

Desarrollo de un guante sensorizado con ESP32/ESP-NOW para teleoperación inalámbrica de una mano robótica en entornos industriales de riesgo Development of an ESP32/ESP-NOW sensorized glove for wireless teleoperation of a robotic hand in hazardous industrial environments

C. R. Flores Castillo ^a, C. R. Sánchez Gárnica ^b, L. Rodríguez Guerrero ^c

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 4218, Mineral de la Reforma, Hidalgo México

Resumen

Los entornos industriales con exposición a agentes físicos o químicos (por ejemplo, espacios confinados o atmósferas potencialmente tóxicas) demandan interfaces de teleoperación que reduzcan el contacto directo del operador con la zona de riesgo. En este trabajo se presenta el desarrollo de un guante sensorizado para teleoperar una mano robótica mediante comunicación inalámbrica. El sistema integra cinco sensores resistivos de flexión (uno por dedo) y una unidad de medición inercial (IMU) para registrar la rotación de la mano. Las señales se acondicionan con un circuito basado en amplificación diferencial y protección a 3.3 V, y se adquieren con un ESP32; la transmisión maestro–esclavo se realiza con el protocolo ESP-NOW, sin enrutador. Se establece de forma explícita un procedimiento de calibración y mapeo voltaje–ángulo (en grados) y se evalúa el seguimiento sensor–actuador con la métrica RMSE sobre secuencias de $N = 200$ muestras por canal. En conjunto, la propuesta demuestra la viabilidad de una interfaz portátil de bajo costo para teleoperación en escenarios de riesgo, e identifica como principales fuentes de discrepancia la no linealidad/histéresis del sensado, la dinámica del actuador y el retardo de comunicación.

Palabras Clave: Guante sensorizado, Teleoperación, Sensores de flexión, ESP32, ESP -NOW, Mano robótica, IMU.

Abstract

Hazardous industrial settings involving exposure to physical or chemical agents (for example, confined spaces or potentially toxic atmospheres) motivate teleoperation interfaces that minimize direct human contact with risky areas. This paper presents the development of a sensorized glove to teleoperate a robotic hand via wireless communication. The system integrates five resistive flex sensors (one per finger) and an inertial measurement unit (IMU) to track hand rotation. Signals are conditioned through a differential-amplifier-based circuit with 3.3 V protection, acquired by an ESP32, and transmitted in a master–slave architecture using the ESP-NOW protocol without a router. A per-channel calibration and an explicit voltage-to-angle mapping (degrees) are provided, and tracking performance is quantified using RMSE over $N = 200$ samples per channel. Overall, results support the feasibility of a low-cost portable interface for hazardous teleoperation and highlight key discrepancy sources: sensor nonlinearity/hysteresis, actuator dynamics, and communication delay.

Keywords: Sensorized glove, Teleoperation, Flex sensors, ESP32, ESP-NOW, Robotic hand, IMU.

1. Introducción

La robótica constituye una disciplina tecnológica que integra conocimientos teóricos y prácticos orientados al estudio, diseño, construcción y automatización de sistemas basados en estructuras mecánicas con múltiples articulaciones y dotados de cierto grado de inteligencia (Mendoza *et al.*, 2020). Los robots se han consolidado como herramientas capaces de ejecutar tareas que los seres humanos no pueden realizar por limitacio-

nes físicas, o bien que pueden llevar a cabo con mayor rapidez, precisión y eficiencia (Corona *et al.*, 2022).

La exposición ocupacional en escenarios industriales de riesgo (por ejemplo, en espacios confinados o con atmósferas potencialmente tóxicas) se asocia con peligros críticos como deficiencia o enriquecimiento de oxígeno, presencia de gases nocivos y condiciones físicas adversas. Por ello, diversos

* Autor para correspondencia: lilliam_rodriguez@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: f1464650@uaeh.edu.mx (César Roberto Flores Castillo), erick_sanchez@uaeh.edu.mx (Erick Javier Sánchez Gárnica), lilliam_rodriguez@uaeh.edu.mx (Lilium Rodríguez Guerrero)

trabajos reportan la necesidad de estrategias de monitoreo y mitigación del riesgo para reducir accidentes y fatalidades (Arifin *et al.*, 2023; Rajakumar y Choi, 2023). En paralelo, la robótica ha demostrado utilidad al ejecutar tareas en zonas peligrosas, al reducir la exposición humana y mejorar la continuidad operativa.

En particular, la teleoperación permite que un operador controle un sistema esclavo a distancia, combinando destreza humana con alcance y resistencia mecánica, lo cual es relevante en aplicaciones industriales donde la proximidad física incrementa el riesgo (González *et al.*, 2021; Gentile *et al.*, 2023; Siciliano y Khatib, 2016). La teleoperación requiere una interfaz hombre-robot capaz de traducir las intenciones del operador en comandos interpretables por el robot.

Entre las opciones existentes, los guantes sensorizados (también encontrados en la literatura especializada en inglés como data gloves, wearable glove, flex sensor glove o glove-based human interface) ofrecen una interacción natural e intuitiva al capturar la flexión de los dedos y la orientación de la mano mediante sensores de curvatura e inerciales, para luego transmitir estas variables al sistema esclavo (Lu *et al.*, 2024). Sin embargo, la literatura también enfatiza desafíos persistentes: la no linealidad e histéresis del sensado, la variabilidad interusuario, la necesidad de filtrado o normalización, y el efecto del retardo de comunicación sobre el seguimiento (Tiboni *et al.*, 2021; Urazayev *et al.*, 2023).

Diversas investigaciones han abordado el desarrollo de sistemas de manipulación robótica mediante interfaces basadas en guantes instrumentados. En este contexto, (Singh *et al.*, 2024) desarrollaron un sistema compuesto por un guante con sensores flexibles, sensores de presión y unidades inerciales (IMU), mientras que la mano robótica reprodujo los movimientos mediante juntas servoaccionadas en un rango de 0 a 90°. La comunicación se realizó de forma inalámbrica mediante transmisión serial hacia un computador encargado del procesamiento y envío de comandos, configurando una arquitectura de sensado multimodal con procesamiento centralizado. De manera similar, (Liddell y Secco, 2025) propusieron una interfaz humano-robot basada en un guante instrumentado con sensores flexibles, un sensor ultrasónico y una unidad inercial MPU6050, cuyas señales fueron adquiridas mediante una placa Arduino Uno, destacando por su bajo costo y capacidad de interacción en tiempo real. Por su parte, (Xia *et al.*, 2025) presentaron un sistema de teleoperación para una mano robótica diestra de cinco dedos, controlada mediante un guante con sensores de flexión conectado a una plataforma Arduino, bajo una arquitectura maestro-esclavo con comunicación remota.

