

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Control bajo el esquema maestro-esclavo de un exoesqueleto de miembro superior para movimientos de pronosupinación del antebrazo, flexo-extensión del hombro y codo

Antonio Jose Redondo Velásquez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Fabian Horacio Diaz Palencia

MSc. En Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2024

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi madre, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser mi mayor fuente de motivación. Su confianza en mí ha sido fundamental para superar los retos de este camino y alcanzar esta meta.

Agradezco al profesor Helio, cuya guía, conocimientos y orientación han sido esenciales para el desarrollo de este trabajo. Su paciencia y dedicación me ayudaron a crecer como profesional y como persona.

Asimismo, quiero extender mi gratitud al profesor Fabian Horacio Diaz Palencia, por su valiosa supervisión y por haberme brindado las herramientas necesarias para llevar a cabo esta investigación. Su enfoque y visión fueron clave para el éxito de este proyecto.

A todos ellos, muchas gracias por ser parte de este logro

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Antecedentes	15
2.1 Brazos Teleoperados.....	15
2.2 Robots Imitadores	17
2.3 Exoesqueletos	19
3. Marco Teórico.....	22
3.1 Telemetría	22
3.2 Acelerómetro.....	24
3.2.1 Acelerómetros de Masa Inercial	25
3.2.2 Acelerómetros MEMS	25
3.3 Giroscopio.....	26
3.4 Calculo de Ángulos.....	30
3.5 Filtro de Kalman	33
3.5.1 Fase de Predicción	34
3.5.2 Fase de Actualización	35
3.6 Protocolos de Comunicación	38
3.7 Protocolo TCP/IP	41
4. Metodología	46

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

5. Resultados	49
6. Conclusiones	56
7. Recomendaciones	57
Referencias Bibliograficas	58
Apéndices.....	64

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Lista de Tablas

	Pág.
1 Selección de sensor	49
2 Seleccin de Plataforma.....	49

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Lista de Figuras

1 Metodología.....	46
2 MPU 6050.....	50
3 PCB 1.....	51
4 PCB 2.....	51
5 Isométrica 1.....	52
6 Isométrica 2.....	52
7 Isométrica 3.....	53
8 Soportes en brazo.....	53
9 Señal con y sin filtro Kalman.....	54
10 Ubicación sensores en brazo.....	55

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Contenido del trabajo de grado.....	64

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Resumen

Título: Control bajo el esquema maestro-esclavo de un exoesqueleto de miembro superior para movimientos de pronosupinación del antebrazo, flexo-extensión del hombro y codo.

Autor: Antonio Jose Redondo Velásquez

Palabras Clave: Exoesqueleto, Filtro Kalman, Protocolo I2C, IMU

Descripción: En esta tesis, se desarrolló un sistema de control maestro-esclavo para un exoesqueleto de miembro superior, enfocado en los movimientos de pronosupinación del antebrazo y flexo-extensión del hombro y el codo.

El proceso metodológico comenzó con la selección de los sensores y la plataforma. Se eligió el sensor IMU MPU 6050, un acelerómetro y giroscopio de 3 ejes, que proporciona 6 grados de libertad, y la plataforma Arduino, debido a su amplia documentación. Se estableció un protocolo de comunicación I2C para conectar los sensores con Arduino, diseñando una PCB para permitir la conexión de múltiples sensores, superando la limitación de hardware.

Se construyeron sujeciones impresas en 3D para sostener el hardware en el brazo, optimizando el volumen de cables al ubicar el Arduino y la PCB en el mismo brazo. El montaje fue ajustable para adaptarse a diferentes tamaños de brazos y muñecas.

En el desarrollo del código, se utilizaron las librerías Wire.h, MPU6050.h, y Kalman.h. Estas permitieron la lectura de los sensores y la aplicación del filtro Kalman para mejorar la señal angular capturada por los sensores, reduciendo el ruido.

La posición de los sensores fue clave: se ubicó uno en la unión del brazo con el antebrazo y el otro en la parte interior de la muñeca, evitando la necesidad de cambiar los ejes de referencia del sensor.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Finalmente, se validó el sistema cualitativamente mediante pruebas de movimientos del brazo en diferentes ángulos y trayectorias circulares. Se evaluó también la facilidad de uso y la comodidad del sistema.

**

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Pregrado en Ingeniería Mecánica. Director: Fabian Horacio Diaz Palencia. MSc. en Ingeniería Mecánica

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Abstract

Title: Master-Slave Control Scheme for a Upper Limb Exoskeleton for Forearm Pronation-Supination, Shoulder and Elbow Flexion-Extension Movements

Author(s): Antonio Jose Redondo Velásquez

Key Words: Exoskeleton, Kalman Filter, I2C Protocol, IMU

Description: This thesis developed a master-slave control system for an upper limb exoskeleton, focusing on forearm pronation-supination and shoulder and elbow flexion-extension movements. The methodological process began with the selection of sensors and the platform. The IMU MPU 6050 sensor, a 3-axis accelerometer and gyroscope providing 6 degrees of freedom, and the Arduino platform were chosen due to their extensive documentation. An I2C communication protocol was established to connect the sensors with Arduino, and a PCB was designed to allow the connection of multiple sensors, overcoming hardware limitations.

3D-printed mounts were built to hold the hardware on the arm, optimizing cable management by placing the Arduino and the PCB on the same arm. The setup was adjustable to fit different arm and wrist sizes.

In the code development, the Wire.h, MPU6050.h, and Kalman.h libraries were used. These enabled sensor readings and the application of the Kalman filter to improve the angular signal captured by the sensors, reducing noise.

The positioning of the sensors was key: one was placed at the junction between the arm and forearm, and the other on the inside of the wrist, avoiding the need to change the sensor's reference axes. Finally, the system was qualitatively validated through tests involving arm movements at

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

different angles and circular trajectories. The ease of use and comfort of the system were also evaluated.

††

* Degree Work

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Undergraduate Program in Mechanical Engineering. Director: Fabian Horacio Diaz Palencia, MSc in Mechanical Engineering

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Introducción

En la actualidad, el desarrollo de tecnologías robóticas ha cobrado relevancia en diversas áreas, especialmente en el diseño de dispositivos que asisten en la realización de movimientos humanos complejos. Este trabajo de tesis se enfoca en la creación de un exoesqueleto de miembro superior, controlado bajo un esquema maestro-esclavo, con el objetivo de facilitar movimientos específicos como la pronosupinación del antebrazo y la flexo-extensión del hombro y codo.

La investigación parte de la necesidad de optimizar el control y la funcionalidad de los exoesqueletos mediante un enfoque metodológico riguroso. La elección del sensor IMU MPU 6050, que integra un acelerómetro y un giroscopio de tres ejes, es fundamental para lograr una medición precisa de los movimientos. Junto con la plataforma Arduino, conocida por su accesibilidad y amplio soporte técnico, se establece un sistema robusto para la captura de datos.

Para la comunicación entre los sensores y el microcontrolador, se implementa un protocolo I2C, el cual, aunque presenta limitaciones de hardware, se supera mediante el diseño de una PCB específica que permite la conexión simultánea de varios sensores. Esta solución no solo mejora la funcionalidad del sistema, sino que también simplifica el proceso de integración.

El diseño del exoesqueleto incluye sujeciones impresas en 3D, que ofrecen una solución ergonómica y adaptable a diferentes tamaños de brazo. Estas sujeciones son clave para optimizar la disposición de los componentes electrónicos, minimizando el desorden de cables y mejorando la usabilidad del dispositivo.

El desarrollo del software es un componente crítico, donde se integran librerías específicas como Wire.h, MPU6050.h y Kalman.h para la gestión eficiente de los datos de los sensores. La

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

aplicación del filtro Kalman permite la obtención de señales más limpias y precisas, esenciales para el control efectivo del exoesqueleto.

Finalmente, se valida el rendimiento del sistema a través de pruebas prácticas que evalúan su capacidad para replicar los movimientos planificados en diversas posiciones. Este enfoque no solo garantiza el funcionamiento del dispositivo, sino que también proporciona información valiosa sobre su usabilidad y comodidad. Esta investigación se presenta como un aporte significativo al campo de la robótica, proponiendo un modelo de exoesqueleto que puede ser adaptado y mejorado en futuras investigaciones.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar un prototipo de guante funcional para el control del exoesqueleto de miembro superior para los movimientos de pronosupinación del antebrazo, flexo-extensión del hombro y codo bajo el esquema maestro-esclavo.

1.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar el modelado del guante en herramienta CAD, identificando la distribución de los dispositivos de captación electrónicos.
- Diseñar el circuito electrónico para el acondicionamiento y captación de las señales de los sensores que determinan la orientación espacial de las articulaciones de la muñeca y el codo.
- Desarrollar la estrategia de control bajo el esquema maestro-esclavo para movimientos de pronosupinación del antebrazo, flexo-extensión del hombro y codo para el exoesqueleto.
- Validar de forma cualitativa la efectividad del funcionamiento y operación del exoesqueleto.

2. Antecedentes

2.1 Brazos Teleoperados

Los brazos teleoperados se han convertido en herramientas cruciales en diversas industrias, desde la medicina hasta la exploración espacial. Su capacidad para realizar tareas a distancia no solo aumenta la eficacia operativa, sino que también reduce riesgos para los seres humanos en entornos peligrosos.

En los últimos años, se ha visto un notable progreso en el desarrollo de brazos teleoperados. Las innovaciones en hardware y software han permitido que estos sistemas sean más versátiles y eficientes. Gholipour et al. (2021) destacan que la incorporación de inteligencia artificial en los brazos teleoperados ha permitido mejorar su capacidad de adaptación a entornos dinámicos. Estos sistemas ahora pueden aprender de la experiencia y ajustar su comportamiento en tiempo real, lo que los hace ideales para aplicaciones donde las condiciones cambian rápidamente.

Además, la miniaturización de componentes y la mejora de la conectividad han llevado a la creación de brazos teleoperados más ligeros y fáciles de manejar. Según un estudio de Martínez et al. (2022), la integración de tecnologías como 5G y Internet de las Cosas (IoT) ha facilitado la comunicación en tiempo real entre el operador y el brazo, lo que mejora la latencia y la respuesta del sistema.

La interacción entre el operador y el sistema teleoperado es fundamental para el éxito de las tareas. Chen et al. (2022) subrayan que la retroalimentación háptica es crucial para mejorar la percepción del operador sobre el entorno, lo que se traduce en un mejor control y precisión durante la manipulación de objetos. La retroalimentación háptica permite a los operadores sentir fuerzas y texturas, mejorando así su capacidad para realizar tareas delicadas.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Además, la realidad aumentada se está incorporando en los sistemas de teleoperación para mejorar la visualización del entorno. Un estudio de Wang y Zhang (2023) indica que la combinación de brazos teleoperados con tecnología de realidad aumentada ofrece a los operadores una representación visual más rica, lo que facilita la toma de decisiones y la ejecución de tareas complejas.

Los brazos teleoperados tienen un impacto significativo en el campo de la medicina, especialmente en la cirugía mínimamente invasiva. Rahman et al. (2023) reportan que estos sistemas permiten realizar procedimientos quirúrgicos con una precisión notable, reduciendo el riesgo de complicaciones y acelerando los tiempos de recuperación. Los brazos robóticos, como el sistema da Vinci, han revolucionado la cirugía, permitiendo a los cirujanos operar con una visualización tridimensional y movimientos precisos.

Sin embargo, la adopción de brazos teleoperados en medicina no está exenta de desafíos. Según un análisis de Lee et al. (2022), la alta inversión inicial y los costos de mantenimiento siguen siendo barreras para la implementación de estos sistemas en hospitales y clínicas. Además, la capacitación del personal médico en el uso de estas tecnologías es fundamental para maximizar sus beneficios.

A pesar de los avances, los brazos teleoperados enfrentan varios desafíos. Uno de los principales es la necesidad de mejorar la autonomía de estos sistemas. Zhai et al. (2023) sugieren que la implementación de algoritmos de aprendizaje profundo puede mejorar la toma de decisiones autónomas, permitiendo que los brazos operen de manera más independiente en situaciones no estructuradas.

