



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE
CONTROL ELECTRÓNICO MEDIANTE GESTOS PARA LA
MOVILIDAD DE UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA DIRIGIDO A
PERSONAS CON DISCAPACIDAD FÍSICO-MOTORA”**

Trabajo de Titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Electrónica

AUTORES: IDROVO MADERO RUBÉN SEBASTIÁN
MACÍAS MOLINA SÓCRATES JOSÉ

TUTOR: ING. LUIS CÓRDOVA RIVADENEIRA, MSc.

Guayaquil – Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Rubén Sebastián Idrovo Madero**, con documento de identificación N° 092506529-4 y **Sócrates José Macias Molina** con documento de identificación N° 095062554-1 manifestamos que:

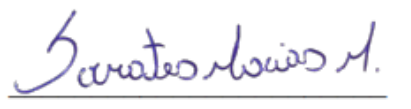
Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación

Guayaquil, enero del año 2025

Atentamente,



Rubén Sebastián Idrovo Madero
C.I 092506529-4



Sócrates José Macias Molina
C.I 095062554-1

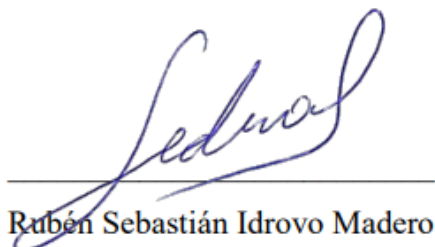
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, **RUBÉN SEBASTIÁN IDROVO MADERO** con documento de identificación N° **092506529-4** y **SÓCRATES JOSÉ MACIAS MOLINA** con documento de identificación N° **0950625541**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Trabajo de Titulación : **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE CONTROL ELECTRÓNICO MEDIANTE GESTOS PARA LA MOVILIDAD DE UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA DIRIGIDO A PERSONAS CON DISCAPACIDAD FÍSICO-MOTORA”**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero en Electrónica , en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

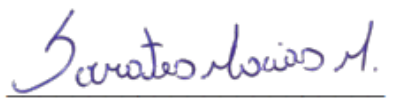
En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, enero del año 2025

Atentamente,



Rubén Sebastián Idrovo Madero
C.I 092506529-4



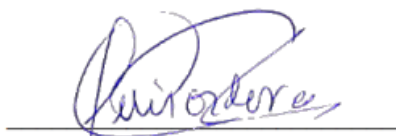
Sócrates José Macias Molina
C.I 095062554-1

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.

Yo, **LUIS SILVIO CÓRDOVA RIVADENEIRA** con documento de identificación N° **091158939-8**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE CONTROL ELECTRÓNICO MEDIANTE GESTOS PARA LA MOVILIDAD DE UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA DIRIGIDO A PERSONAS CON DISCAPACIDAD FÍSICO-MOTORA**, realizado por **Rubén Sebastián Idrovo Madero** con documento de identificación N° **092506529-4** y **Sócrates José Macias Molina** con documento de identificación N° **0950625541**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Trabajo de titulación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, enero del año 2025

Atentamente,



Ing. Luis Silvio Córdova Rivadeneira, Msc.

C.I. 091158939-8

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, por permitirme llegar a esta etapa final de mi carrera, por brindarme sabiduría a lo largo del camino y por darme la fortaleza necesaria para superar cada desafío sin desfallecer.

Asimismo, mi gratitud infinita a mis padres, Boli y Leo, quienes han sido mis pilares fundamentales en esta etapa universitaria. Su amor, sacrificio y apoyo incondicional han sido la base sobre la cual he construido este logro, y sin ellos, este camino no habría sido posible.

También deseo agradecer a todas las personas que me han acompañado a lo largo de esta carrera, a cada docente que con su conocimiento y orientación contribuyó a mi formación.

De manera especial, extendo mi reconocimiento al Ing. Luis Córdova Rivadeneira, mi tutor, por su guía, paciencia y compromiso durante este proceso. Su apoyo fue clave para la culminación de este proyecto.

A todos, gracias.

Rubén Sebastián Idrovo Madero

AGRADECIMIENTO

La culminación de esta tesis es el resultado de años de esfuerzo y dedicación durante la formación académica, un logro que no habría sido posible sin el apoyo incondicional de Jehová Dios y mi familia que, gracias a su apoyo constante, motivación y comprensión fueron pilares fundamentales en este proceso.

Se expresa un profundo reconocimiento al Ing. Luis Córdova Rivadeneira, por su guía, paciencia y valiosas aportaciones a lo largo del desarrollo de esta investigación. Su experiencia y compromiso fueron determinantes para la materialización de este proyecto.

De igual manera, se agradece a la Universidad Politécnica Salesiana por proporcionar los recursos y el espacio necesarios para la realización de este trabajo, facilitando así el cumplimiento de cada una de sus etapas.

Finalmente, se valora el esfuerzo y la dedicación personal invertidos en este proyecto, con la firme esperanza de que sus hallazgos contribuyan al desarrollo del conocimiento en el campo de la Electrónica y Automatización.

Sócrates José Macías Molina

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino, por brindarme luz en los momentos de oscuridad y sostenerme cuando sentía que no podía continuar. Su amor incondicional y su compañía han sido mi refugio en este largo trayecto, y por ello, le entrego mi más profundo agradecimiento.

A mi papá Boli, por ser mi ejemplo de perseverancia, esfuerzo y valentía. Cada enseñanza suya ha dejado una huella imborrable en mí, mostrándome con su propia vida el significado de la dedicación y el trabajo honesto. Gracias por cada palabra de aliento, por cada consejo que me ha impulsado a ser mejor y por estar presente en cada momento importante.

A mi mamá Leo, cuyo amor infinito ha sido mi mayor sostén. Con su ternura y sabiduría, me ha guiado a lo largo de este camino, alentándome a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y su incansable lucha para que yo alcance mis sueños han sido un pilar fundamental en mi vida. Gracias por no soltar mi mano, por creer en mí y por ser mi refugio en los días de tormenta.

A cada persona que, de una u otra manera, ha contribuido en este viaje. A mis familiares, amigos, profesores y compañeros, quienes con su apoyo, consejos y compañía me han ayudado a alcanzar este logro. Cada gesto de bondad, cada palabra de aliento y cada granito de arena han sido fundamentales para que hoy pueda celebrar este momento tan anhelado.

Este logro no es solo mío, sino de todos aquellos que han caminado a mi lado, que han compartido mis alegrías y han aliviado mis preocupaciones. A cada uno de ustedes, gracias de corazón.

Rubén Sebastián Idrovo Madero

DEDICATORIA

Este trabajo de tesis está dedicado, en primer lugar, a Jehová Dios, fuente de fortaleza, sabiduría y guía en cada paso de este proceso, cuya presencia ha sido fundamental para superar cada desafío y alcanzar este logro.

A mi padre Sócrates Macías, mi madre Flor Molina y mi hermana Fiorella Macías, por su amor incondicional, paciencia y apoyo constante. Su confianza y motivación fueron el motor que impulsó este esfuerzo, brindando ánimo en los momentos más difíciles y compartiendo la alegría de cada avance.

Finalmente, a aquellos amigos y docentes que, con su conocimiento, consejos y aliento, dejando una huella invaluable en este camino académico.

Sócrates José Macías Molina

RESUMEN

El proyecto tiene como propósito desarrollar e implementar un prototipo de control electrónico basado en gestos para facilitar la movilidad de una silla de ruedas eléctrica, destinado a personas con discapacidad físico-motora. La propuesta busca incrementar la autonomía y mejorar la calidad de vida de quienes lo utilicen, permitiendo desplazarse sin necesidad de emplear extremidades superiores o apoyos adicionales, representando así una solución alternativa para este grupo de personas. El sistema que se implementara se fundamenta en la tecnología de detección de gestos, utilizando el módulo MPU6050, ya que es una Unidad de Medición Inercial (IMU) con 6 grados de libertad (DOF), integra un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes, lo que posibilita interpretar señales mediante movimientos corporales específicos. La programación del prototipo se realiza en un entorno de programación que es Arduino IDE, ampliamente reconocido en la comunidad de hardware de código abierto para proyectos electrónicos. La silla de ruedas estará equipada con un módulo ESP32 encargado de recibir las señales emitidas por el MPU6050, ubicado en el diseño del prototipo de control electrónico, y de traducir dichos movimientos en comandos relacionados con dirección. Este enfoque no solo facilita la movilidad, sino que también fomenta la inclusión y empodera a las personas con discapacidad, permitiendo que se movilicen de manera independiente en sus entornos. La implementación de esta tecnología aspira a brindar una solución eficaz a los retos diarios enfrentados por estas personas, favoreciendo su integración social y mejorando significativamente su calidad de vida.

Palabras claves: Prototipo, control electrónico, físico-motora

ABSTRACT

The project aims to develop and implement a gesture-based electronic control prototype to facilitate the mobility of an electric wheelchair for individuals with physical-motor disabilities. This proposal seeks to enhance autonomy and improve the quality of life of users by allowing movement without the need for upper limbs or additional support, thus providing an alternative solution for this group. The implemented system is based on gesture detection technology using the MPU6050 module, an Inertial Measurement Unit (IMU) with six degrees of freedom (DOF). It integrates a 3-axis accelerometer and a 3-axis gyroscope, enabling the interpretation of signals through specific body movements. The prototype's programming is carried out in the Arduino IDE, a widely recognized open-source hardware development environment for electronic projects. The wheelchair will be equipped with an ESP32 module responsible for receiving the signals emitted by the MPU6050—placed within the electronic control prototype design—and translating these movements into directional commands. This approach not only facilitates mobility but also promotes inclusion and empowers individuals with disabilities, allowing them to move independently within their environments. The implementation of this technology aims to provide an effective solution to the daily challenges faced by these individuals, fostering their social integration and significantly improving their quality of life.

Keywords: Prototype, electronic control, physical-motor

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN. I	
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	
A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	II
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
DEDICATORIA.....	VI
DEDICATORIA.....	VII
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE GENERAL.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	2
2.1. Planteamiento del Problema.....	2
2.1.1. Antecedentes.....	2
2.1.2. Importancia y Alcance.....	4
2.1.3. Justificación	5
2.1.4. Delimitación Del Problema	8
2.1.4.1. Temporal	8
2.1.4.2. Geográfica.....	8
2.1.4.3. Académica	8
3. OBJETIVOS.....	9
3.1. Objetivo General	9
3.2. Objetivos específicos.....	9
3.3. Metodología	9
4. MARCO TEÓRICO	10
4.1. Movilidad reducida en Ecuador	13
4.2. Elementos referenciales.....	16

4.2.1.1.	Sillas de Ruedas	16
4.2.1.2.	ESP32.....	17
4.2.1.3.	L293D IC	18
4.2.1.4.	AMSS1117.....	18
4.2.1.5.	MPU6050	19
4.2.1.6.	Ruedas Omnidireccionales	20
4.2.1.7.	Motor Reductor 1:120	21
4.2.1.8.	Arduino IDE.....	22
4.2.1.9.	ZBrush.....	23
4.2.1.10.	EasyEDA.....	24
4.2.1.11.	Gestos en la comunicación no verbal	25
4.2.1.12.	Gestos de los brazos: Importancia y clasificación.....	26
4.2.1.12.1.	Movimiento de los brazos hacia adelante	31
4.2.1.12.2.	Movimiento de los brazos hacia atrás	31
4.2.1.12.3.	Movimiento de los brazos hacia la derecha	32
4.2.1.12.4.	Movimiento de los brazos hacia la izquierda.....	32
5.	MARCO METODOLÓGICO.....	33
5.1.	Etapas del prototipo.....	33
5.2.	Diseño del circuito electrónico	33
5.3.	Modelado en ZBrush.....	37
5.3.1.	Diseño prototipo silla de ruedas.....	37
5.3.2.	Diseño prototipo control gestual.....	39
5.3.3.	Impresión 3D	40
5.3.4.	Diseño de placas PCB	42
5.3.4.1.	Placa PCB Emisor	42
5.3.4.1.1.	Distribución de componentes	42
5.3.4.1.2.	Enrutamiento de pistas	44
5.3.4.1.3.	Consideraciones adicionales.....	45
5.3.4.1.4.	Verificación del diseño	45
5.3.4.1.5.	Placa PCB Receptor	46
5.3.4.2.	Distribución de componentes	46

5.3.4.3.	Enrutamiento de pistas	48
5.3.4.3.1.	Consideraciones adicionales.....	49
5.3.4.3.2.	Verificación del diseño	49
5.3.5.	Ensamblaje de Componentes Electrónicos	50
6.	RESULTADOS.....	52
6.1.	Pruebas	52
6.1.1.	Análisis de Resultados.....	52
6.1.2.	Evaluación de la Precisión.....	52
6.1.3.	Análisis del tiempo de respuesta.....	53
7.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	56
8.	PRESUPUESTO.....	58
9.	CONCLUSIONES.....	59
10.	RECOMENDACIONES	60
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
12.	ANEXOS.....	64
12.1.	ANEXO 1: CÓDIGO DEL MODULO EMISOR (BRAZALETE DE CONTROL GESTUAL)	64
12.2.	ANEXO 2: CÓDIGO DEL MÓDULO RECEPTOR (SILLA DE RUEDAS).....	67
12.3.	ANEXO 3: PRUEBAS DEL DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Silla De Ruedas Con Propulsión Y Control Automático.....	11
Figura 2	Prototipo En Funcionamiento	12
Figura 3	Total De Personas Con Discapacidad Registradas En El Registro Nacional De Discapacidad	13
Figura 4	Tipo De Discapacidad.....	14
Figura 5	Grupos Etarios	14
Figura 6	Personas Con Discapacidades Físicas En Guayaquil.....	15
Figura 7	Silla De Ruedas Manuales	16

Figura 8 Módulo Esp32.....	17
Figura 9 Integrado L293d Ic	18
Figura 10 Regulador De Voltaje Ams1117.....	19
Figura 11 Chip Mpu6050	20
Figura 12 Ruedas Omnidireccionales.....	21
Figura 13 Motor Reductor.....	22
Figura 14 Software Arduino Ide	23
Figura 15 Software Zbrush.....	24
Figura 16 Software Easyeda.....	25
Figura 17 Brazos Cruzados	28
Figura 18 Cruce De Brazos Reforzados	28
Figura 19 Gesto De Tomarse Los Brazos	29
Figura 20 Cruce Parcial De Brazos	30
Figura 21 Cruce De Brazos Disimulados	31
Figura 22 Esquemático Electrónico Del Control Gestual Esp32 (Emisor)	33
Figura 23 Esquemático Giroscopio Mpu.....	34
Figura 24 Esquemático Bornera Y Switch.....	34
Figura 25 Esquemático Electrónico Del Control Gestual Esp32 (Receptor)	35
Figura 26 Esquemático L293dn (Motores Delanteros)	35
Figura 27 Esquemático L293dn (Motores Traseros).....	36
Figura 28 Esquemático Ams1117	36
Figura 29 Esquemático Bornera Y Switch.....	36
Figura 30 Uso De Primitivas	37
Figura 31 Uso De Deformadores Y Transformadores.....	38
Figura 32 Piezas Individuales Base Silla De Ruedas En Zbrush	38
Figura 33 Render Final Silla De Ruedas	39
Figura 34 Simulación De Brazaletes En Brazo Digital	39
Figura 35 Piezas Individuales Control Gestual Zbrush.....	40
Figura 36 Impresión Silla De Ruedas En 3d.....	42
Figura 37 Distribución De Componentes.....	43
Figura 38 Diseño Optimizado	43

Figura 39 Enrutamiento Manual	44
Figura 40 Enrutamiento Automático	44
Figura 41 Administrador De Capas.....	45
Figura 42 Drc	46
Figura 43 Distribución De Componentes De Colocación Inicial.....	47
Figura 44 Diseño Optimizado	47
Figura 45 Enrutamiento Manual	48
Figura 46 Enrutamiento Manual 2	48
Figura 47 Administrador De Capas.....	49
Figura 48 Verificación Del Diseño	50
Figura 49 Prototipo Inicial Vista Posterior.....	51
Figura 50 Prototipo Inicial Vista Superior	51
Figura 51 Placa Pcb Del Receptor.....	51
Figura 52 Prototipo Silla De Ruedas Frontal	54
Figura 53 Brazaletes 3d	55
Figura 54 Pruebas De Prototipo	72
Figura 55 Brazaletes En Pruebas	73
Figura 56 Inserta Esp32.....	73
Figura 57 Brazaletes Final	74
Figura 58 Módulo Receptor Funcional	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Necesidad De Sillas De Ruedas En Los Lmics	5
Tabla 2 Cronograma De Actividades	56
Tabla 3 Presupuesto Del Proyecto	58

1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se enfoca en el desarrollo de un sistema electrónico que permite el control de una silla de ruedas mediante gestos, dirigido a personas con discapacidad físico-motora. Esta propuesta tiene como finalidad mejorar la movilidad y autonomía de los usuarios, ofreciendo una solución de fácil uso.

El objetivo principal consiste en diseñar un prototipo que utilice tecnologías de sensor giroscópico y control electrónico para interpretar los gestos con las manos, facilitando así el manejo de la silla de ruedas sin la necesidad de utilizar joysticks convencionales. Se implementará un sistema que combine hardware y software, permitiendo que los movimientos del usuario se conviertan en comandos para dar dirección a la silla.

Para la implementación del prototipo, se emplearán herramientas de desarrollo de software, junto con microcontroladores y módulos de sensores que detecten los gestos, tales como acelerómetros y giroscopios. La metodología adoptada será experimental y sistemática, abarcando desde la investigación inicial de tecnologías relacionadas y la definición clara de objetivos, hasta el diseño y fabricación del prototipo, así como la integración de los componentes electrónicos.