En cuanto a las arquitecturas de control y adquisición, (Olive y Gonzalo, 2022) implementaron un sistema basado en comunicación serial entre un microcontrolador maestro y múltiples esclavos mediante una interfaz periférica serial, mientras que (Quimiz *et al.*, 2023) emplearon la plataforma Blynk junto con un módulo ESP32 para el control remoto de servomotores. Asimismo, (Sánchez y Hernán, 2023) desarrollaron un sistema de adquisición basado en sensores de flexión, incorporando un

circuito de acondicionamiento (divisor de tensión, seguidor de tensión y ajuste de span y cero) que garantiza la correcta adaptación de la señal al rango de entrada de la tarjeta de adquisición (0 - 5 V).

Por otro lado, (Zaidan *et al.*, 2021) propusieron una mano protésica teleoperada e inalámbrica, controlada mediante un guante con sensores flexibles, donde la mano robótica emplea servomotores acoplados por cables para replicar el movimiento humano. La comunicación se estableció mediante módulos HC-12 y placas Arduino Nano/Uno, integrando además sensores de fuerza y temperatura. En esta misma línea, (Pérez *et al.*, 2019) utilizaron un sistema de visión para la captura del movimiento de la mano, complementado con sensores de fuerza para reproducir la presión en una mano robótica. Finalmente, (Yu *et al.*, 2024) desarrollaron un sistema de control por gestos basado en un guante con diez sensores de flexión y seguimiento espacial mediante OptiTrack; la adquisición se realizó con una ESP32, el procesamiento óptico con el software Motive y el control del sistema robótico mediante una Raspberry Pi encargada de accionar múltiples motores.

En conjunto, estos trabajos evidencian avances relevantes en el diseño de interfaces humano-robot basadas en guantes instrumentados, integrando diversos sensores y actuadores bajo distintas arquitecturas de adquisición y control. No obstante, persisten limitaciones asociadas al uso de comunicaciones inalámbricas, la dependencia de procesamiento centralizado en computadores externos y el empleo de plataformas con capacidades limitadas de resolución y procesamiento, como Arduino UNO. Asimismo, las soluciones inalámbricas reportadas no siempre optimizan aspectos críticos como la latencia, eficiencia energética y autonomía del sistema. En este contexto, el presente trabajo propone la implementación de un guante instrumentado con sensores de flexión, acompañado de un circuito electrónico optimizado para la adquisición de señales, y basado en la plataforma ESP32, seleccionada por su mayor capacidad de procesamiento y su convertidor analógico-digital (ADC) de 12 bits (proporcionando mayor resolución con 4096 niveles de cuantización en un rango de 0 a 3.3 V). Adicionalmente, el ESP32 es un chip de 2.4 GHz con conectividad Wi-Fi y Bluetooth, cuyas características en términos de rendimiento, robustez, versatilidad y fiabilidad lo convierten en una plataforma idónea para aplicaciones de control inalámbrico en robótica (Espressif, 2025). Se emplea el protocolo ESP-NOW, que permite una comunicación inalámbrica eficiente, de baja latencia y sin dependencia de redes Wi-Fi convencionales. Estas características posicionan la propuesta como una solución más robusta, autónoma y adecuada para aplicaciones de teleoperación en entornos de riesgo, contribuyendo a superar las limitaciones identificadas en trabajos previos.

La Sección 2 de este artículo presenta el desarrollo del guante sensorizado, con énfasis en el diseño y construcción del circuito electrónico de acondicionamiento. En la Sección 2.4 se describe el proceso de construcción de la mano robótica y la selección de materiales empleados para garantizar el funcionamiento del sistema. Finalmente, la Sección 3 aborda la verificación experimental del guante, evaluando su precisión y desem-

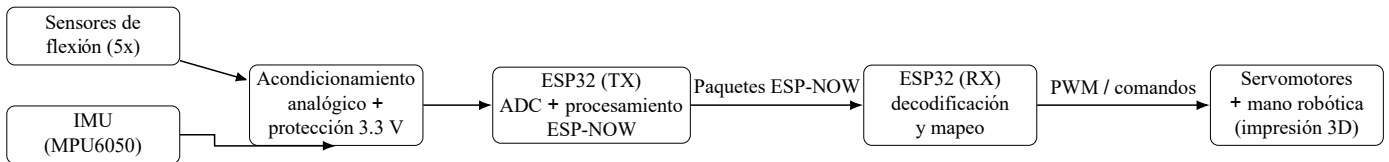


Figura 1: Arquitectura funcional a bloques del sistema maestro–esclavo. Se distingue *diseño* (sensado + acondicionamiento + adquisición) e *implementación* (integración inalámbrica y teleoperación).

peño en la detección de movimientos. Finalmente se concluye en la Sección 4.

2. Materiales y métodos

La Figura 1 resume la interacción entre elementos. El guante (maestro) mide flexión y orientación, acondiciona señales y transmite paquetes por ESP-NOW. El receptor reconstruye ángulos de referencia y envía comandos a servomotores (esclavo) para reproducir la postura.

2.1. Integración de sensores de flexión e IMU

Se plantea el uso de un guante ajustado a la mano del usuario con el fin de disminuir el ruido en las mediciones, dado que los sensores de flexión son particularmente sensibles a variaciones en su entorno. Dichos sensores operan como resistores variables, cuya resistencia eléctrica se incrementa a medida que el componente se dobla (spectralsymbol, 2014).

Se utilizaron sensores resistivos de flexión en el dorso de cada dedo, fijados sobre un guante ajustado para reducir desplazamientos relativos. Este tipo de sensores presenta variaciones de resistencia dependientes del radio de curvatura, además de no linealidad e histéresis, por lo que se recomienda caracterización y calibración por canal (Tiboni *et al.*, 2021). Para mitigar artefactos mecánicos se encapsuló cada sensor con tubo termorretráctil y una tira plástica de soporte.

De manera complementaria, se diseñó un estuche para alojar una Unidad de Procesamiento de Movimiento (MPU), la cual se aseguró al guante mediante imanes, como se ilustra en la Figura 2. Esta unidad permite registrar los movimientos de la mano y, en consecuencia, identificar la rotación de la mano robótica respecto a su propio eje.



Figura 2: **Implementación física del guante sensorizado.** Sensores de flexión fijados en el dorso de los dedos y módulo IMU montado sobre el guante. Esta figura documenta la *implementación* (integración física), complementando la Figura 1 (arquitectura funcional).