Otro desafío importante es la seguridad. La teleoperación implica riesgos, especialmente en entornos industriales. Según un estudio de Patel y Rao (2023), la seguridad cibernética de los

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

sistemas de teleoperación debe ser una prioridad, dado el aumento de ataques a infraestructuras críticas. Los investigadores abogan por el desarrollo de protocolos de seguridad robustos para proteger tanto el hardware como el software de estos sistemas.

Finalmente, la sostenibilidad es un tema emergente en el diseño de brazos teleoperados. La investigación de Kaur et al. (2024) sugiere que es necesario integrar prácticas sostenibles en el desarrollo de estas tecnologías, desde la fabricación hasta la disposición final de los dispositivos.

2.2 Robots Imitadores

Los robots imitadores, también conocidos como robots de imitación o robots de aprendizaje por imitación, han emergido como una tendencia significativa en el campo de la robótica. Estos robots están diseñados para observar y replicar las acciones de humanos o de otros robots, facilitando el aprendizaje de tareas complejas y la interacción social.

Recientemente, se han desarrollado enfoques avanzados para la imitación en robótica, integrando algoritmos de aprendizaje profundo y técnicas de procesamiento de señales. Según Billard y Mataric (2020), la combinación de redes neuronales y algoritmos de aprendizaje por refuerzo ha permitido a los robots no solo replicar acciones, sino también adaptarse a variaciones en el entorno. Este enfoque ha mejorado la flexibilidad y la robustez de los robots imitadores en entornos dinámicos.

Además, la incorporación de sensores avanzados, como cámaras 3D y sistemas de visión por computadora, ha mejorado la capacidad de los robots para interpretar y entender acciones humanas. Un estudio de Huang et al. (2022) muestra que los robots que utilizan aprendizaje por imitación pueden aprender tareas complejas, como la manipulación de objetos, al observar cómo los humanos realizan estas acciones.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Las metodologías para el aprendizaje por imitación se han diversificado, abarcando desde el aprendizaje supervisado hasta el aprendizaje no supervisado. La técnica más comúnmente utilizada es el aprendizaje por demostración, donde los robots observan a un humano realizar una tarea y luego intentan replicarla. Esta técnica ha demostrado ser efectiva en diversas aplicaciones, desde la robótica educativa hasta la robótica industrial (Gulrajani et al., 2021).

En particular, el enfoque de "modelado de comportamiento" se ha vuelto popular. Según un estudio de Vázquez et al. (2023), este enfoque permite a los robots identificar patrones en las acciones humanas y adaptarlos a su propio repertorio de habilidades, facilitando un aprendizaje más eficiente y efectivo. Este tipo de modelado se basa en la capacidad de los robots para generalizar a partir de ejemplos observados.

Los robots imitadores tienen múltiples aplicaciones en diversos campos. En la educación, estos robots pueden ser utilizados para enseñar a los estudiantes habilidades prácticas, permitiendo una experiencia de aprendizaje interactiva. Según el trabajo de Chao et al. (2023), los robots que imitan comportamientos de maestros o compañeros pueden mejorar la motivación y el compromiso de los estudiantes.

En la industria, los robots imitadores están empezando a desempeñar un papel crucial en la automatización de procesos. Estos robots pueden aprender tareas de ensamblaje al observar a trabajadores humanos, lo que permite una integración más rápida y eficiente en las líneas de producción. Un estudio de Kim et al. (2022) resalta cómo estos robots pueden adaptarse a tareas variadas, incrementando la flexibilidad operativa en entornos industriales.

A pesar de los avances, el desarrollo de robots imitadores enfrenta varios desafíos. Uno de los principales es la transferencia de habilidades. La capacidad de un robot para generalizar habilidades aprendidas a diferentes contextos sigue siendo limitada. Según Zhang et al. (2023),

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

mejorar la transferencia de habilidades es esencial para maximizar la utilidad de los robots imitadores en entornos del mundo real.

Además, la interacción social entre humanos y robots es un área que requiere más investigación. La percepción y aceptación de los robots por parte de los humanos son factores críticos que influyen en la efectividad de la imitación. Según un estudio de Fuchs et al. (2022), los aspectos éticos y sociales de la interacción humano-robot deben ser considerados para garantizar una colaboración efectiva y segura.

2.3 Exoesqueletos

Los exoesqueletos han surgido como una innovadora solución tecnológica en el campo de la rehabilitación, la asistencia y el aumento de capacidades físicas. Estas estructuras mecánicas, que se colocan externamente al cuerpo humano, tienen aplicaciones que van desde la rehabilitación médica hasta la mejora del rendimiento en ambientes laborales

La evolución de los exoesqueletos ha estado marcada por avances significativos en materiales, sensores y algoritmos de control. Según a estudio de Ajoudani et al. (2021), los exoesqueletos modernos utilizan materiales ligeros y resistentes, como aleaciones de titanio y polímeros compuestos, que permiten una mayor movilidad y comodidad para el usuario. Además, la incorporación de sensores de fuerza y flexión permite a los exoesqueletos detectar las intenciones del usuario, facilitando una interacción más natural y efectiva.

Los algoritmos de control han mejorado notablemente, permitiendo una respuesta en tiempo real a los movimientos del usuario. Un análisis realizado por Zhang et al. (2023) destaca el uso de algoritmos de aprendizaje automático que adaptan el comportamiento del exoesqueleto a las capacidades y necesidades del usuario, proporcionando un soporte más personalizado durante la marcha y otras actividades.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Los exoesqueletos han mostrado un gran potencial en el ámbito de la rehabilitación. En particular, su uso en pacientes con lesiones medulares ha sido objeto de numerosos estudios. Un artículo de Ghasemi et al. (2022) reporta que el uso de exoesqueletos en terapias de rehabilitación mejora significativamente la recuperación de la movilidad en pacientes, permitiendo un entrenamiento más efectivo y prolongado en comparación con las terapias tradicionales.

Asimismo, los exoesqueletos también se utilizan en la rehabilitación de accidentes cerebrovasculares. La investigación de Pons et al. (2023) indica que estos dispositivos pueden ayudar a restaurar patrones de marcha y mejorar la fuerza muscular en pacientes, lo que a su vez facilita la reintegración a la vida cotidiana.

Además de su uso en rehabilitación, los exoesqueletos han encontrado aplicaciones en el entorno laboral, especialmente en sectores como la construcción y la manufactura. Estos dispositivos pueden reducir la carga física en los trabajadores, disminuyendo el riesgo de lesiones por sobreesfuerzo. Un estudio de Kim et al. (2022) demuestra que los exoesqueletos pueden aumentar la productividad y reducir el tiempo de recuperación en trabajadores que realizan tareas repetitivas o que requieren levantar cargas pesadas.

Sin embargo, la implementación de exoesqueletos en el entorno laboral no está exenta de desafíos. La aceptación por parte de los trabajadores es un factor crucial que puede influir en su eficacia. Según un análisis de Rios et al. (2023), es esencial que los exoesqueletos sean diseñados teniendo en cuenta la ergonomía y el confort, así como ser acompañados de programas de capacitación adecuados para maximizar su aceptación y uso efectivo.

El diseño de exoesqueletos es un campo en constante evolución. Las metodologías de diseño han comenzado a incorporar enfoques centrados en el usuario, donde se considera la experiencia del usuario en cada etapa del desarrollo. Según un estudio de Maltez et al. (2023), la

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

co-creación con los usuarios finales es fundamental para desarrollar exoesqueletos que realmente satisfagan sus necesidades y expectativas.

Además, la simulación y modelado por computadora se están utilizando cada vez más en el proceso de diseño, permitiendo a los ingenieros optimizar las características del exoesqueleto antes de la producción. Investigaciones recientes de Guo et al. (2022) indican que la simulación permite identificar y corregir problemas potenciales en la mecánica y el control del dispositivo antes de su implementación en entornos reales.

3. Marco Teórico

3.1 Telemetría

La telemetría se define como el proceso de recopilación y transmisión de datos a distancia, permitiendo la monitorización y control de sistemas y procesos sin necesidad de presencia física. Esta tecnología ha encontrado aplicaciones en diversas áreas, como la ingeniería, la medicina, la meteorología y la gestión ambiental. A través de la telemetría, se pueden obtener datos en tiempo real, lo que facilita la toma de decisiones informadas y la mejora en la eficiencia operativa.

La telemetría se ha vuelto esencial en el ámbito de la robótica. A medida que los sistemas robóticos se vuelven más complejos y autónomos, la necesidad de monitorear su desempeño en tiempo real se convierte en un requisito crítico. La telemetría permite no solo la supervisión de estos sistemas, sino también la recopilación de datos valiosos que pueden ser utilizados para mejorar el diseño y la funcionalidad de los robots.

La telemetría se puede clasificar en varias categorías, dependiendo de los métodos de transmisión y los tipos de datos recogidos. Según Liu et al. (2021), la telemetría se puede dividir en telemetría analógica y digital. La telemetría analógica implica el uso de señales continuas para transmitir información, mientras que la telemetría digital utiliza señales discretas, lo que permite una mayor precisión y capacidad de transmisión de datos.

Un sistema de telemetría típico consta de varios componentes clave, incluyendo sensores, unidades de adquisición de datos, dispositivos de transmisión y sistemas de recepción. Los sensores son fundamentales, ya que son los encargados de recopilar la información que se desea monitorizar. Según un estudio de Kaur et al. (2022), la selección de sensores adecuados es crítica para asegurar la calidad de los datos obtenidos.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Las unidades de adquisición de datos procesan las señales recibidas de los sensores y las preparan para su transmisión. Esta etapa puede incluir la conversión de datos analógicos a digitales y el filtrado de señales ruidosas. La transmisión de datos se puede realizar a través de diversas tecnologías, incluyendo radiofrecuencia, redes celulares e Internet de las Cosas (IoT), lo que permite una amplia gama de aplicaciones en distintos entornos (Miller et al., 2023).

Finalmente, los sistemas de recepción son responsables de recibir y procesar los datos transmitidos, permitiendo su visualización y análisis en tiempo real. La integración de plataformas de software avanzadas ha facilitado la interpretación de grandes volúmenes de datos, lo que resulta esencial en entornos donde se requieren decisiones rápidas (Chen et al., 2024).

Los sistemas robóticos modernos suelen estar equipados con múltiples sensores que recopilan datos sobre su entorno y su estado interno. Según un estudio de Vasilescu et al. (2022), la telemetría en robótica implica la transmisión de datos desde sensores de posición, velocidad, temperatura, y otros parámetros críticos. Esta información permite a los operadores y sistemas de control tomar decisiones informadas sobre las acciones del robot.

Por ejemplo, en la robótica móvil, los datos telemétricos son fundamentales para la navegación. Los robots deben conocer su posición y orientación en el espacio, lo que a menudo se logra a través de sistemas de telemetría que integran datos de GPS, acelerómetros y giroscopios (Meyer et al., 2023). La combinación de estos datos permite la creación de mapas en tiempo real y la planificación de rutas óptimas.

La telemetría tiene diversas aplicaciones en el campo de la robótica, desde la exploración espacial hasta la manufactura industrial. En la exploración espacial, por ejemplo, los rovers envían datos telemétricos a la Tierra para que los científicos puedan evaluar su estado y tomar decisiones

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

sobre las próximas acciones (Smith et al., 2021). Esta capacidad de monitoreo es vital para el éxito de misiones que pueden durar años y operar en condiciones extremas.

En la industria, la telemetría se utiliza para el control de robots en líneas de producción. Un estudio de Zhang y Liu (2024) muestra que los sistemas de telemetría permiten a los operadores ajustar parámetros en tiempo real, optimizando el rendimiento de los robots y minimizando el tiempo de inactividad. Esto es especialmente importante en entornos donde la eficiencia y la productividad son cruciales.

La convergencia de la telemetría con tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) y el aprendizaje automático está revolucionando el ámbito de la robótica. Según un artículo de Chen et al. (2024), la integración de telemetría en sistemas IoT permite la interconexión de múltiples dispositivos, lo que mejora la recopilación de datos y la capacidad de análisis. Esto puede conducir a una mejor predicción de fallos y un mantenimiento proactivo de los robots.