El resultado final será un sistema de control electrónico gestual que mejore la experiencia de movilidad de las personas con discapacidad físico-motora, promoviendo su independencia y calidad de vida. Este trabajo contribuye al avance de la tecnología asistiva, implementando prácticas más inclusivas y efectivas en el ámbito de la movilidad.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

2.1. Planteamiento del Problema

2.2. Antecedentes

La pérdida total o parcial de extremidades puede ser atribuida a diversos factores. Según la Federación Española de Ortesistas y Protesistas (FEDOP, 2019), Estados Unidos presenta el mayor índice de amputaciones a nivel mundial, seguido de España, donde se estima que aproximadamente 60,000 (Aline de Mesquita, 2021) , personas han sufrido algún tipo de amputación debido a accidentes, malformaciones congénitas, enfermedades o cirugías. Además, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Grupo del Banco Mundial (2011) evidencian que “existe un 15% de personas con discapacidad a nivel mundial”.

Las personas con discapacidad físico-motora enfrentan dificultades significativas y limitaciones al desplazarse, lo que afecta su capacidad para realizar actividades cotidianas de manera independiente. Este grupo de individuos a menudo depende de la asistencia de otras personas para completar sus tareas diarias. Esta dependencia puede llevar a sentimientos de aislamiento social, así como a un aumento en la incidencia de ansiedad y depresión, lo que resulta en un deterioro progresivo de la salud del individuo.

La silla de ruedas eléctrica se ha convertido en una herramienta esencial para la movilidad de personas con discapacidades, otorgándoles una mayor autonomía e independencia. Sin embargo, el diseño actual, basado principalmente en el control mediante joystick, presenta limitaciones para usuarios con afectación en las extremidades superiores.

Diversos estudios evidencian las dificultades que experimentan algunos usuarios al operar el joystick. Como señalan, "la fuerza y la resistencia requeridas para operar un joystick pueden ser un desafío para algunos usuarios, especialmente aquellos con debilidad en las extremidades superiores"

El uso prolongado del joystick puede provocar fatiga en la mano, la muñeca y el hombro”, lo cual afecta la capacidad de control y aumenta el riesgo de incidentes. En este sentido, los errores en el manejo de la silla de ruedas, como colisiones o caídas, pueden ser causados por factores relacionados con el usuario, el entorno o la tecnología de la silla (World Health Organization, 2001).

La OMS o también conocida como la Organización Mundial de la Salud estima que “más de mil millones de personas en el mundo viven con alguna forma de discapacidad, y se espera que esta cifra aumente en los próximos años” (Rodríguez-Abreu, Yanetsy; Méndez-Calero, Yasmín; Cañamero-Dinza, 2022). Esto resalta la necesidad urgente de desarrollar tecnologías más inclusivas que puedan atender a un espectro más amplio de necesidades.

Los sistemas de control basados en gestos están emergiendo como una alternativa intuitiva y natural para la interacción con dispositivos electrónicos, particularmente en el campo de la movilidad asistida. Estos sistemas utilizan sensores para detectar e interpretar los movimientos del cuerpo humano, traduciéndolos en comandos para controlar dispositivos como sillas de ruedas, prótesis robóticas y sistemas de domótica.

Existen diversas tecnologías para la detección de gestos:

- **Cámaras de visión artificial:** Analizan las imágenes capturadas para identificar patrones de movimiento y reconocer gestos específicos. (Siddharth S. Rautaray, 2012)
- **Sensores de profundidad:** Como los utilizados en Kinect, permiten capturar información tridimensional del movimiento, lo que facilita la identificación de gestos con mayor precisión (Zhengyou Zhang, 2012) .
- **Sensores inerciales:** Acelerómetros y giroscopios, detectan la aceleración y la rotación del cuerpo, permitiendo reconocer gestos dinámicos y movimientos complejos (Mitra, S., & Acharya, T, 2007) .

Electromiografía (EMG): Mide la actividad eléctrica de los músculos, permitiendo detectar la intención de movimiento incluso antes de que se produzca el gesto visible (Côté-Allard, U., Fall, C. L., Drouin, A., Campeau- Lecours, A., Gosselin, C., Glette, K., Laviolette, F., & Gosselin, B).

El desarrollo e implementación de estas tecnologías emergentes en el campo de la movilidad asistida presenta desafíos importantes. La precisión, la fiabilidad y la robustez de los sistemas de control son cruciales para garantizar la seguridad de los usuarios.

2.2.1. Importancia y Alcance

El presente proyecto se centra en el desarrollo de un sistema electrónico, mediante el uso de un sensor de movimiento como giroscopio y acelerómetro, permite controlar una silla de ruedas eléctrica a través de gestos. Esta propuesta no busca diseñar una nueva silla de ruedas, sino que se enfoca en la interfaz de control, proporcionando a las personas con discapacidad físico-motora una solución que mejore su movilidad y calidad de vida.

Al ofrecer un método de control alternativo, se espera que los usuarios puedan interactuar con la silla de ruedas de manera más intuitiva y natural, lo que podría reducir la frustración asociada con los sistemas de control convencionales. Este enfoque busca garantizar una solución accesible y funcional desde su implementación, permitiendo que los usuarios puedan adaptarse rápidamente al dispositivo y aprovechar sus beneficios sin complejidades adicionales.

De esta forma, se prioriza no solo la practicidad, sino también la fiabilidad del sistema, asegurando que cumpla con los estándares básicos necesarios para mejorar la movilidad y autonomía de las personas con discapacidad físico-motora. El trabajo se erige como una propuesta orientada hacia una perspectiva inclusiva y centrada en el usuario, así mismo el proyecto presenta un alcance de considerable magnitud, con un impacto potencial de gran relevancia en la calidad de vida de individuos que presentan discapacidades físicas- motoras.

2.2.2. Justificación

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que 80 millones de personas en el mundo requieren una silla de ruedas para su movilidad (OMS, 2024). Sin embargo, existe una brecha significativa entre la necesidad y el acceso a este producto de asistencia esencial.

Se estima que entre el 85 y 95 % de las personas que necesitan una silla de ruedas no tienen acceso a una de ellas y esta disparidad es particularmente aguda en los Países de Bajos y Medianos Ingresos (LMICs) mostrado en la Tabla 1. Según (ATscale, 2019) “cuatro de cada cinco personas que necesitan una silla de ruedas viven en Países de Bajos y Medianos ingresos” (p.9), ya que estos países se encuentran en una situación de alta necesidad no satisfecha, por lo que se calcula que 64 millones de personas requieren de una silla de ruedas en los LMICs.

Tabla 1
Necesidad de sillas de ruedas en los LMICs

Región de la OMS	Necesidad de las sillas de ruedas (millones)	Cobertura estimada de las sillas de ruedas (porcentaje)	Necesidad insatisfecha (millones)
América (Excluyendo HICs)	~6	5%	~6
Europa (Excluyendo HICs)	~4	5%	~4
África	~10	5%	~10
Sur Este Asiático	~26	5%	~25
Pacífico Occidental	~20	5%	~19
Países con Altos Ingresos (HICs)	~9	90%	~1
Mundial	~75		~65

Nota: análisis de la necesidad de sillas de ruedas en los LMICs (ATscale, 2019).

La silla de ruedas, como tecnología de asistencia (TA), desempeña un papel crucial en la promoción de la autonomía, la inclusión social y la participación plena de las personas con discapacidad físico-motora, facilitando el acceso a la educación, el empleo, la atención médica y la vida comunitaria, contribuyendo a la mejora de la calidad de vida y el bienestar de los usuarios.

No obstante, la provisión de sillas de ruedas adecuadas enfrenta desafíos importantes, especialmente en los LMICs, donde se prevé un incremento considerable en la demanda debido a una convergencia de factores demográficos, epidemiológicos y socioeconómicos que se describe a continuación:

- **Envejecimiento poblacional:** Las proyecciones demográficas indican que la población mundial mayor de 60 años se duplicará para el año 2050, alcanzando los 2 mil millones, mientras que la población mayor de 80 años se triplicará, llegando a los 426 millones (OMS, 2024). El envejecimiento se asocia con un aumento en la prevalencia de enfermedades crónicas y condiciones que afectan la movilidad, como la artritis, las enfermedades cardiovasculares, los accidentes cerebrovasculares y el deterioro cognitivo. Esta tendencia demográfica tendrá un impacto directo en la demanda de sillas de ruedas y otros productos de asistencia para la movilidad (Population Aging, 2022).
- **Aumento de la incidencia de lesiones:** Los accidentes de tránsito, los accidentes laborales, la violencia y las crisis humanitarias contribuyen al aumento de la discapacidad en los LMICs. Las lesiones medulares, en particular, representan una causa importante de discapacidad física que requiere el uso de silla de ruedas. La OMS (2021) estima que entre 250.000 y 500.000 personas sufren lesiones medulares cada año, y la mayoría de estos casos ocurren en países de ingresos bajos y medianos.
- **Incremento de las Enfermedades No Transmisibles (ENT):** Las ENT, como las enfermedades cardiovasculares, la diabetes y el cáncer, son una causa creciente de discapacidad en todo el mundo. La incidencia de accidentes cerebrovasculares, por ejemplo, ha aumentado un 14% anual en países de bajos ingresos en las últimas tres décadas. La diabetes, que puede causar amputaciones y neuropatía diabética, afectando la movilidad, se estima que afectará a 552 millones de personas en 2030. El aumento de la prevalencia de ENT tendrá implicaciones significativas para la demanda de sillas de ruedas y otros productos de asistencia. (Organización Panamericana de la Salud, s.f.).

A pesar de la creciente necesidad, la provisión de sillas de ruedas en los LMICs enfrenta obstáculos importantes. La falta de financiamiento público, la limitada infraestructura para la distribución y el mantenimiento, y la complejidad de las necesidades individuales de los usuarios son factores que limitan el acceso a sillas de ruedas adecuadas (OMS, 2024; Borg & Larsson, 2018). Si bien existen fabricantes locales, sus productos a menudo se perciben como de "baja tecnología", lo que puede generar estigmatización y afectar la aceptación por parte de los usuarios.

En este contexto, la tecnología de asistencia (TA) se posiciona como un catalizador para la innovación en el diseño, la producción y la provisión de sillas de ruedas. La TA, que engloba una amplia gama de productos, desde dispositivos de movilidad hasta software de accesibilidad, ofrece la posibilidad de desarrollar soluciones personalizadas que respondan a las necesidades y preferencias individuales de los usuarios (International Society for Prosthetics and Orthotics , 2023).

La OMS define los productos de asistencia como "cualquier producto externo (incluidos los dispositivos, equipos, instrumentos o software), en especial producidos o generalmente disponibles, cuyo objetivo principal es mantener o mejorar el funcionamiento y la independencia de una persona y, por lo tanto, promover su bienestar" (OMS, 2024).

- **Integrar la TA en las políticas y programas de desarrollo:** Incorporar la TA en sectores como salud, educación, empleo y protección social.
- **Garantizar la disponibilidad de productos seguros, eficaces y asequibles:** Establecer estándares de calidad, promover la producción local y facilitar el acceso a financiamiento.
- **Fomentar la investigación y la innovación en TA:** Invertir en el desarrollo de nuevas tecnologías que respondan a las necesidades específicas de los usuarios.
- **Incluir la TA en la respuesta humanitaria:** Proporcionar productos de asistencia a las personas afectadas por desastres naturales y conflictos armados.

En conclusión, la creciente necesidad de sillas de ruedas, particularmente en los LMICs, exige una respuesta integral que garantice el acceso equitativo a productos de asistencia de calidad. La tecnología de asistencia, con su capacidad para la innovación y la personalización, ofrece una oportunidad para mejorar la movilidad, la independencia y la inclusión social de las personas con discapacidad físico-motora.

2.2.3. Delimitación Del Problema

2.2.3.1.1. Temporal

El proyecto se desarrollará y evaluará en un período de seis meses, durante los cuales se diseñará, implementará y probará el prototipo de control electrónico mediante gestos. Este tiempo es suficiente para cubrir todas las fases del desarrollo, incluyendo la investigación, diseño, implementación, pruebas y ajustes necesarios.

2.2.3.1.2. Geográfica

El proyecto se llevará a cabo en el cantón Guayaquil de la provincia del Guayas del Ecuador, enfocándose en una población específica de personas con discapacidad físico-motora que residen en esta área, considerando cada arista posible en las especificaciones.

2.2.3.1.3. Académica

El siguiente proyecto técnico permite enlazar los conocimientos adquiridos en sistemas microprocesador, procesamiento de señales, programación en lenguaje C++, diseño placas PCB, entre otros. Aplicados en el desarrollo de un sistema de control electrónico mediante gestos para una silla de ruedas eléctrica. Así también, involucra el uso de microcontroladores como ESP32 y sensores inerciales (acelerómetro y giroscopio) para captar los gestos del usuario, los cuales son procesados y traducidos en comandos para controlar los actuadores de la silla, tales como los motores reductores que facilitan su movilidad.

3. OBJETIVOS

3.1.Objetivo General

Desarrollar el diseño e implementación de un prototipo de un sistema electrónico que permita a una persona con discapacidad físico-motora mantener el control de una silla de ruedas eléctrica a través de comunicación gestual.

3.2.Objetivos específicos

- Diseñar el diagrama electrónico del circuito de control gestual.
- Desarrollar la programación necesaria de un microcontrolador ESP32.
- Diseñar el prototipo de una silla de ruedas a baja escala

3.3.Metodología

El enfoque metodológico seleccionado para este proyecto combina principios inductivos, experimentales y sistemáticos. Cada enfoque se integra cuidadosamente para garantizar un proceso estructurado y científico.

El método inductivo se aplica al aprovechar los conocimientos adquiridos en disciplinas como programación, electrónica aplicada, microprocesadores y diseño de PCB, que son esenciales para el diseño y desarrollo del prototipo. Este enfoque permite consolidar y aplicar teorías previamente estudiadas en un contexto práctico, generando un puente entre el conocimiento académico y su aplicación tecnológica.

El método experimental se emplea mediante pruebas controladas, donde se evalúan las interacciones entre los componentes del sistema, como el MPU6050 y el ESP32. Estas pruebas permiten verificar la eficiencia del control gestual en términos de sensibilidad, precisión y respuesta dinámica. Finalmente, el enfoque sistemático garantiza que cada etapa del proyecto se ejecute de manera lógica y organizada. Esto incluye la planificación, diseño, desarrollo, validación y documentación del prototipo, asegurando que cada componente y módulo funcione de forma cohesiva dentro del sistema

4. MARCO TEÓRICO

El proyecto técnico de la Ingeniera Xiomara Anahí Cabrera Ordoñez denominado **Diseño e implementación de un prototipo automatizado de silla de ruedas con propulsión eléctrica basada en tecnología de bajo coste** del año 2023 se refiere a los avances tecnológicos que se encuentran en constante progresos, brindando mayor comodidad al ser humano que se encuentra en dicha discapacidad. Uno de estos avances es la automatización de procesos convencionales, lo que ha generado beneficios significativos en diversos ámbitos. En este contexto, el presente proyecto de investigación propone el diseño e implementación de un prototipo de silla de ruedas eléctrica de bajo costo, capaz de optimizar la movilidad de personas con discapacidad físico-motora. Este desarrollo no solo promueve la independencia del usuario, sino que también fortalece su interacción social y bienestar general, contribuyendo directamente al cumplimiento de cuatro de los diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible. El estudio se estructura en cinco fases fundamentales: recopilación de información, diseño, adquisición de materiales, implementación y evaluación. La selección y desarrollo de los componentes del prototipo se basó en criterios técnicos que garantizaran su funcionalidad y eficiencia. Inicialmente, se llevó a cabo un análisis detallado sobre las limitaciones físicas relacionadas con la movilidad en miembros inferiores y las tecnologías de asistencia disponibles, con especial énfasis en sillas de ruedas manuales y eléctricas. Se establecieron los parámetros de operación del prototipo, permitiendo la selección de un sistema de propulsión eléctrica compuesto por dos motores sin escobillas y una batería de iones de litio, asegurando un rendimiento óptimo. El sistema de control y automatización se diseñó a partir de una tarjeta controladora Arduino, que actúa como el núcleo del proceso, en conjunto con una palanca de mando que facilita la navegación del usuario. La programación del sistema responde a criterios de precisión y seguridad, garantizando un manejo intuitivo y eficiente. Adicionalmente, se ha diseñado y construido una estructura que integra de manera óptima los componentes mecánicos y electrónicos, proporcionando facilidad de ensamblaje, mantenimiento y adaptabilidad, además de ofrecer confort y seguridad al usuario, como se visualiza en la figura 1 (Ordoñez, 2023).

Figura 1
Silla de ruedas con propulsión y control automático



Nota: Prototipo automatizado de silla de ruedas con propulsión eléctrica con tecnología de bajo coste (Ordoñez, 2023).

Los Ingenieros Christian Ricardo Montenegro Jurado y Edwin Javier Villagrán Salazar en el trabajo de titulación de Grado denominado **Diseño e implementación de un prototipo de silla de ruedas eléctrica para la enseñanza en el manejo, conducción y orientación a personas con limitaciones físicas y adultos mayores** presenta una propuesta de desarrollo de un prototipo de bajo costo, con un sistema de control basado en Arduino y motores sin escobillas, lo que permite un desplazamiento más eficiente y autónomo para el usuario. Entre los antecedentes más relevantes, se destacan estudios previos sobre la automatización de dispositivos de asistencia y el uso de tecnologías emergentes en movilidad asistida. En donde la automatización de sillas de ruedas mediante sistemas de control avanzados ha sido un área de interés para investigadores y desarrolladores de dispositivos de accesibilidad. Esto describe la integración de una palanca de mando (joystick) y un sistema de control programado en una tarjeta Arduino, lo que facilita el manejo intuitivo del prototipo y en donde se visualiza el levantamiento de información, el diseño, la adquisición de componentes, la implementación y la evaluación del prototipo mediante pruebas de campo. Así se alinea con los Objetivos de Desarrollo

Sostenible (ODS), promoviendo la accesibilidad y la inclusión de personas con movilidad reducida, como se visualiza en la figura 2 (Montenegro Jurado & Villagran Salazar, 2008).

