

Modelado de una silla de ruedas integrada a una plataforma de elevación-giro a un vehículo con neuro control para personas con discapacidad motriz Modeling of a wheelchair integrated into a lifting-turning platform into a vehicle with neuro control for people with motor disabilities.

Luis-Alberto Rodríguez-Austria ^a, Armando Martínez-Valdez ^b, Gilberto Osorio-Roque ^c, Griselda Cortés-Barrera ^d,
Edgar Corona-Organiche ^e

^{a, b, c}Mecánica, Mecatrónica e Industrial, Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, 55210, Ecatepec de Morelos, Estado de México, México.

^{d, e}Laboratorio Nacional CONAHCYT en Inteligencia Artificial y Ciencia de Datos (LNC-IACD)-ISC, Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, 55210, Ecatepec de Morelos, Estado de México, México.

Resumen

Se describe el modelado de una silla de ruedas para apoyar la movilidad de personas con capacidades de movilidad diferentes. Se presenta el diseño de una estructura móvil (plataforma de elevación-giro), que se acopla al lugar del copiloto de un auto sedán, teleoperada por el usuario a través de instrucciones neuronales. El modelado tiene la capacidad de desplegarse de manera secuencial desde su posición inicial, lugar del copiloto, hasta su posición final, parte exterior del vehículo. Esto se realiza a través de movimientos lineales, apoyándose en rodamientos y guías lineales en dos dimensiones, y un movimiento de rotación. Cuando la plataforma se encuentra fuera del vehículo, se despliegan las llantas de la silla de ruedas y esta se desacopla de forma autónoma de la plataforma que está unida al vehículo. El control de la plataforma y de la silla se logra mediante un sistema asistencial innovador, operado por el usuario a través de señales electroencefalográficas obtenidas de una diadema neuronal Emotiv de 5 o 14 sensores. Esto facilita la movilidad del usuario sin necesidad de asistencia de terceros.

Palabras clave: Plataforma móvil, neurociencia cognitiva, EEG, Emotiv, neuro control.

Abstract

The modeling of a wheelchair to support the mobility of people with different mobility abilities is described. The design of a mobile structure (lift-turn platform) is presented, which is attached to the co-pilot's seat of a sedan car, teleoperated by the user through neural instructions. The model could be deployed sequentially from its initial position, the co-pilot's position, to its final position, the exterior part of the vehicle. This is done through linear movements, relying on bearings and linear guides in two dimensions, and a rotation movement. When the platform is outside the vehicle, the wheels of the wheelchair are deployed, and the wheelchair autonomously disengages from the platform that is attached to the vehicle. Control of the platform and the chair is achieved through an innovative assistance system, operated by the user through electroencephalographic signals obtained from an Emotiv neural headband with 5 or 14 sensors. This facilitates user mobility without the need for third-party assistance. **Keywords:** Mobile platform, cognitive neuroscience, EEG, Emotive, neurocontrol.

1. Introducción

Muchas empresas e institutos de nivel superior y posgrado han desarrollado prototipos funcionales que atienden problemas que se presentan en el diseño y construcción de

plataformas móviles para distintas aplicaciones, como en el caso del diseño de plataformas móviles auto balanceadas para el transporte de una persona promedio, se toma en cuenta la concepción electrónica, las necesidades de procesamiento de señales, la manera de como se hace el acondicionamiento de las señales de los sensores, el máximo de carga que puede

*Autor para la correspondencia: ecorona@tese.edu.mx

Correo electrónico: 201910094@tese.edu.mx (Luis-Alberto Rodríguez-Austria), armandomartinezv@tese.edu.mx (Armando Martínez-Valdés), gilberto_or@tese.edu.mx (Gilberto Osorio-Roque), gcortes@tese.edu.mx (Griselda Cortés-Barrera), ecorona@tese.edu.mx (Edgar Corona-Organiche)

transportar el dispositivo y el análisis necesario de sus piezas para evitar deformaciones y daños por defectos en los materiales (Cely Gutiérrez, 2015).

Las plataformas móviles se pueden encontrar para distintos propósitos y fines, como lo es un prototipo de sistema elevador incorporado a un vehículo todoterreno, este sistema elevador está estructurado, básicamente, en dos sistemas de tijeras accionados por cilindros hidráulicos, anclado cada uno de ellos a los largueros del vehículo, cada tijera se apoya en el suelo mediante plataformas favoreciendo así el reparto de cargas, siendo muy útil en superficies limosas, todo el conjunto es propulsado por un motor hidráulico de corriente continua (Martínez del Carmen, 2018).

De igual manera, se puede encontrar el diseño de plataformas para realizar pruebas, como el diseño mecánico de una plataforma de simulación de impactos, se exhiben los componentes y elementos que integran el diseño, los resultados muestran un equipo que podrá efectuar pruebas experimentales con una carga máxima de 1000 kg, de igual manera se presentan los esfuerzos y las deformaciones generados en el modelo estructural (Molina Cortez, 2018).

Hoy en día el uso de las señales electroencefalográficas (EEG) y construcción de Interfaz Cerebro Computadora (BCI) son de gran ayuda para la innovación asistencial, para el diseño de diferentes tipos de dispositivos como prótesis de mano, drones, silla de ruedas, prótesis, etc. El desarrollo de sistemas para facilitar la movilidad e incrementar la calidad

de vida de personas con capacidades diferentes ha estado en constante desarrollo. Por una parte, se han estudiado los sistemas mecánicos que los constituyen y por otro lado las formas de controlar el movimiento que han de realizar.

Todos estos sistemas se enmarcan en los productos para el bienestar, en particular se han diseñado diferentes modelos de sillas de ruedas: manuales, eléctricas, bipedestación e inteligentes, entre otras. El desarrollo del tipo inteligente puede incluir funciones como navegación autónoma, asistencia de inteligencia artificial y conexión a dispositivos móviles o aplicaciones para mejorar la experiencia del usuario. Por ejemplo, Ihab (2022) y Mongue Lay (2015) hacen referencia al uso de las señales electroencefalográficas para neuro controlar una silla de ruedas por personas parapléjicas o que simplemente han perdido fuerza en sus extremidades superiores o inferiores (Ihab, 2022), (Monge Lay, 2015).

En este sentido las sillas más avanzadas son las que pueden realizar sus movimientos con base en un neuro control. Estas se basan en la interacción entre el sistema nervioso del usuario y una interfaz tecnológica que traduce las señales neuronales en comandos para mover estas. La tabla 1, proporciona algunos tipos de sillas de ruedas que se han desarrollado dentro del tipo neuro control, proporciona su funcionamiento y explica las características de los usuarios para su uso (Kübler, A., & Birbaumer, N. (2008); Millan, J. d. R., Rupp, R., et al (2010); Leeb, R., Tonin, L., Rohm, et al (2015)).