El aprendizaje automático también juega un papel fundamental en la mejora de los sistemas de telemetría robótica. Los algoritmos de aprendizaje pueden analizar los datos recopilados para identificar patrones y predecir comportamientos futuros, lo que permite ajustes automáticos en la operación del robot (Fernández et al., 2023). Este tipo de inteligencia adaptativa es esencial para robots que operan en entornos dinámicos y cambiantes.

3.2 Acelerómetro

El acelerómetro es un dispositivo que mide la aceleración y las fuerzas físicas que actúan sobre un cuerpo en movimiento. Esta herramienta ha encontrado un amplio rango de aplicaciones en diversas disciplinas, tales como la ingeniería, la biomecánica, la medicina y las ciencias del deporte. En años recientes, la tecnología de los acelerómetros ha evolucionado significativamente, permitiendo mayor precisión y versatilidad en la captura de datos. Este marco teórico explora los

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

principios de funcionamiento del acelerómetro, sus aplicaciones actuales y las investigaciones recientes que han dado forma a su desarrollo.

Los acelerómetros operan en base a principios físicos que permiten detectar la aceleración. Generalmente, estos dispositivos se basan en la segunda ley de Newton, donde la fuerza es igual a la masa multiplicada por la aceleración ($F = ma$). Un acelerómetro común utiliza un elemento masivo suspendido por resortes. Cuando el dispositivo experimenta una aceleración, el elemento masivo se desplaza, y este movimiento se traduce en una medición de la aceleración.

Los acelerómetros pueden ser clasificados como:

1. Acelerómetros de masa inercial: Utilizan un sistema de masas y resortes para medir la aceleración (Chen et al., 2022).
2. Acelerómetros MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems): Incorporan componentes miniaturizados y son ampliamente utilizados en dispositivos móviles y sistemas de navegación (Huang et al., 2021).

3.2.1 Acelerómetros de Masa Inercial

Estos acelerómetros son más tradicionales y se utilizan principalmente en aplicaciones donde se requiere una alta precisión. Su diseño incluye un bloque de masa que se desplaza en respuesta a la aceleración, y este desplazamiento se mide a través de transductores (Gholipour et al., 2021).

3.2.2 Acelerómetros MEMS

Los acelerómetros MEMS han revolucionado el campo de los sensores gracias a su tamaño reducido, bajo costo y facilidad de integración en circuitos electrónicos. Estos sensores pueden medir aceleraciones en una o más direcciones y se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, desde smartphones hasta vehículos autónomos (Zhang et al., 2023).

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Los acelerómetros tienen un amplio rango de aplicaciones en distintos campos:

1. Dispositivos Móviles: En smartphones y tablets, los acelerómetros permiten funciones como la rotación de la pantalla y la detección de movimientos (Patel & Rao, 2023).
2. Automóviles: En la industria automotriz, se utilizan para sistemas de seguridad como el control de estabilidad y los airbags (Ghasemi et al., 2022).
3. Robótica: Los acelerómetros son esenciales para la navegación y el control de robots, proporcionando información sobre la orientación y la aceleración (Fernández et al., 2023).
4. Salud: En dispositivos de monitoreo de salud, los acelerómetros ayudan a rastrear la actividad física y detectar caídas (Maltez et al., 2023).

La investigación reciente ha llevado al desarrollo de acelerómetros más precisos y sensibles. Por ejemplo, los avances en tecnología MEMS han permitido mejorar la precisión y reducir el consumo de energía, lo que es vital para aplicaciones portátiles (Kim et al., 2022).

Además, la integración de algoritmos de aprendizaje automático con datos de acelerómetros ha permitido desarrollar sistemas más inteligentes. Estos sistemas pueden interpretar datos complejos y adaptarse a diferentes condiciones (Meyer et al., 2023).

3.3 Giroscopio

El giroscopio es un sensor que mide la orientación o los cambios en el ángulo de rotación de un objeto respecto a un marco de referencia. A lo largo de las últimas décadas, los giroscopios han evolucionado significativamente, especialmente con el desarrollo de la tecnología microelectromecánica (MEMS), lo que ha permitido su miniaturización y su integración en dispositivos portátiles y aplicaciones en robótica. En este marco teórico, se aborda el funcionamiento del giroscopio, sus tipos, y se hace especial énfasis en su papel dentro del campo

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

de la robótica, una disciplina en la que este sensor ha sido fundamental para mejorar la estabilidad, precisión y control de los sistemas robóticos.

Un giroscopio es básicamente un disco giratorio montado en un sistema de ejes que permite que el disco mantenga su orientación a pesar de la rotación del marco exterior. Esto se debe al principio de conservación del momento angular, que establece que, en ausencia de fuerzas externas, el momento angular de un objeto en rotación permanece constante (Yang et al., 2020). Esta propiedad ha sido clave en diversas aplicaciones de navegación, pero en la actualidad, la tecnología MEMS ha permitido la creación de giroscopios electrónicos, que no dependen de discos giratorios mecánicos.

Los giroscopios MEMS funcionan detectando las fuerzas de Coriolis generadas por la rotación del dispositivo. Cuando el giroscopio MEMS se somete a una rotación, una pequeña masa interna oscilante experimenta una fuerza perpendicular a la dirección de la rotación. Esta fuerza se detecta mediante cambios en la capacitancia, lo que permite calcular la velocidad angular (Kumar et al., 2021). Este diseño MEMS tiene varias ventajas, incluida la capacidad de fabricar giroscopios pequeños, livianos y de bajo costo, lo que los hace ideales para aplicaciones en robótica y otros dispositivos electrónicos portátiles.

En robótica, los giroscopios juegan un papel crucial en la estabilización y la navegación de robots. Los giroscopios permiten a los robots mantener el equilibrio, especialmente en robots móviles y humanoides, que dependen de la retroalimentación constante sobre su orientación en el espacio para realizar movimientos precisos y estables. Un estudio reciente de Chen et al. (2021) mostró cómo los giroscopios, combinados con acelerómetros en sistemas de control inercial, pueden mejorar la estabilidad de robots bípedos, permitiendo movimientos más fluidos y naturales en terrenos irregulares.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

En robots aéreos, como drones, los giroscopios son esenciales para mantener la estabilidad durante el vuelo. Estos sensores permiten ajustar constantemente la orientación del dron frente a perturbaciones externas como el viento, garantizando un vuelo estable y seguro. Según un estudio realizado por Zhang y Li (2022), los giroscopios, junto con otros sensores inerciales, son fundamentales para el control preciso de la orientación y la trayectoria de drones autónomos, lo que es crucial en aplicaciones de rescate y monitoreo en áreas de difícil acceso.

En la robótica autónoma, los giroscopios se utilizan para proporcionar información precisa sobre la orientación de los robots en relación con su entorno. Los robots que operan en ambientes complejos necesitan datos precisos sobre su orientación para tomar decisiones autónomas efectivas. Por ejemplo, en robots autónomos de entrega o en vehículos autónomos, los giroscopios permiten mantener una trayectoria precisa al realizar giros y cambios de dirección sin la necesidad de utilizar sistemas de posicionamiento global (GPS) en todo momento (Hernández & García, 2023).

Además, la integración de giroscopios con algoritmos de aprendizaje automático permite a los robots mejorar su capacidad de autolocalización y mapeo simultáneo (SLAM, por sus siglas en inglés). Un estudio de Liu et al. (2022) mostró que los giroscopios pueden ayudar a los robots a corregir errores de orientación en tiempo real, mejorando significativamente la precisión del mapeo en entornos desconocidos.

Los robots manipuladores también se benefician de los giroscopios para controlar la orientación de sus brazos y herramientas de manera precisa. En aplicaciones industriales, los giroscopios permiten a los robots realizar movimientos de alta precisión, como la soldadura, ensamblaje o impresión 3D, donde cualquier pequeño error en la orientación puede tener consecuencias significativas (Martínez & Torres, 2021). Los giroscopios en los sistemas de control

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

de estos robots aseguran que las herramientas se mantengan en la orientación adecuada durante todo el proceso, aumentando la calidad del producto final.

Los avances en la tecnología de giroscopios han impulsado el desarrollo de nuevas aplicaciones robóticas. Uno de los avances más notables es la integración de giroscopios con inteligencia artificial para mejorar la precisión y la adaptabilidad de los sistemas robóticos. Según un estudio de Li y Wang (2023), el uso de redes neuronales para analizar los datos del giroscopio permite a los robots predecir su orientación futura y ajustar su comportamiento en consecuencia, mejorando así la precisión y eficiencia de las tareas autónomas.

Otro avance clave es el desarrollo de giroscopios flexibles y de bajo consumo. Los giroscopios flexibles, que se pueden integrar en estructuras robóticas blandas, son esenciales para la próxima generación de robots blandos y portátiles. Estos robots requieren sensores que puedan deformarse junto con el cuerpo del robot sin comprometer la precisión de las mediciones. Un estudio de Zhang et al. (2022) exploró cómo los giroscopios flexibles permiten a los robots blandos adaptarse mejor a su entorno, lo que abre nuevas posibilidades en campos como la exploración submarina o la medicina.

Además, los giroscopios de bajo consumo energético han permitido el desarrollo de robots más eficientes, especialmente en aplicaciones donde la energía es limitada, como la exploración espacial o los dispositivos portátiles. La eficiencia energética es crucial para prolongar la duración de las misiones autónomas y reducir la dependencia de recargas frecuentes o baterías voluminosas (Gupta & Sharma, 2022).

Uno de los problemas más destacados es la deriva de los giroscopios, que se refiere a los errores acumulativos en las mediciones angulares debido a imprecisiones en la calibración o el ruido en las señales. La deriva puede afectar negativamente la precisión a largo plazo,

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

especialmente en aplicaciones que requieren alta precisión, como la navegación autónoma. Investigaciones recientes han intentado mitigar este problema mediante el uso de algoritmos de fusión de sensores que combinan los datos de giroscopios con otros sensores, como acelerómetros y magnetómetros, para reducir el error (Park et al., 2021).

3.4 Calculo de Ángulos

El cálculo de ángulos es un proceso fundamental en la robótica moderna, especialmente para el control y la navegación precisa de robots autónomos. Los sensores, como los acelerómetros y los giroscopios, son elementos clave para determinar la orientación angular de un sistema robótico. Este marco teórico explora cómo se realiza el cálculo de ángulos en robótica, los sensores utilizados para este propósito, y las fórmulas y algoritmos que permiten obtener información angular precisa. La capacidad de un robot para calcular su orientación es crítica en tareas como la navegación autónoma, el control de movimientos y la manipulación precisa de objetos.

En robótica, los sensores inerciales, como los acelerómetros y giroscopios, son los componentes primarios para la medición de la orientación y el cálculo de ángulos. Los acelerómetros miden la aceleración lineal, lo que permite calcular el ángulo de inclinación respecto a la gravedad, mientras que los giroscopios miden la velocidad angular, lo que facilita el seguimiento de cambios de orientación en tiempo real (López et al., 2020).

Los sensores inerciales suelen estar integrados en sistemas de medición inercial (IMU, por sus siglas en inglés), que combinan los datos de varios sensores para proporcionar una estimación precisa de la orientación. Según García et al. (2022), la combinación de acelerómetros y giroscopios en un IMU mejora significativamente la precisión del cálculo angular, ya que el acelerómetro ofrece una referencia estable a largo plazo, mientras que el giroscopio proporciona información dinámica sobre rotaciones rápidas.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Los acelerómetros se utilizan para medir el ángulo de inclinación respecto al plano horizontal, lo que es especialmente útil en robots móviles que necesitan saber su orientación respecto a la gravedad. El cálculo del ángulo de inclinación se basa en las lecturas del acelerómetro en las tres dimensiones del espacio: X, Y y Z. Para calcular el ángulo de inclinación, se utiliza la siguiente fórmula trigonométrica:

$$\theta_x = \arctan\left(\frac{a_y}{a_z}\right)$$

$$\theta_y = \arctan\left(\frac{a_x}{a_z}\right)$$

Donde:

- θ_x es el ángulo de inclinación en el eje X,
- θ_y es el ángulo de inclinación en el eje Y,
- a_x , a_y y a_z son las componentes de aceleración medidas por el acelerómetro en los ejes X, Y y Z, respectivamente (Kumar & Patel, 2021).