Figura 2
Prototipo en funcionamiento



Nota: prototipo de silla de ruedas eléctrica para la enseñanza en el manejo, conducción y orientación a personas con limitaciones físicas y adultos mayores (Montenegro Jurado & Villagran Salazar, 2008).

El proyecto "Diseño de un prototipo de silla de ruedas inteligente con monitoreo GPS" del Ing. Danny Fernando Romero Murillo de la Universidad de Guayaquil en 2021 se enmarca en el desarrollo de dispositivos de asistencia avanzada que buscan mejorar la autonomía y seguridad de las personas con movilidad reducida., como las sillas de ruedas inteligentes han evolucionado significativamente, incorporando tecnologías como sensores, sistemas de control avanzados y capacidades de conectividad para mejorar la experiencia del usuario. La integración de sistemas GPS permite no solo la localización en tiempo real de la silla, sino también la posibilidad de establecer rutas seguras y monitorear patrones de uso. Un ejemplo destacado es el proyecto desarrollado por Intel en colaboración con Stephen Hawking, donde se presentó una silla de ruedas conectada que monitorea la salud del usuario y proporciona datos en tiempo real. Además, existen modelos comerciales como la silla de ruedas eléctrica InfinityX, que ofrece asistencia inteligente a través de una aplicación móvil, facilitando el control y monitoreo por parte del usuario. Investigaciones recientes también han explorado la incorporación de

inteligencia artificial en sillas de ruedas para evitar obstáculos y permitir el control mediante movimientos de cabeza o reconocimiento de voz, ampliando las opciones de interacción para usuarios con diferentes grados de discapacidad motriz (Romero Murillo, 2021).

4.1.Movilidad reducida en Ecuador

Según datos del Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades (CONADIS), en Ecuador existen 487.542 personas con discapacidad, lo que representa el 2.88% de la población total, eso se visualiza en la figura 3. (Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades - CONADIS, 2024)

Figura 3

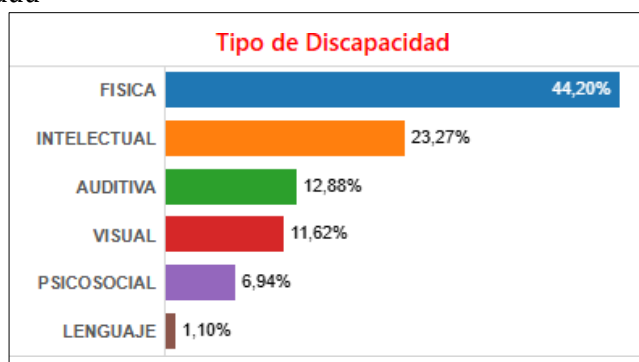
Total de personas con discapacidad registradas en el Registro Nacional de Discapacidad



Nota: El grafico representa la totalidad de las personas con discapacidad registradas en el Ecuador (CONADIS, 2024).

El Consejo Nacional para la Integración de la Persona con Discapacidad mejor conocido como CONADIS clasifica las discapacidades en varios grupos, los cuales son: Físicos, Intellectuales, Auditivos, Visuales, Psicosociales y de lenguaje, tal como se visualiza en la figura 4.

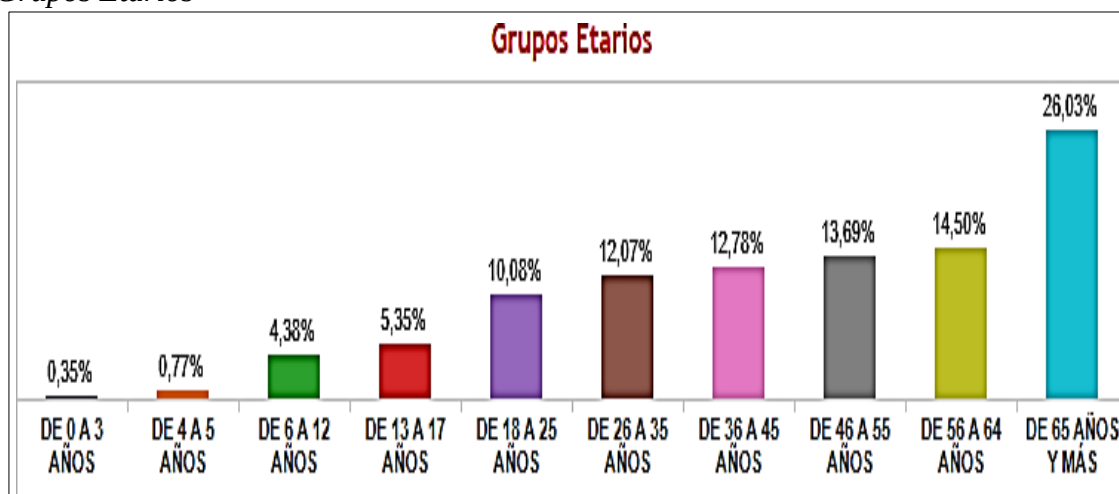
Figura 4
Tipo de Discapacidad



Nota: La figura muestra el porcentaje del tipo de discapacidad registradas en el Ecuador (CONADIS, 2024).

El grupo etario más afectado por la discapacidad motriz son las personas mayores de 65 años, quienes representan el 26.03% del total. Este dato se correlaciona con el proceso de envejecimiento y el aumento en la prevalencia de enfermedades crónicas que afectan la movilidad, como la artritis, las enfermedades cardiovasculares y la diabetes. Las personas de edad entre 56 a 64 años representan el 14.50% de la población con discapacidad motriz, el grupo edad joven laboral constituyen a un 48.62% mientras que los menores de 18 años constituyen el 10.85%.

Figura 5
Grupos Etarios



Nota: Distribución por edad de personas con discapacidades motrices en Ecuador (CONADIS, 2024).

Guayaquil, en la provincia del Guayas, concentra casi 34.915 personas con discapacidad físico-motora, lo que representa el 7.16% del total nacional. La alta concentración de personas con discapacidad en Guayaquil plantea desafíos en términos de accesibilidad al entorno físico, la disponibilidad de servicios de rehabilitación y la inclusión social.

Figura 6
Personas con discapacidades físicas en Guayaquil



Nota: Números de registros de discapacidad físico-motora (CONADIS, 2024).

Si bien estos datos no permiten determinar con precisión el número de personas con discapacidad motriz que afecta las extremidades inferiores, las cifras evidencian la magnitud de la población con discapacidad físico-motora en Ecuador. Estas personas enfrentan barreras para acceder a una vida plena e independiente, y su movilidad se ve limitada en actividades cotidianas como el trabajo, la educación, el ocio y el acceso a espacios públicos.

El desarrollo de tecnologías de asistencia, como las sillas de ruedas eléctricas con sistemas de control alternativos, busca disminuir la dependencia de la asistencia externa y promover la autonomía de las personas con discapacidad motriz, facilitando su participación plena en la sociedad. La innovación en este campo se centra en el desarrollo de sistemas de control más intuitivos, eficientes y personalizados, que respondan a las necesidades y preferencias de los usuarios.

4.2. Elementos referenciales

4.2.1. Sillas de Ruedas

Una silla de ruedas es un dispositivo de movilidad que consiste en una silla montada sobre ruedas. Se utiliza para proporcionar movilidad a las personas que tienen dificultades para caminar o no pueden caminar debido a una enfermedad, lesión o discapacidad. Las sillas de ruedas pueden ser manuales (movidas por el usuario o por un asistente) o eléctricas (movidas por un motor eléctrico). Existen varios tipos de sillas de ruedas, incluyendo:

- Sillas de ruedas manuales: Estas sillas requieren que el usuario o un asistente las empuje. Son generalmente ligeras y portátiles.
- Sillas de ruedas eléctricas o motorizadas: Estas sillas son propulsadas por un motor eléctrico y controladas por el usuario a través de un joystick.
- Sillas de ruedas deportivas: Estas sillas están diseñadas para deportes como el baloncesto en silla de ruedas o el tenis en silla de ruedas.

Cada tipo de silla de ruedas tiene sus propias ventajas y desventajas, y la elección de la silla de ruedas adecuada depende de las necesidades individuales del usuario.

Figura 7
Silla de Ruedas manuales



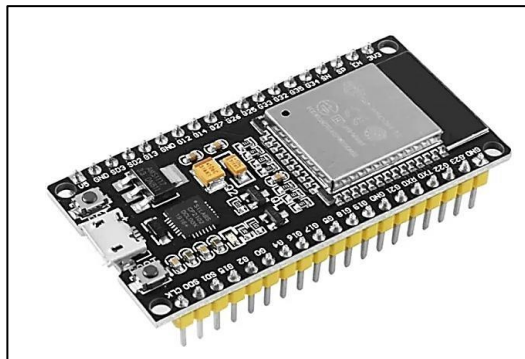
Nota: Se muestra la imagen de una silla de ruedas eléctrica (Electric Mobility, 2024).

4.2.2. ESP32

El ESP32, creado por Espressif Systems, es un SoC (Sistema en un Chip) altamente funcional. Ha sido diseñado pensando en aplicaciones de bajo costo y eficientes en términos de energía, e incorpora tecnología Wi-Fi y Bluetooth de doble modo. Algunos aspectos destacados del ESP32:

- **Procesador:** Integra un microprocesador llamado Tensilica Xtensa de serie LX6 de 32 bits, que se encuentra en el rango de 160 o 240 MHz en la operación, alcanzando un rendimiento de hasta 600 DMIPS.
- **Conectividad:** Ofrece Wi-Fi (802.11 b/g/n) y Bluetooth (v4.2 BR/EDR y BLE) integrados, lo que facilita la comunicación con otros dispositivos y la conexión a Internet.
- **Memoria:** Cuenta con 520 KB de SRAM interna y soporta memoria flash externa.
- **Periféricos:** Incluye una amplia gama de periféricos, como:
 - De 12 bits se tiene el convertidor analógico a digital.
 - De 8 bits se tiene el convertidor digital a analógico.
 - Interfaces SPI, I2C, UART.
 - PWM (Modulación por ancho de pulso).
 - Sensores táctiles capacitivos.

Figura 8
Módulo ESP32



Nota: Dispositivo ESP32 que se utiliza en la codificación y desarrollo del prototipo (Espressif, 2024).

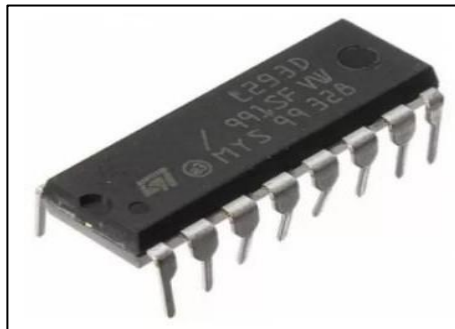
4.2.3. L293D IC

El L293D es un Circuito Integrado (IC) que sirve como un controlador de motor fundamental, permitiéndonos operar un motor de corriente continua en cualquier dirección y regular su velocidad. Este IC consta de 16 pines, distribuidos en dos lados, facilitando el control del motor. Algunos detalles importantes del L293D:

- Capacidad del canal: Puede proporcionar una corriente de salida de 600 mA por canal.
- Pico de salida de corriente: Alcanza un pico de corriente de salida de 1,2 A por canal (no repetitivo).
- Sistema de activación.
- Suministro de energía: El IC del motor L293D dispone de dos pines para la entrada de energía, conocidos como 'Vcc1' y 'Vcc2'.

El L293D es un controlador de motor H-Bridge de doble canal que tiene la capacidad de manejar un par de motores de corriente continua o un motor paso a paso. Esto implica que puede operar hasta dos motores de forma individual.

Figura 9
Integrado L293D IC



Nota: Integrado para el funcionamiento de motores (STMicroelectronics, 2025).

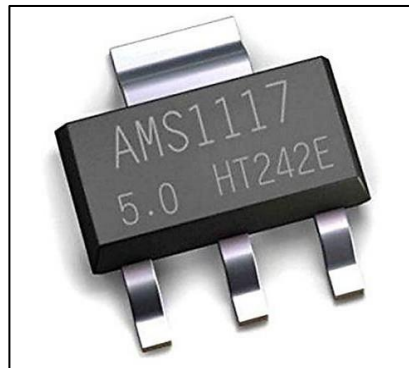
4.2.4. AMSS1117

El AMS1117 es un regulador de voltaje que se emplea principalmente para la regulación lineal de alta eficiencia y las fuentes de conmutación de post-regulación.

Este componente de 3 pines también se utiliza como cargador de batería y ofrece un rango de voltaje de salida de 1.5V a 5V. Proporciona un voltaje de caída bajo de 1.3A cuando funciona a la corriente máxima. Algunos aspectos relevantes del AMS1117:

- Voltaje de entrada: De 5V a 3.3V.
- Voltaje de salida: 3.3 V, 800 mAh.
- Corriente de salida: 1A.
- Regulación de línea: Máximo del 0.2%.
- Regulación de carga: Máximo del 0.4%.
- 1 Voltaje de referencia: Ajustado en el chip al 1.5%.
- Voltaje de caída: Máximo garantizado de 1.3V, disminuyendo con cargas de corriente más bajas.
- Paquetes disponibles: SOT-223, TO-252 y SO-8.

Figura 10
Regulador de voltaje AMS1117



Nota. Se muestra el regulador de voltaje AMS1117(Advanced Monolithic, 2007).

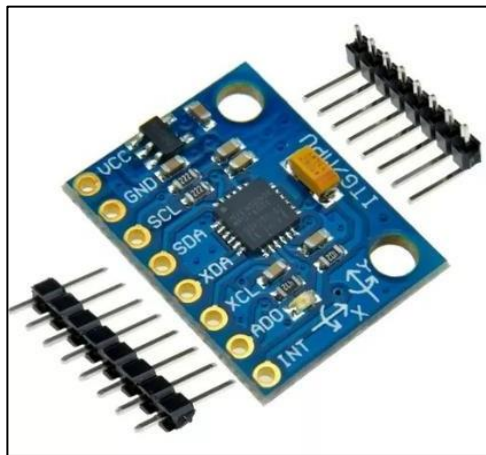
4.2.5. MPU6050

El MPU6050, fabricado por Invensense, es una Unidad de Medición Inercial (IMU) con 6 grados de libertad (6DOF). Este chip integra un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes. La comunicación con este dispositivo se puede realizar a través de SPI o bus I2C, lo que facilita la recopilación de los datos medidos. Algunos aspectos destacados del MPU6050:

- Acelerómetro de 3 ejes: Capaz de medir la aceleración lineal en tres dimensiones.
- Giroscopio de 3 ejes: Permite medir la velocidad angular en tres dimensiones.
- Comunicación: Se puede realizar a través de SPI o bus I2C.

El MPU6050 se utiliza comúnmente en aplicaciones de navegación, goniometría, estabilización, entre otras.

Figura 11
Chip MPU6050



Nota. Se muestra el MPU6050 Unidad de Medición Inercial (IMU) (TDK Corporation, 2025).

4.2.6. Ruedas Omnidireccionales

Las ruedas omnidireccionales son un tipo especial de rueda diseñada para permitir movimientos en múltiples direcciones sin necesidad de cambiar la orientación del vehículo o robot. Estas ruedas están compuestas por un disco principal que tiene varios rodillos pequeños distribuidos alrededor de su perímetro, colocados en ángulos específicos para facilitar el movimiento lateral, diagonal y rotacional.

Algunos aspectos destacados de las ruedas omnidireccionales:

- Movilidad en todas las direcciones: Permiten moverse hacia adelante, atrás, lateralmente y realizar giros sobre su propio eje sin cambiar la orientación.

- Rodillos integrados: Los rodillos están inclinados generalmente a 45° o 90° respecto al eje principal, lo que permite el deslizamiento lateral.
- Precisión y maniobrabilidad: Ideales para aplicaciones que requieren movimientos precisos, como robots móviles en espacios reducidos.
- Eficiencia en espacio: Facilitan maniobras complejas en áreas limitadas, como almacenes o entornos industriales.
- Aplicaciones versátiles: Usadas en robótica, sistemas de transporte automatizado y plataformas móviles

Figura 12

Ruedas Omnidireccionales



Nota. Se muestra rueda omnidireccional (Interroll Group, 2025).

4.2.7. Motor Reductor 1:120

El motor reductor amarillo 1:120 es un motor DC compacto con una caja reductora integrada, diseñado para proyectos de robótica y electrónica que requieren bajo costo, simplicidad y torque elevado. Su relación de reducción 1:120 le permite entregar un movimiento lento, pero con suficiente fuerza para mover vehículos pequeños y otros mecanismos. Aspectos destacados:

- Relación de reducción 1:120: Aumenta significativamente el torque del motor, ideal para aplicaciones que requieren fuerza en lugar de alta velocidad.
- Tamaño compacto: Su diseño ligero y pequeño facilita su integración en robots móviles, vehículos y mecanismos.

- Voltaje de operación: Funciona generalmente entre 3V y 12V, siendo compatible con fuentes comunes en proyectos electrónicos.
- Torque elevado: Proporciona suficiente fuerza para mover ruedas, engranajes o mecanismos con cargas ligeras.
- Velocidad reducida: Velocidades típicas de salida entre 120 a 200 RPM dependiendo del voltaje de alimentación.
- Ejes de doble salida: Cuenta con dos ejes: uno para acoplar ruedas o engranajes y otro para un codificador opcional.

Figura 13

Motor Reductor



Nota. Se muestra el motor reductor. (Kinmore Motor, 2024).