El dispositivo MPU integra en un único chip de silicio un giroscopio de tres ejes y un acelerómetro de tres ejes, además de un Procesador Digital de Movimiento (DMP) incorporado, el cual posibilita el procesamiento local de los datos sensoriales (InvenSense, 2013).

La información generada por los sensores es recolectada y transmitida mediante una placa ESP32, empleando el protocolo inalámbrico ESP-NOW. Este protocolo, desarrollado por Espressif, ofrece una comunicación rápida, directa y de bajo consumo energético entre dispositivos inteligentes, sin requerir de un enrutador. Asimismo, presenta compatibilidad con las tecnologías Wi-Fi y Bluetooth LE (Espressif, 2021).

2.2. Acondicionamiento analógico de señal

El circuito base recomendado por el fabricante (divisor de voltaje) produjo un rango reducido de salida (2.2V–3.3V en las pruebas), lo que limitó la resolución efectiva del ADC del ESP32. Por ello, se implementó un acondicionamiento basado en amplificación diferencial con ajuste de offset (resistencia fija + potenciómetro), a fin de expandir el rango de lectura hacia el intervalo del ADC (0 V–3.3V) y compensar diferencias entre sensores.

La Tabla 1 resume valores de resistencia mínimos y máximos medidos experimentalmente para cinco sensores (recto vs. flexionado), información usada para seleccionar resistencias comerciales y ajustar el punto de operación.

Tabla 1: Valores resistivos de los sensores de flexión (kΩ) empleados para dimensionamiento del acondicionamiento.

Núm. de serie	Valor mínimo	Valor máximo
01222	31	280
01520	28	184
01620	22	100
01122	31	190
00624	31	136

La Figura 3 presenta un amplificador diferencial ideal, el cual amplifica la diferencia entre las tensiones aplicadas a sus dos terminales de entrada y rechaza las componentes comunes en dichas conexiones. La salida del amplificador diferencial debe ser cero cuando $V_1 = V_2$. El modo más sencillo de aplicar voltajes iguales consiste en conectar ambas entradas entre sí y acoplarlas a una fuente de voltaje. A esta condición se le denomina voltaje de entrada en modo común (Coughlin *et al.*, 1999).

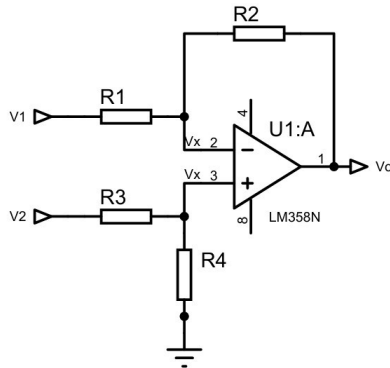


Figura 3: Amplificador diferencial

Con base en lo anterior, se implementa un diferenciador de señales con voltaje común. Para obtener la ecuación correspondiente, se emplea el método de superposición aplicado a un amplificador diferencial.

En dicho procedimiento, una de las entradas del amplificador operacional se considera a 0V. Al asignar 0V a R_1 , se obtiene un amplificador no inversor. En consecuencia, la expresión que lo describe es

$$V_o = V_x \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \tag{1}$$

En la entrada no inversora existe un divisor de voltaje, por lo que el valor de V_x se determina de la siguiente manera:

$$V_x = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 \tag{2}$$

Sustituyendo (2) en (1) y simplificando obtenemos el valor de la salida

$$V_o = V_2 \frac{R_4(R_1 + R_2)}{R_1(R_3 + R_4)} \tag{3}$$

Ahora, al aplicar 0V a R_3 y V_1 a R_1 , se obtiene un amplificador inversor, con una entrada $V_x = 0$. Por lo tanto en esta configuración, se tiene:

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_1 \tag{4}$$

Superponiendo (3) y (4), y considerando un voltaje común se obtiene la salida del circuito amplificador diferencial

$$V_o = V_{cc} \frac{R_4(R_1 + R_2)}{R_1(R_3 + R_4)} - \frac{R_2}{R_1} \tag{5}$$

Al alimentar el circuito con una sola batería, se tiene como resultado un amplificador diferencial con tensión de modo común. Aunque la expresión del circuito sugiere una dependencia directa con la fuente de alimentación, en la implementación tanto la señal del sensor como la referencia del amplificador son generadas a partir del mismo voltaje, lo que introduce un comportamiento parcialmente ratiométrico y reduce la sensibilidad a variaciones en V_{cc} . Por lo que la influencia de la fuente de alimentación no es un factor dominante en el desempeño del sistema.

Para determinar el valor adecuado de las resistencias, se consideran en primer lugar las tolerancias mencionadas previamente, correspondientes a la resistencia de los sensores de flexión, donde R_1 representa el valor de dichos sensores. Es fundamental que la resistencia medida cuando el sensor se encuentra en posición recta sea comparable al valor de R_3 , ya que esta última se emplea para ajustar el offset del sensor.

A partir de las variaciones observadas en la Tabla 1, se decide reemplazar R_3 por una resistencia fija de 16k Ω en serie con un potenciómetro de 20k Ω. Esta configuración compensa las diferencias individuales entre sensores.

R_2 y R_4 tienen el mismo valor, determinado a partir de la mediana de los sensores; en consecuencia, se selecciona una resistencia de 22k Ω, correspondiente al valor comercial más próximo.

La Figura 4 muestra los arreglos empleados para establecer una tensión de alimentación que garantice un mejor funcionamiento, tomando como referencia el valor máximo del sensor de flexión 01620. Para este análisis se evaluaron tensiones de alimentación de 6V y 9V. En función de las resistencias utilizadas en el circuito, se concluye que la fuente de 9V proporciona un rango de voltaje más amplio.

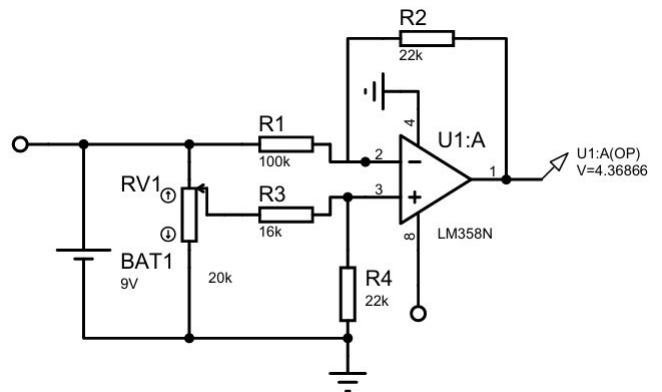


Figura 4: Circuito del amplificador diferencial acoplado

Por último, en la Figura 5 se incorpora un diodo Zener de 3.3 V con el propósito de proteger la placa de desarrollo ESP32. Este circuito permite operar en un rango ampliado de 0.5 a 3.3V, correspondientes a 0° y 180°, respectivamente, aprovechando

cerca del 85 % del rango del ADC proporcionado por el sistema de adquisición.