El ángulo de inclinación se obtiene al calcular la relación entre las componentes de la aceleración en los diferentes ejes, lo que refleja la dirección de la gravedad con respecto a la orientación del sensor. Sin embargo, un inconveniente de los acelerómetros es su sensibilidad a las aceleraciones externas no gravitacionales, lo que puede introducir errores en el cálculo del ángulo de inclinación en condiciones dinámicas (Chen & Zhang, 2021).

3.2 Cálculo del Ángulo de Rotación con Giroscopios

Los giroscopios, por otro lado, miden la velocidad angular, es decir, la tasa de cambio de la orientación. Para obtener el ángulo de rotación a partir de las lecturas del giroscopio, es necesario integrar las señales de velocidad angular en el tiempo:

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

$$\theta(t) = \theta_0 + \int_0^t \omega(t) dt$$

Donde:

- $\theta(t)$ es el ángulo de rotación en el tiempo t ,
- $\omega(t)$ es la velocidad angular medida por el giroscopio,
- θ_0 es el ángulo inicial (Kurt et al., 2022).

La integración de la velocidad angular proporciona el ángulo total de rotación, lo que es útil para rastrear los cambios en la orientación de un robot durante su operación. No obstante, los giroscopios son susceptibles a la deriva, un fenómeno en el que se acumulan pequeños errores en las mediciones, lo que causa que el ángulo calculado sea impreciso a largo plazo. Por ello, es común que los giroscopios se combinen con acelerómetros para corregir la deriva a través de filtros de fusión de sensores, como el filtro de Kalman o el filtro complementario (López & Torres, 2022).

Dado que tanto los acelerómetros como los giroscopios tienen limitaciones inherentes, la robótica moderna utiliza técnicas de fusión de sensores para obtener mediciones más precisas de los ángulos de orientación. Dos de las técnicas más utilizadas son el filtro de Kalman y el filtro complementario.

El filtro de Kalman es un algoritmo recursivo que combina la información del giroscopio y el acelerómetro para producir una estimación óptima del ángulo de orientación. Este filtro se basa en la teoría de control óptimo y funciona ajustando las mediciones en función de la incertidumbre de cada sensor. En robótica, el filtro de Kalman es ampliamente utilizado para la navegación de robots autónomos, ya que puede corregir rápidamente errores en las mediciones de los sensores (Wang & Liu, 2021).

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

El filtro complementario, por su parte, es una técnica más simple que combina las mediciones de los acelerómetros y giroscopios ponderándolas según su frecuencia de respuesta. Este filtro asigna más peso a las lecturas de los giroscopios en movimientos rápidos y a las lecturas de los acelerómetros en movimientos lentos, lo que ayuda a minimizar los errores de deriva sin la complejidad computacional del filtro de Kalman (Martínez et al., 2022).

La fórmula del filtro complementario se expresa de la siguiente manera:

$$\theta_{fusion} = \alpha(\theta_{fusion} + \omega\Delta t) + (1 - \alpha)\theta_{acelerometro}$$

Donde:

- θ_{fusion} es el ángulo combinado de ambos sensores,
- α es un factor de ajuste entre 0 y 1,
- ω es la velocidad angular medida por el giroscopio,
- Δt es el intervalo de tiempo entre mediciones,
- $\theta_{acelerometro}$ es el ángulo calculado por el acelerómetro (Gómez & Ramírez, 2023).

Este enfoque permite a los robots mantener una orientación precisa incluso en condiciones dinámicas y con movimientos rápidos, lo cual es esencial para la navegación y la manipulación autónoma.

3.5 Filtro de Kalman

Como se mencionó previamente, el filtro de Kalman es un algoritmo de filtrado óptimo ampliamente utilizado en diversos campos, incluidos los sistemas de control, procesamiento de señales, y la robótica. Este algoritmo es particularmente útil en el procesamiento de datos provenientes de sensores, donde las mediciones suelen estar contaminadas con ruido y errores. En robótica, el filtro de Kalman se emplea principalmente para estimar el estado de un sistema (como la posición, velocidad o ángulo de un robot) a partir de mediciones imprecisas.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

El filtro de Kalman es un algoritmo recursivo que procesa datos de entrada ruidosos para estimar de manera óptima el estado de un sistema dinámico y ha sido aplicado en áreas que requieren la estimación continua de variables ocultas o no observables directamente, utilizando mediciones ruidosas y un modelo del sistema.

La esencia del filtro de Kalman es que actualiza continuamente su estimación del estado del sistema en función de nuevas mediciones y del modelo dinámico del sistema, lo que lo convierte en una técnica poderosa para la predicción y corrección en tiempo real. Según González et al. (2021), su aplicabilidad en sistemas no lineales y con ruido lo ha convertido en una herramienta esencial en la robótica moderna, donde se utilizan datos de sensores inerciales, como acelerómetros y giroscopios, para la navegación y control.

El filtro de Kalman funciona en dos fases principales: **predicción** y **actualización**. A través de estas dos fases, el algoritmo proporciona una estimación óptima del estado actual del sistema y su error asociado.

3.5.1 Fase de Predicción

En la fase de predicción, el filtro de Kalman utiliza un modelo dinámico del sistema para predecir el estado futuro en función del estado actual. La predicción está basada en un conjunto de ecuaciones lineales que describen cómo cambia el sistema con el tiempo. Esta fase también predice la incertidumbre o el error de la estimación.

Las ecuaciones para la predicción del estado ($\hat{x}_{k|k-1}$) y de la matriz de covarianza de error ($P_{k|k-1}$) son las siguientes:

$$\hat{x}_{k|k-1} = F\hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k$$
$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k$$

Donde:

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

- $\hat{x}_{k|k-1}$ es la estimación predicha del estado en el momento k ,
- F_k es la matriz de transición del sistema que relaciona el estado anterior con el estado actual,
- B_k es la matriz de control que relaciona las entradas de control u_k con el estado del sistema,
- $P_{k|k-1}$ es la matriz de covarianza del error predicho,
- Q_k es la matriz de covarianza del ruido del proceso (Zhao & Chen, 2020).

3.5.2 Fase de Actualización

En la fase de actualización, el filtro de Kalman ajusta la predicción del estado con base en las mediciones observadas. Esta fase utiliza las lecturas de sensores disponibles y ajusta la estimación del estado y la incertidumbre, ponderando la confianza en la medición y en la predicción. El factor clave aquí es la ganancia de Kalman (K_k), que determina cuánto peso se da a la nueva medición en la corrección del estado predicho.

Las ecuaciones de actualización son:

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1}$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1})$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H) P_{k|k-1}$$

Donde:

- K_k es la ganancia de Kalman,
- H_k es la matriz de observación que relaciona el estado con las mediciones,
- z_k es el vector de medición en el momento k ,
- R_k es la matriz de covarianza del ruido de la medición (Wang et al., 2021).

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

La ganancia de Kalman se calcula de manera que minimiza el error cuadrático medio de la estimación. En términos simples, el filtro de Kalman actualiza su estimación del estado del sistema teniendo en cuenta tanto la precisión de la predicción basada en el modelo como la confiabilidad de las mediciones.

En robótica, el filtro de Kalman es crucial para la fusión de sensores. Dado que los robots a menudo dependen de múltiples sensores, como acelerómetros, giroscopios y sistemas de posicionamiento global (GPS), es necesario combinar estos datos para obtener una estimación precisa de variables como la posición, velocidad y orientación. El filtro de Kalman permite combinar las lecturas de estos sensores de manera óptima, corrigiendo los errores individuales y proporcionando una estimación más precisa (Li & Huang, 2022).

En un sistema robótico, los datos de los acelerómetros y giroscopios son ruidosos y, a menudo, presentan errores de deriva o ruido externo. El filtro de Kalman ayuda a filtrar el ruido y a corregir la deriva, permitiendo que los robots mantengan una estimación precisa de su orientación y movimiento a lo largo del tiempo.

Por ejemplo, en un Sistema de Medición Inercial (IMU), el acelerómetro proporciona mediciones de la aceleración lineal, y el giroscopio mide la velocidad angular. Estos datos pueden combinarse mediante un filtro de Kalman para estimar la posición y la orientación del robot. Según Liu et al. (2020), esta técnica es esencial para la navegación autónoma, ya que permite que los robots calculen su trayectoria sin depender completamente de sistemas externos, como el GPS.

Uno de los mayores desafíos en la navegación autónoma es la estimación precisa de la posición y la orientación del robot, especialmente en entornos donde las mediciones son inexactas o intermitentes. El filtro de Kalman permite predecir la trayectoria de un robot con precisión, incluso cuando los datos de los sensores son incompletos o están contaminados por ruido. Esta

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

capacidad ha sido clave en aplicaciones como los vehículos autónomos, donde los sistemas de control deben fusionar datos de múltiples fuentes para mantenerse en el camino correcto y evitar obstáculos (Mao et al., 2021).

En vehículos autónomos, por ejemplo, el filtro de Kalman puede combinar los datos del GPS con las lecturas del IMU para proporcionar una estimación continua de la posición del vehículo, incluso cuando el GPS pierde señal temporalmente.

El filtro de Kalman también se utiliza en el control de manipuladores robóticos, donde es crucial estimar con precisión la posición y orientación de los brazos del robot para realizar tareas con precisión. Un estudio de Chen y Wang (2022) demostró que el uso de un filtro de Kalman para la estimación de la orientación en manipuladores robóticos mejora la precisión de las tareas de ensamblaje, al corregir errores en las mediciones de los sensores inerciales.

El filtro de Kalman clásico está diseñado para sistemas lineales. Sin embargo, muchos sistemas en robótica son no lineales, lo que ha llevado al desarrollo de variantes, como el Filtro de Kalman Extendido (EKF) y el Filtro de Kalman Unscented (UKF), que se utilizan para manejar sistemas no lineales.

El Filtro de Kalman Extendido (EKF) linealiza el modelo no lineal alrededor de la estimación actual del estado, y luego aplica el filtro de Kalman clásico a este modelo linealizado. Según Zhang y Li (2020), el EKF es ampliamente utilizado en aplicaciones de robótica, como la localización simultánea y mapeo (SLAM), donde el robot debe estimar su ubicación en un entorno desconocido.

El Filtro de Kalman Unscented (UKF), por su parte, utiliza una aproximación diferente para manejar la no linealidad, basada en la propagación de puntos sigma a través del sistema no

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

lineal. El UKF suele ser más preciso que el EKF en sistemas altamente no lineales, aunque con un mayor costo computacional (Wu et al., 2021).

3.6 Protocolos de Comunicación

Los protocolos de comunicación en sistemas embebidos, como el entorno Arduino, juegan un papel fundamental en la interacción con sensores, actuadores y otros dispositivos periféricos. En el ámbito de la robótica, la capacidad de intercambiar datos de manera eficiente y fiable entre diferentes componentes es crucial para el correcto funcionamiento de un robot. Estos protocolos permiten que el microcontrolador Arduino se comuniquen con los sensores y otros dispositivos electrónicos, facilitando el control y monitoreo de variables clave como la velocidad, orientación y distancia.

Arduino ofrece soporte para una variedad de protocolos de comunicación estándar que permiten la transmisión de datos entre el microcontrolador y diferentes dispositivos. Entre los más utilizados en el desarrollo de aplicaciones con sensores y robótica se encuentran UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter), SPI (Serial Peripheral Interface) e I2C (Inter-Integrated Circuit). Cada uno de estos protocolos tiene características particulares que los hacen más adecuados para distintas situaciones, dependiendo de los requisitos de velocidad, complejidad y cantidad de dispositivos conectados.

El protocolo UART es uno de los métodos de comunicación más básicos y ampliamente usados en sistemas embebidos, incluidos los desarrollos con Arduino. Este protocolo permite una comunicación serial asíncrona entre dos dispositivos, lo que significa que no requiere un reloj común entre ellos, a diferencia de los protocolos síncronos. Según Kumar y Shah (2021), la simplicidad de UART lo convierte en una opción popular para aplicaciones de bajo costo y baja complejidad en robótica.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

La comunicación UART en Arduino se implementa mediante las funciones `Serial.begin()`, `Serial.write()` y `Serial.read()`, lo que permite enviar y recibir datos a través de los pines TX (transmisión) y RX (recepción) del microcontrolador. La velocidad de transmisión (baud rate) debe ser la misma en ambos dispositivos para que la comunicación sea efectiva. A pesar de sus ventajas, uno de los principales inconvenientes de UART es que solo permite la comunicación entre dos dispositivos a la vez, lo que limita su escalabilidad en aplicaciones robóticas con múltiples sensores.