4.2.8. Arduino IDE.

El Arduino IDE es un entorno de desarrollo integrado que facilita la escritura y carga de código en las placas Arduino. Es una herramienta eficaz y de fácil manejo que es compatible con todas las versiones de placas Arduino. Algunos aspectos destacados del Arduino IDE:

- Versión actual: Arduino IDE 2.2.1.
- Características: Cuenta con autocompletado, navegación de código y un depurador en tiempo real.
- Compatibilidad del sistema operativo: Funciona en Windows (Win 10 y más reciente, 64 bits), Linux (64 bits), macOS (Intel, 10.14: “Mojave” o más reciente, 64 bits; Apple Silicon, 11: “Big Sur” o más reciente, 64 bits).

Figura 14
Software Arduino IDE



Nota. Arduino IDE es muy popular en la comunidad de hardware de código abierto para el desarrollo de proyectos electrónicos. (Arduino, 2025).

4.2.9. ZBrush

ZBrush es un software de modelado y esculpido digital desarrollada por Pixologic, utilizado principalmente en la creación de modelos 3D detallados y en la producción de texturas para personajes, criaturas y objetos. Es ampliamente utilizado en la industria de los videojuegos, cine, animación y la impresión 3D. Algunos aspectos destacados de Zbrush:

- **Escultura digital avanzada:** ZBrush permite esculpir detalles complejos en modelos 3D de manera intuitiva, como si estuviera trabajando con arcilla, gracias a sus herramientas de pinceles avanzados.
- **ZRemesher:** Un algoritmo inteligente que genera una malla de topología optimizada y de alta calidad para facilitar la animación y la texturización.
- **Pinceles y texturización:** Amplia variedad de pinceles y herramientas para pintar y agregar texturas de manera precisa, incluyendo proyección de detalles de alta resolución.
- **Polygroups:** Herramienta que facilita la organización y edición de diferentes áreas de un modelo 3D para trabajos más estructurados.

- Integración con otros programas: ZBrush se integra con otro software de diseño 3D como Maya, 3ds Max y Blender, facilitando la exportación e importación de modelos.

Figura 15
Software ZBrush



Nota. La primera versión oficial de ZBrush se presentó en la conferencia SIGGRAPH en 1999, donde sorprendió a todo el mundo por sus innovadoras capacidades de escultura y modelado en 3D, permitiendo a los artistas trabajar de manera más intuitiva y detallada. (Maxon Computer GMBH, 2025).

4.2.10. EasyEDA

EasyEDA es una plataforma en línea para el diseño de circuitos electrónicos, que permite a los usuarios crear esquemáticos, diseñar placas de circuito impreso (PCB) y simular circuitos sin necesidad de software adicional. Está orientada tanto a principiantes como a profesionales, ofreciendo herramientas de diseño accesibles y potentes. Algunos aspectos destacados de EasyEDA:

- Diseño de esquemáticos: Permite crear diagramas electrónicos utilizando una amplia librería de componentes electrónicos estándar.
- Diseño de PCB: Incluye herramientas para diseñar y autorizar placas de circuito impreso (PCB), con opciones de capas, enrutamiento y reglas de diseño.
- Simulación de circuitos: EasyEDA cuenta con simuladores integrados para probar el comportamiento de los circuitos antes de la fabricación, usando modelos analógicos y digitales.

- Librerías de componentes: Acceso a una extensa base de datos de componentes electrónicos, que incluye tanto piezas comunes como especializadas, con posibilidad de crear y personalizar bibliotecas.
- Compatibilidad con otros formatos: Permite importar y exportar archivos en varios formatos estándar, como Gerber, para asegurar la interoperabilidad con otros softwares de diseño.

Figura 16
Software EasyEDA



Nota. Se muestra logotipo de software EasyEDA (EasyEDA, 2024).

4.2.11. Gestos en la comunicación no verbal

Existe una gran variedad de definiciones para el término "comunicación". En esencia, se refiere al proceso donde individuos interpretan el significado de eventos, especialmente el comportamiento de otros. Para que esto ocurra, se necesitan un emisor y un receptor. En la comunicación verbal, aunque el lenguaje es crucial, también enviamos y recibimos muchos mensajes no verbales. Estos incluyen aspectos como la apariencia física, los movimientos corporales, el tono de voz, los objetos, la vestimenta y el uso del espacio y el tiempo.

La comunicación no verbal se refiere a la manera en que transmitimos nuestras emociones y sentimientos sin necesidad de palabras, siendo los gestos un componente esencial de esta. Los gestos pueden manifestar una diversidad de sentimientos, desde felicidad y respeto hasta ira y melancolía (Rafael Lopez, 2024). La comunicación no verbal juega un papel fundamental ya que transmite alrededor del 65% de mensajes en comparación con la comunicación verbal que representa el 35% restante (Noraini Mohamed, 2017).

Las características generales de la comunicación no verbal son las siguientes:

- Una relación de independencia con la interacción verbal.
- Los mensajes no verbales tienen mayor significancia que los mensajes verbales.
- Inevitable es la comunicación no verbal.
- En estos trabajan o predominan la función expresiva o emotiva.
- Hay sistemas no verbales diferentes según la cultura.
- Existe una especialización de ciertos comportamientos para la comunicación.
- El estudio en que se encuentra este tipo de búsqueda es el descriptivo.

Los gestos son acciones físicas llevadas a cabo con las manos, la cara, la cabeza u otros segmentos del cuerpo con el objetivo de transmitir información, manifestar sentimientos o manejar aparatos electrónicos, también se emplean para proporcionar directrices, resaltar aspectos durante un diálogo o discurso, e incluso para asistir en el aprendizaje de nuevas lenguas. La interpretación de los gestos puede variar considerablemente entre diferentes culturas, lo que resalta la importancia de tener conciencia de estas diferencias para prevenir confusiones (Maribel Pagán Delgado, 2020)

Los gestos se pueden clasificar en gestos corporales que implican el uso de todo el cuerpo, gestos del rostro y cabeza (girar la cabeza en una dirección específica, una mirada, asentir la cabeza), gestos de brazos y manos (lenguaje de señas, lenguaje de signos, poses de manos).

4.2.11.1. Gestos de los brazos: Importancia y clasificación

Los gestos del brazo son movimientos y posiciones de los brazos y manos que se utilizan para comunicar información no verbal. Estos gestos pueden ser conscientes o inconscientes, y pueden complementar, reforzar o contradecir el mensaje verbal. Los gestos del brazo varían ampliamente entre culturas y contextos, y pueden expresar una variedad de emociones, actitudes e intenciones.

Son una herramienta fundamental en la comunicación humana, ya que complementan, enriquecen e incluso pueden contradecir palabras verbales. Estos movimientos no solo enfatizan o ilustran ideas, sino que también expresan un amplio rango de emociones y actitudes, desde alegría y confianza hasta enfado e inseguridad. Regulan las interacciones sociales, facilitando la fluidez de las conversaciones y mostrando acuerdo o desacuerdo. Incluso, pueden revelar información

sobre el estado emocional de una persona, ayudando a comprender mejor a esa persona.

Tipos de gestos de brazos:

- **Brazos cruzados:** Cruzar los brazos es un gesto común que se ve en todo el mundo y que suele indicar que una persona se siente a la defensiva, incómoda o insegura. Es una reacción natural que se tiene cuando se está en situaciones o lugares desconocidos con gente que no se conoce bien, como en una fiesta, haciendo fila en el banco, esperando el autobús o en un ascensor lleno de gente.

La postura de brazos cruzados en un interlocutor puede ser un indicador de resistencia o falta de receptividad hacia el mensaje del orador. Este gesto no verbal puede interpretarse como una barrera que expresa, a nivel inconsciente, pensamientos negativos o falta de atención. Los comunicadores experimentados identifican esta postura como una señal para implementar estrategias que fomenten la apertura e interés del oyente. Algunas técnicas para "romper el hielo" y promover una actitud más receptiva incluyen, facilitar algún objeto, hacer alguna pregunta para que se pueda integrar, etc..

Figura 17
Brazos cruzados



Nota: Imagen de como son los brazos cruzados (Allan Pease, 2012).

- **Cruce de brazos reforzados:** La postura de brazos cruzados acompañada de puños cerrados indica un estado de ánimo defensivo y potencialmente hostil. Esta configuración gestual sugiere una intensificación de la resistencia o disconformidad, pudiendo ser precursora de una reacción agresiva. Si a esta postura se suman signos como tensión mandibular (dientes apretados) y enrojecimiento facial, es altamente probable que se produzca un ataque verbal o incluso físico.

Figura 18

Cruce de brazos reforzados

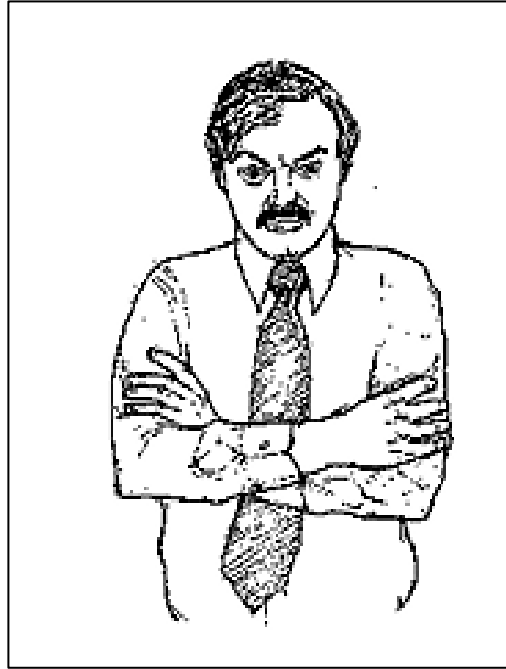


Nota: Persona realizando el cruce de brazos reforzad (Allan Pease, 2012).

- **El gesto de tomarse los brazos:** es un indicador no verbal de inseguridad, ansiedad y necesidad de autoprotección. Esta configuración postural, que restringe la apertura del cuerpo hacia el exterior, se observa con frecuencia en personas que se encuentran en situaciones que generan incertidumbre o estrés, como salas de espera de consultorios médicos o dentistas, o en pasajeros que experimentan su primer viaje en avión. Esta postura refleja una actitud de retraimiento, donde la persona busca inconscientemente "sujetarse" y limitar su exposición al entorno. Puede interpretarse como un intento de crear una barrera protectora frente a la situación que genera incomodidad o aprensión.

Figura 19

Gesto de tomarse los brazos

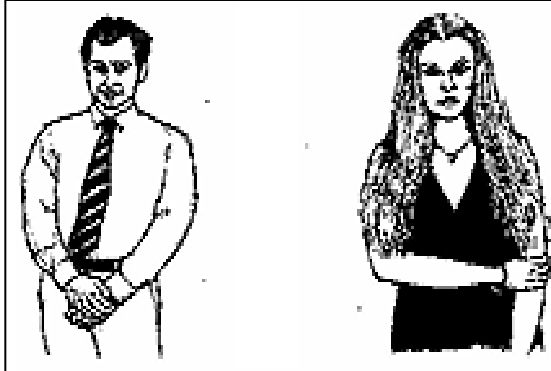


Nota: Sujeto realizando el gesto de tomarse los brazos (Allan Pease, 2012).

- **Cruce parcial de los brazos:** similar a un "autoabrazo", refleja un intento de autorregulación emocional frente a situaciones que generan inseguridad, ansiedad o estrés. Este gesto puede observarse en personas que se encuentran en situaciones de exposición pública, como al recibir un premio, dar un discurso o enfrentar una audiencia. Esta postura evoca, a nivel inconsciente, la sensación de protección y seguridad que experimentaba el individuo durante la infancia al tomar la mano de sus padres en situaciones temerosas. Al recrear este contacto físico consigo mismo, la persona busca autorregularse emocionalmente, conteniendo la ansiedad y brindándose una sensación de apoyo.

Figura 20

Cruce parcial de brazos



Nota: Se muestra el cruce parcial de brazos de dos formas diferente (Allan Pease, 2012).

- **Cruce de brazos disimulados:** La postura de sujetar un objeto con una mano, mientras la otra mano toca el bolso, reloj, puño de la camisa o realiza algún otro gesto similar, constituye una forma sutil de "barrera parcial". Este gesto es utilizado con frecuencia por personas que se encuentran en situaciones de exposición pública, como políticos, vendedores o conferenciantes, con el objetivo de disimular sentimientos de nerviosismo o inseguridad. En lugar de cruzar ambos brazos sobre el pecho, lo que podría interpretarse como una señal evidente de incomodidad o defensividad, la persona "sujeta" un objeto con una mano, mientras la otra mano realiza un gesto que le permite establecer una barrera parcial y obtener una sensación de seguridad. Este gesto puede pasar desapercibido para el observador casual, pero revela la necesidad del individuo de autorregularse emocionalmente y controlar la ansiedad.

Figura 21

Cruce de brazos disimulados



Nota. Muestra de cruce de brazos disimulados por sujetos (Allan Pease, 2012).

4.2.11.1.1. Movimiento de los brazos hacia adelante

Al detectar el movimiento del brazo hacia adelante mediante el MPU6050, el ESP32 del emisor procesa la señal. Una vez confirmado el gesto, se codifica la información del movimiento y se transmite una señal inalámbrica, a través del protocolo ESP-NOW, al ESP32 del receptor en la silla. Este último, al recibir la señal, la procesa e identifica el comando de "movimiento hacia adelante". A continuación, el ESP32 del receptor envía las señales de control correspondientes a los dos circuitos integrados L293D, configurándolos para activar los cuatro motores DC y establecer la dirección de rotación adecuada para que las llantas omnidireccionales giren en sentido horario. Esta sincronización en la activación y la velocidad de los cuatro motores es crucial para asegurar un desplazamiento suave y recto hacia adelante.

4.2.11.1.2. Movimiento de los brazos hacia atrás

Cuando el MPU6050 registra un movimiento del brazo hacia atrás, el ESP32 del emisor realiza un procesamiento similar al del movimiento hacia adelante, filtrando la señal y confirmando el gesto de "movimiento hacia atrás". La información codificada se transmite al ESP32 del receptor, que la procesa e identifica el comando correspondiente. En este caso, el ESP32 del receptor, a través de los L293D, activa los cuatro motores DC, pero invierte la polaridad del voltaje aplicado a los mismos y provoca que la rotación de las llantas omnidireccionales se produzca en sentido antihorario, generando el desplazamiento de la silla en reversa.

4.2.11.1.3. Movimiento de los brazos hacia la derecha

Al girar el brazo hacia la derecha, el MPU6050 envía la información al ESP32 del emisor, que la procesa, confirma el gesto de "giro a la derecha" y la transmite al ESP32 del receptor. El ESP32 del receptor, a su vez, decodifica la señal e identifica el comando correspondiente. En este caso, a diferencia del giro a la izquierda, el ESP32, a través del otro circuito integrado L293D, activa los dos motores DC del lado derecho de la silla, configurando su dirección de giro para que las llantas omnidireccionales de ese lado impulsen el giro de la silla hacia la derecha.

4.2.11.1.4. Movimiento de los brazos hacia la izquierda

La rotación del brazo hacia la izquierda, detectada por el MPU6050, se traduce en una señal que se procesa en el ESP32 del emisor. Tras confirmar el gesto de "giro a la izquierda", se envía la información codificada al ESP32 del receptor. Este último, al procesar la señal, identifica el comando correspondiente y envía las señales de control a uno de los circuitos integrados L293D. En este caso, el L293D activa únicamente los dos motores DC del lado izquierdo de la silla, estableciendo la dirección de giro adecuada para que las llantas omnidireccionales de ese lado impulsen el giro de la silla hacia la izquierda.

5. MARCO METODOLÓGICO

5.1.1. Etapas del prototipo

A continuación, se detallan las etapas más importantes para el desarrollo del proyecto.

5.1.2. Diseño del circuito electrónico

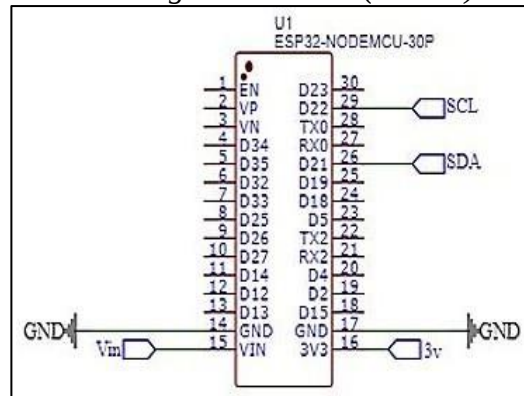
El proceso consiste en diseñar el esquema y la distribución de los componentes electrónicos que conformarán tanto el circuito del emisor como el del receptor.

Para el diseño del emisor, se empleó un módulo ESP32 de 30 pines, que actúa como el controlador principal del sistema, junto con un giroscopio-acelerómetro MPU6050, encargado de captar los movimientos y enviar la información correspondiente. Además, se incluyó una bornera, utilizada para conectar la batería y suministrar la energía necesaria al circuito.

A continuación, en la figura 22, se presenta la distribución de los pines del ESP32, donde se indica exactamente la asignación de cada conexión esencial. Entre ellas, el GND (tierra), necesario para cerrar el circuito eléctrico; el Vin (voltaje de entrada), a través del cual se alimenta el módulo; la salida de 3V, utilizada para alimentar el MPU6050; y las líneas de comunicación SCL (Serial Clock Line) y SDA (Serial Data Line), responsables de la transmisión de datos entre el ESP32 y el sensor MPU6050 mediante el protocolo I2C.