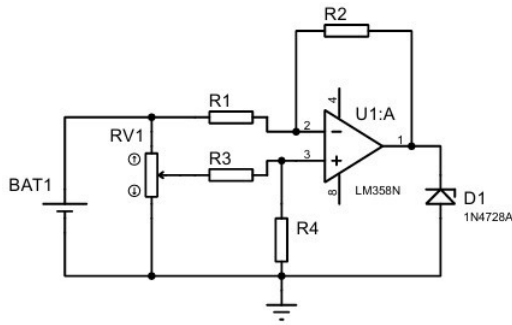


Figura 5: **Circuito final de acondicionamiento y protección.** Se presenta el circuito implementado para expandir el rango de lectura del sensor hacia el intervalo del ADC del ESP32 e incorporar protección a 3.3V.

2.3. Comunicación inalámbrica: ESP-NOW en ESP32

La transmisión se implementa con ESP-NOW, un protocolo de Espressif para comunicación directa entre dispositivos (sin necesidad de AP/router), lo cual resulta conveniente cuando el guante debe operar de manera portátil y el cableado es impráctico o riesgoso. La documentación oficial describe el establecimiento de pares, formato de paquetes y las funciones de retorno de envío/recepción (Espressif, 2020). Además, estudios comparativos muestran que el desempeño (retardo y robustez) depende del entorno, interferencia y condiciones de tráfico, por lo que es recomendable reportar al menos la tasa de paquetes recibidos y una estimación de retardo cuando se evalúan interfaces de teleoperación (Urazayev et al., 2023).

En la Tabla 2 se aprecian los datos obtenidos durante las pruebas del enlace inalámbrico basado en ESP-NOW, se observó una comunicación estable y confiable entre el transmisor y el receptor. El tamaño de los paquetes transmitidos fue de 12 bytes, correspondiente a la estructura de datos definida en el sistema.

El retardo medio de comunicación se estabilizó alrededor de 2.9 ms, con una variación de retardo de aproximadamente 0.82 ms, lo que indica una baja variabilidad temporal en la recepción de los paquetes. Estos valores son considerablemente pequeños en comparación con el periodo de muestreo del sistema (100 ms), representando menos del 3 % del mismo.

La frecuencia de muestreo del ADC se implementa mediante temporización por software dentro del ciclo principal, utilizando un control del periodo de muestreo basado en la evaluación del tiempo transcurrido entre iteraciones, garantizando un intervalo de 100 ms entre adquisiciones consecutivas. Este enfoque evita el uso de retardos bloqueantes y proporciona una precisión temporal adecuada para la dinámica del sistema.

La selección de dicho periodo de muestreo se fundamenta en las características intrínsecas de los sensores de flexión empleados, los cuales presentan variaciones de alta frecuencia asociadas a ruido y pequeñas perturbaciones mecánicas. Un muestreo a frecuencias superiores provoca la captura de estas fluctuaciones, generando señales de control inestables que se traducen en oscilaciones en los actuadores del sistema robótico. En este contexto, el intervalo de 100 ms actúa como un mecanismo de filtrado temporal discreto que atenúa las componentes de alta frecuencia no deseadas, permitiendo obtener una señal más estable y representativa del gesto intencional del usuario. De esta

manera, se garantiza un comportamiento suave y estable en la ejecución de los movimientos de la mano robótica teleoperada.

Asimismo, durante la operación continua se detectaron pérdidas de paquetes ocasionales a eventos transitorios del enlace inalámbrico, por lo que la tasa de entrega de paquetes se mantuvo cercano al 99 %. No obstante, dichas pérdidas no comprometen la estabilidad ni la continuidad de la transmisión. Por lo tanto el retardo medio y la fluctuación de retardo medidos resultan despreciables en relación con el periodo de muestreo del sistema, confirmando la idoneidad de ESP-NOW para esta aplicación.

Tabla 2: Parámetros de adquisición y comunicación.

Parámetro	Símbolo	Valor
Periodo de muestreo ADC/IMU	T_s	100ms
Frecuencia de envío ESP-NOW	f_{tx}	10 Hz
Tamaño de paquete	L	12 bytes
Tasa de entrega de paquetes	PDR	99 %
Retardo medio de comunicación	$\bar{\tau}$	2.9 ms
Fluctuación (desviación estándar de retardo)	σ_{τ}	0.82 ms

A continuación, se presentan los diagramas de flujo que muestran la secuencia lógica de operación del sistema, dividiendo las tareas del dispositivo transmisor y del dispositivo receptor.

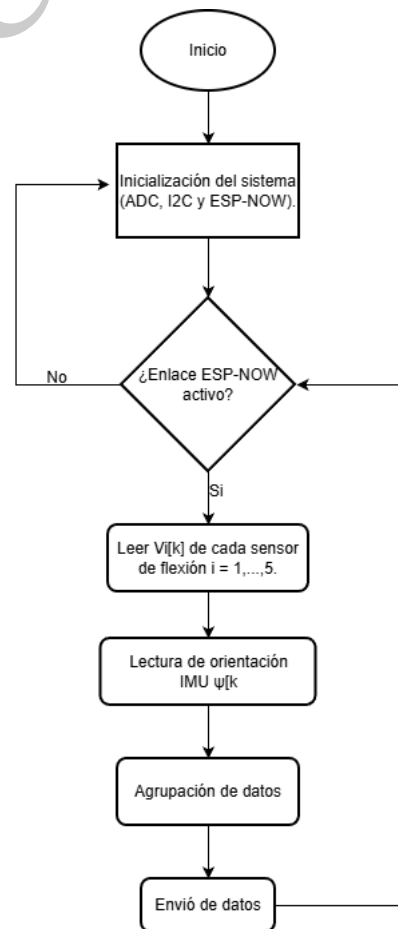


Figura 6: **Diagrama de flujo del sistema transmisor (guante).** Inicialización de periféricos, enlace ESP-NOW, lectura ADC/IMU, empaquetado y envío periódico.

La Figura 6, correspondiente al sistema transmisor (guan-

te), describe la secuencia de operación del guante sensorizado. El proceso comienza con la inicialización de los periféricos del microcontrolador y del protocolo de comunicación ESP-NOW. Posteriormente, se realiza la lectura del circuito acoplado a los sensores de flexión. Los datos se agrupan y se envían periódicamente al sistema receptor.