Tabla 1: Tipos de sillas de ruedas con neuro control

Sillas de ruedas por neuro control	Funcionamiento	Aplicación
Controladas por interfaz cerebro-computadora (BCI - Brain-Computer Interface)	Utilizan interfaces cerebro-computadora para captar las señales cerebrales del usuario, las cuales son procesadas por algoritmos que traducen esos impulsos en movimientos controlados de la silla. Los sensores se colocan en el cuero cabelludo o mediante electrodos no invasivos que monitorean la actividad cerebral.	Ideales para personas con parálisis total, como pacientes con esclerosis lateral amiotrófica (ELA) o cuadriplejia, que no pueden controlar la silla mediante los métodos convencionales.
Controladas por neuroestimulación	Utilizan señales neuromusculares o bioeléctricas captadas a través de dispositivos de electromiografía (EMG) que detectan la actividad muscular residual o microgestos del usuario. A diferencia de las BCI, estas sillas captan señales directamente desde los músculos para generar los comandos de movimiento.	Son útiles para personas que tienen algún nivel de control muscular, aunque sea mínimo, como en algunos casos de lesiones medulares.
Controladas por señales electroencefalográficas (EEG)	Capturan las señales eléctricas generadas por el cerebro a través de dispositivos EEG. Las señales se interpretan para determinar intenciones de movimiento, como avanzar, girar o detenerse. Estas señales cerebrales se correlacionan con ciertos patrones de actividad mental, como imaginar mover una mano o dirigir la atención hacia un estímulo visual.	Ideales para personas que pueden generar patrones cerebrales específicos relacionados con el movimiento, pero que no pueden mover físicamente su cuerpo. Se usan en pacientes con parálisis cerebral o accidentes cerebrovasculares graves.
Control ocular (eye-tracking) y neurocontrol híbrido	Combinan un sistema de seguimiento ocular (eye-tracking) con neurocontrol. El usuario selecciona los comandos mediante el movimiento de los ojos, y la silla procesa estas señales junto con las señales cerebrales para tomar decisiones de movimiento.	Personas con movilidad extremadamente limitada pero que pueden controlar el movimiento ocular o generar ciertos patrones cerebrales.
Control con implantes neurales	El usuario tiene un implante neural que capta directamente las señales del cerebro y las transmite a la silla para controlarla. Aunque todavía en desarrollo experimental, este enfoque ofrece la posibilidad de una	Actualmente en etapas de investigación para personas con discapacidades motoras graves, donde los métodos no invasivos no proporcionan el control necesario.

comunicación más directa y rápida entre el cerebro y la máquina, mejorando la precisión del control.

Un desarrollo más avanzado, son las sillas de ruedas que se pueden integrar de forma manual o autónoma al asiento del copiloto y/o del piloto de un vehículo automotriz y que son controladas mediante neuro control, estas representan una innovación avanzada en la movilidad asistida permitiendo que personas con capacidades diferentes no solo se desplacen de manera autónoma, sino que también puedan integrar su silla de ruedas en el sistema de un vehículo. Estas combinan

navegación autónoma con control basado en señales neuronales, permitiendo a los usuarios conducir o moverse en su entorno sin depender de asistentes humanos. Las características que presentan este tipo de sillas se proporcionan en la tabla 2 (Clerico, A., Kofman, J., & Aghvami, M. (2021); Putrino, D., & Smith, B. A. (2018); López, E., Zúñiga, E., & Díaz, A. (2019)).

Tabla 2: Características de sillas de ruedas con integración a vehículos automotrices.

Característica	Descripción
Acoplamiento autónomo al asiento del automóvil	<ul style="list-style-type: none"> Estas sillas de ruedas tienen la capacidad de alinearse y fijarse automáticamente al asiento del conductor o copiloto. Con mecanismos robóticos o magnéticos, se integran al interior del automóvil sin la necesidad de transferir al usuario fuera de la silla. Sistemas automatizados levantan o rotan la silla para colocarla en posición y conectarla a los controles del vehículo.
Navegación autónoma	<ul style="list-style-type: none"> Equipadas con sensores, cámaras y tecnología de inteligencia artificial, estas sillas de ruedas pueden navegar de forma autónoma tanto en interiores como exteriores, evitando obstáculos y encontrando rutas seguras. La inteligencia artificial permite que la silla tome decisiones en tiempo real sobre la mejor ruta a seguir.
Control neuronal para manejo y navegación	<ul style="list-style-type: none"> Utilizan sistemas de neuro control que interpretan las señales cerebrales o neuromusculares del usuario para controlar la silla de ruedas y el vehículo. Estas señales se capturan mediante interfaces cerebro-computadora (BCI) o dispositivos de electromiografía (EMG), lo que permite un control preciso tanto del movimiento de la silla como de la conducción del automóvil.
Asistencia a la conducción y movilidad extendida	<ul style="list-style-type: none"> En algunos modelos, las sillas de ruedas autónomas pueden conectarse al sistema de conducción del vehículo, permitiendo que la persona conduzca mediante comandos neuronales o utilizando controles adaptados. Estos sistemas pueden incluir la capacidad de estacionar de forma autónoma o de realizar maniobras complejas en el tráfico.

El diseño de una silla de ruedas que puede ser integrada al asiento del copiloto de un vehículo automotriz incluye diversos módulos que permiten su funcionalidad autónoma y adaptable. Estos módulos son fundamentales para facilitar el acoplamiento seguro, la navegación precisa, y la integración

fluida con los sistemas del vehículo. La tabla 3 enuncia los principales módulos que conforman este tipo de silla de ruedas, su función y componentes a considerarse (Cortés, J. A., Montero, C. E., & Díaz, J. M. (2020); Tanaka, S., & Hirata, K. (2018); Rodríguez, J., & García, P. (2019)).

Tabla 1: Módulos principales, funcionamiento y componentes a considerarse en una silla de ruedas integrada a un vehículo automotriz

Módulo	Función	Componentes
Acoplamiento automatizado	Permite el acoplamiento entre la silla de ruedas y el asiento del copiloto o conductor del automóvil. Utiliza mecanismos robóticos, guías o sistemas magnéticos para alinearse correctamente y fijarse de manera segura en el vehículo. Además, debe ser capaz de realizar ajustes de altura, ángulo y posición para asegurar el confort y seguridad del usuario.	Brazos robóticos, guías de anclaje, sistemas de seguridad de bloqueo y sensores de posicionamiento.
Navegación autónoma	Permite que la silla de ruedas se mueva de forma autónoma tanto dentro del hogar como en exteriores, facilitando el acceso al vehículo. Equipado con sensores, cámaras y tecnología de mapeo, permite que la silla detecte obstáculos, planifique rutas y se desplace con precisión hacia el automóvil.	Sensores LiDAR, cámaras de visión, sistemas GPS, y algoritmos de inteligencia artificial para navegación autónoma.
Control neuronal o interfaz cerebro-computadora (BCI)	El usuario puede manejar la silla de ruedas con sus pensamientos, enviando señales cerebrales captadas por una interfaz BCI para mover la silla hacia el automóvil y luego integrarla al sistema del vehículo.	Sensores EEG o EMG, unidad de procesamiento neuronal, y software de interpretación de señales cerebrales.

Integración vehicular	Permite la interacción entre la silla de ruedas y los sistemas del automóvil, facilitando la integración con los controles del copiloto o conductor. Es esencial para habilitar el control de los elementos del automóvil, como el ajuste de asientos, cinturones de seguridad y sistemas de comunicación con el vehículo.	Interfaz de conectividad con el sistema electrónico del vehículo, adaptadores de control para los sistemas de seguridad y confort del vehículo.
Energía y alimentación	Gestiona el suministro de energía necesario tanto para el funcionamiento de los sistemas automatizados de la silla de ruedas como para su recarga cuando está en uso. Puede integrar sistemas de baterías recargables y mecanismos de carga mientras la silla está acoplada al vehículo.	Baterías de alta capacidad, sistema de recarga por conexión con el vehículo y unidad de gestión de energía.
Control y supervisión	Proporciona al usuario y al vehículo información en tiempo real sobre el estado de la silla de ruedas, como nivel de batería, estado de los mecanismos de acoplamiento, y posibles alertas de mal funcionamiento.	Pantallas de monitoreo, sensores de estado y diagnóstico, conexión inalámbrica o Bluetooth.