Figura 22

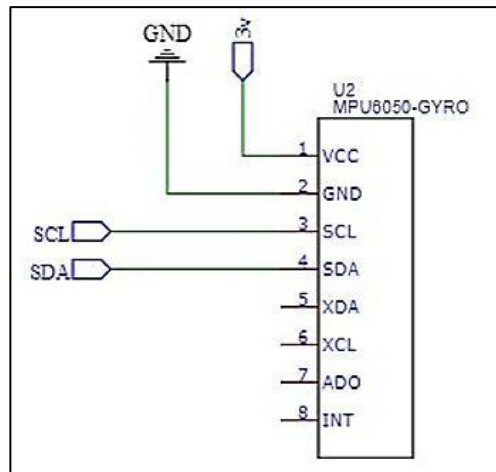
Esquemático electrónico del control gestual ESP32 (Emisor)



Así mismo se muestra en la figura 23 la distribución de los pines del MPU6050, donde se indica exactamente dónde llegan las señales generadas por el ESP32.

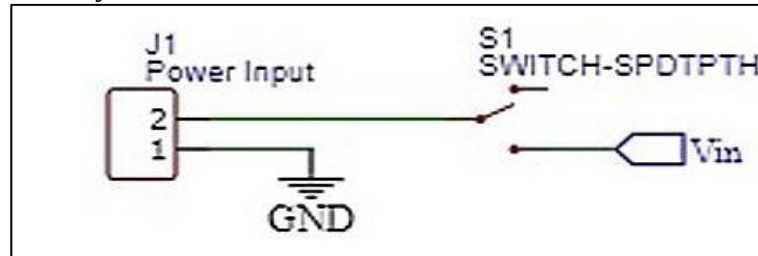
Figura 23

Esquemático giroscopio MPU



Como parte final del desarrollo del sistema electrónico del emisor se presenta en la figura 24 la conexión de la bornera, detallando la distribución de los pines esenciales, como GND (tierra) y Vin (voltaje de entrada), los cuales permiten la correcta alimentación del circuito. Además, se incorporó un interruptor que cumple una función clave en el sistema, ya que facilita el encendido y apagado del dispositivo de manera sencilla y segura.

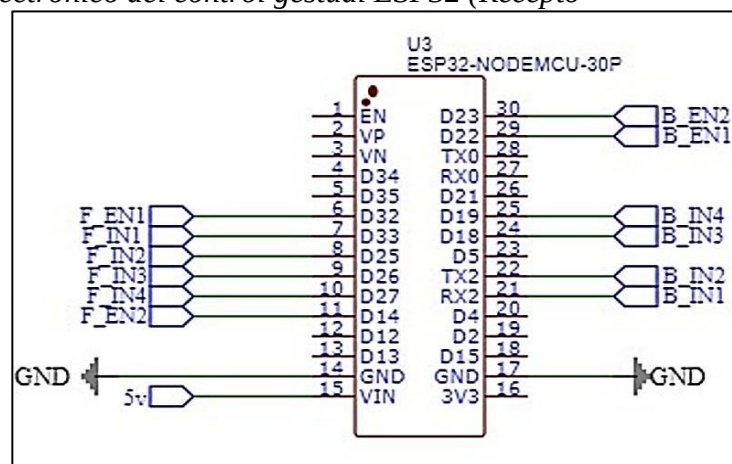
Figura 24
Esquemático bornera y switch



Para el diseño del receptor también se utilizó un módulo ESP32 de 30 pines que actúa como controlador principal el cual se complementa con el driver L293DN que permite controlar motores de corriente continua (DC) y motores paso a paso de manera eficiente, un regulador de voltaje AMS1117.

En la figura 25, se presenta la distribución de los pines del ESP32 de los motores delanteros y traseros, donde se indica exactamente la asignación de cada conexión esencial. Entre ellas, las señales EN (Enable- Habilitación) que se usan para activar o desactivar el motor, las señales IN (Input-Entrada) que permite enviar una señal de entrada desde un microcontrolador o sensor y puede controlar la dirección de giro en motores, GND (tierra) necesario para cerrar el circuito eléctrico.

Figura 25
Esquemático electrónico del control gestual ESP32 (Recepto



En la figura 26 y 27, se presenta la configuración de los pines del driver L293DN, encargado de controlar hasta dos motores. Se detallan las conexiones por las cuales el ESP32 envía las señales de control a través de los pines EN (Enable- Habilidad) IN (Input-Entrada). Además, se ilustra la conexión específica de cada motor, tanto los delanteros como los traseros.

Figura 26

Esquemático L293DN (motores delanteros)

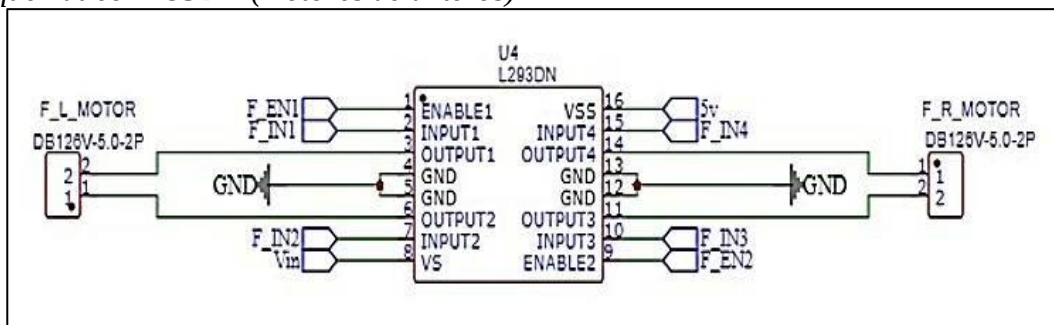
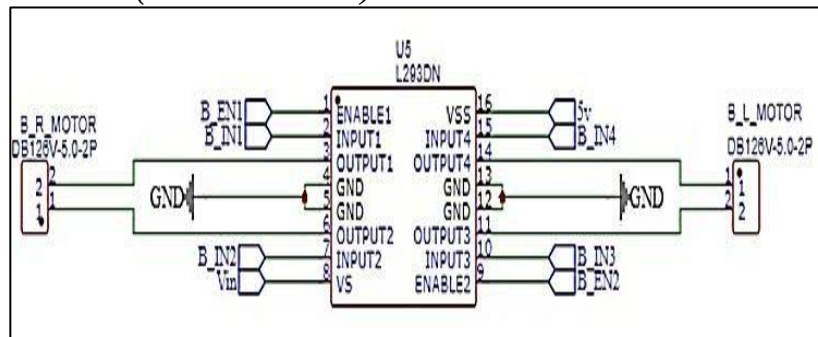


Figura 27

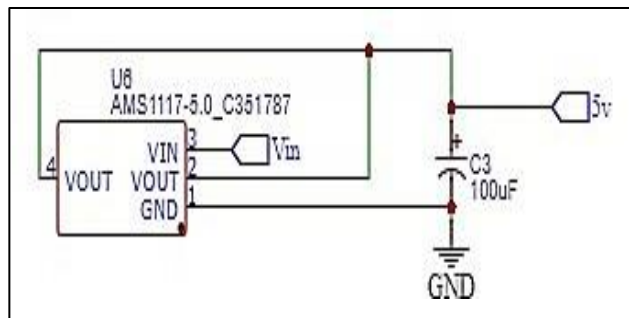
Esquemático L293DN (motores traseros)



Así mismo se muestra en la figura 28 la conexión de los pines del AMS1117 el cual se encuentra respaldado por un capacitor de 100uf y se detalla donde llega el Vin y los 5V.

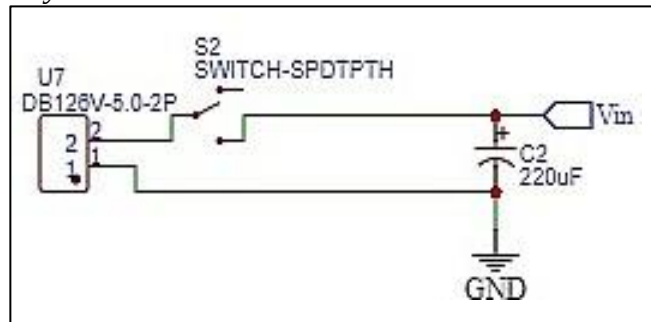
Figura 28

Esquemático AMS1117



Al igual que el emisor, el receptor lleva un capacitor de 220uf, una bornera y un interruptor el cual facilita el encendido y apagado del dispositivo de manera sencilla y segura, como se visualiza en la figura 29.

Figura 29
Esquemático bornera y switch.

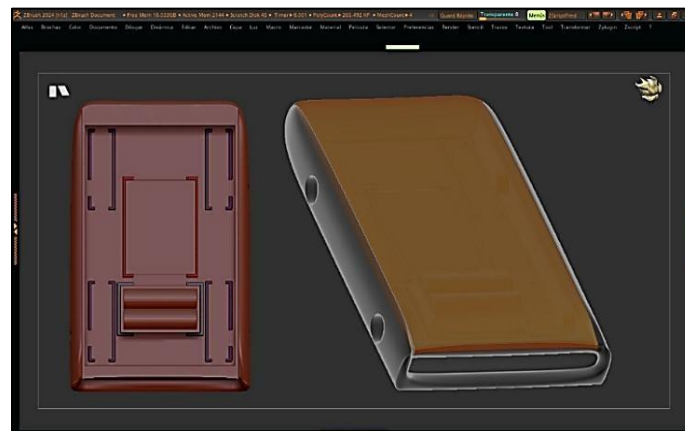


5.1.3. Modelado en ZBrush

5.1.3.1. Diseño prototipo silla de ruedas

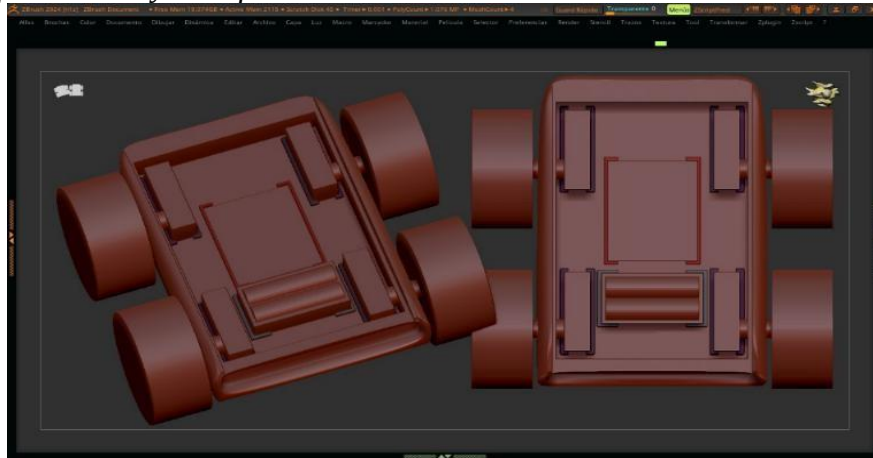
En base al concepto que se tenía en mente para el diseño de la silla de ruedas, se llevó a cabo el desarrollo del modelo digital utilizando el software ZBrush como se visualiza en la figura 30. Durante este proceso, se inició con el uso de formas geométricas básicas, como cubos y cilindros, las cuales fueron transformadas y refinadas mediante diversas herramientas del software, incluyendo deformadores y transformadores. Estas herramientas permitieron modificar la estructura inicial de las primitivas, agregando detalles y adaptándolas progresivamente hasta alcanzar la forma final deseada.

Figura 30
Uso de primitivas



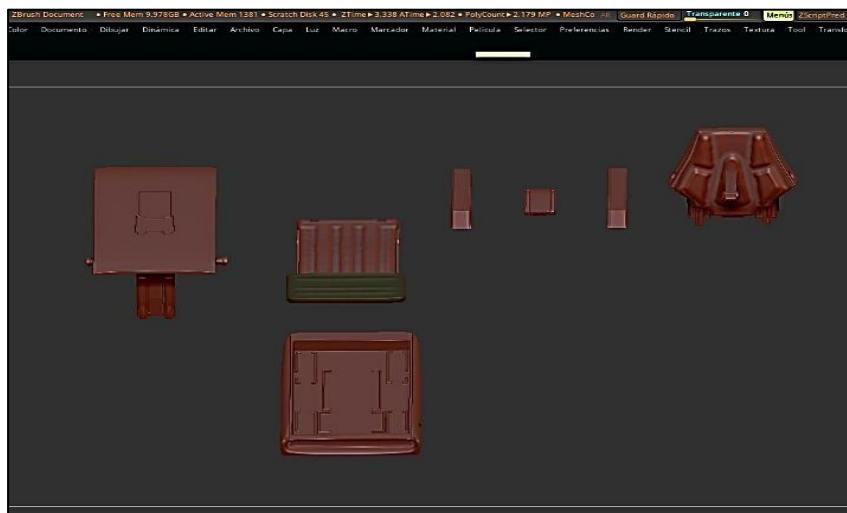
Cada componente de la silla fue construido a partir de la combinación de múltiples primitivas, predominando el uso de cubos debido a su adaptación en la conformación de las distintas secciones. Esto facilitó la creación de un modelo más preciso y detallado, asegurando que todas las partes encajaran correctamente en la fase de ensamblaje, se puede observar en la figura 31 el uso de deformadores transformadores.

Figura 31
Uso de deformadores y transformadores



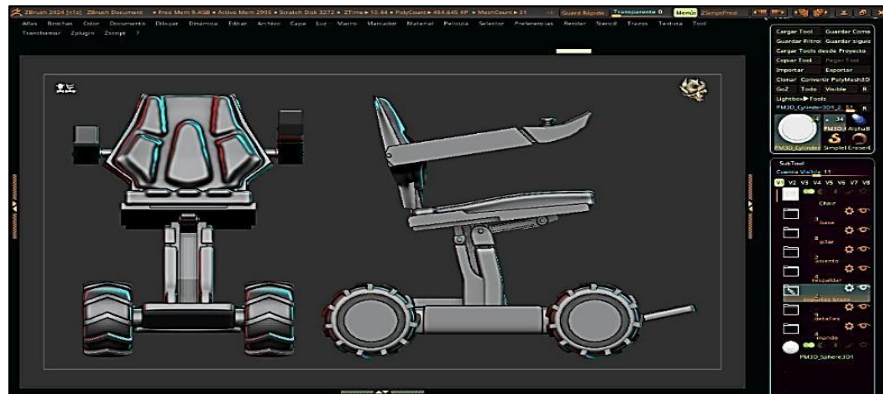
Finalizado el modelado, se procedió a la preparación del diseño para su impresión en 3D. Para optimizar este proceso, el modelo se desglosó en diferentes secciones independientes, como se observa en la figura 32, tales como la base, el respaldo, los brazos, el asiento y el pilar central. Esta segmentación resulta fundamental, ya que permite una impresión más eficiente y reduce el riesgo de errores o deformaciones en las piezas finales.

Figura 32
Piezas individuales base silla de ruedas en Zbru



Tras la preparación y optimización de cada componente, los archivos fueron exportados en formatos compatibles con impresión 3D, como **.OBJ** y **STL**. En la figura 33 se puede observar el modelado completo y listo para exportar. Estos formatos aseguran que el modelo sea interpretado correctamente por el software de impresión, facilitando la generación del código necesario para su fabricación en la impresora 3D.

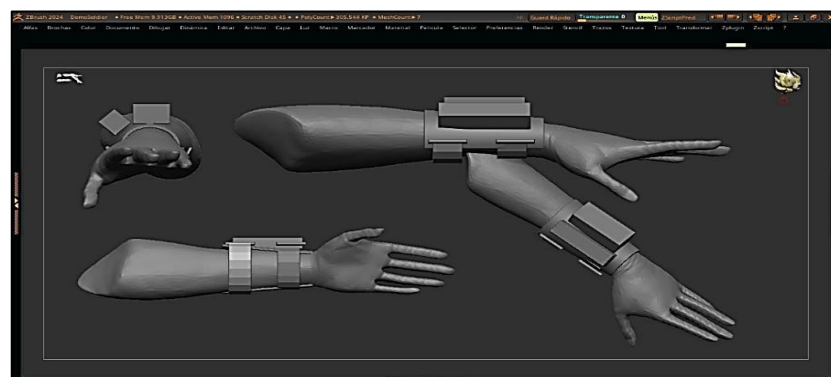
Figura 33
Render final silla de ruedas



5.1.3.2. Diseño prototipo control gestual

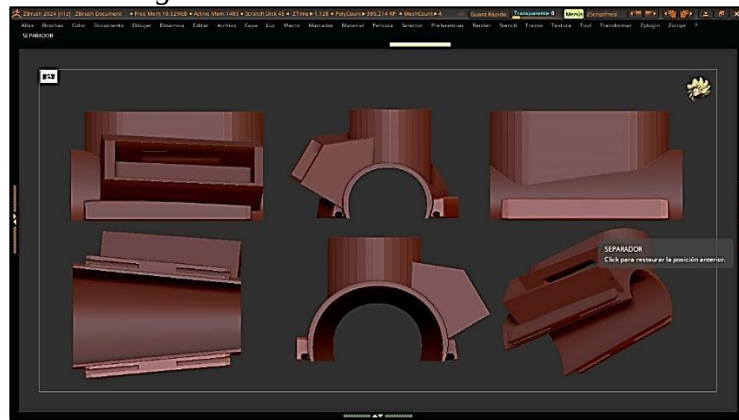
Para el diseño del brazalete se siguió el mismo enfoque que la silla de ruedas. En este caso se inició con la toma de medidas precisas del antebrazo de una persona con proporciones promedio, considerando tanto el diámetro como la circunferencia en diferentes puntos estratégicos. Con estas dimensiones como referencia, se procedió a escalar un cubo base en el entorno 3D, el cual sirvió como estructura inicial para simular el brazalete en un modelo digital del brazo como se puede ver en la figura 34.