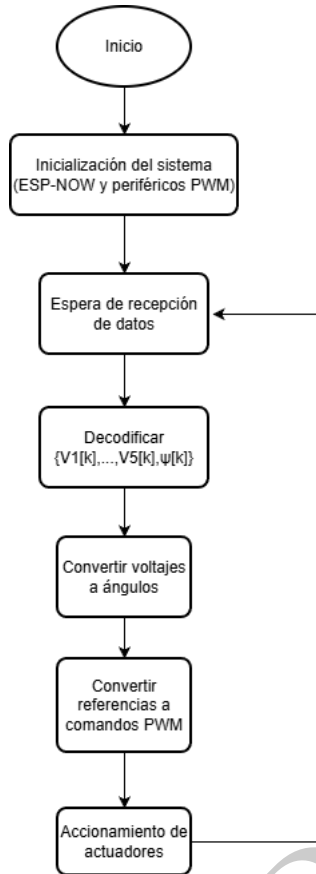


Figura 7: **Diagrama de flujo del sistema receptor (mano robótica)**. Recepción y validación de paquetes, reconstrucción de ángulos de referencia, generación de PWM y actualización de actuadores.

El sistema receptor, representado en la Figura 7, muestra el funcionamiento de la unidad encargada del movimiento de la mano robótica. Una vez iniciado el microcontrolador y la comunicación ESP-NOW, el sistema permanece en espera de los datos enviados por el guante sensorizado. Tan pronto como la información sea recibida, se reconstruyen ángulos de referencia y se generan señales PWM para los servomotores. Para favorecer la robustez del enlace, se incorporó lógica de verificación (recepción/confirmación) e intentos controlados en la inicialización.

La conversión de la señal del sensor a grados se realizó mediante un mapeo lineal entre el rango de voltaje medido por el convertidor analógico-digital y el rango angular correspondiente del actuador. Previamente, los valores mínimo y máximo del circuito acoplado se obtuvieron de forma experimental para mejorar la correspondencia entre el movimiento del dedo y el ángulo del servomotor.

La Figura 8 presenta el diagrama de conexiones del sistema. El circuito de acoplamiento para los sensores de flexión y el sensor MPU se conectan al ESP32, el cual establece comunicación inalámbrica mediante el protocolo ESP-NOW con una

segunda tarjeta ESP32. Esta última controla la mano robótica, alimentada por una fuente conmutada de 5 V y 6 A.



Figura 8: **Arquitectura de conexión del sistema de adquisición y accionamiento basado en ESP-NOW**

2.4. Construcción e instrumentación de una mano robótica

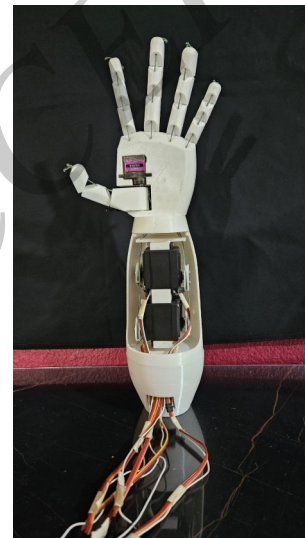


Figura 9: **Mano robótica impresa en 3D y ubicación de actuadores**. Estructura impresa en PLA, tendones/cables de transmisión y servomotores.

El modelo mostrado en la Figura 9 fue fabricado mediante impresión 3D con material PLA (ácido poliláctico). Se utilizó el diseño denominado “Humanoid Robotic Hand” disponible en la plataforma Thingiverse (Grossrc, 2017), seleccionado por la practicidad de su ensamblaje.

Para generar el movimiento de los dedos se emplea un actuador para cada uno de ellos: un servomotor MG90S destinado al desplazamiento del pulgar y cuatro servomotores MG995 colocados estratégicamente para retraer los dedos restantes mediante hilo de pesca. El retorno de los dedos a su posición habitual se asegura mediante resortes tipo “cola de ratón”. Asimismo, se incorpora un servomotor MG995 encargado de la rotación de la mano, a partir de los datos generados por el sensor MPU-6050. Los actuadores son alimentados por una fuente de 5 V y 6 A, en consideración a la corriente requerida por cada uno de ellos.

3. Análisis y discusión de resultados

A partir de las pruebas experimentales se obtienen las gráficas correspondientes a cada dedo, en las cuales se compara la respuesta del actuador con la señal proveniente del sensor de flexión y el dispositivo MPU6050. Para estimar la posición real

del actuador, se accedió a la señal del potenciómetro interno del servomotor, la cual es proporcional al ángulo de giro. Esta medición permitió realizar una comparación cuantitativa entre los grados estimados por el sensor y el ángulo ejecutado por el actuador, utilizando como referencia la diferencia absoluta entre ambas señales. En las Figuras 10-13 se observa que los actuadores presentan un desfase temporal con respecto a la señal de referencia, así como un error en estado estacionario. No obstante, dicho error permanece acotado y no muestra crecimiento progresivo durante la prueba, lo cual indica que el sistema mantiene un comportamiento estable. Aun así, la estabilidad observada no implica un seguimiento preciso, ya que la discrepancia entre la señal medida y la señal ejecutada revela limitaciones en la respuesta dinámica del sistema. La presencia de este desfase puede asociarse, en primera instancia, a la dinámica propia de los servomotores, cuya velocidad de respuesta y capacidad de seguimiento no permiten reproducir instantáneamente variaciones rápidas en la señal de entrada. En consecuencia, los picos y valles registrados por los sensores aparecen desplazados temporalmente en la respuesta del actuador. Este comportamiento es consistente en todos los canales analizados y su magnitud varía según el dedo, lo cual sugiere que además de la dinámica del actuador intervienen factores particulares de cada canal de sensado y accionamiento.

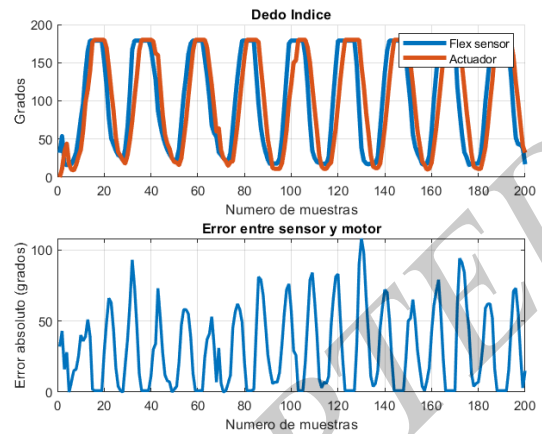


Figura 12: Seguimiento índice: sensor vs. actuador y error. Eje horizontal: índice de muestra n (adimensional). Eje vertical: ángulo (grados).