Existen diferentes diseños de plataformas de acoplamiento de sillas de ruedas al asiento del piloto o copiloto de un vehículo, atendiendo a los elementos claves que dan origen a su diseño, a continuación, se describen algunas, (Chou, H. P., Lin, W. T., & Tsai, C. J. (2020); Tanaka, K., Okuda, H., & Oshima, T. (2018); Rodríguez, M., García, S., & Llamas, R. (2019)):

1. Plataforma de acoplamiento robótico:

- **Función:** Esta plataforma utiliza brazos robóticos o mecanismos automatizados que permiten que la silla de ruedas se acople al asiento del copiloto. El sistema alinea la silla de ruedas y la desplaza dentro del vehículo, ajustándola de manera precisa para garantizar que quede correctamente anclada.

- **Componentes:** Brazos robóticos, sensores de posicionamiento, y sistemas de seguridad de bloqueo. Los sensores ayudan a guiar la silla dentro del vehículo, mientras que los brazos robóticos aseguran el movimiento controlado y el acoplamiento exacto.

2. Plataforma de acoplamiento guiada por rieles:

- **Función:** En este diseño, la silla de ruedas se desplaza sobre una serie de rieles ubicados en el suelo del vehículo, lo que permite que la silla se desplace y se acople de manera segura en la posición de copiloto. Este tipo de plataforma es más simple en su diseño, pero requiere precisión en la colocación de los rieles y el sistema de alineación.

- **Componentes:** Rieles de guía en el suelo del vehículo, mecanismos de anclaje automático y sensores de alineación para garantizar que la silla quede fijada en su lugar.

3. Plataforma de elevación y giro automatizado:

- **Función:** Esta plataforma permite que la silla de ruedas se eleve y gire para ajustarse al asiento del copiloto. El mecanismo de elevación facilita el ajuste de altura, mientras que el sistema de giro asegura que la silla quede en la orientación correcta para su acoplamiento.

- **Componentes:** Elevadores hidráulicos o eléctricos, sistema de giro y ajuste de altura, y anclajes de seguridad.

4. Plataforma con acoplamiento magnético o electromagnético:

- **Función:** Utiliza imanes o sistemas electromagnéticos para acoplar la silla de ruedas de manera

segura al asiento del copiloto. Esta tecnología permite una conexión rápida y precisa sin la necesidad de componentes mecánicos visibles, mejorando la eficiencia del proceso de acoplamiento.

- **Componentes:** Sistemas de imanes, sensores de proximidad, y controles de activación automática.

5. Plataforma de acoplamiento con asistencia inteligente:

- **Función:** Integra tecnologías de inteligencia artificial y sensores avanzados para que la plataforma ajuste de manera automática la posición, altura, y seguridad de la silla de ruedas al acoplarse en el automóvil. La IA puede ajustar en tiempo real la posición basada en las condiciones del vehículo y las necesidades del usuario.

- **Componentes:** Módulo de inteligencia artificial, sensores LiDAR, cámaras de visión artificial, y controles de acoplamiento automático.

Con base en la información anterior, el prototipo de silla de ruedas que se desarrolla es una silla de ruedas que se puede integrar al asiento del copiloto de un automóvil compacto tipo sedan, con un módulo de acoplamiento de plataforma de elevación y giro automatizado, así como el módulo de neuro control para hacer posible la navegación de forma autónoma, a través del uso de una diadema Emotiv insinght inalámbrica de 5 y 14 sensores, misma que permite identificar y obtener las señale de control para avance, retroceso, y giro izquierda derecha de la silla; para el proceso de mapeo se integran Raspbery, Arduino, sensor LiDAR 2D, ambientes ROS NOETIC, UBUNTU 20.04, Phytton.

2. Materiales y Método

Diseño de la Plataforma de elevación y giro automatizado Sistema mecánico de la plataforma móvil

El sistema mecánico se puede dividir en dos partes: La plataforma giratoria retráctil y La silla de ruedas eléctrica, los cuales se colocan en el espacio designado al asiento del copiloto de un auto compacto.

La plataforma giratoria retráctil consiste en un mecanismo de 5 eslabones y dos grados de libertad que sirve como soporte a una silla de ruedas eléctrica. La movilidad del mecanismo le permite colocar la silla de ruedas en una posición adecuada para su salida del automóvil, las figuras 1a y 1b muestran el

diagrama cinemático de la plataforma que ilustra el movimiento de la plataforma, sobre el eslabón 5 se coloca la silla de ruedas.

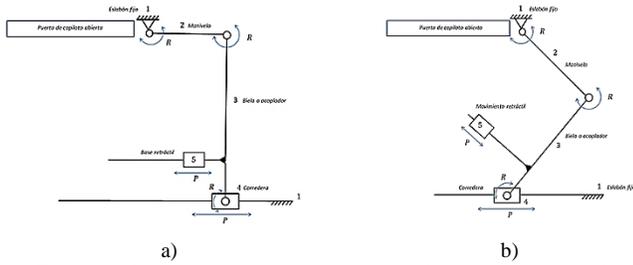


Fig. 1. a) Mecanismo en posición inicial, b) Mecanismo en movimiento
Para el caso de la figura 1a, es un sistema que obedece a un mecanismo de manivela-corredera o un mecanismo de cuatro barras simplificado con una corredera. Este diseño cumple con lo siguiente:

Identificación de los elementos del diagrama:

1. Eslabón fijo (1): El eslabón que no se mueve (la base).
2. Manivela (2): Es la barra que gira alrededor del punto fijo (R), proporcionando el movimiento rotacional.
3. Biela o acoplador (3): La barra que conecta la manivela con la corredera. Esta biela transmite el movimiento desde la manivela hacia la corredera.
4. Corredera (4): La pieza que se mueve en línea recta a lo largo de la base.
5. Base retráctil (5): Representa la trayectoria de la corredera.

Ecuaciones cinemáticas:

1. Relación angular de la manivela (2):

La posición de la manivela está definida por un ángulo θ_2 , y se considera que la longitud de la manivela es R , por tanto, el desplazamiento lineal de la corredera depende de este ángulo.

- Para la manivela (2), la posición de su extremo estará en:

$$\begin{aligned} x_2 &= R \cos \theta_2 \\ y_2 &= R \sin \theta_2 \end{aligned}$$

donde x_2 , y y_2 son las coordenadas del extremo de la manivela.

2. Relación de la biela o acoplador (3):

La biela conecta la manivela con la corredera. El extremo que se conecta a la corredera se moverá en línea recta, por lo que podemos escribir la ecuación de posición de este punto en términos de x_3 , y y_3 .

- El acoplador tiene una longitud L_3 y las ecuaciones que definen su movimiento estarán basadas en la posición del extremo de la corredera. Si el desplazamiento de la corredera es $x_4 = P$, entonces:

$$x_3 = P$$

- La distancia entre el punto 2 y el punto 3 (el acoplamiento entre la biela y la corredera) debe ser constante y equivalente a la longitud de la biela L_3 . Esto implica:

$$L_3^2 = (x_2 - P)^2 + (y_2 - y_3)^2$$

Donde $y_3 = 0$, ya que la corredera se mueve en línea recta en la dirección horizontal.