Figura 34
Simulación de brazalete en brazo digital



A partir de esta base, se comenzaron a incorporar los detalles y elementos al brazalete, definiendo estratégicamente la ubicación de componentes como la batería y la placa electrónica. Para facilitar la integración del sistema, se diseñó un canal interno que permitiría el paso ordenado de los cables, asegurando que quedaran protegidos y organizados dentro de la estructura como se puede ver en la figura 35. Además, se añadieron soportes específicos para las correas de sujeción, garantizando estabilidad y comodidad al momento de utilizar el brazalete.

Figura 35
Piezas individuales control gestual Zbrush



Una vez finalizado el diseño, se procedió a la preparación del modelo para su impresión en 3D. Para optimizar el proceso de fabricación del brazalete, se decidió dividir la impresión en dos partes, lo que permitió una mejor calidad estructural y mayor seguridad en el ensamblaje final.

5.1.3.3. Impresión 3D

Una vez finalizado el diseño y exportados los archivos en los formatos adecuados, se procedió a su transferencia al software de preparación para impresión 3D, conocido como slicer, cuya función es convertir los modelos digitales en un conjunto de instrucciones que la impresora 3D pueda interpretar. Para este proceso, se empleó el software CURA, ampliamente reconocido por su capacidad de optimización y compatibilidad con diversas impresoras 3D.

Dentro del slicer, se realizó una configuración de cada pieza, asegurando que estuviera correctamente orientada sobre la plataforma de impresión. Este ajuste sirve para mejorar la eficiencia del proceso y reducir la necesidad de soportes estructurales, potenciando el uso del material y minimizando tiempos de producción.

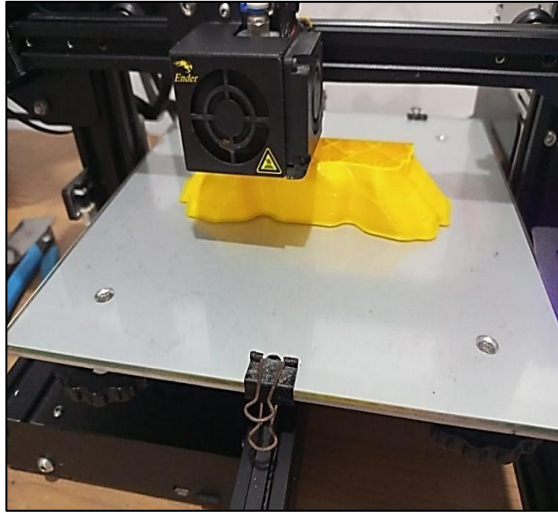
Entre los parámetros críticos configurados se encuentra la altura de capa, la cual incide directamente en la calidad superficial del modelo impreso. Una altura de capa mayor acelera el proceso de impresión, pero genera un acabado con capas más visibles, mientras que una menor altura proporciona un detalle más fino y una textura más homogénea. Para la fabricación de la silla, se estableció una altura de capa de 0.2 mm, considerada un valor intermedio entre resolución y tiempo de impresión, permitiendo obtener un acabado de calidad sin extender innecesariamente el tiempo de fabricación.

Asimismo, se configuró el nivel de relleno interno de las piezas, el cual influye en la resistencia estructural del modelo. En este caso, se utilizó un 10 % de relleno, suficiente para garantizar la integridad mecánica sin incurrir en un consumo excesivo de material.

Para la silla de ruedas el tiempo de impresión varió según la complejidad y el tamaño de cada pieza, registrando duraciones de entre 6 y 10 horas por componente. De manera similar, el peso individual de las piezas osciló entre 50 y 180 gramos, con un consumo total de material superior a 1 kilogramo. Para completar la impresión de todos los componentes de la silla como se observa en la figura 36, la impresora operó de manera continua durante aproximadamente una semana, asegurando la correcta fabricación de cada elemento. Para el brazalete electrónico el proceso de impresión requirió aproximadamente 200 gramos de material y tomó cerca de 16 horas de producción.

Finalizado el proceso de impresión, se llevó a cabo la fase de postproceso, la cual consistió en la limpieza, lijado y ajuste de cada pieza para eliminar irregularidades superficiales y garantizar un encaje preciso en el ensamblaje final. Posteriormente, las partes fueron ensambladas y fijadas en su posición correspondiente, obteniendo como resultado un modelo estructuralmente estable y con un acabado detallado, listo para su evaluación y futuras pruebas funcionales.

Figura 36
Impresión silla de ruedas en 3D



5.1.4. Diseño de placas PCB

Se utiliza el software de diseño EasyEDA el cual cuenta con gran cantidad de herramientas y bibliotecas para facilitar el proceso de diseño electrónico, así mismo es accesible desde cualquier lugar con conexión a internet. En base a los diagramas electrónicos ya explicados se procede al diseño de las placas PCB.

5.1.4.1. Placa PCB Emisor

Se eligen los componentes electrónicos adecuados para el circuito, en este caso los componentes a seleccionar son los siguientes:

- ESP32
- MPU6050
- Interruptor

5.1.4.1.1. Distribución de componentes

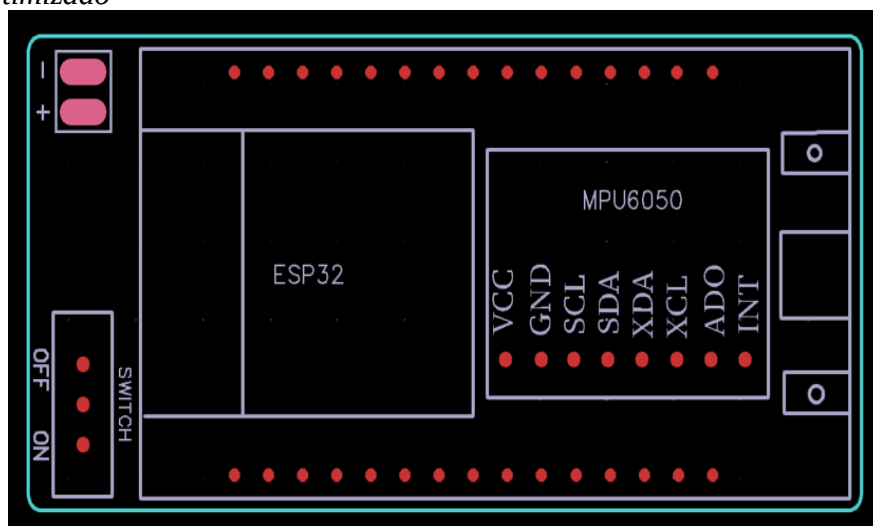
Colocación inicial: Se colocan los componentes en la placa de forma tentativa, considerando su tamaño, función y conexiones. Se busca una distribución equilibrada y organizada.

Figura 37
Distribución de componentes



Optimización: Se ajusta la posición de los componentes para minimizar la longitud de las pistas, evitar cruces y garantizar un buen flujo de señal. Se consideran factores como la disipación de calor, la ubicación de conectores y la estética del diseño.

Figura 38
Diseño optimizado

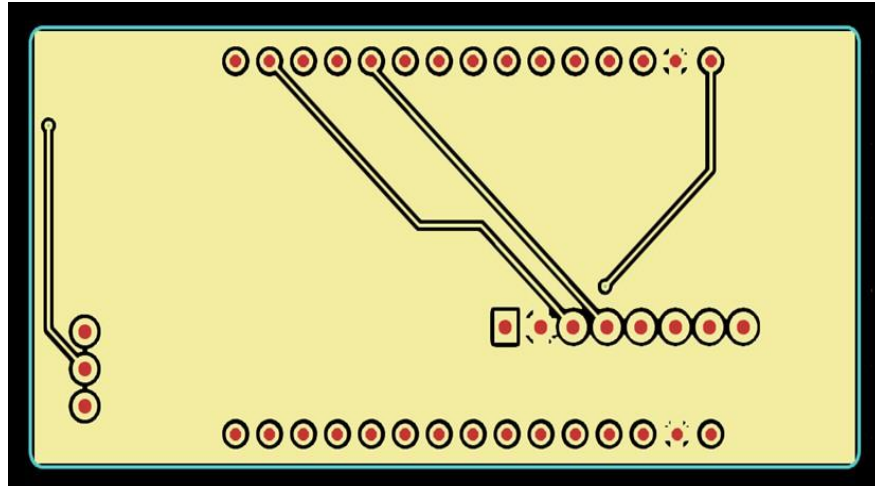


Reglas de diseño: Se aplican reglas de diseño (DRC) para asegurar que el diseño cumple con los estándares de fabricación y evitar errores como pistas demasiado delgadas o espacios insuficientes entre componentes.

5.1.4.1.2. Enrutamiento de pistas

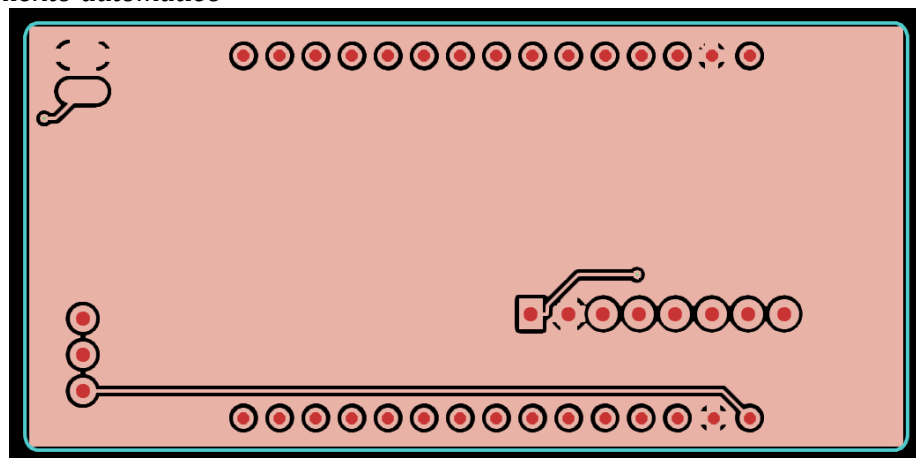
Enrutamiento manual: Se trazan las pistas conductoras una a una, conectando los componentes según el diagrama esquemático. Se utilizan herramientas de enrutamiento del software EDA.

Figura 39
Enrutamiento manual



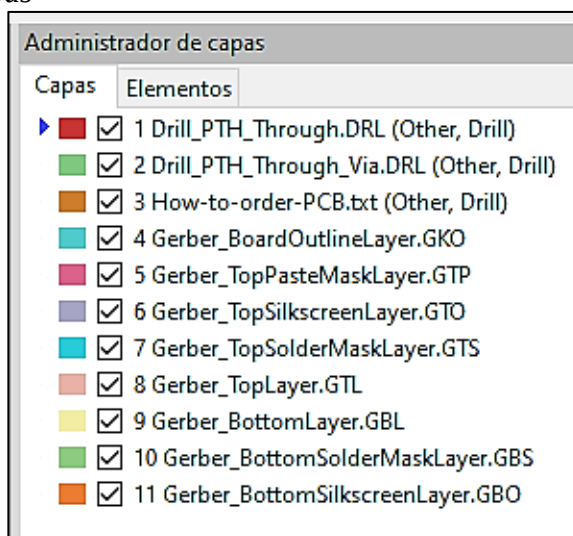
Enrutamiento automático: Se utilizan algoritmos de enrutamiento automático para generar las pistas de forma automática. Se requiere supervisión y ajustes manuales para optimizar el resultado.

Figura 40
Enrutamiento automático



Capas: Se utilizan diferentes capas de la PCB para las pistas, lo que permite diseñar circuitos complejos con alta densidad de componentes.

Figura 41
Administrador de Capas



Vías: Se utilizan vías (orificios que conectan diferentes capas) para enrutar pistas que no pueden ser trazadas en una sola capa.

5.1.4.1.3. Consideraciones adicionales

- Planos de tierra y alimentación: Se crean planos de tierra y alimentación para proporcionar una conexión estable y de baja impedancia a los componentes.
- Integridad de señal: Se consideran aspectos como la impedancia de las pistas, la longitud de las trazas y el ruido para garantizar la calidad de la señal.
- Diseño térmico: Se evalúa la disipación de calor de los componentes y se toman medidas para evitar el sobrecalentamiento.
- Fabricación: Se consideran las capacidades del fabricante de PCBs, como el tamaño mínimo de pista, el espacio mínimo entre pistas y el número de capas.

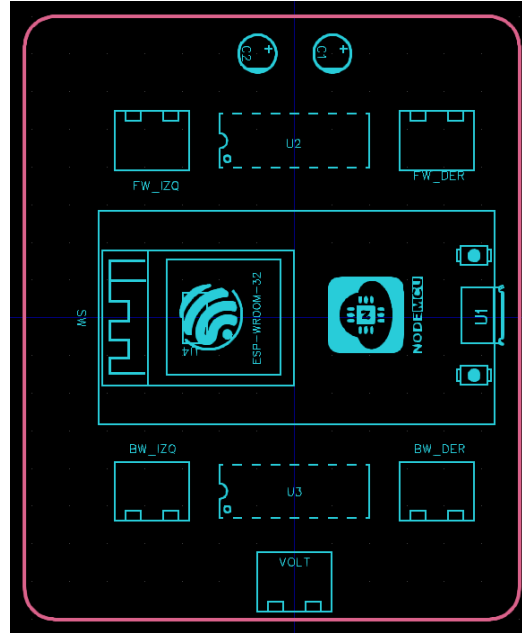
5.1.4.1.4. Verificación del diseño

DRC: Se ejecutan comprobaciones de reglas de diseño para identificar errores y asegurar que el diseño cumple con los estándares.

Figura 42
DRC

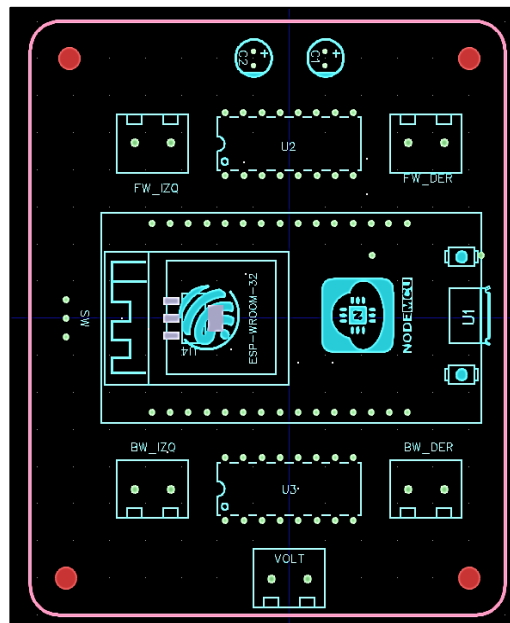


Figura 43
Distribución de componentes de colocación inicial



Optimización: Se ajusta la posición de los componentes para minimizar la longitud de las pistas, evitar cruces y garantizar un buen flujo de señal. Se consideran factores como la disipación de calor, la ubicación de conectores y la estética del diseño.

Figura 44
Diseño optimizado



Reglas de diseño: Se aplican reglas de diseño (DRC) para asegurar que el diseño cumple con los estándares de fabricación y evitar errores como pistas demasiado delgadas o espacios insuficientes entre componentes.

5.1.4.3. Enrutamiento de pistas

Enrutamiento manual: Se trazan las pistas conductoras una a una, conectando los componentes según el diagrama esquemático. Se utilizan herramientas de enrutamiento del software EDA.

Figura 45
Enrutamiento Manual

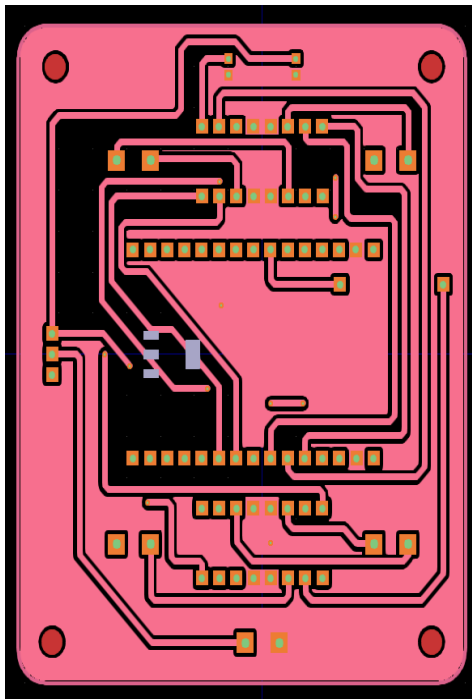
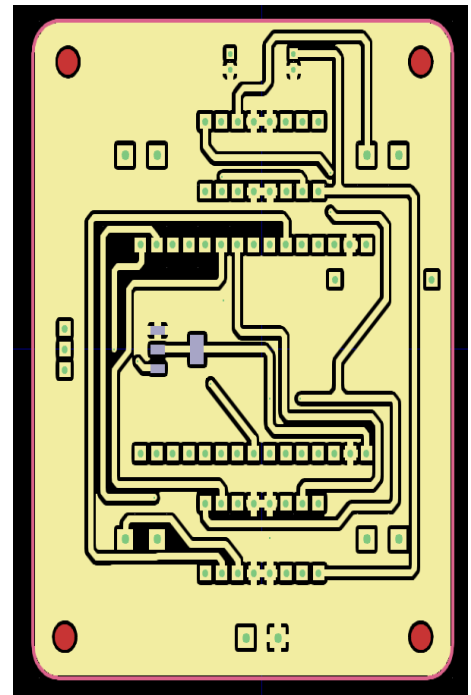


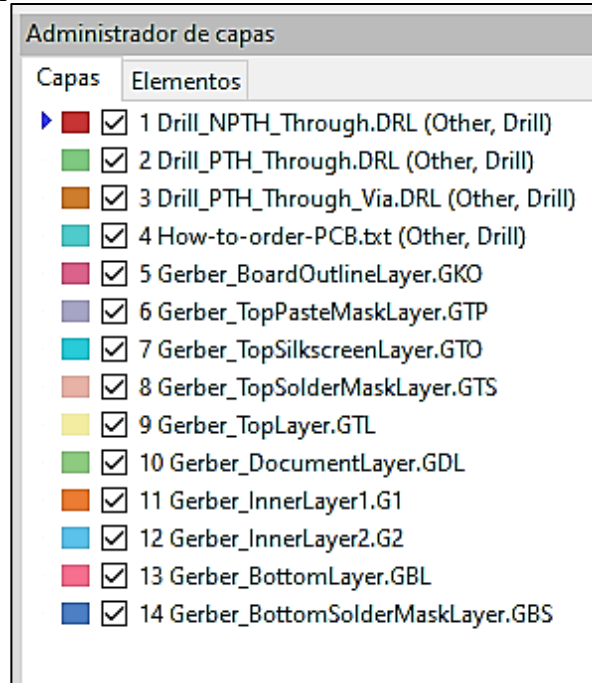
Figura 46
Enrutamiento Manual 2



Enrutamiento automático: Se utilizan algoritmos de enrutamiento automático para generar las pistas de forma automática. Se requiere supervisión y ajustes manuales para optimizar el resultado.

