestural. *XIV International Congress of Electronics and Advanced Technologies (XIV CIETA)*. IOP Publishing.

- [10] LaViola Jr., J. J., (2013). 3D Gestural Interaction: The State of the Field. *ISRN Artificial Intelligence*, 1-18.
- [11] Microchip, (2021). Microchip 18F4550: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC18F4550>.
- [12] Nahavandi, S., (2019). Industry 5.0—A Human-Centric Solution. *Sustainability*, 1-13.
- [13] Østergaard, E. H., (2018). WELCOME TO INDUSTRY 5.0 The “human touch” revolution is now under way. *Universal robots*, 1-7.
- [14] Sachon, M., (2018). Cuando personas y máquinas trabajan juntos. Los pilares de la industria 4.0. *Revista de Negocios del IEEM*, 46-54.
- [15] Serafimov, K., Angelkov, D., Koceska, N., & Koceski, S., (2012). Using Mobile-phone Accelerometer for Gestural Control of Soccer Robots. *Mediterranean Conference on Embedded Computing*, págs. 1-4.
- [16] Tsarouchi, P., Athanasatos, A., Makris, S., Chatzigeorgiou, X., & George, C., (2016). High level robot programming using body and hand gestures. *5th CIRP Global Web Conference Research and Innovation for Future Production*, págs. 1-5. ELSEVIER.
- [17] Voyles, R. M., Morrow, J. D., & Khosla, P. K., (1999). Gesture-Based Programming for Robotics: Human-Augmented Software Adaption. *IEEE Intelligent Systems*, pp. 22-29.
- [18] Yavuz, E., Senel, Y., Özçelik, M., & Aydin, H., (2021). Design of a String Encoder-and-IMU-Based 6D Pose Measurement System for a Teaching Tool and Its Application in Teleoperation of a Robot Manipulator. *Journal of Sensors*, 1-17.