3. Velocidad de la corredera (4):

Si conocemos la velocidad angular $\dot{\theta}_2$ de la manivela, entonces la velocidad lineal v_4 de la corredera depende de la relación entre las velocidades de los eslabones:

$$v_4 = \frac{dP}{dt} = \dot{P}$$

La relación entre la velocidad angular de la manivela y la velocidad de la corredera se puede encontrar diferenciando la ecuación de la longitud de la biela L_3 con respecto al tiempo:

$$\frac{d}{dt}(L_3^2 = (x_2 - P)^2 + y_2^2)$$

4. Aceleración de la corredera (4):

La aceleración de la corredera se determina al diferenciar la ecuación de velocidad con respecto al tiempo para obtener:

$$a_4 = \ddot{P}$$

Para el caso de la figura 1b, que es el mecanismo de movimiento de cuatro barras con corredera, se rige por las siguientes ecuaciones de movimiento:

1. Descripción del mecanismo:

- Eslabón fijo (1): La base del sistema.
- Manivela (2): La barra que rota alrededor de un pivote fijo (eslabón fijo 1).
- Biela o acoplador (3): La barra que conecta la manivela con la corredera.
- Corredera (4): Se desplaza linealmente a lo largo de un eje horizontal.
- Módulo retráctil (5): Parece ser un elemento que ajusta o guía la corredera.

2. Variables importantes:

- θ_2 : Ángulo de rotación de la manivela (2).
- R : Longitud de la manivela (2).
- P : Desplazamiento de la corredera (4) en la dirección horizontal.
- L_3 : Longitud de la biela o acoplador (3).
- θ_2 : Ángulo de la biela o acoplador (3).

La posición de la manivela está definida por un ángulo θ_2 , y se considera que la longitud de la manivela es R , por tanto, el desplazamiento lineal de la corredera depende de este ángulo.

- Para la manivela (2), la posición de su extremo estará en:

$$\begin{aligned} x_2 &= R \cos \theta_2 \\ y_2 &= R \sin \theta_2 \end{aligned}$$

donde x_2 , y y_2 son las coordenadas del extremo de la manivela.

3. Posición de la corredera (4):

El desplazamiento de la corredera P es una función de la posición del extremo de la biela o acoplador (3). La biela conecta la manivela con la corredera, por lo que la longitud L_3 entre los puntos 2 y 3 debe mantenerse constante. La posición del punto de unión entre la biela y la corredera está dada por:

$$L_3^2 = (x_2 - P)^2 + (y_2)^2$$

Donde $y_2 = R \sin \theta_2$ es la altura del extremo de la manivela, y x_2 es la coordenada horizontal del extremo de la manivela.

4. Relación cinemática entre los ángulos:

La velocidad de la corredera v_p está relacionada con la velocidad angular de la manivela $\dot{\theta}_2$. La velocidad de la corredera es:

$$v_p = \frac{dP}{dt}$$

Para encontrar la velocidad de la corredera, diferenciamos la ecuación de posición de la corredera con respecto al tiempo:

$$v_p = \frac{d}{dt} \left((R \cos(\theta_2) - P)^2 + (R \sin(\theta_2))^2 \right)$$

5. Aceleración de la corredera (4):

De manera similar, para obtener la aceleración de la corredera, diferenciamos la velocidad respecto al tiempo:

$$a_p = \frac{d^2P}{dt^2}$$

Dimensionamiento de la plataforma

Para el dimensionamiento del mecanismo se considera el espacio disponible en un automóvil IBIZA COUPE, dos puertas modelo 2013, cuyas dimensiones de interés para el dimensionamiento y del mecanismo, se muestran en las figuras 2a y 2b.

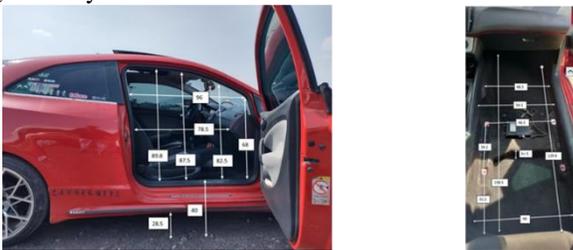
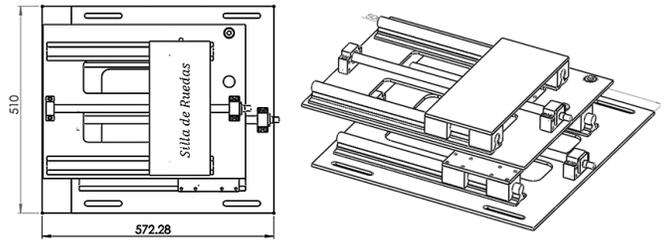


Fig. 2a y 2b. Espacio disponible para el dimensionamiento del mecanismo.

Modelado y dimensiones principales de la base giratoria

La figura 3a y 3b muestran el modelado y dimensiones principales de la base giratoria de acuerdo con el espacio disponible, el mecanismo se desliza hasta alcanzar la posición adecuada para salida de la silla de ruedas (figura 3c). Para generar el movimiento de cada grado de libertad en la base giratoria retráctil, se emplean dos sistemas de usillo roscado con diámetro de 16 mm y paso de 1mm, con acoplamiento a un reductor de banda dentada por polea HTD3M-15 con relación de transmisión de 1/9, un motor a pasos bipolar Nema 17 alto torque 92 Oz.in/65 N, un sistema por cada grado de libertad y por último se hace uso de guías de tipo lineal SBR20 y chumaceras lineales SBR20UU (figura 3d).



Figuras 3a y 3b. Posición inicial y dimensiones del mecanismo.

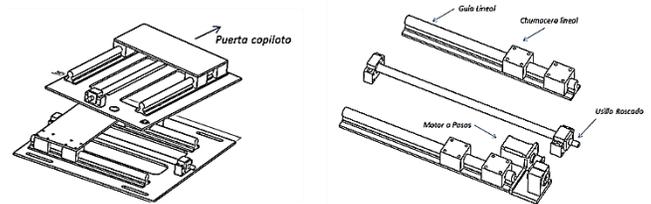


Figura 3. c) Mecanismo en posición para la salida de la silla de ruedas, d) sistema motriz de la plataforma giratoria retráctil.

En todas las articulaciones de tipo revoluta se emplean rodamientos de bolas, su principal función es proporcionar el movimiento rotativo necesario para impulsar un husillo sin fin con tuerca de bola, que tiene un diámetro de 16 mm y un paso de 5 mm. Este mecanismo se usa en las articulaciones de los eslabones 4 y 1 y los eslabones 3 y 5 (articulaciones prismáticas). El motor empleado es un motor Paso a Paso Bipolar NEMA 17 de alto par, equipado con 4 hilos y con unas dimensiones de 1.65 x 1.65 x 2.36 pulgadas. La parte estructural de la base se construye en placa de acero 1045 espesor de 3/8".

Mecanismo de la silla de ruedas

El componente correspondiente a la segunda etapa del proyecto consiste en una silla de ruedas autónoma, cuyas dimensiones se detallan en las figuras 4a a la 4d. Esta silla se encuentra instalada sobre el mecanismo de la base giratoria retráctil previamente expuesto. Su diseño incluye un asiento y un sistema retráctil independiente, que permite el plegado de las ruedas con el propósito de ocupar el espacio en la cabina del copiloto de un vehículo compacto, utilizando la plataforma previamente mencionada. La estructura de la silla

de ruedas está fabricada en su totalidad con aluminio con el fin de reducir el peso total del mecanismo.

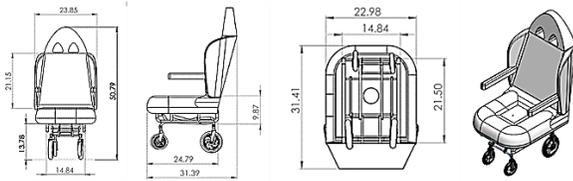


Fig. 4a - 4d. Dimensiones de la silla de ruedas.

La base de la silla la compone un mecanismo se ruedas plegables, cumpliendo la función de servir como plataforma de montaje para la placa base de la silla de ruedas. Este diseño garantiza que los eslabones del mecanismo plegable no soporten directamente el peso del usuario, contribuyendo a la distribución de la carga de manera más efectiva. Las dimensiones del mecanismo de ruedas plegables, se muestra en las figuras 5a y 5b.