Capas: Se utilizan diferentes capas de la PCB para las pistas, lo que permite diseñar circuitos complejos con alta densidad de componentes.

Figura 47
Administrador de Capas



Vías: Se utilizan vías (orificios que conectan diferentes capas) para enrutar pistas que no pueden ser trazadas en una sola capa.

5.1.4.3.1. Consideraciones adicionales

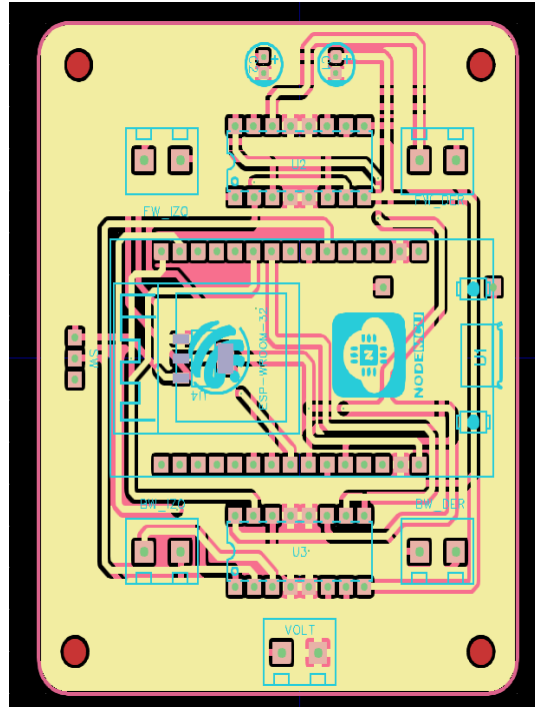
- Planos de tierra y alimentación: Se crean planos de tierra y alimentación para proporcionar una conexión estable y de baja impedancia a los componentes.
- Integridad de señal: Se consideran aspectos como la impedancia de las pistas, la longitud de las trazas y el ruido para garantizar la calidad de la señal.
- Diseño térmico: Se evalúa la disipación de calor de los componentes y se toman medidas para evitar el sobrecalentamiento.
- Fabricación: Se consideran las capacidades del fabricante de PCBs, como el tamaño mínimo de pista, el espacio mínimo entre pistas y el número de capas.

5.1.4.3.2. Verificación del diseño

DRC: Se ejecutan comprobaciones de reglas de diseño para identificar errores y asegurar que el diseño cumple con los estándares.

Simulación: Se realizan simulaciones para verificar el funcionamiento del circuito y la integridad de la señal.

Figura 48
Verificación del diseño



5.1.5. Ensamblaje de Componentes Electrónicos

El ensamblaje de los componentes electrónicos comenzó con la implementación de un prototipo inicial como se muestra en las figuras 49 y 50. Este enfoque permitió realizar un montaje provisional que facilitó la conexión de los distintos elementos, mediante cables y soldadura.

Esto ofreció flexibilidad para realizar ajustes en el diseño y solucionar posibles errores en las conexiones antes de trasladar el circuito a una placa de circuito impreso (PCB). Durante esta etapa, se llevó a cabo un proceso exhaustivo de pruebas funcionales para verificar la correcta interacción entre los componentes y garantizar la estabilidad del sistema.

Figura 49
Prototipo inicial vista posterior

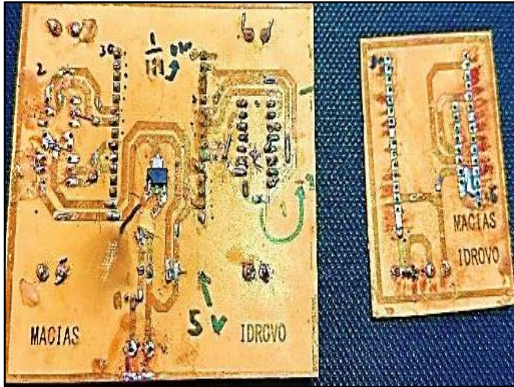
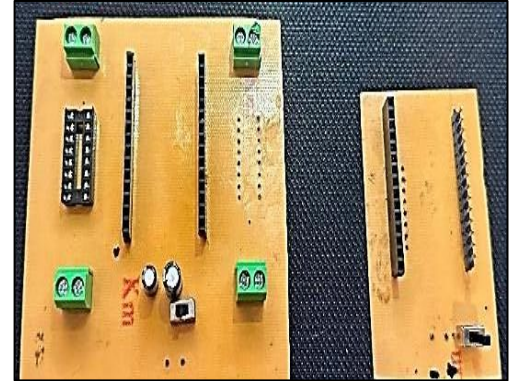
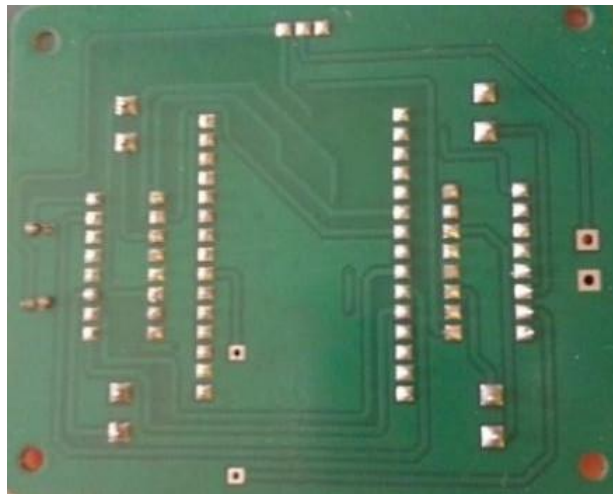


Figura 50
Prototipo inicial vista superior



Una vez validado el funcionamiento, el diseño final del circuito se trasladó a una PCB personalizada. Las PCBs se fabricaron siguiendo especificaciones precisas, y los componentes fueron montados mediante soldadura, cuidando aspectos como la polaridad, la continuidad de las conexiones, y la disposición adecuada de los elementos. Como se muestra en la figura 51.

Figura 51
Placa PCB del receptor



6. RESULTADOS

6.1.Pruebas

6.1.1. Análisis de Resultados

El principal objetivo de las pruebas realizadas fue lograr una calibración precisa del giroscopio, específicamente mediante la evaluación de los muestreos en los ejes tales como X, Y y Z, para garantizar que los motores respondieran de manera óptima a las señales de control gestual. Esto incluyó verificar la sensibilidad del sensor y su capacidad para interpretar correctamente los movimientos en diferentes condiciones.

Para asegurar la validez de los resultados, las pruebas se llevaron a cabo en un entorno real, replicando las condiciones de uso cotidiano del sistema. Este enfoque permitió analizar el desempeño del prototipo en un contexto práctico, evaluando variables clave como la precisión en la interpretación de gestos y la rapidez en la respuesta de los motores frente a los comandos generados por el giroscopio.

6.1.2. Evaluación de la Precisión

Durante el proceso de pruebas, se realizaron múltiples intentos para evaluar la precisión del sistema en la detección de gestos y su correcta interpretación. Sin embargo, se identificaron problemas significativos relacionados con la calibración del giroscopio y la comunicación entre el emisor y el receptor. Estas dificultades impactaron en la capacidad del sistema para interpretar de manera constante los gestos realizados, lo que generó variaciones en los resultados obtenidos.

Aunque se llevaron a cabo ajustes en el software y en la configuración del giroscopio, la comunicación inalámbrica presentó interferencias ocasionales, lo que redujo la estabilidad del sistema en ciertos escenarios. Estos problemas resaltan la necesidad de realizar optimizaciones en los algoritmos de procesamiento y en la sincronización entre los dispositivos, con el objetivo de mejorar la precisión y la fiabilidad general del sistema en futuras iteraciones.

6.1.3. Análisis del tiempo de respuesta

Durante las pruebas realizadas, no se pudo establecer un tiempo promedio de respuesta debido a inconsistencias en la calibración de los ejes X, Y y Z del giroscopio, lo que limitó la capacidad del sistema para procesar los movimientos de manera eficiente. La falta de valores óptimos en estos ejes provocó que los comandos generados no fueran interpretados adecuadamente, afectando directamente la capacidad del prototipo para ejecutar los movimientos esperados.

El tiempo de respuesta del sistema, entendido como el intervalo entre la detección de un gesto y la ejecución del comando correspondiente, es un parámetro crítico en aplicaciones de control gestual. En este caso, la ausencia de sincronización entre el emisor y el receptor generó demoras significativas en la comunicación, evidenciando una inestabilidad en la transmisión de datos. Este problema, además, se agravó en escenarios donde se enviaban comandos consecutivos o cuando había interferencias externas en la comunicación inalámbrica.

El método utilizado para medir el tiempo de respuesta incluyó un análisis de la señal en tiempo real, monitoreando el lapso entre la entrada del gesto y la activación de los motores. Sin embargo, las interrupciones frecuentes en el flujo de datos y la falta de un algoritmo de corrección robusto limitaron la precisión del sistema en esta etapa. Estas fallas resaltan la necesidad de implementar un sistema de filtrado y sincronización para mejorar el desempeño en futuras iteraciones.

En términos técnicos, la dependencia del protocolo ESP-NOW para la comunicación inalámbrica mostró limitaciones en condiciones de ruido ambiental elevado, lo que podría ser mitigado con técnicas como la optimización de la frecuencia de transmisión, el ajuste del buffer de datos, o la inclusión de redundancia en los paquetes enviados.

En el desarrollo del proyecto, uno de los hitos principales fue la construcción física de las placas electrónicas y el diseño 3D del prototipo, los cuales ya han sido completados con éxito. Estas etapas implicaron la materialización del diseño conceptual en componentes tangibles fundamentales para la implementación y prueba del sistema. El desarrollo de las placas incluyó el montaje de los circuitos

y la integración de los componentes electrónicos necesarios para el control de la silla de ruedas eléctrica.

Por otro lado, el diseño 3D del prototipo permitió la fabricación de las piezas estructurales mediante impresión 3D, garantizando la precisión y la adaptabilidad necesarias para cumplir con los requerimientos del sistema. Este diseño incluye soportes personalizados para los motores, el sensor MPU6050 y otros módulos electrónicos, asegurando una integración eficiente y un ensamblaje robusto.

Figura 52

Prototipo Silla de Ruedas frontal



Con las placas y el diseño 3D ya realizados, se dispone de la infraestructura física necesaria para avanzar a la etapa de pruebas funcionales y calibración. Este avance representa un paso crucial en el proyecto, ya que valida la transición exitosa desde la planificación y diseño hacia la implementación práctica.

La finalización de esta etapa sienta las bases para evaluar el desempeño del sistema en condiciones reales, alineándose con los objetivos establecidos. En la figura 53 se puede

observar el resultado final de impresión u ensamblaje del prototipo de silla de ruedas y brazalete electrónico.

Figura 53
Brazalete 3D



7. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

En la siguiente tabla se detallan las actividades planificadas para el desarrollo del proyecto, distribuidas a lo largo de los meses del año.

Tabla 2
Cronograma de actividades

Investigación y planificación	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES									
	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	
Investigación sobre las diferentes discapacidades motrices que existen	X	X	X							
Investigación sobre las diferentes sillas de ruedas		X	X							
Definición de los objetivos del proyecto		X	X							
Planificación del diseño y desarrollo del prototipo		X	X							
Diseño del prototipo										
Especificación de requisitos de silla de ruedas				X						
Modelado 3D del prototipo				X						
Diseño PCB's				X						
Selección de servomotores, ruedas y desarrollo sistema de control electrónico				X	X					
Implementación de Hardware										
Impresión del modelado 3D						X				

Instalación de servomotores, ruedas y sistema electrónico	X	X		
Instalación de acelerómetro y giroscopio u otros componentes electrónicos		X		
Diseño de programación				
Programación de algoritmos de navegación para la silla de ruedas		X	X	
Desarrollo de Código en Arduino IDE		X	X	
Pruebas				
Pruebas de funcionalidad del prototipo de silla de ruedas en un entorno controlado			X	X
Identificación y solución de errores			X	X
Documentación y presentación				
Preparación de informes técnicos y manuales de usuario				X X

8. PRESUPUESTO

En la siguiente Tabla 3 se detalla la lista de materiales con sus respectivos costos para su implementación en el prototipo.

Tabla 3
Presupuesto del proyecto

Componentes	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Horas Ingeniería	150	\$3,00	\$473
Modulo ESP32-32 WIFI Bluetooth	5	\$12,00	\$72,00
(30 pines)			
L293D IC	2	\$3,00	\$6,00
MPU6050	1	\$3,00	\$3,00
Motor	4	\$3,00	\$12,00
Ruedas omnidireccionales	4	\$12,50	\$50,00
AMS1117 5v regulador	1	\$1,00	\$1,00
Borneras 2 servicios	5	\$0,20	\$1,00
On/Off Switch	2	\$0,50	\$1,00
Baterías de litio	3	\$7,00	\$21,00
Filamento	4	\$30,00	\$120,00
Placas PCB	10	\$5,50	\$55,00
Impresión 3D	2	\$200	\$400
Total			\$1215

9. CONCLUSIONES

Resalta el desarrollo de un sistema de control gestual como una alternativa viable para mejorar la movilidad de personas con discapacidad físico-motora. A través de la integración de tecnologías como el MPU6050 y el ESP32, se logró implementar un prototipo funcional que cumple con los objetivos establecidos, ofreciendo una solución práctica y accesible. Este sistema demostró su capacidad para interpretar gestos y transformarlos en comandos de movimiento.

El proceso de diseño, que incluyó el modelado en 3D, la programación del sistema y las pruebas funcionales permitió abordar de manera estructurada los desafíos técnicos y prácticos, asegurando la confiabilidad y adaptabilidad del prototipo.

No solo se evidencia la posibilidad de integrar tecnología avanzada en soluciones asistivas, sino que también subraya la importancia de desarrollar dispositivos que contribuyan a la autonomía y calidad de vida de sus usuarios. Si bien se alcanzaron los objetivos planteados, los resultados obtenidos también abren la puerta a futuras optimizaciones y aplicaciones en el ámbito de la movilidad asistida, estableciendo una base sólida para proyectos similares que busquen transformar la tecnología en una herramienta para el bienestar humano.

10. RECOMENDACIONES

Mejorar la ergonomía del prototipo es fundamental para garantizar que sea cómodo y se adapte fácilmente a diferentes usuarios. Ajustar la ubicación del sensor y rediseñar el soporte podría ofrecer una experiencia más intuitiva y funcional, optimizando su uso cotidiano.

Extender las funcionalidades del sistema, incluyendo la posibilidad de patrones gestuales mediante entrenamientos o la conexión con aplicaciones móviles con inteligencia artificial, brindaría mayor versatilidad. Esto permitiría ajustarlo a las necesidades específicas de cada usuario, haciéndolo más práctico y eficiente.

Llevar a cabo pruebas con usuarios finales y explorar la posibilidad de producción a mayor escala son pasos importantes para validar y mejorar el prototipo. Esto no solo permitiría ajustar detalles técnicos, sino también evaluar su accesibilidad económica y su potencial impacto como solución asistiva.

11. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- ❖ Aline de Mesquita. (Enero de 2021). *Amputación y salud: una revision sistematica* . (A. d. Dummar, Ed.) Recuperado el 16 de Agosto de 2024, de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/60268/TFM_AlinedeMesquitaDummar.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- ❖ ATscale. (5 de junio de 2019). *Gaps and solutions in assistive technology*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2024, de <https://www.atscale.com/blog/data-architecture-modernization-atscales-release-2019-1/>
- ❖ Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades - CONADIS. (Diciembre de 2024). *Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades*. Recuperado el 14 de Diciembre de 2023, de Estadísticas de Discapacidad: <https://www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadisticas-de-discapacidad/>
- ❖ Côté-Allard, U., Fall, C. L., Drouin, A., Campeau-Lecours, A., Gosselin, C., Glette, K., Laviolette, F., & Gosselin, B. (s.f.). Deep Learning for Electromyographic Hand Gesture Signal Classification Using Transfer Learning. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 27(4), págs. 760–771. Recuperado el 26 de Enero de Noviembre, de <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2019.2896269>
- ❖ FEDOP. (10 de noviembre de 2019). *www.fedop.org*. Recuperado el 20 de noviembre de 2024, de fedop: <https://fedop.org/noticias/la-diabetes-primera-causa-de-amputacion-en-espana/>
- ❖ International Society for Prosthetics and Orthotics . (2023). *ISPO World Congress 2023*. Recuperado el 26 de diciembre de 2023, de <https://www.ispo-congress.com/en/about/retrospect/world-congress-2023/>
- ❖ Maribel Pagán Delgado. (2020). *CEPSI*. Recuperado el 30 de Enero de 2024, de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://rcm1.rcm.upr.edu/consejeriasicologia/wp-content/uploads/sites/6/2020/10/CECSI_Capsulas_75.pdf
- ❖ Mitra, S., & Acharya, T. (2007). Gesture recognition: A survey. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, págs. 311-324.