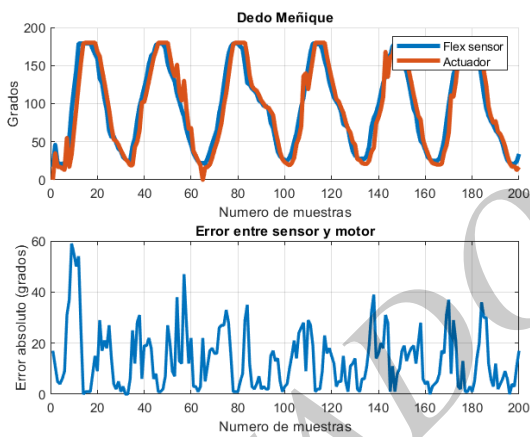


Figura 10: Seguimiento meñique: sensor vs. actuador y error. Eje horizontal: índice de muestra n (adimensional). Eje vertical: ángulo (grados). Se reporta el error instantáneo $\Theta_s[n] - \Theta_a[n]$.

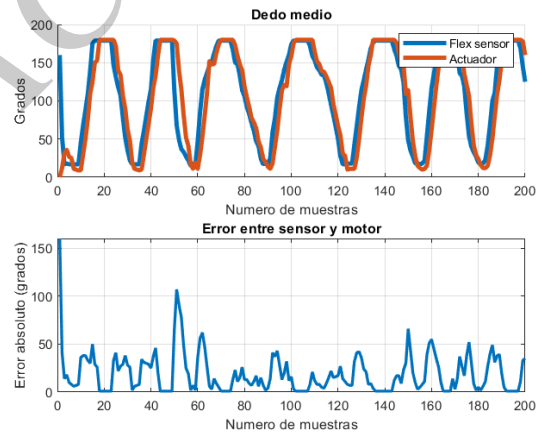


Figura 13: Seguimiento medio: sensor vs. actuador y error. Eje horizontal: índice de muestra n (adimensional). Eje vertical: ángulo (grados).

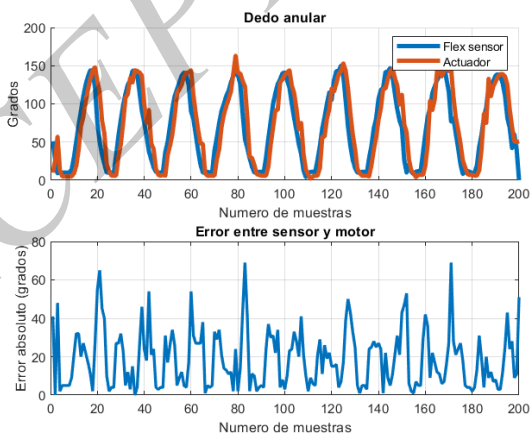


Figura 11: Seguimiento anular: sensor vs. actuador y error. Eje horizontal: índice de muestra n (adimensional). Eje vertical: ángulo (grados).

En el caso específico del pulgar, el actuador se encuentra montado directamente en la palma de la mano robótica, lo que limita su rango de giro en comparación con los demás dedos. Su movimiento se restringe aproximadamente a 90° , iniciando en 180° y finalizando en 90° , de acuerdo con la configuración mecánica del actuador. Por esta razón, los valores mostrados en la Figura 14 se ubican en un intervalo de 80° a 200° . Esta restricción mecánica reduce la excursión angular y, en consecuencia, la diferencia entre la señal del sensor y la respuesta del actuador resulta menor que en los demás canales. Esto explica por qué el pulgar presenta un mejor comportamiento relativo y errores inferiores respecto al resto de los dedos.

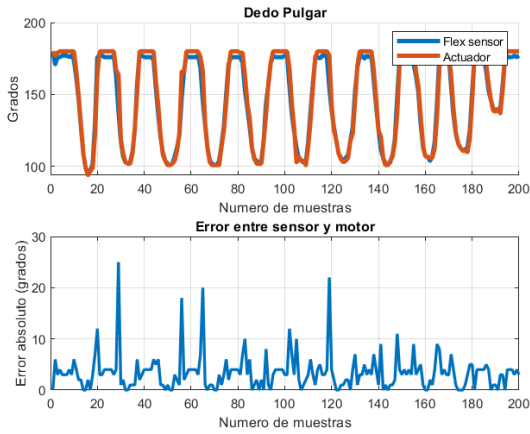


Figura 14: Seguimiento pulgar: sensor vs. actuador y error. Eje horizontal: índice de muestra n (adimensional). Eje vertical: ángulo (grados). El rango del pulgar se encuentra limitado por la geometría del montaje.

Por su parte, la ejecución del actuador asociado al canal del MPU6050 presenta diferencias más notorias, como se aprecia en la Figura 15. En este caso, la respuesta del actuador exhibe un retraso más evidente con respecto a la indicación suministrada por el sensor, así como una mayor discrepancia en amplitud. Este comportamiento puede relacionarse con la propia naturaleza del MPU6050, ya que la estimación angular en este tipo de sensores depende del procesamiento de señales inerciales, las cuales son más susceptibles al ruido, a pequeñas perturbaciones y a errores acumulados de estimación que una medición directa basada en flexión.

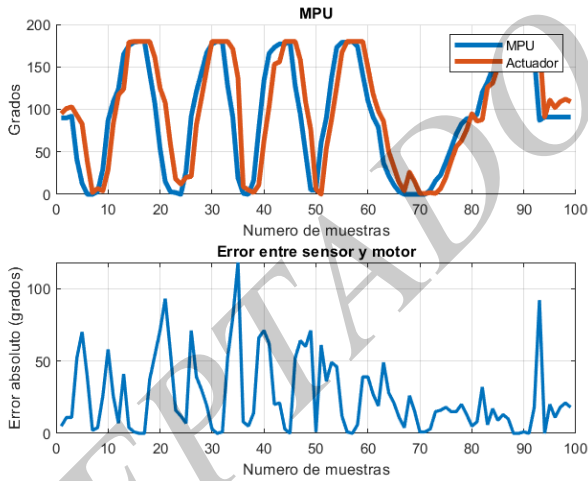


Figura 15: Seguimiento IMU (MPU6050): orientación estimada vs. comando en el actuador y error. Eje horizontal: índice de muestra n (adimensional). Eje vertical: ángulo (grados).