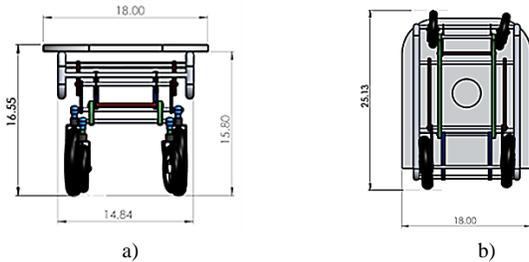


Fig. 5. a) Dimensiones de la base de la silla plegable (vista frontal), b) dimensiones de la base de la silla plegable (vista inferior).

La estructura está construida utilizando tubo de aluminio de aleación 6060 T66, lo que aporta ligereza y resistencia al conjunto, las figuras 6a y 6b muestran numerados todos los elementos que componen el sistema completo, cuya descripción se muestra a continuación.

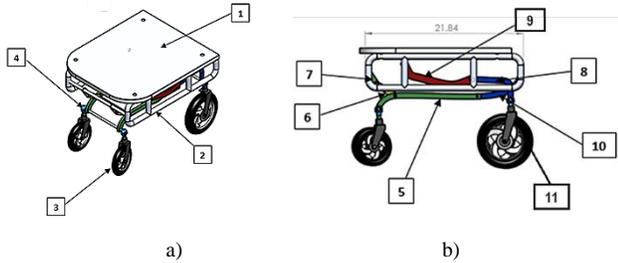


Fig. 6a y 6b. Componentes de la base de la silla de ruedas.

Compontes del sistema plegable de mecanismos en la parte baja de la silla de ruedas:

El primer elemento, muestra una placa rectangular de aluminio, redondeada en la parte frontal. Esta base está propuesta principalmente para soportar el asiento de la silla de ruedas junto con su usuario. Además, en ella se encuentran montados los eslabones del mecanismo responsable de plegar las ruedas de esta.

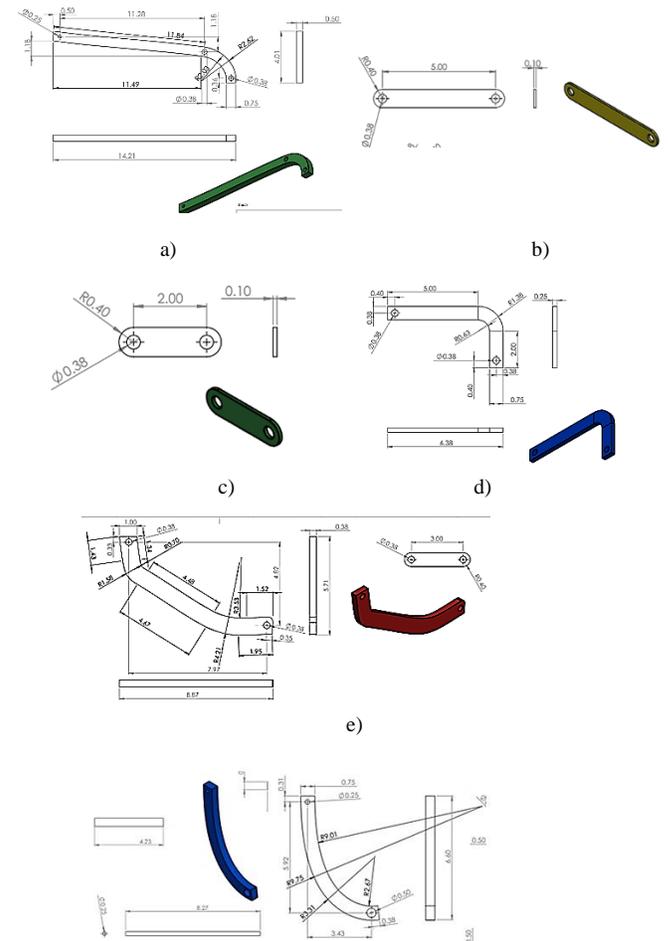
El número 2 señala una estructura tubular que cumple la función de servir como plataforma de montaje para la placa base de la silla de ruedas, contribuyendo a la distribución del peso de manera más efectiva. La estructura está construida

utilizando tubo de aluminio de aleación 6060 T66, lo que aporta ligereza y resistencia al conjunto.

El tercer elemento muestra las ruedas delanteras de goma antideslizante con una dimensión total que comprende el diámetro exterior y el ancho de la llanta, de 20 cm x 2.5 cm (8 x 1 pulgada). La distancia entre los rodamientos en ambos lados es de 5.5 cm (2.2 pulgadas). Además, el diámetro interno del rodamiento central mide 0.8 cm (0.3 pulgadas) y la longitud del tornillo del eje es de 8.5 cm (3.3 pulgadas). Estas ruedas tienen la función de proporcionar soporte para mantener el equilibrio de la silla, en colaboración con las ruedas traseras motorizadas.

El número 4 es un acoplamiento rotatorio, que tiene la función de habilitar el movimiento rotatorio de las ruedas delanteras, permitiendo que éstas se plieguen hacia el interior del mecanismo junto con los demás eslabones, está fabricado en aluminio.

Los elementos conformados por los numerales 5, 6, 7, 8, 9 y 10, indicados en la figura 6b, integran el mecanismo plegable de la silla de ruedas. Están fabricados en aluminio y tienen la función de generar el movimiento necesario para plegar las ruedas motorizadas hacia arriba, mediante un movimiento lineal. Además, en conjunto con el acoplamiento rotatorio, permiten el plegado lateral hacia el interior de las ruedas delanteras. Las dimensiones y especificaciones precisas de estos elementos se encuentran detalladas en las figuras 7a a la 7f.



f)

Fig. 7a a la 7f. Eslabones que componen el sistema plegable de la base de la silla de ruedas.

Por último, el número 11 muestra las ruedas motorizadas, cuya función es garantizar el desplazamiento autónomo de la estructura de la silla de ruedas. Cada una de ellas incorpora un servomotor integrado con un motorreductor compacto. Operando con un voltaje de 48 VCD, estos servomotores tienen la capacidad adecuada para mover el peso total tanto del mecanismo como del usuario de la silla de ruedas.

Construcción de interfaz Cerebro-Computador

Hoy en día la arquitectura del sistema BCI se utiliza con mayor frecuencia para neuro controlar dispositivos como sillas de ruedas, drones, prótesis, etc.; el uso de equipos con EEG son de bajo costo, compatibles, portátiles, es un método no invasivo que utiliza las señales fisiológicas para procesar señales EEG (medición de la actividad eléctrica del cerebro colocando un electrodo en el cuero cabelludo) y traducirlas en movimiento para controlar dispositivos a través de la mente (Ihab,2023).



Fig. 8. a) Ubicación de los sensores bajo un sistema internacional 10-20, b) Diadema Emotiv Insight de 5 electrodos, c) Diadema Emotiv EPOC X de 14 electrodos

Sistema de neurocontrol de la plataforma móvil

El dispositivo utilizado para la recuperación y medición de EEG es una diadema Emotiv con cinco y 14 canales. La distribución y colocación de los sensores está bajo la norma del sistema internacional 10-20 (figura 8a). La figura 8 muestra la diadema que proporciona la lectura de señales EEG en el rango de microvoltios (μV) (GVB geliMED GmbH.), los principales ritmos de EEG se clasifican según el rango de frecuencia en alfa (α), beta (β), delta (δ), theta (θ) y gamma (Ihab,2022).