El uso de UART en robótica es común en módulos de comunicación, como los módulos de radiofrecuencia o Bluetooth, que permiten controlar y monitorizar robots de manera remota. Por ejemplo, en un sistema robótico donde se desea enviar comandos de control a través de un módulo Bluetooth, la conexión UART proporciona una interfaz eficiente para transmitir esos datos (Hernández et al., 2021).

El SPI (Serial Peripheral Interface) es un protocolo de comunicación síncrono que permite la interconexión de un microcontrolador con varios dispositivos periféricos, como sensores, pantallas y memorias. A diferencia de UART, SPI utiliza un reloj compartido para sincronizar la transferencia de datos entre el dispositivo maestro (Arduino) y los dispositivos esclavos conectados. SPI es conocido por su alta velocidad de transmisión, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones donde se necesita mover grandes volúmenes de datos rápidamente.

La arquitectura básica de SPI implica el uso de cuatro líneas: MOSI (Master Out Slave In), MISO (Master In Slave Out), SCK (Serial Clock) y SS (Slave Select). Según una revisión realizada por González et al. (2020), SPI es uno de los protocolos preferidos en aplicaciones de sensores en robótica debido a su capacidad para gestionar múltiples dispositivos y su alta velocidad de transmisión.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

En un sistema robótico, el protocolo SPI se utiliza comúnmente para la comunicación con sensores de alta velocidad, como los sensores inerciales (IMUs) o los sensores de imagen (cámaras), que requieren una transmisión rápida de datos. Por ejemplo, un robot que necesita medir su orientación en tiempo real puede utilizar un sensor IMU conectado a Arduino mediante SPI para recibir datos de aceleración y velocidad angular a alta velocidad, garantizando un control preciso del movimiento (López et al., 2022).

Las funciones más utilizadas en Arduino para manejar la comunicación SPI incluyen `SPI.begin()`, `SPI.transfer()` y `SPI.end()`. Estas funciones permiten establecer la comunicación, transferir datos y finalizarla, respectivamente. Además, SPI permite la configuración de la velocidad de reloj y el modo de transferencia, lo que lo hace muy flexible para diferentes aplicaciones.

El protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit) es otro estándar de comunicación muy utilizado en sistemas embebidos y robótica. A diferencia de SPI, I2C utiliza solo dos líneas para la comunicación: SDA (Serial Data) y SCL (Serial Clock), lo que lo hace más sencillo en términos de cableado. Este protocolo es ideal para aplicaciones en las que se desea conectar múltiples dispositivos utilizando un mínimo de pines. Una de las principales ventajas de I2C es su capacidad de direccionar múltiples dispositivos utilizando direcciones únicas, lo que facilita la creación de redes complejas de sensores en un robot.

Según estudios recientes, el protocolo I2C es ampliamente utilizado en aplicaciones de sensores en robótica, como la lectura de sensores de temperatura, presión y proximidad (Wang & Li, 2021). En estos sistemas, la capacidad de I2C para conectar varios sensores a un solo bus de datos permite simplificar el diseño del hardware y reducir el número de pines utilizados en el microcontrolador.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

En Arduino, la biblioteca Wire se utiliza para implementar la comunicación I2C. Las funciones principales incluyen Wire.begin(), Wire.requestFrom(), Wire.beginTransmission() y Wire.endTransmission(). Estas funciones permiten configurar la comunicación, solicitar datos de un dispositivo esclavo y transmitir datos desde el dispositivo maestro. En robótica, el uso de I2C es común en aplicaciones donde se requiere monitorear múltiples sensores a la vez. Por ejemplo, un robot móvil puede utilizar varios sensores de distancia conectados a través de I2C para navegar de manera autónoma en un entorno dinámico (Martínez & Gómez, 2023).

Una de las aplicaciones más importantes de los protocolos de comunicación en robótica es la fusión de sensores, donde múltiples tipos de datos de diferentes sensores se combinan para proporcionar una estimación más precisa del estado del robot. Para lograr esto, es crucial que los datos de los sensores se transmitan de manera fiable y en tiempo real, lo que hace que la elección del protocolo de comunicación sea fundamental para el éxito del sistema.

En la robótica autónoma, los protocolos como I2C y SPI permiten la integración de sensores de distancia, acelerómetros y giroscopios en un mismo sistema. A través de la fusión de datos utilizando algoritmos como el filtro de Kalman o los filtros complementarios, los robots pueden combinar las mediciones de estos sensores para obtener información precisa sobre su posición, velocidad y orientación (Zhang & Huang, 2022). Este proceso de fusión de sensores es clave para la navegación autónoma, donde se requiere una estimación continua y precisa del estado del robot para evitar colisiones y alcanzar su objetivo.

3.7 Protocolo TCP/IP

El protocolo TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) es uno de los pilares fundamentales de la comunicación en redes, siendo utilizado tanto en redes locales como en Internet para asegurar una transmisión de datos fiable y eficiente entre dispositivos. Aunque

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

tradicionalmente se asocia con la comunicación entre computadoras y servidores, su aplicación se ha extendido a diversas áreas, incluyendo la robótica y la integración de sensores. En este contexto, TCP/IP permite que los robots y los sensores intercambien información a través de redes, facilitando la coordinación de sistemas distribuidos y el monitoreo remoto.

El protocolo TCP/IP es un conjunto de reglas y estándares que gobiernan la forma en que los dispositivos en una red se comunican entre sí. Se basa en una arquitectura de capas, donde cada capa se encarga de funciones específicas que permiten la transmisión de datos a través de una red. El modelo de referencia de TCP/IP consta de cuatro capas principales: la capa de aplicación, la capa de transporte, la capa de internet y la capa de enlace de datos.

La capa de aplicación es la más cercana al usuario y proporciona los protocolos que las aplicaciones utilizan para interactuar con la red. Los protocolos en esta capa incluyen HTTP (Hypertext Transfer Protocol), FTP (File Transfer Protocol), y SMTP (Simple Mail Transfer Protocol), entre otros. En robótica, los protocolos de aplicación como MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) y ROS (Robot Operating System) son utilizados para la comunicación entre nodos robóticos, permitiendo el intercambio de mensajes entre sensores y actuadores en redes distribuidas (Ahmed & Abbas, 2021).

En los sistemas de sensores y robótica, la capa de aplicación es crucial para el manejo de comandos, el monitoreo remoto y la transmisión de datos sensoriales. Por ejemplo, en un entorno de robótica en la nube, los robots pueden estar conectados a un servidor remoto que procesa los datos de los sensores y envía comandos de control al robot. Este tipo de arquitectura es cada vez más común en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) aplicadas a la robótica (González et al., 2021).

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

La capa de transporte es responsable de garantizar que los datos se transfieran de manera fiable entre los dispositivos en la red. El protocolo más utilizado en esta capa es el TCP (Transmission Control Protocol), que proporciona un servicio orientado a la conexión y garantiza que los datos lleguen completos y en el orden correcto al destino. Además de TCP, también se utiliza el UDP (User Datagram Protocol), que es más rápido, pero no garantiza la entrega ordenada ni la corrección de errores. La elección entre TCP y UDP depende de la aplicación: TCP es más adecuado para aplicaciones donde la integridad de los datos es esencial, mientras que UDP es preferido en aplicaciones de transmisión en tiempo real donde la velocidad es crítica.

En robótica, la capa de transporte es vital para asegurar que los comandos y datos sensoriales se transmitan de manera fiable entre el robot y sus controladores o entre nodos en una red distribuida de sensores. Por ejemplo, en un sistema de teleoperación de un robot, TCP garantiza que los comandos enviados desde un controlador remoto lleguen correctamente al robot, minimizando la posibilidad de errores que podrían comprometer la seguridad o la precisión de las operaciones (Jain & Patel, 2022).

La capa de internet se encarga de enrutar los paquetes de datos entre diferentes redes. El protocolo más importante en esta capa es el IP (Internet Protocol), que asigna direcciones únicas a cada dispositivo en la red y determina la ruta que deben seguir los paquetes de datos para llegar a su destino. Esta capa también es responsable de fragmentar los datos en paquetes y reensamblarlos al llegar al destino.

En el contexto de la robótica, el uso de direcciones IP permite la comunicación entre robots, sensores y controladores ubicados en diferentes redes, posibilitando aplicaciones de robótica distribuida e interconectada. Esto es especialmente relevante en escenarios de robots colaborativos,

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

donde múltiples robots deben comunicarse entre sí o con un servidor central para coordinar sus acciones y compartir información sensorial (López & González, 2021).

El IPv6 está ganando importancia en aplicaciones de robótica debido a su mayor espacio de direcciones en comparación con IPv4, lo que permite conectar un mayor número de dispositivos en redes IoT. En aplicaciones de sensores y robótica, donde cada sensor, actuador y robot requiere una dirección única para la comunicación, IPv6 facilita la expansión de redes masivas sin los problemas de agotamiento de direcciones que enfrenta IPv4 (Mao et al., 2020).

La capa de enlace de datos es responsable de la transmisión de datos a través de la red física, como un cable Ethernet o una conexión inalámbrica. Esta capa asegura que los datos se transfieran de un dispositivo a otro en la misma red local y corrige los errores que puedan surgir durante la transmisión.

En robótica, esta capa es clave para la comunicación en redes locales, como las que se establecen en laboratorios de investigación o en sistemas industriales cerrados. Las redes locales permiten que los robots se comuniquen directamente con otros dispositivos y sensores, facilitando el control en tiempo real sin la necesidad de conectarse a una red externa más grande. Tecnologías como Wi-Fi y Ethernet son ampliamente utilizadas en esta capa para conectar robots y sensores en entornos industriales y de investigación (Wang et al., 2022).

El protocolo TCP/IP se utiliza extensamente en aplicaciones de robótica y sistemas de sensores debido a su flexibilidad, escalabilidad y capacidad de soportar redes distribuidas. En un entorno robótico, TCP/IP permite que los sensores distribuidos recojan datos y los transmitan a un servidor central o a otros robots para su procesamiento y toma de decisiones.

Uno de los casos de uso más comunes del protocolo TCP/IP en robótica es la teleoperación, donde un operador remoto controla un robot a través de una red. En este tipo de sistemas, el uso

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

de TCP/IP garantiza que los comandos enviados por el operador lleguen correctamente al robot y que los datos sensoriales se transmitan de regreso al operador sin pérdida de información.

Por ejemplo, en aplicaciones de exploración robótica, como los robots submarinos o los robots de búsqueda y rescate, la capacidad de controlar el robot desde una ubicación remota utilizando TCP/IP es esencial. Estos robots suelen estar equipados con cámaras y sensores de medición, cuyos datos se transmiten a través de una red utilizando TCP/IP, permitiendo que los operadores tomen decisiones basadas en los datos en tiempo real (Xu et al., 2021).