De manera general, las señales de los actuadores presentan un desfase respecto a las señales provenientes de los sensores. Este comportamiento se manifiesta como un retraso en la ocurrencia de máximos y mínimos de la señal del servomotor respecto a la referencia. Dicho desfase se atribuye principalmente a la dinámica de los servomotores, los cuales poseen limitaciones en velocidad de respuesta, impidiendo un seguimiento instantáneo de cambios rápidos en la señal de entrada. Además, el sistema opera con un periodo de muestreo de 100 ms, lo cual

introduce un retardo asociado a la actualización de los datos. A ello se suma el retardo del enlace inalámbrico, que aunque es del orden de los milisegundos (2.9 ms), contribuye de forma acumulativa al desfase total observado. En conjunto, estos factores explican por qué la señal ejecutada reproduce la tendencia general de la referencia, pero no coincide exactamente con ella ni en fase ni en amplitud.

Las diferencias en la magnitud del error entre canales pueden asociarse a múltiples factores. En primer lugar, los sensores de flexión presentan respuestas no lineales y una sensibilidad dependiente de la curvatura, lo que introduce discrepancias en la señal de referencia. En segundo lugar, el acondicionamiento de señal influye en la calidad de la medición, particularmente en presencia de ruido, variación de ganancia, resolución finita del convertidor analógico-digital y errores de calibración. En tercer lugar, la configuración mecánica de cada dedo y la forma en que cada sensor se acopla al movimiento real del usuario pueden modificar la correspondencia entre la flexión detectada y el ángulo finalmente ejecutado por el actuador. En el caso del MPU6050, el error tiende a incrementarse debido a que la estimación angular involucra procesamiento adicional y es más sensible a perturbaciones e imprecisiones.

Se realizaron pruebas de teleoperación registrando, para cada canal, dos señales temporales sincronizadas: (i) ángulo estimado por el sensor, $\theta_s[k]$; y (ii) ángulo ejecutado por el actuador, $\theta_a[k]$, calculado a partir del comando asociado al servomotor. Cada prueba produce secuencias de $N = 200$ muestras por canal (índice de muestra $k = 1, \dots, N$). La discrepancia se cuantifica mediante el *error cuadrático medio* (RMSE) expresado en grados:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\theta_s[k] - \theta_a[k])^2} \quad (6)$$

Con el fin de cuantificar la diferencia entre el ángulo medido por los sensores y el ángulo ejecutado por los actuadores, se utilizó el error cuadrático medio como métrica cuantitativa para evaluar el desempeño del sistema, debido a su capacidad para penalizar errores grandes y proporcionar una medida de la desviación entre ambas señales. Adicionalmente, se calculó el error absoluto medio (MAE) como métrica complementaria, con el propósito de caracterizar el error promedio sin enfatizar de manera tan marcada los valores extremos. Esta métrica permite reforzar las observaciones obtenidas a partir del RMSE. La Tabla 3 resume los valores RMSE y MAE calculados entre la señal del sensor y la respuesta del actuador.

Tabla 3: Error RMSE y error MAE representados en grados

Sensor/Actuador	Error RMSE	Error MAE
Dedo meñique	18.02	13.6
Dedo anular	24.11	18.94
Dedo medio	28.35	19.26
Dedo índice	41.39	30.58
Dedo pulgar	4.9	3.42
MPU6050	36.32	25.64

Los resultados muestran una variabilidad significativa entre los distintos canales del sistema. El dedo pulgar presenta

el menor error, con valores de RMSE = 4.9° y MAE = 3.42°, lo cual indica una correspondencia más cercana entre la señal del sensor y la respuesta del actuador. Este mejor desempeño puede explicarse por su rango mecánico más limitado, lo que reduce la variabilidad del movimiento y facilita el seguimiento. En contraste, el dedo índice presenta el mayor error, con RMSE = 41.39° y MAE = 30.58°, seguido por el canal del MPU6050 con RMSE = 36.32° y MAE = 25.64°, y por el dedo medio con RMSE = 28.35° y MAE = 19.26°. Los dedos anular y meñique presentan errores intermedios, con RMSE de 24.11° y 18.02°, respectivamente.

La comparación conjunta de RMSE y MAE permite una interpretación más completa del comportamiento de cada canal. Cuando ambos indicadores crecen de forma consistente, como ocurre en el dedo índice y en el canal MPU6050, se confirma que no solo existen errores instantáneos grandes, sino también una discrepancia promedio elevada durante toda la trayectoria. En cambio, en el pulgar ambos indicadores permanecen bajos, lo que refuerza la evidencia de un mejor ajuste entre referencia y respuesta. Esta comparación sugiere que los canales con mayor error no presentan únicamente picos aislados de desviación, sino un desempeño general menos preciso. Estas diferencias pueden explicarse a partir de varios factores. El acondicionamiento y la naturaleza de los sensores juegan un papel importante: los sensores de flexión presentan características no lineales y sensibilidad variable según la curvatura, mientras que el MPU6050 introduce errores adicionales asociados a ruido, estimación angular y posibles desviaciones en la medición inercial.

Asimismo, factores como la calibración individual de cada canal, el ajuste del mapeo sensor-actuador, el rango de operación efectivo de cada dedo y las variaciones mecánicas en el montaje contribuyen a la dispersión observada en los errores. En términos prácticos, esto significa que algunos dedos presentan una relación más directa y reproducible entre el gesto humano y la acción robótica, mientras que otros requieren un proceso de calibración y compensación más cuidadoso.

A pesar de estas diferencias, en todos los casos el error permanece acotado, lo cual confirma la estabilidad del sistema durante las pruebas de teleoperación. Sin embargo, los resultados también muestran que el desempeño no es uniforme entre canales, por lo que aún existe margen de mejora en precisión, sincronización y fidelidad de seguimiento. En este sentido, el sistema demuestra viabilidad funcional, pero también evidencia la necesidad de optimizar el procesamiento de señal, la calibración y la estrategia de control para reducir el desfase y mejorar la correspondencia entre el movimiento del usuario y la respuesta de la mano robótica.

4. Conclusiones

La implementación del circuito electrónico permitió mantener las señales de los sensores de flexión dentro del rango de operación de la tarjeta de desarrollo ESP32. De manera complementaria, la integración del protocolo ESP-NOW facilitó una comunicación inalámbrica eficiente entre el guante sensorizado y la mano robótica, lo que permitió construir un sistema funcional, versátil y adecuado para aplicaciones donde el uso de cableado resulta poco práctico o representa un riesgo para el usuario.