A continuación, se describe los pasos a seguir para la instalación del software, la conexión, configuración y calibración de los sensores de la diadema:

1. Para configurar, calibrar y utilizar la diadema será necesario descarga e instalar Emotiv Launcher en la siguiente dirección <https://www.emotiv.com/get-started/>
 - a. Antes de utilizarlo demás será necesario que tenga carga el 100%
 - b. Armar diadema e hidratar sensores utilizando agua salina (líquido para lentes de contacto), esto facilitará la conexión.

c. Conectar USB para comunicar el equipo con la Diadema a través de bluetooth.

d. Colocar diadema en la cabeza teniendo precaución de que los sensores se coloquen respetando el sistema internacional 10-20 para lograr una lectura exitosa (figura 9a).

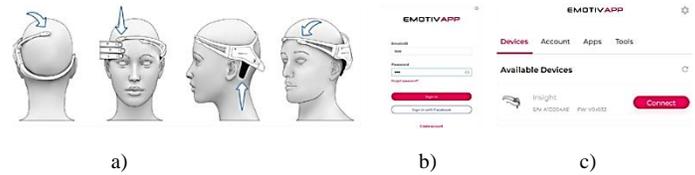


Fig. 9a) consideraciones para colocar y ajustar diadema, b) iniciar sesión, c) conexión por bluetooth

e. Crear cuenta e iniciar sesión desde la página oficial de Emotiv <https://www.emotiv.com/>

f. Ejecutar Emotiv app, iniciar sesión y ajustar diadema (figura 9).

g. Los sensores de la figura 8a deben estar en color verde para garantizar un 100% de calidad en la señal EEG.

2. Para controlar dispositivos utilizando la detección de comandos mentales será necesario instalar y ejecutar la aplicación de “Emotiv BCI” <https://www.emotiv.com/emotiv-bci/>

3. Una vez que se tiene la aplicación de BCI en ejecución y una calidad de conexión con la cadena del 100%, se puede utilizar la aplicación de BCI para entrenar el cubo y moverlo en sus cuatro direcciones (push, pull, left, right).



Fig. 10a) Aplicación para entrenar Cuba, b) Configuración de diadema en código de Python.

```

276 def main():
277     # Please fill your application clientid and clientSecret before running script
278     your_app_client_id = '0f6e482f1b1f6a48991e15f5c2ab872f8c5'
279     your_app_client_secret = '4b339evdmu5f5v7a115m1a0af6f42q1e1vbnw7558m7z3xcuoc44t6jph55tr8a1uuncs8ppl5pfo131t10mj0e9p2h5m'
280
281     # Init live stream
282     l = live5dance(your_app_client_id, your_app_client_secret)
283
284     trained_profile_name = 'Jovant' # Please set a trained profile name here
285     l.start(trained_profile_name)
286
287 if __name__ == '__main__':
288     main()
289
290
291 # .....

```

Para dar funcionalidad al BCI y neuro controlar la plataforma robótica, es necesaria la configuración del puerto serial, con el Arduino se trabajó con un algoritmo en Python con el SDK de EMOTIV el cual requiere la siguiente configuración:

1. Instalar las siguientes librerías desde la terminal:
 - a. Pip install websocket-client
 - b. Pip install python-dispatch
 - c. Pip install cortex2 o cortex (o ambas en caso de que el programa no corra)

Fig. 12. Señales obtenidas por la diadema y correlación de las señales que registra cada sensor para el desplazamiento hacia atrás.

Resultados y Conclusiones

En la figura 13 se observa las señales procesadas que permiten observar la contribución de cada señal a la correlación en cada una de las direcciones en las que el móvil prototipo se desplaza.

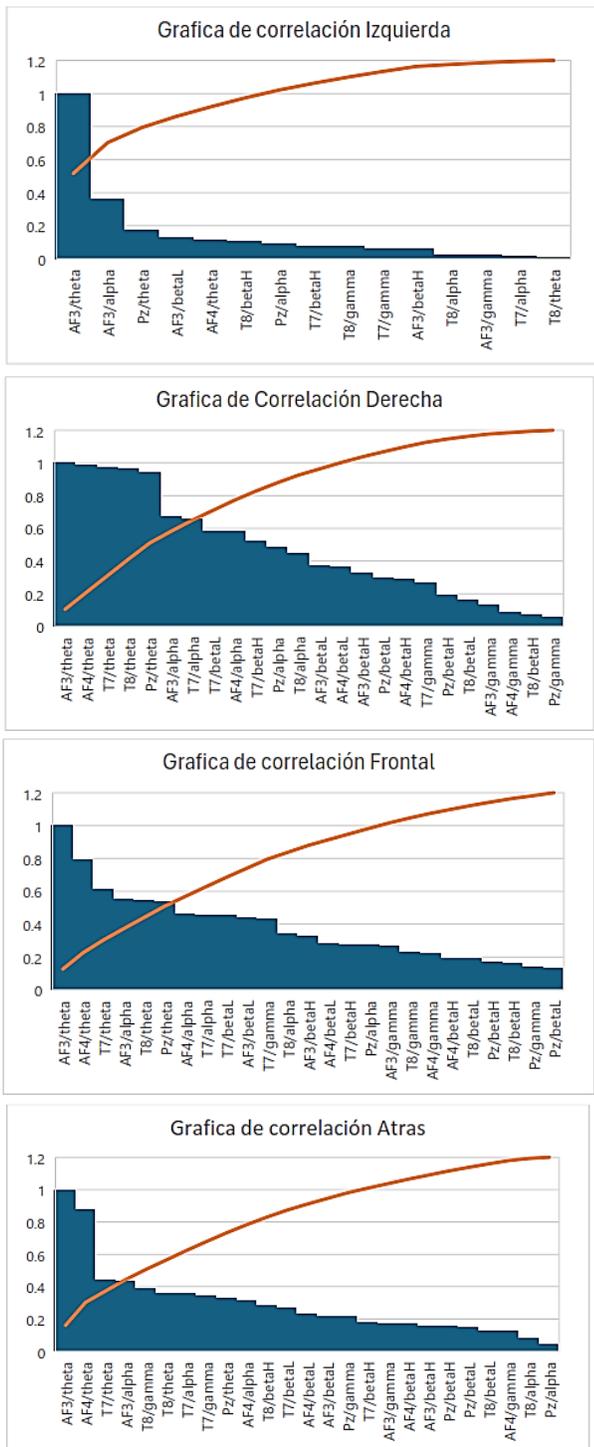


Fig. 13. Contribución a la correlación de cada una de las señales que se obtienen de la diadema, para cada una de las direcciones en las que se desplaza el móvil.

En relación con el desempeño de la plataforma, la figura 14 muestra su comportamiento en sus recorridos de desplazamiento y giro, considerando que la duración del movimiento es de un minuto, desde su posición inicial dentro del vehículo hasta su posición final fuera del vehículo. Los gráficos están asociados considerando que el peso del sistema es de 110 kg.

- **Posición lineal:** La gráfica superior muestra el desplazamiento de la silla hacia adelante, alcanzando un avance total de 1.5 metros en 60 segundos.
- **Ángulo girado:** La gráfica inferior muestra el ángulo de rotación de la plataforma, alcanzando 90 grados ($\pi/2$ radianes) al final del mismo tiempo.