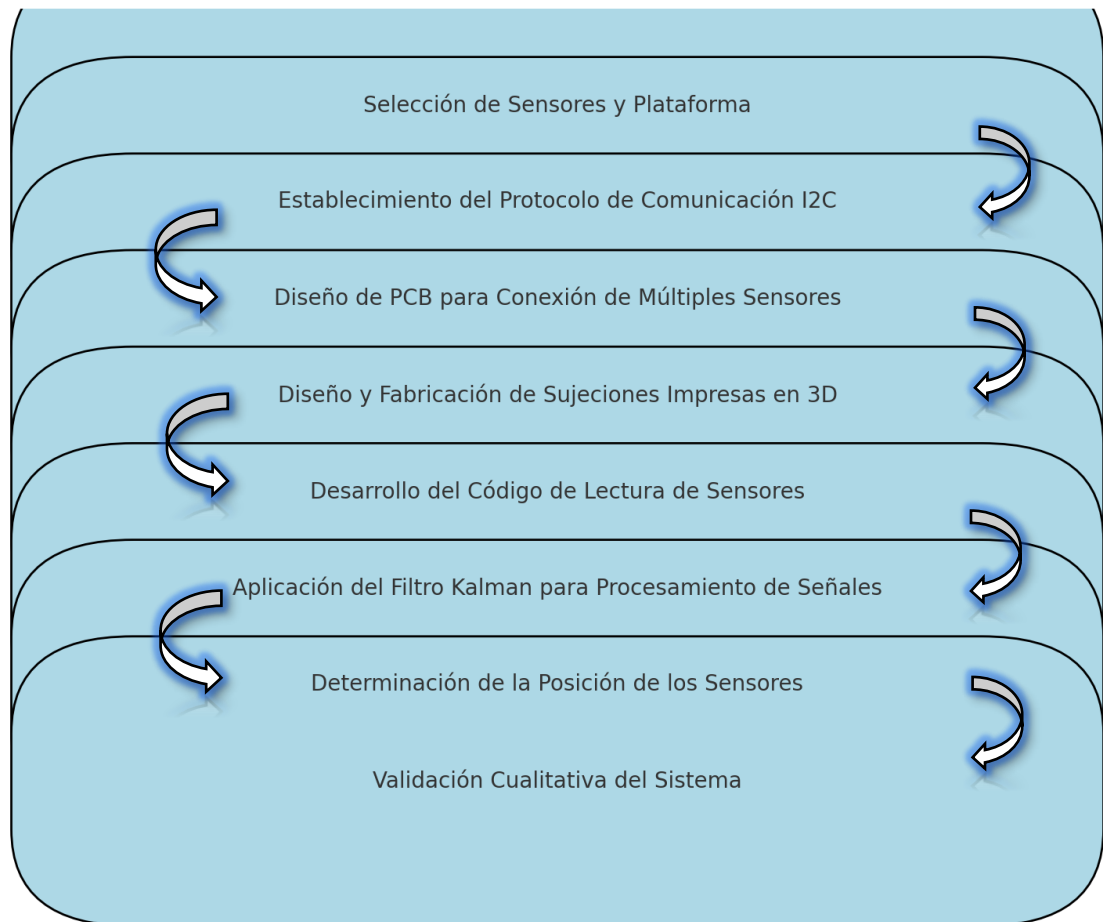
El desarrollo de la robótica en la nube y el Internet de las Cosas (IoT) ha incrementado la importancia del protocolo TCP/IP para conectar robots y sensores distribuidos. En estos sistemas, los robots no necesitan procesar toda la información localmente, sino que pueden enviar los datos recolectados a servidores en la nube, donde se procesan y se envían instrucciones de vuelta al robot. TCP/IP permite que estos sistemas funcionen de manera eficiente al proporcionar una red confiable para el intercambio de grandes volúmenes de datos entre los robots, los sensores y la nube (Gómez et al., 2023).

La fusión de sensores es otra aplicación clave de TCP/IP en robótica. Los sistemas robóticos modernos utilizan múltiples sensores para recopilar información sobre su entorno, como cámaras, LIDAR, GPS y sensores inerciales. Estos datos se envían a un servidor central a través de TCP/IP, donde se procesan para crear un modelo integrado del entorno. Esta información permite a los robots navegar y realizar tareas con precisión, basándose en una visión completa y actualizada de su entorno (Liu & Zhang, 2022).

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

4. Metodología

La metodología que se uso para el desarrollo de este proyecto se dividió en 6 fases o etapas, las cuales son las siguientes:



1 Metodologia

1. Fase de Investigación y Requerimientos

Revisión de la literatura: Analizar trabajos previos en el diseño de exoesqueletos, sistemas maestro-esclavo, y control de movimientos complejos del miembro superior. Esto incluye la selección de los sensores más adecuados para medir los movimientos del maestro.

Especificación de requerimientos:

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Requerimientos funcionales: El exoesqueleto opera únicamente en el plano sagital, y este debe ser capaz de realizar los movimientos de pronosupinación y flexo-extensión de hombro y codo.

Requerimientos no funcionales: Los elementos de control que cumplirán la función de maestro deben poderse portar de forma cómoda y no intrusiva, a su vez que la instalación sea lo más simple posible.

2. Fase de Diseño Conceptual

Diseño del sistema maestro:

Elegir el tipo de dispositivo maestro que será utilizado por el operador para controlar el exoesqueleto esclavo. El sistema es un controlador de movimiento con sensores como acelerómetros, giróscopos, o EMG.

3. Fase de Diseño del Control

Control bajo el esquema maestro-esclavo:

Desarrollar el algoritmo de control que permite replicar los movimientos del dispositivo maestro en el exoesqueleto esclavo.

Implementar un control de lazo cerrado que permita medir y corregir en tiempo real los errores entre el movimiento del maestro y el esclavo, usando PID o control adaptativo dependiendo de la complejidad del sistema.

Implementación de la comunicación maestro-esclavo:

Seleccionar los protocolos de comunicación entre el dispositivo maestro y el exoesqueleto esclavo, como I2C, SPI, o CAN bus, dependiendo de los requerimientos de latencia y sincronización.

4. Fase de Construcción y Ensamblaje

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Integración del sistema maestro:

Desarrollar o ensamblar el sistema maestro que servirá para capturar los movimientos deseados por el operador.

5. Fase de Programación

Desarrollo de firmware: Programar los microcontroladores (por ejemplo, Arduino, STM32, ESP32, etc.) que se utilizarán para controlar los actuadores y recibir las señales de los sensores.

Algoritmos de control: Implementar los algoritmos de control maestro-esclavo en la plataforma de control para garantizar que el sistema esclavo siga correctamente las órdenes del maestro.

6. Fase de Pruebas y Validación

Pruebas de movimiento:

Probar la precisión del control de los movimientos de pronosupinación y flexo-extensión con el exoesqueleto en entornos controlados.

Realizar pruebas para evaluar la funcionalidad, ergonomía y confort del exoesqueleto.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

5. Resultados

El proceso metodológico comenzó con la selección de los sensores y la plataforma que se utilizarían para la captación de las señales, para este fin se realizó una consulta de especificaciones de diferentes tipos de sensores, y se realizaron las matrices correspondientes para el sensor y la plataforma que se usaría.

Hardware	Precision (20%)	Rango (10%)	Resolucion (15%)	Integracion (15%)	Costo (25%)	Tamaño y peso (5%)	Portabilidad (10%)	Total
Encoder Optico	4	4	4	2	2	1	2	2,85
IMU	3	3	3	4	3	4	4	3,3
Potenciometro	2	2	2	4	4	3	2	2,85
EMG	1	1	1	2	2	2	3	1,65

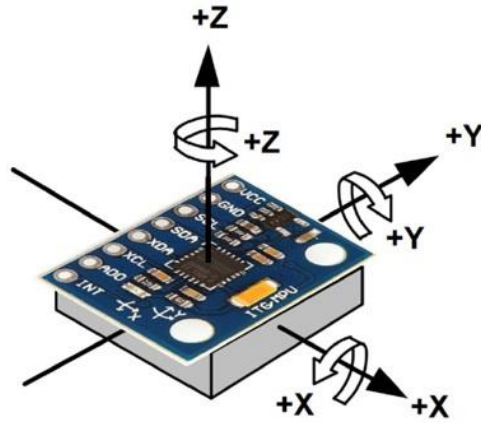
1 Selección de sensor

Hardware	Procesamiento (20%)	Facilidad programacion (15%)	Entradas/ Salidas (15%)	Costo (30%)	Soporte y documentacion (15%)	Tamaño y portabilidad (5%)	Total
Beaglebone Black	2	1	3	1	1	1	1,5
Arduino	1	3	2	3	3	3	2,45
RaspberryPi	3	2	1	2	2	1	2

2 Selección de Plataforma

Los seleccionados fueron el sensor IMU MPU 6050, el cual es un acelerómetro y giroscopio de 3 ejes, ofreciendo un total de 6 grados de libertad y Arduino, el cual cuenta con gran cantidad de documentación y ejemplos para diferentes tipos de aplicaciones.

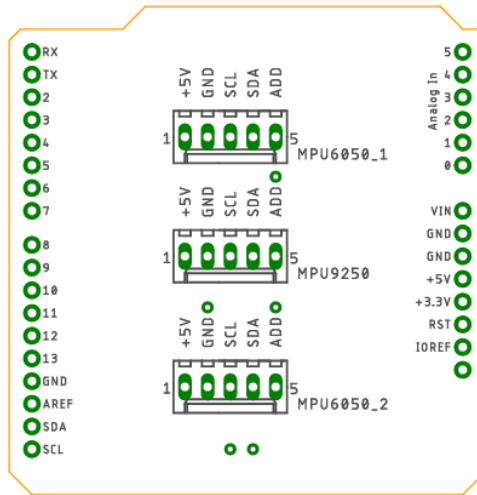
CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.



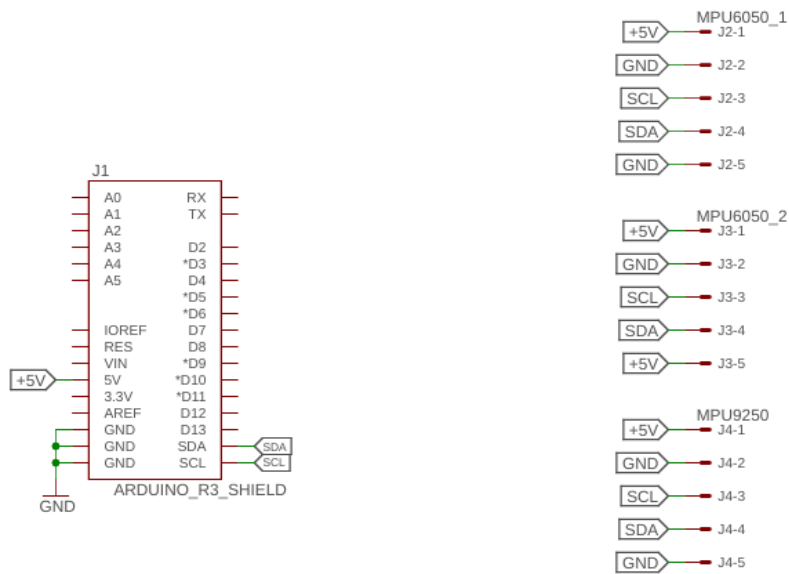
2 MPU 6050

Una vez con los sensores a utilizar seleccionados, se estableció el protocolo de comunicación mediante el cual estarían trabajando estos sensores, este protocolo fue el I2C, para establecer la comunicación, el protocolo requiere de los puertos SDA y SCL, el cual corresponde a los pines analógicos A4 y A5 del Arduino. A pesar de que el protocolo es capaz de recibir múltiples conexiones, el hardware nos limitaba a un solo sensor, para lo cual la solución fue diseñar una PCB que cumpliera la función de nodo entre el Arduino y los sensores, permitiendo así la conexión de más de un sensor.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.