- ❖ Montenegro Jurado, C. R., & Villagran Salazar , E. J. (2008). *Diseño e implementación de un prototipo de silla de ruedas eléctrica para la enseñanza en el manejo, conducción y orientación a personas con limitaciones físicas y adultos mayores*. Escuela Politécnica del Ejército, Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones . Sangolqui: Escuela Politécnica del Ejército. Recuperado el 10 de Diciembre de 2024

- ❖ Noraini Mohamed. (2017). *A Review of the Hand Gesture Recognition*. Recuperado el 28 de Enero de 2025, de IEEE Access: https://www.researchgate.net/publication/356400301_A_Review_of_the_Hand_Gesture_Recognition_System_Current_Progress_and_Future_Directions/fulltext/619861b33068c54fa504a1c8/A-Review-of-the-Hand-Gesture-Recognition-System-Current-Progress-and-Future-Directi

- ❖ OMS. (1 de Octubre de 2024). *Organización Mundial de la Salud*. Recuperado el 30 de Junio de 2024, de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ageing-and-health>

- ❖ OMS. (2 de Enero de 2024). *Organización Mundial de la Salud*. Recuperado el 19 de octubre de 2024

- ❖ Ordoñez, X. A. (2023). *Diseño e implementación de un prototipo automatizado de silla de ruedas con propulsión eléctrica basada en tecnología de bajo coste* (Primera ed.). Loja: Universidad Nacional de Loja. Recuperado el 10 de Enero de 2025

- ❖ Organización Mundial de la Salud. (s.f.). *Organización Panamericana de la Salud*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: <https://www.paho.org/es/temas/enfermedades-no-transmisibles>

- ❖ Organización Panameriacana de la Salud. (s.f.). *Paho.org*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2023, de <https://www.paho.org/es/temas/enfermedades-cardiovasculares>

- ❖ Population Aging. (31 de Octubre de 2022). *World Bank*. Recuperado el 13 de julio de 2024, de Societal Aging: <https://www.worldbank.org/en/topic/pensions/brief/societal-aging>

- ❖ Rafael Lopez. (16 de Agosto de 2024). *Evidentian University*. Recuperado el 30 de Enero de 2025, de <https://evidentiauniversity.com/blogs/es/clublenguajenoverbal/gestos-expresion-emocional-en-jovenes-y-en-adultos/>
- ❖ Rodríguez-Abreu, Yanetsy; Méndez-Calero, Yasmín; Cañamero-Dinza, . (Mayo de 2022). Consideraciones teóricas sobre la relevancia del estudio acerca de familia, autodeterminación y. 101. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=551771993010>
- ❖ Romero Murillo, D. F. (2021). *Diseño de un prototipo de silla de rueda inteligente con monitoreo GPS para personas sin extremidades*. Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Carrera de Ingeniería en Teleinformática., Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Carrera de Ingeniería en Teleinformática. Guayaquil: Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Carrera de Ingeniería en Teleinformática. Recuperado el 11 de enero de 2025
- ❖ Siddharth S. Rautaray. (2012). *Vision based hand gesture recognition for human computer interaction: a survey*. Recuperado el 15 de enero de 2024, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-012-9356-9#citeas>
- ❖ Worl Health Organization. (28 de Septiembre de 2001). Informe sobre la salud en el mundo 2001: Los trastornos mentales afectan a una de cada cuatro personas. Obtenido de <https://www.who.int/news/item/28-09-2001-the-world-health-report-2001-mental-disorders-affect-one-in-four-people>
- ❖ Zhengyou Zhang. (2012). Microsoft Kinect Sensor and Its Effect. Recuperado el 11 de Enero de 2024, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6190806>
- ❖ Electric Mobility. (2024). iChair Sky - Silla de ruedas eléctrica. MedicalExpo. <https://www.medicalexpo.es/prod/electric-mobility/product-76086-1055460.html>
- ❖ STMicroelectronics. (2025). STMicroelectronics: Our technology starts with you. https://www.st.com/content/st_com/en.html
- ❖ Advanced. (2007). *Advanced Monolithic Systems - home*. <http://www.advanced-monolithic.com/>
- ❖ TDK Corporation. (2025). *TDK Corporation*. TDK. <https://www.tdk.com/en/index.html>
- ❖ Interroll Group. (2025). Interroll Group. <https://www.interroll.com/es>

- ❖ Kinmore Motor (2024) Shenzhen Kinmore Motor Co., Ltd. *Brushed DC Motor Archives*.
<https://kinmore.com/product/brushed-dc-motor/>
- ❖ Arduino (2025) <https://www.arduino.cc/>
- ❖ ZBrush (2025) Software de esculpido digital.
https://www.maxon.net/es/zbrush?srsltid=AfmBOoq5wHwRUZXGpqzRGdM9aU_U4uqtSWko-_Mr2LSKJZy3OzTxW8Xg
- ❖ EasyEDA (2024) - Online PCB design & circuit simulator.<https://easyeda.com/>
- ❖ Allan Pease. (2012) Comunicación no verbal (“El Lenguaje del Cuerpo”).

12. ANEXOS

12.1. ANEXO 1: CÓDIGO DEL MODULO EMISOR (BRAZALETE DE CONTROL GESTUAL)

```
// Emisor
#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050_6Axis_MotionApps20.h"
#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
#include "Wire.h"
#endif

// Variables para el control del MPU6050
MPU6050 mpu;
bool dmpReady = false;
uint8_t devStatus;
uint8_t fifoBuffer[64];
Quaternion q;
VectorFloat gravity;
float ypr[3];

// Dirección MAC del receptor
uint8_t receiverMacAddress[] = {0xBC, 0xDD, 0xC2, 0xD0, 0xB6, 0x78};

typedef struct PacketData {
    byte xAxisValue;
    byte yAxisValue;
    byte zAxisValue;
} PacketData;
PacketData data;

esp_now_peer_info_t peerInfo;

// Callback al enviar datos
void OnDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
    Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "Mensaje enviado correctamente" : "Error al enviar el mensaje");
}

// Configuración inicial del MPU6050
```

```

void setupMPU() {
    Wire.begin();
    Wire.setClock(400000);
    mpu.initialize();
    devStatus = mpu.dmpInitialize();

    if (devStatus == 0) {
        mpu.CalibrateAccel(6);
        mpu.CalibrateGyro(6);
        mpu.setDMPEEnabled(true);
        dmpReady = true;
    } else {
        Serial.println("Error al inicializar el DMP del MPU6050");
    }
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    WiFi.mode(WIFI_STA);

    if (esp_now_init() != ESP_OK) {
        Serial.println("Error al inicializar ESP-NOW");
        return;
    }
    esp_now_register_send_cb(OnDataSent);
    memcpy(peerInfo.peer_addr, receiverMacAddress, 6);
    peerInfo.channel = 0;
    peerInfo.encrypt = false;

    if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK) {
        Serial.println("Error al agregar el receptor");
        return;
    }

    setupMPU();
}

void loop() {
    if (!dmpReady) return;

    if (mpu.dmpGetCurrentFIFOPacket(fifoBuffer)) {
        mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
    }
}

```



```

mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
mpu.dmpGetYawPitchRoll(ypr, &q, &gravity);

int xAxisValue = constrain(ypr[2] * 180 / M_PI, -90, 90);
int yAxisValue = constrain(ypr[1] * 180 / M_PI, -90, 90);
int zAxisValue = constrain(ypr[0] * 180 / M_PI, -90, 90);

// Invertir los ejes X e Y:
data.xAxisValue = map(yAxisValue, -90, 90, 0, 254); // xAxisValue ahora usa yAxisValue
data.yAxisValue = map(xAxisValue, -90, 90, 0, 254); // yAxisValue ahora usa xAxisValue
data.zAxisValue = map(zAxisValue, -90, 90, 0, 254); // zAxisValue sin cambios

esp_now_send(receiverMacAddress, (uint8_t *)&data, sizeof(data));

// Mensajes al monitor serial modificados para coincidir con el receptor:
if (data.yAxisValue < 75) { // Adelante
  Serial.println("Motores moviéndose hacia adelante");
} else if (data.yAxisValue > 175) { // Atrás
  Serial.println("Motores moviéndose hacia atrás");
} else if (data.xAxisValue > 175) { // Girar a la izquierda
  Serial.println("Girando a la izquierda");
} else if (data.xAxisValue < 75) { // Girar a la derecha
  Serial.println("Girando a la derecha");
} else if (data.zAxisValue < 75) { // Inclinación a la izquierda
  Serial.println("Inclinación a la izquierda");
} else if (data.zAxisValue > 175) { // Inclinación a la derecha
  Serial.println("Inclinación a la derecha");
} else {
  Serial.println("Detenido");
}
delay(50);
}
}

```

12.2. ANEXO 2: CÓDIGO DEL MÓDULO RECEPTOR (SILLA DE RUEDAS)

```
#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>
#include <vector>

#define MAX_MOTOR_SPEED 200
#define FORWARD 1
#define BACKWARD 2
#define LEFT 3
#define RIGHT 4
#define TURN_LEFT 5
#define TURN_RIGHT 6
#define STOP 0

struct MOTOR_PINS {
    int pinIN1;
    int pinIN2;
    int pinEn;
    int pwmSpeedChannel;
};

std::vector<MOTOR_PINS> motorPins = {
    {16, 17, 22, 4}, // Motor delantero izquierdo
    {18, 19, 23, 5}, // Motor delantero derecho
    {26, 27, 14, 6}, // Motor trasero izquierdo
    {33, 25, 32, 7}, // Motor trasero derecho
};

typedef struct PacketData {
    byte xAxisValue;
    byte yAxisValue;
    byte zAxisValue;
} PacketData;

PacketData receiverData;
unsigned long lastRecvTime = 0;
#define SIGNAL_TIMEOUT 1000

void OnDataRecv(const uint8_t *mac, const uint8_t *incomingData, int len) {
    if (len > 0) {
        memcpy(&receiverData, incomingData, sizeof(receiverData));
    }
}
```

```

if (receiverData.xAxisValue > 175) {
    processCarMovement(RIGHT, receiverData.xAxisValue);
    Serial.println("Girando a la izquierda");
} else if (receiverData.xAxisValue < 75) {
    processCarMovement(LEFT, receiverData.xAxisValue);
    Serial.println("Girando a la derecha");
} else if (receiverData.yAxisValue < 75) {
    processCarMovement(FORWARD, receiverData.yAxisValue);
    Serial.println("Motores moviéndose hacia adelante");
} else if (receiverData.yAxisValue > 175) {
    processCarMovement(BACKWARD, receiverData.yAxisValue);
    Serial.println("Motores moviéndose hacia atrás");
} else if (receiverData.zAxisValue < 75) {
    processCarMovement(TURN_RIGHT, receiverData.zAxisValue);
    Serial.println("Inclinación a la izquierda");
} else if (receiverData.zAxisValue > 175) {
    processCarMovement(TURN_LEFT, receiverData.zAxisValue);
    Serial.println("Inclinación a la derecha");
} else {
    processCarMovement(STOP, 0);
    Serial.println("Detenido");
}
lastRecvTime = millis();
}
}

void processCarMovement(int inputValue, byte speedValue) {
    bool motorActivation[4];
    switch (inputValue) {
        case FORWARD:
            Serial.println("Motores activados: Delantero izquierdo, Delantero derecho, Trasero izquierdo, Trasero derecho");
            for (int i = 0; i < 4; i++) { motorActivation[i] = true; }
            break;
        case BACKWARD:
            Serial.println("Motores activados: Delantero izquierdo, Delantero derecho, Trasero izquierdo, Trasero derecho");
            for (int i = 0; i < 4; i++) { motorActivation[i] = true; }
            break;
        case LEFT:
            Serial.println("Motores activados: Delantero izquierdo, Trasero derecho");
            motorActivation[0] = true;
            motorActivation[1] = false;
            motorActivation[2] = false;

```

```

    motorActivation[3] = true;
    break;
case RIGHT:
    Serial.println("Motores activados: Delantero derecho, Trasero izquierdo");
    motorActivation[0] = false;
    motorActivation[1] = true;
    motorActivation[2] = true;
    motorActivation[3] = false;
    break;
case TURN_LEFT:
    Serial.println("Motores activados: Delantero derecho, Trasero derecho");
    motorActivation[0] = false;
    motorActivation[1] = true;
    motorActivation[2] = false;
    motorActivation[3] = true;
    break;
case TURN_RIGHT:
    Serial.println("Motores activados: Delantero izquierdo, Trasero izquierdo");
    motorActivation[0] = true;
    motorActivation[1] = false;
    motorActivation[2] = true;
    motorActivation[3] = false;
    break;
case STOP:
    Serial.println("Motores desactivados");
    for (int i = 0; i < 4; i++) { motorActivation[i] = false; }
    break;
}

for (size_t i = 0; i < motorPins.size(); i++) {
    if (motorActivation[i]) {
        if (i == 0 && (inputValue == FORWARD || inputValue == LEFT || inputValue == TURN_RIGHT)) {
            digitalWrite(motorPins[i].pinIN1, HIGH);
            digitalWrite(motorPins[i].pinIN2, LOW);
        } else if (i == 0 && (inputValue == BACKWARD || inputValue == RIGHT || inputValue == TURN_LEFT)) {
            digitalWrite(motorPins[i].pinIN1, LOW);
            digitalWrite(motorPins[i].pinIN2, HIGH);
        } else if (i == 1 && (inputValue == FORWARD || inputValue == RIGHT || inputValue == TURN_LEFT)) {
            digitalWrite(motorPins[i].pinIN1, HIGH);
            digitalWrite(motorPins[i].pinIN2, LOW);
        } else if (i == 1 && (inputValue == BACKWARD || inputValue == LEFT || inputValue == TURN_RIGHT)) {
            digitalWrite(motorPins[i].pinIN1, LOW);
            digitalWrite(motorPins[i].pinIN2, HIGH);
        }
    }
}

```

```

    } else if (i == 2 && (inputValue == FORWARD || inputValue == RIGHT || inputValue == TURN_RIGHT)) {
        digitalWrite(motorPins[i].pinIN1, HIGH);
        digitalWrite(motorPins[i].pinIN2, LOW);
    } else if (i == 2 && (inputValue == BACKWARD || inputValue == LEFT || inputValue == TURN_LEFT)) {
        digitalWrite(motorPins[i].pinIN1, LOW);
        digitalWrite(motorPins[i].pinIN2, HIGH);
    } else if (i == 3 && (inputValue == FORWARD || inputValue == LEFT || inputValue == TURN_LEFT)) {
        digitalWrite(motorPins[i].pinIN1, HIGH);
        digitalWrite(motorPins[i].pinIN2, LOW);
    } else if (i == 3 && (inputValue == BACKWARD || inputValue == RIGHT || inputValue == TURN_RIGHT)) {
        digitalWrite(motorPins[i].pinIN1, LOW);
        digitalWrite(motorPins[i].pinIN2, HIGH);
    }
    ledcWrite(motorPins[i].pwmSpeedChannel, 200);
    Serial.print("Velocidad del motor ");
    Serial.print(i + 1);
    Serial.print(": ");
    Serial.println(200);
} else {
    digitalWrite(motorPins[i].pinIN1, LOW);
    digitalWrite(motorPins[i].pinIN2, LOW);
    ledcWrite(motorPins[i].pwmSpeedChannel, 0);
    Serial.print("Motor ");
    Serial.print(i + 1);
    Serial.println(" apagado");
}
}
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    if (esp_now_init() != ESP_OK) {
        Serial.println("Error al inicializar ESP-NOW");
        return;
    }
    esp_now_register_recv_cb(OnDataRecv);
    setUpPinModes();
}

void setUpPinModes() {
    for (int i = 0; i < motorPins.size(); i++) {

```

```

pinMode(motorPins[i].pinIN1, OUTPUT);
pinMode(motorPins[i].pinIN2, OUTPUT);
ledcSetup(motorPins[i].pwmSpeedChannel, 1000, 8);
ledcAttachPin(motorPins[i].pinEn, motorPins[i].pwmSpeedChannel);
}
}

void loop() {
  unsigned long currentTime = millis();
  if (currentTime - lastRecvTime > SIGNAL_TIMEOUT) {
    processCarMovement(STOP, 0);
    Serial.println("Señal perdida, detenido");
  }
}

```

12.3. ANEXO 3: PRUEBAS DEL DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

El sistema consiste en 2 módulos:

- Emisor
- Receptor

Los dos módulos trabajan con los microcontroladores ESP32 que emplean una conexión Wi-Fi para comunicarse entre sí utilizando el protocolo ESP-NOW, un protocolo diseñado para dispositivos ESP32 en el entorno Arduino IDE.

Figura 54
Pruebas de prototipo



Módulo Emisor

El módulo emisor incluye un ESP32 y un sensor de giroscopio-acelerómetro MPU6050 para detectar los movimientos de giro y la dirección de colgamiento del módulo con el respecto los datos capturados al mismo transmitiremos por Wi-Fi inalámbrico al el módulo receptor con el protocolo ESP-NOW.

Figura 55
Brazalete en pruebas



Figura 56
Inserta ESP32



Figura 57
Brazalete final



Módulo Receptor

El módulo receptor se compone de un ESP32 y un regulador de voltaje AMS1117; el ESP32 recibe los datos del módulo emisor y procesa la información, para el encendido, apagado y cambiando las direcciones de giro de DC motores.

Figura 58
Módulo receptor funcional