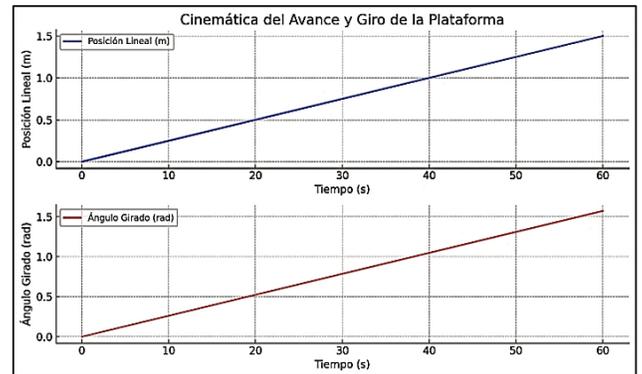


Fig. 14. Recorridos de la plataforma de elevación y giro

El esfuerzo realizado por la plataforma desde su posición inicial (dentro del vehículo) hasta la posición final (fuera del vehículo) se muestra en la figura siguiente, para ello, se consideran algunos factores clave que afectan el esfuerzo:

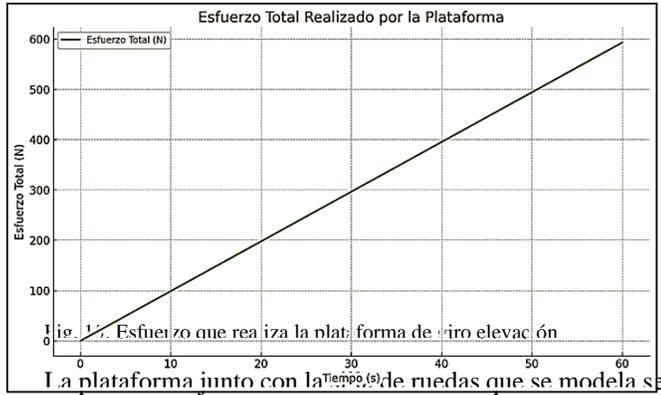
1. **Peso total (silla + ocupante):** 40 kg (silla) + 70 kg (ocupante) = 110 kg.
2. **Fuerzas involucradas:**

Peso total: $F = mg$, donde $g = 9.81 \frac{m}{m^2}$ es la gravedad.

Desplazamiento lineal: $\Delta x = 1.5 m$

Giro de la plataforma: la rotación también implica un esfuerzo adicional dependiendo del brazo de palanca y la resistencia a la rotación.

La figura 15 muestra el esfuerzo total que realiza la plataforma desde su posición inicial (dentro del vehículo) hasta la posición final (fuera del vehículo) a lo largo del tiempo, durante un minuto. Este esfuerzo incluye tanto el avance lineal como el esfuerzo de giro necesario para mover la silla de ruedas y su ocupante, con un peso combinado de 110 kg.



muestra en la figura 16, el modelado muestra los recorridos que realiza la plataforma de elevación giro desde su posición inicial hasta la final.

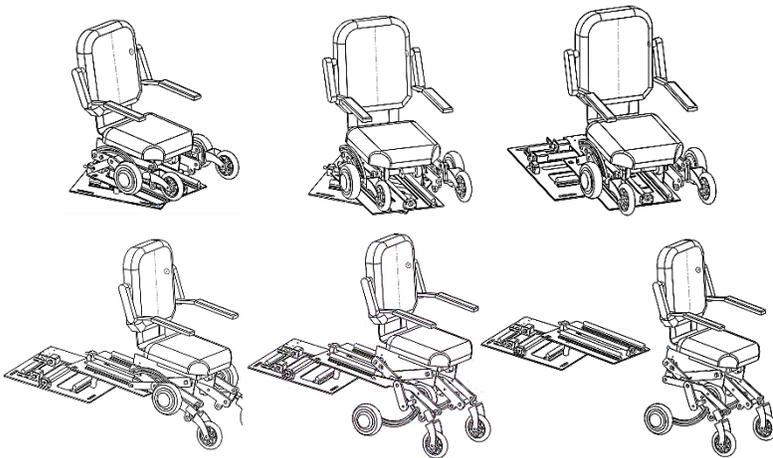


Fig. 16. Modelo del prototipo de sillas de ruedas que se construye.

Para lograr el movimiento de la plataforma se utilizan motores paso a paso NEMA 17 junto con un sistema de reducción con poleas dentadas (HTD3M) con una relación de 1/9. La figura 17 muestra el sistema de motores y poleas implementado para lograr el movimiento óptimo de la plataforma de elevación-giro.

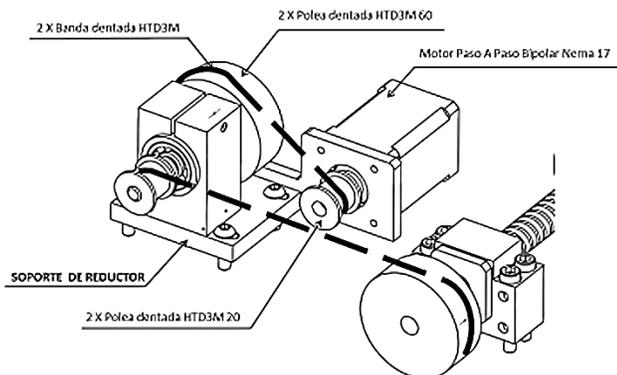


Fig. 17. Sistemas de motores y poleas considerado para controlar el movimiento de la plataforma de elevación-giro.

Esto implica que se está utilizando un motor adecuado para aplicaciones de alta precisión, donde se necesita controlar el movimiento con exactitud, como es el caso de plataformas móviles de elevación-giro. Las características clave de los motores necesarios:

1. Motor NEMA 17:

Tipo de motor: Paso a paso (bipolar).

Torque: Un motor NEMA 17 típico puede ofrecer entre 0.25 Nm y 0.5 Nm, dependiendo del modelo específico.

Precisión: Los motores paso a paso NEMA 17 ofrecen movimientos precisos debido a su naturaleza de pasos (por lo general, 200 pasos por revolución).

Corriente nominal: Los motores paso a paso NEMA 17 requieren corrientes típicas de entre 1.5 A a 2 A por fase, según el modelo específico.

Tamaño físico: El tamaño estándar es de 42 mm x 42 mm (dimensiones de la carcasa).

2. Sistema de reducción (poleas dentadas HTD3M):

Relación de reducción: La relación 1/9, por cada 9 vueltas del motor, el eje de salida realiza una vuelta. Esto permite que el motor entregue un torque más alto y mayor precisión en el control del movimiento, aunque a costa de una velocidad menor.

Aplicación: Esta reducción es útil para mover la plataforma con cargas pesadas (como el peso combinado de la silla de ruedas y su ocupante) sin que el motor se esfuerce demasiado.

3. Requisitos de Torque y Potencia:

Dado el sistema de poleas y la relación de reducción de 1/9, el torque disponible en el eje de salida será mayor que el del motor original. Esto mejora la capacidad de carga del sistema.

Potencia requerida: Para el caso analizado se necesitan motores NEMA 17 de 5W, recomendándose considerar un margen del 20 al 30% más con la finalidad de mejorar el desempeño, reducción proporcionada es suficiente para manejar pesos como el de la silla de ruedas (40 kg) y el ocupante (70 kg).

Cada parte del prototipo se modelo usando solidworks y se imprimen en 3D al 60% de su tamaño real (figura 15a), los materiales usados para la impresión fueron termoplásticos atendiendo a los costes de implementación.

La etapa de adquisición de datos y procesamiento de estos se realizan utilizando dos diademas de EMOTIV de 5 y 14 electrodos, así como el software EMOTIVPRO para la configuración de la diadema y MOTIVBCI para adquisición y procesamiento. Tanto en la fase de entrenamiento como en la de funcionamiento se observa para las 4 acciones neuronales cognitivas (avanzar, retroceder, izquierda, derecha) que es necesario que el usuario tenga una muy buena concentración y atención dado que la velocidad e intensidad de la respuesta depende en gran medida de esto; si el usuario

presenta dificultades para concentrarse no se logra generar los patrones necesarios para provocar las 4 acciones requeridas. En la figura 18a y b se muestra tanto el prototipo de la silla como las pruebas de abstracción de señales para lograr obtener las instrucciones para las 4 acciones neuronales cognitivas requeridas para el neuro control de la silla.