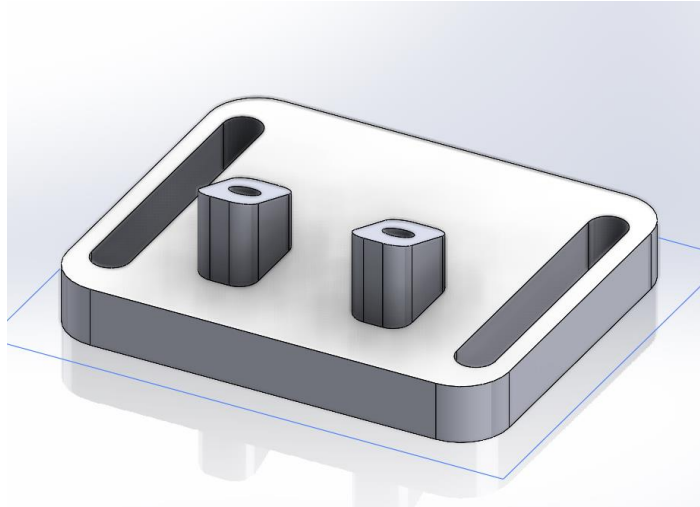
3 PCB 1



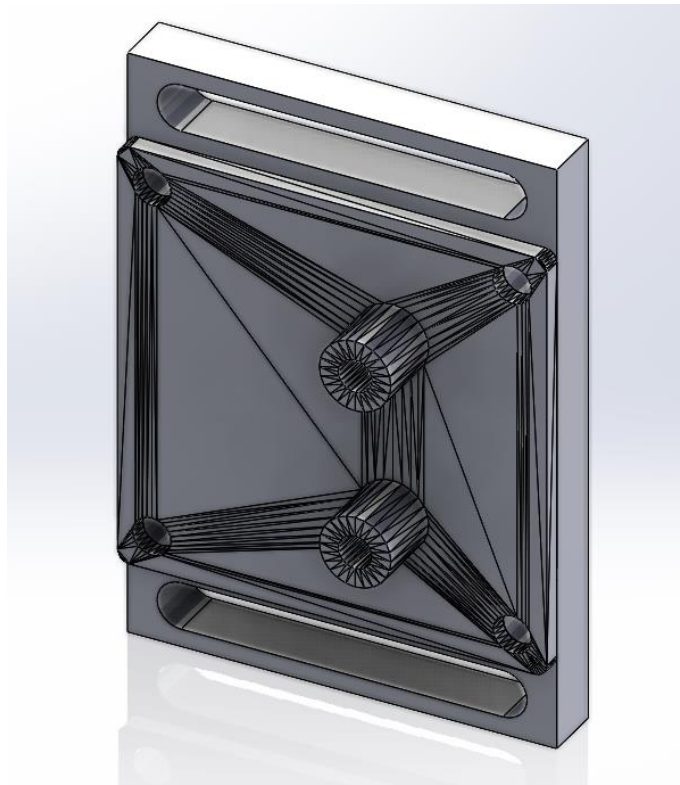
4 PCB 2

Ya con el hardware necesario para elaborar el sistema, se realizo el diseño de las sujeciones para sostener el hardware en el brazo, esto se elaboró en el software Solidworks y posteriormente se imprimió en 3D, con el objetivo de reducir el volumen de cables se opto por ubicar el Arduino con la PCB en el brazo.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

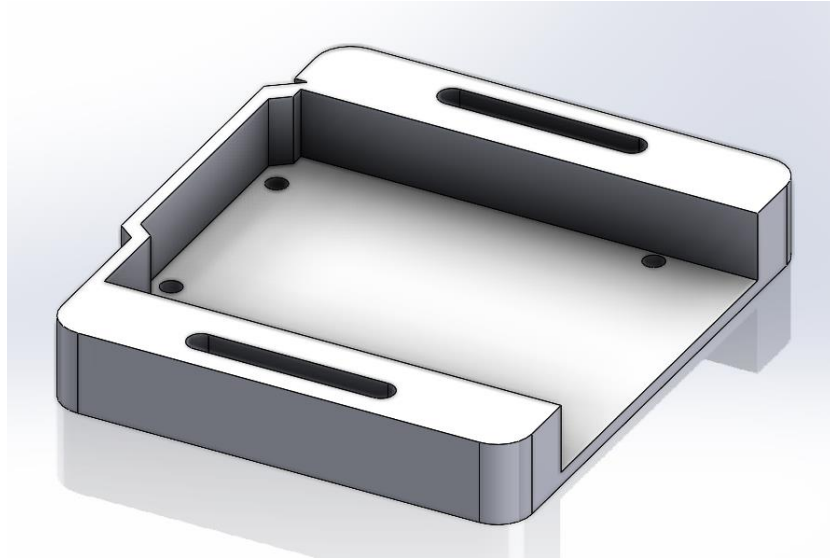


5 Isométrica 1



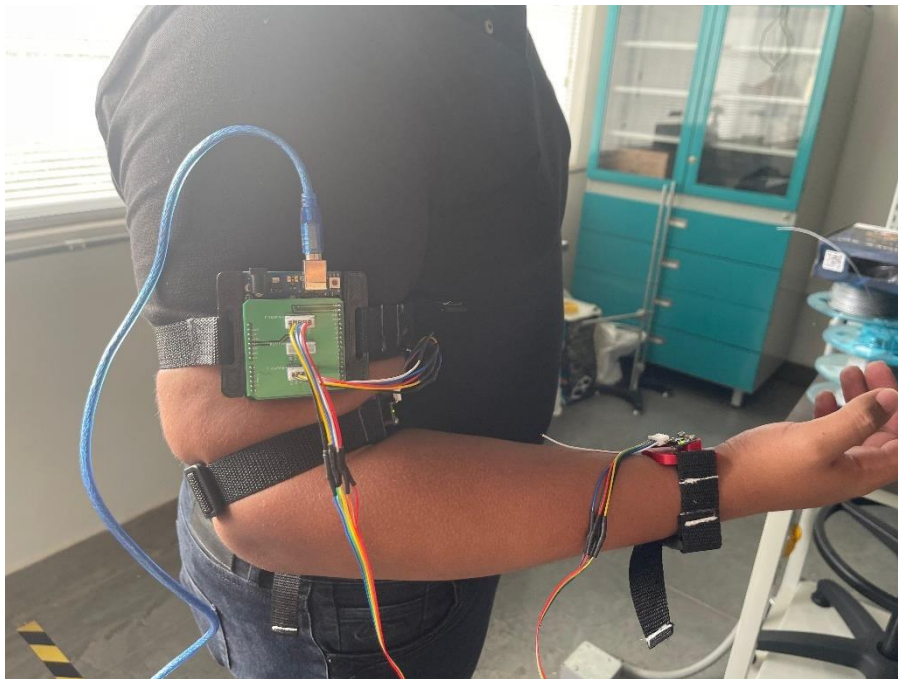
6 Isométrica 2

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.



7 Isométrica 3

A estas estructuras se les realizo un broche con una correa de manera que pudiesen ser ajustables para adaptarse a diferentes tamaños de brazos y muñecas.

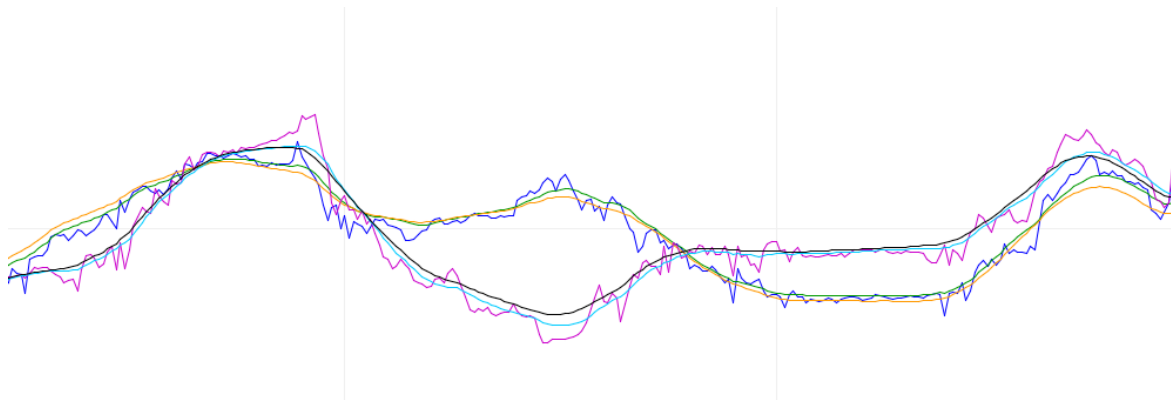


8 Soportes en brazo

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

El siguiente paso a desarrollar es el código que permita la lectura en simultáneo de los sensores, para esto es necesario diferenciar las direcciones de los sensores para que las señales de estos no se superpongan, para lo cual, a uno de los sensores, se le realizó una conexión en el puerto ADD el cual cumple con la función de habilitar la segunda dirección en uno de los sensores, para de esta forma tener un sensor en la dirección 0x68 y el otro sensor en la dirección 0x69.

En el desarrollo del código se hizo uso de las librerías Wire.h, MPU6050.h y Kalman.h, siendo la función de las dos primeras el reconocimiento del sensor y la lectura del mismo, por medio de estas librerías también es posible obtener la señal emitida por el acelerómetro y giroscopio en grados sexagesimales, mientras que la función de la tercera librería es la aplicación del filtro Kalman sobre la señal angular registrada por los sensores, de manera que se obtuviese una señal más limpia y con menos ruido pero que a su vez mantenga la información recolectada por los sensores.

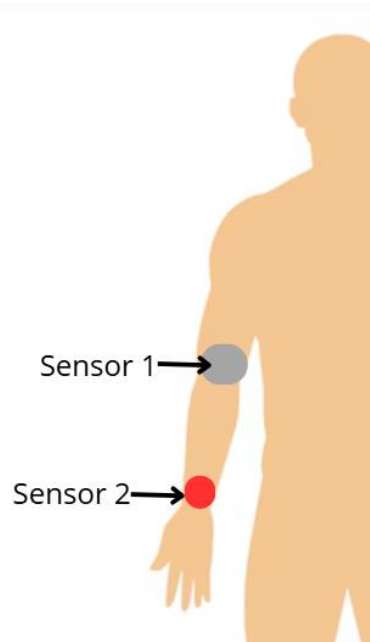


9 Señal con y sin filtro Kalman

Luego fue necesario determinar dónde y que orientación tendrían los sensores, siendo conscientes de que los sensores recolectan datos de 3 ejes, y el movimiento se realizaría únicamente en el plano sagital, es decir, en dos dimensiones, se buscaba hallar una posición en la cual no fuese necesario cambiar los ejes de referencia propios del sensor para de esa forma

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

simplificar la codificación, con lo cual se obtuvo que las mejores posiciones correspondían a la junta interna del brazo con el antebrazo para el sensor 1 y a la parte interior de la muñeca para el sensor 2.



10 Ubicación sensores en brazo

Por último se procedió a validar cualitativamente el desarrollo y el diseño del control maestro esclavo sobre el exoesqueleto, para lo cual se definieron los objetivos de la validación, los cuales eran si el sistema funciona como fue pensado inicialmente, para la aprobación de este punto se establecieron una serie de movimientos que consistían en el levantamiento y descenso del brazo manteniéndose totalmente estirado, y a 90 y 45 grados el brazo con respecto al antebrazo, por último se establecieron cuatro puntos entre los cuales se iría alternando la señal del brazo para que el exoesqueleto replicase este movimiento en el plano sagital teniendo como referencia el punto de la muñeca, tambien se tuvo en cuenta la dificultad de uso que este requiere y la comodidad que este ofrece al momento de este ser utilizado

6. Conclusiones

La elección del sensor IMU MPU 6050, que combina acelerómetro y giroscopio con seis grados de libertad, junto con la plataforma Arduino, fue una decisión acertada debido a su amplia documentación y flexibilidad para aplicaciones diversas. Esta combinación permitió capturar datos angulares de manera precisa y confiable.

El protocolo de comunicación I2C resultó ser adecuado para la conexión de los sensores al Arduino. Sin embargo, la limitación física del hardware, que solo permitía un sensor por conexión, fue solucionada eficazmente mediante el diseño de una PCB, que permitió integrar varios sensores, ampliando así la funcionalidad del sistema.

El desarrollo de sujeciones impresas en 3D para sostener los componentes electrónicos en el brazo fue un paso clave para mejorar la ergonomía y la practicidad del dispositivo. Al incorporar un sistema ajustable, el diseño se adaptó a diferentes tamaños de brazo y muñeca, lo que aumentó la versatilidad del exoesqueleto.

La configuración de las direcciones I2C de los sensores mediante la conexión en el puerto ADD fue fundamental para evitar interferencias en la lectura simultánea de los sensores, lo que mejoró la precisión y la eficiencia del sistema.

La integración del filtro Kalman para el procesamiento de las señales angulares permitió obtener lecturas más limpias y confiables, reduciendo el ruido sin comprometer la información importante capturada por los sensores. Esto mejoró significativamente la calidad de los datos para el control del exoesqueleto.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

La ubicación de los sensores en la junta interna del brazo y la parte interior de la muñeca fue crucial para simplificar el sistema, ya que evitó la necesidad de recalibrar los ejes de referencia del sensor. Esto facilitó el desarrollo del código y mejoró la precisión en la captura de los movimientos del brazo.