A partir de los resultados experimentales se comprobó que los actuadores responden a las señales generadas por los sensores; sin embargo, se identificaron discrepancias entre la referencia sensada y la respuesta ejecutada por el sistema robótico. El análisis temporal mostró la presencia de desfases entre ambas señales, atribuibles principalmente a la dinámica de los servomotores, al periodo de muestreo empleado y al retardo acumulado del sistema de comunicación y procesamiento. Asimismo, el análisis cuantitativo mediante RMSE y MAE evidenció que el desempeño varía entre canales, siendo el pulgar el canal con mejor ajuste y el dedo índice, junto con el canal del MPU6050, los de mayor error.

Estos resultados confirman que la arquitectura propuesta es viable para tareas de teleoperación básica, ya que el sistema reproduce la tendencia general del movimiento de la mano del usuario y mantiene un comportamiento estable durante las pruebas. No obstante, también muestran que la precisión de seguimiento aún es limitada, particularmente en aquellos canales donde intervienen efectos de no linealidad, ruido, sensibilidad variable del sensor y diferencias mecánicas en el montaje. Se considera que estas discrepancias podrían mitigarse mediante varias mejoras. Entre ellas destacan la incorporación de estrategias de control más robustas, la aplicación de técnicas de filtrado para reducir el ruido en las señales de los sensores, la calibración individual de cada canal y el refinamiento del mapeo sensor-actuador. Adicionalmente, sería conveniente explorar alternativas de accionamiento, como motores a paso u otros actuadores con mejor control posicional, con el fin de disminuir los efectos asociados a la respuesta dinámica y al ruido eléctrico característico de los servomotores.

Finalmente, los resultados obtenidos confirman la factibilidad de utilizar un guante sensorizado con comunicación inalámbrica para la manipulación remota de una mano robótica en escenarios donde el contacto directo del usuario representa un riesgo. Este trabajo abre la posibilidad de investigaciones futuras orientadas al perfeccionamiento del diseño mecánico, la mejora del seguimiento angular, la incorporación de técnicas de control avanzado y la integración de algoritmos de inteligencia artificial para el reconocimiento y la ejecución más precisa de gestos complejos.

Referencias

- Arifin, A. N., Azmi, E. N. M., Tamrin, M. A., y Andah, M. R. (2023). A systematic literature review on confined space hazards. *Results in Engineering*, 18:101188.
- Corona, M., Tapia, N., y Vicario, C. (2022). La robótica a través del tiempo.
- Coughlin, R., Driscoll, F., y Flores, G. (1999). *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*, volumen 5. Prentice Hall.
- Espressif (2020). Esp-now programming guide (esp-idf documentation). Disponible en https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/network/esp_now.html.
- Espressif (2021). Protocolo de comunicación inalámbrica (esp-now). Disponible en <https://www.espressif.com/en/solutions/low-power-solutions/esp-now>.
- Espressif (2025). Esp32 series. Datasheet, versión 4.9, disponible en https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
- Gentile, G., Ma ffei, R., Müller, H., Sühl, J., y Briol, F. (2023). Synchronized control by teleoperation of a mobile robotic assistant: An application to hazardous tasks at cern. *Sensors*, 23(11):5248.
- González, C., Solanes, J. E., Muñoz, A., Gracia, L., Gírbés-Juan, V., y Tornero,

- J. (2021). Advanced teleoperation and control system for industrial robots based on augmented virtuality and haptic feedback. *Journal of Manufacturing Systems*, 59:283–298.
- Grossre (2017). Humanoid robotic hand. disponible en <https://www.thingiverse.com/thing:2269115/files>
- InvenSense, T. (2013). Mpu-6000 and mpu-6050 register map and descriptions. disponible en <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1132807/TDK/MPU-6050/63/1/MPU-6050.html>
- Liddell, H. y Secco, E. L. (2025). Development of an intuitive glove-based human interface for robotic applications. *Bio-Robotics*. Disponible en <https://doi.org/10.54963/br.v1i1.1303>
- Lu, X., AuthorTwo, A., y AuthorThree, B. (2024). Teleoperated grasping using data gloves based on fuzzy logic controller. *Biomimetics*, 9(2):116.
- Mendoza, L., Alarcón, H., y Monroy, L. (2020). La robótica como recurso educativo para desarrollar las competencias del alumnado en el siglo xxi.
- Olave, W. y Gonzalo, R. (2022). Diseño, fabricación y análisis de una mano robótica subactuada utilizando actuadores de cuerda trenzada.
- Pérez, N. Q., Durandal, E. C., y San Pablo, B. (2019). Sistema de control de manorobótica replicadora de movimientos para manipular sustancias químicas. *Acta Nova*, 9(1):82–114.
- Quimiz, G., David, A., Lindao, S., y Andrés, X. (2023). Desarrollo de prototipo de mano robótica para manipulación de objetos livianos aplicando robótica suave. B.S. thesis.
- Rajakumar, J. P. y Choi, J. H. (2023). Helmet-mounted real-time toxic gas monitoring and prevention system for workers in confined places. *Sensors*, 23(3):1590.
- Sánchez, S. y Hernán, J. (2023). Desarrollo de una herramienta de control para manipulación de objetos por medio de una mano robótica antropomorfa. Siciliano, B. y Khatib, O., editores (2016). *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2 edición.
- Singh, R., Moza ffari, S., Akhshik, M., Ahamed, M. J., Rondeau-Gagn é, S., y Alirezaee, S. (2024). Gesture-controlled robotic arm for agricultural harvesting using a data glove with bending sensor and optitrack systems. *Micro-machines*. Disponible en <https://doi.org/10.3390/mi15070918>
- spectralsymbol (2014). Sensores flexibles resistivos. Disponible en <https://www.spectralsymbol.com/resistive-flex-sensors>
- Tiboni, M., Filippini, A., Amici, C., y Vetturi, D. (2021). Test-bench for the characterization of flexion sensors used in biomechanics. *Electronics*, 10(23):2994.
- Urazayev, M. U., Tsyban, A. A., Zhumabekova, D. K., Kulbayeva, B. M., y Aitkazina, S. K. (2023). Comparative study of esp-now and wi-fi for the internet of things applications. En *2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*.
- Xia, J., Li, Y., Zhu, Y., Wu, H., y Wang, Y. (2025). A teleoperation system for dexterous hand control. *International Joint Conference on Robotics and Artificial Intelligence*. Disponible en <https://doi.org/10.1145/3696474.3708465>.
- Yu, Z., Lu, C., Zhang, Y., y Jing, L. (2024). Gesture-controlled robotic arm for agricultural harvesting using a data glove with bending sensor and optitrack systems. *Micromachines*, 15(7).
- Zaidan, A., Wail, M., y Yaseen, A. (2021). Design and implementation of upper prosthetic controlled remotely by flexible sensor glove. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Disponible en <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1105/1/012080>

ACEPTADO - ACCURACY