Fig. 18a) Plataforma robótica en impresión 3D neuro controlada con la Diadema EMOTIV EPOC X, b) entrenamiento del cubo y acciones de operación neuronal.

Las pruebas de neuro control permiten observar que el ambiente influye en el proceso de concentración del usuario y por tanto, en la calidad de la abstracción de señales necesarias para el control del movimiento de la silla. Por lo que el prototipo requiere que el usuario que va a utilizar la silla tenga un proceso de entrenamiento con el fin de generar una señal base que sirva de referencia para el módulo de control.

Para el módulo de navegación se integran: componentes de hardware como la Raspberry, Arduino y LiDAR 2D, con un programa desarrollado en ambiente ROS NOETIC en ambiente UBUNTU 20.04. Se validó la capacidad del sensor LiDAR 2D para proporcionar la percepción del entorno, así como se implementa el algoritmo SLAM para generar mapas en tiempo real. Se logró el telecontrol eficiente que permite una comunicación bidireccional efectiva entre el prototipo de la silla de ruedas y el usuario, utilizando el lenguaje de programación Python. La figura 19 proporciona el entorno real donde se realizan pruebas de mapeo y un fragmento de código para el mapeo.

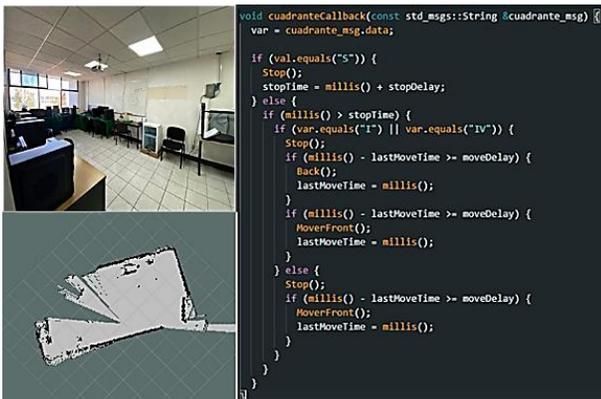


Fig. 19. Ambiente real de mapeo y gráfico de un mapeo realizado por el LiDAR 2D montado en el prototipo de silla de ruedas.

Durante las pruebas se recopiló datos sobre:

- Tiempo de respuesta: Evaluación del tiempo necesario para que la silla reaccione a los comandos y a los obstáculos. El prototipo mostró una respuesta a los comandos con un tiempo promedio de reacción 20% menor en comparación con una silla de ruedas convencional.
- Tasa de colisiones: Frecuencia con la que la silla chocaba con obstáculos. La tasa de colisiones se redujo en 30% en entornos con obstáculos moderados, lo que sugiere que el mapeo mejora la capacidad de evitar obstáculos.

Agradecimientos

Este trabajo fue soportado por el trabajo colaborativo del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, el Instituto Tecnológico de Zitácuaro el centro de investigación en computación del Instituto Politécnico Nacional; instituciones pertenecientes LNC-IACD, mismas que agradecen al COMECYT por el soporte económico otorgado a través de la convocatoria de redes de colaboración en el 2023 para el desarrollo del proyecto. Asimismo, los autores expresan total gratitud a los investigadores y estudiantes por las contribuciones realizadas en esta investigación.

Referencias

- Cely Gutiérrez, J. S. (2015). Diseño y simulación de una plataforma móvil auto-balanceada para el transporte de una persona promedio [Tesis de ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada]. Archivo digital.
<https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/13810>
- GVB geliMED GmbH. (s.f.). Sistema de electrodos 10-20 en electroencefalografía (EEG). Recuperado de <https://gvb-gelimed.com/es/10-20-elektrodensystem-in-der-elektroenzephalografie-eeg/>
- Ihab Abdulrahman Satam (2023) A comprehensive study of EEG-based control of artificial arms, Vojnotehnicki glasnik/Military Technical Courier, vol. 71, no. 1, pp. 9-41, University of Defence
- Martínez del Carmen, F. (2018). Diseño de un sistema elevador para vehículos [Tesis de ingeniería, Universidad Politécnica de Catalunya]. Archivo digital.
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/14338/Mem%C3%B2ria_PFC2.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Molina Cortez, J. A. (2018). Diseño de una plataforma móvil y un sistema de desaceleración para pruebas de seguridad pasiva [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Archivo digital.
<https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/25484>
- Monge Lay, S., & Aracena Pizarro, D. (2015). Control de movimiento robótico con detección cognitiva y facial mediante Emotiv EEG. Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, 23(4), 496-504. ISSN: 0718-3291. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77242864002>.
- Kübler, A., & Birbaumer, N. (2008). Brain-computer interfaces and communication in paralysis: Extinction of goal directed thinking in completely paralysed patients? Clinical

- Neurophysiology, 119(11), 2658-2666. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.06.019>
- Millan, J. d. R., Rupp, R., Müller-Putz, G. R., Murray-Smith, R., Giugliemma, C., Tangermann, M., ... & Leeb, R. (2010). Combining brain-computer interfaces and assistive technologies: State-of-the-art and challenges. *Frontiers in Neuroscience*, 4, 161. <https://doi.org/10.3389/fnins.2010.00161>
- Leeb, R., Tonin, L., Rohm, M., Desideri, L., Carlson, T., & Millan, J. d. R. (2015). Towards independence: A BCI telepresence robot for people with severe motor disabilities. *Proceedings of the IEEE*, 103(6), 969-982. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2419736>
- Clerico, A., Kofman, J., & Aghvami, M. (2021). Autonomous wheelchair systems: State of the art and future trends. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 3(1), 3-15. <https://doi.org/10.1109/TMRB.2021.3059832>
- Putrino, D., & Smith, B. A. (2018). The future of brain-machine interfaces: Advances in neural engineering for neurorehabilitation and beyond. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 15(1), 85. <https://doi.org/10.1186/s12984-018-0418-9>
- López, E., Zúñiga, E., & Díaz, A. (2019). Wheelchair control through brain-computer interfaces for people with motor disabilities: A review. *Journal of Advanced Research*, 20, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.06.002>
- Cortés, J. A., Montero, C. E., & Díaz, J. M. (2020). Integration of autonomous wheelchairs with vehicle systems for improved mobility: A review of assistive technologies. *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering*, 7, 2055668320933030. <https://doi.org/10.1177/2055668320933030>
- Tanaka, S., & Hirata, K. (2018). Robotic wheelchair design for automated vehicle integration: Challenges and future perspectives. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 15(3), 848-858. <https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2795019>
- Rodríguez, J., & García, P. (2019). Intelligent autonomous systems for integrating wheelchairs into automobiles. *Autonomous Robots and Systems Journal*, 14(2), 175-192. <https://doi.org/10.1007/s11964-019-00245-1>
- Chou, H. P., Lin, W. T., & Tsai, C. J. (2020). Automated wheelchair docking systems for vehicles: Review and future directions. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 98(3), 483-495. <https://doi.org/10.1007/s10846-020-01250-6>
- Tanaka, K., Okuda, H., & Oshima, T. (2018). Robotic platforms for autonomous wheelchair docking in vehicles: A novel approach. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(5), 2213-2223. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2018.2834640>
- Rodríguez, M., García, S., & Llamas, R. (2019). Autonomous docking systems for wheelchair integration in vehicles. *International Journal of Intelligent Transportation Systems*, 14(2), 95-107. <https://doi.org/10.1109/IJITS.2019.8890346>