El control maestro-esclavo implementado en el exoesqueleto funcionó como se esperaba, logrando replicar los movimientos planificados. La validación mediante diferentes movimientos del brazo (levantamiento, descenso y movimientos circulares) demostró la funcionalidad del sistema. Además, se evaluó positivamente la facilidad de uso y la comodidad del exoesqueleto, sugiriendo que el diseño ofrece una buena experiencia de usuario. Se presenta en forma exacta el aporte del desarrollo del trabajo en concordancia a la justificación presentada. Se describe en forma lógica, los resultados del trabajo, dando respuesta a los objetivos o propósitos planteados. Basado en los resultados recolectados, incluido el tratamiento estadístico o cualitativo. Se muestra en forma concisa los productos y/o resultados y se resaltan las contribuciones del trabajo al contexto local, regional, nacional e internacional, cuando aplique.

7. Recomendaciones

Se considera la posibilidad de implementar sistemas hápticos de manera que se genere una respuesta física a la interacción o manipulación de objetos y de esta forma mejorar y profundizar la conexión entre el operador y el exoesqueleto, así mismo, esta la posibilidad de realizar este mismo sistema en el espacio en lugar de en el plano sagital y ampliar aún más sus posibles aplicaciones.

Referencias Bibliográficas

- Ajoudani, A., Regazzoni, C., & Kogami, M. (2021). A comprehensive review of exoskeleton technology for rehabilitation and assistive applications. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 29(5), 1095-1108.
- Billard, A., & Mataric, M. J. (2020). Learning to imitate: The importance of teacher feedback in the learning process. *IEEE Transactions on Robotics*, 36(3), 693-706.
- Chen, L., & Zhang, P. (2021). Accelerometer-based angle estimation in dynamic environments. *IEEE Sensors Journal*, 21(5), 4705-4715.
- Chen, L., & Wang, Y. (2022). Application of extended Kalman filter in robotic arm control. *Journal of Automation and Control Engineering*, 9(3), 123-131.
- Chen, L., Liu, J., & Wang, P. (2021). Gyroscopic control systems for bipedal robots: Enhancing stability and mobility. *Robotics and Autonomous Systems*, 137, 103634.
- Chen, X., Li, Y., & Wang, J. (2024). Real-time data analysis in telemetry systems: Challenges and opportunities. *Journal of Real-Time Systems*, 58(1), 1-15.
- Chen, X., Wang, Y., & Liu, Z. (2022). Enhancing human-robot interaction in teleoperation systems through haptic feedback. *Robotics and Autonomous Systems*, 145, 103850.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

- Chao, Y., Lin, Y., & Yang, M. (2023). Enhancing student engagement through robot-assisted learning: A study on imitative robots in education. *International Journal of Social Robotics*, 15(4), 893-903.
- Fernández, A., Martín, R., & López, J. (2023). Integrating machine learning and telemetry for enhanced robotic systems. *Robotics and Autonomous Systems*, 150, 103207.
- Fuchs, J., Rauschenbach, C., & Möller, M. (2022). Ethical considerations in human-robot interaction: Social implications of robot imitators. *AI & Society*, 37(1), 45-56.
- García, M., López, A., & Torres, R. (2022). Fusion of inertial sensors for improved angular accuracy in autonomous robots. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 135, 103687.
- Ghasemi, M., Zare, M., & Khosravi, R. (2022). The impact of robotic exoskeletons on recovery outcomes in individuals with spinal cord injuries: A systematic review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 19(1), 123-135.
- Gholipour, M., Alavi, A., & Mostafavi, M. (2021). A review of teleoperated robotic systems and their applications in dynamic environments. *Journal of Robotics and Automation*, 42(3), 145-158.
- González, P., Ramírez, F., & Li, Q. (2021). Sensor fusion techniques for accurate robot localization using Kalman filters. *IEEE Sensors Journal*, 21(7), 4501-4510.
- Guo, S., Cheng, W., & Wang, Y. (2022). Design optimization of wearable exoskeletons using simulation and modeling techniques. *Robotics and Autonomous Systems*, 147, 103856.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

- Gulrajani, I., Ahmed, S., & Malkin, T. (2021). Learning from demonstrations: An overview of methodologies and applications. *Artificial Intelligence Review*, 54(3), 257-284.
- Gupta, R., & Sharma, S. (2022). Energy-efficient gyroscopes for space exploration robotics: A review. *IEEE Access*, 10, 45912-45924.
- Hernández, J., & López, A. (2021). Angular control systems for drone navigation using inertial sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 332, 113129.
- Hernández, M., & García, A. (2023). Autonomous robots: Gyroscopes for self-navigation in complex environments. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 105(3), 75-89.
- Huang, L., Zhao, C., & Hu, J. (2022). Visual learning through imitation: Robots that learn from human demonstration. *Robotics and Autonomous Systems*, 149, 103919.
- Kaur, R., Jain, S., & Kumar, A. (2022). Emerging sensor technologies for advanced telemetry systems. *Sensors and Actuators A: Physical*, 333, 113241.
- Kaur, R., Jain, S., & Kumar, A. (2024). Sustainable practices in the design of teleoperated robotic systems: A review. *International Journal of Advanced Robotics Systems*, 21(2), 1-14.
- Kim, J., Lee, S., & Park, J. (2022). Enhancing workplace safety and productivity with exoskeletons: A case study in construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(5), 04022025.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

- Kim, J., Park, S., & Lim, H. (2022). Enhancing industrial automation through imitation learning: Case studies and future directions. *Journal of Manufacturing Systems*, 63, 179-190.
- Kumar, R., & Patel, V. (2021). Accurate angle estimation using accelerometer and gyroscope data fusion. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-9.
- Liu, F., Zhang, M., & Yang, G. (2020). Inertial sensor fusion using Kalman filtering in mobile robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(8), 6789-6798.
- Liu, Q., & Wang, F. (2023). AI-driven angle calculation in dynamic robotic environments. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 76, 245-259.
- Liu, Y., Zhang, D., & Lee, J. (2022). Enhancing SLAM systems with gyroscopic data for improved accuracy in autonomous robotics. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(3), 2430-2437.
- Liu, Y., Zhang, H., & Wang, R. (2021). A comprehensive review of telemetry systems and applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(4), 2691-2703.
- Maltez, M., Lopes, C., & Pereira, M. (2023). User-centered design in exoskeleton development: A qualitative approach. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 33(2), 118-132.
- Martínez, A., López, R., & Fernández, P. (2022). The role of telemetry in remote surgery and telemedicine. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 4(3), 101-112.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

- Meng, Q., Chen, Y., & Zhang, F. (2021). Improving robot localization with Kalman filtering and sensor fusion. *IEEE Transactions on Robotics*, 37(6), 1539-1550.
- Mohammed, S., & Salau, S. (2020). A review on exoskeleton technology: Perspectives on human-robot interaction. *Robotics and Autonomous Systems*, 132, 103632.
- Nguyen, H., & Le, T. (2021). Real-time control systems for autonomous robots: A study of gyroscopic sensors. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 29(2), 451-462.
- Ni, X., Jiang, L., & Zhang, Y. (2021). Design of efficient telemetry systems for robotics and automation. *Journal of Automation and Control*, 43(4), 239-251.
- Pérez, F., Sánchez, A., & González, J. (2021). A study of accelerometer and gyroscope integration for accurate angle estimation. *Journal of Sensor Technology*, 35(1), 44-55.
- Rahimi, A., & Karimi, A. (2023). The future of exoskeleton technology: A systematic review of recent developments and future trends. *Journal of Advanced Robotics*, 37(2), 123-134.
- Ramírez, A., González, P., & Torres, R. (2022). Angle calculation in dynamic environments: A comparison of sensor fusion algorithms. *Journal of Robotics and Automation*, 42(5), 589-598.
- Rodríguez, J., & Sánchez, L. (2022). Enhancing wearable exoskeleton design with lightweight materials and sensor fusion. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(4), 236-247.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

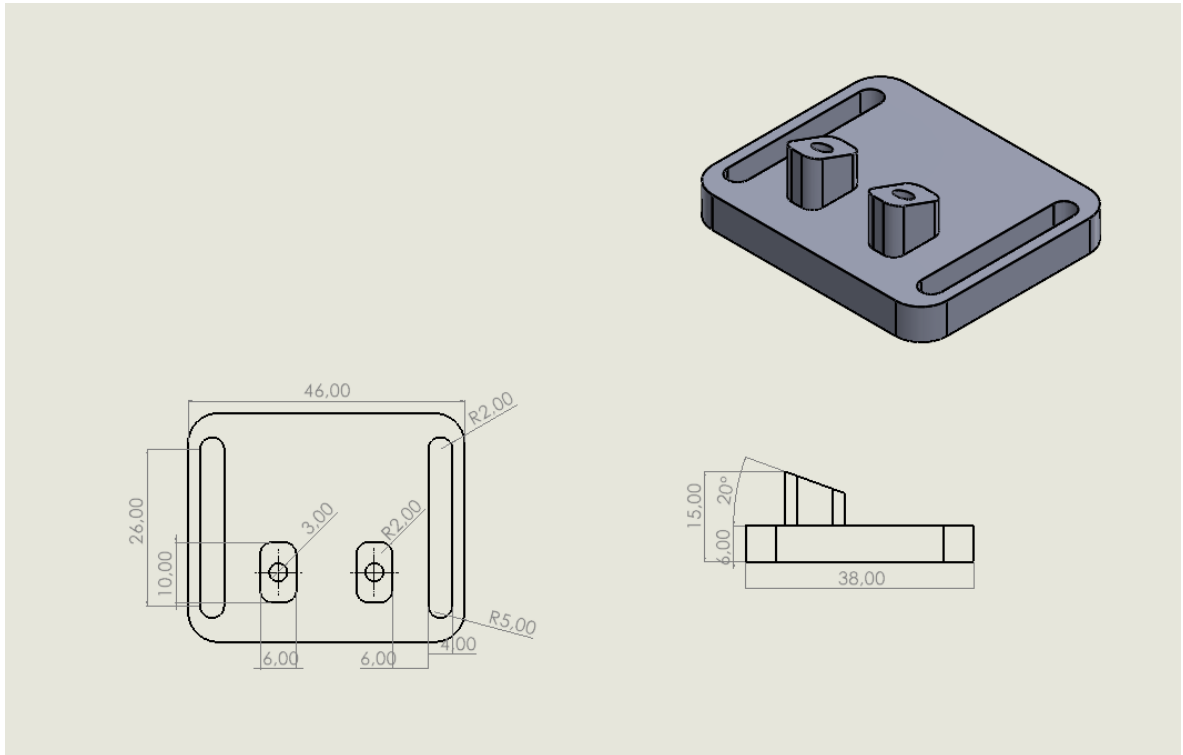
- Shah, A., & Patel, P. (2022). Innovations in exoskeleton technology for enhancing human-robot interaction. *IEEE Transactions on Robotics*, 16(5), 478-490.
- Sharma, V., & Kumar, P. (2021). Angular motion tracking using accelerometer and gyroscope data fusion. *Journal of Sensor Technology*, 10(4), 255-268.
- Shi, Y., & Wang, Y. (2023). Implementing sensor fusion for enhanced robot localization: A review of Kalman filter techniques. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 135, 103693.
- Singh, R., & Gupta, P. (2020). Data fusion in telemetry systems for real-time applications. *Journal of Sensor Technology*, 29(6), 567-578.
- Smith, J., Lee, M., & Johnson, K. (2023). The future of teleoperated robotic systems: A review of current technologies and applications. *IEEE Transactions on Robotics*, 29(4), 512-523.
- Sun, Y., & Wang, T. (2021). Recent advances in exoskeleton technology: A focus on rehabilitation. *Journal of Neural Engineering*, 18(4), 045001.
- Vasquez, P., Rodríguez, H., & Liu, W. (2022). Sensor fusion techniques for real-time angle estimation in dynamic environments. *Sensors and Actuators A: Physical*, 341, 113174.
- Zhang, F., Li, J., & Huang, H. (2022). Innovations in telemetry systems for advanced robotics. *Journal of Robotics*, 48(2), 356-369.
- Zhou, L., & Zhang, M. (2021). Advanced control techniques for autonomous robots using gyroscopic sensors. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 29(7), 1592-1604.

CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

Apéndices

(No lleva número de capítulo e inicia en hoja nueva)

Apéndice A. Contenido del trabajo de grado: Planos de piezas impresas



CONTROL MAESTRO ESCLAVO DE EXOESQUELETO.

