





Diseño y Construcción de un Dispositivo Trazador Controlado Mediante Movimientos de la Cabeza

Design and Construction of a Tracer Device Controlled Through Head Movements

R. B. Pérez-Silva ^a, G. R. Peñaloza-Mendoza ^{b,*}, A. Campos-Hernández ^b, P. J. Flores-Medina ^a

^a CIIDT de Ingeniería Biomédica, TecNM-Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, 61615, Pátzcuaro, Michoacán, México.

^b CA-IIDT Departamento de Ingeniería Biomédica, TecNM-Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, 61615, Pátzcuaro, Michoacán, México.

Resumen

La tetraplejía es generada por una lesión medular en la cual se pierde el control y la sensibilidad de las extremidades. Al presentarse este estado de incapacidad física se recomienda el uso de dispositivos de apoyo para obtener mayor autonomía en las actividades cotidianas. Actualmente, la mayoría de los dispositivos se enfocan en mejorar el desplazamiento de la persona dejando de lado actividades recreativas. Este trabajo presenta el diseño y construcción de un dispositivo que permite a la población con tetraplejía la posibilidad de realizar trazos a través de la detección de los movimientos de la cabeza, con el fin de brindar una opción que permite la expresión de manera escrita. La detección de los movimientos de la cabeza del usuario se realiza mediante un acelerómetro con giroscopio cuyos datos son procesados por un microcontrolador que envía la acción por Bluetooth a un robot cartesiano, logrando una comunicación usuario-máquina que permite la expresión escrita a la persona con discapacidad.

Palabras Clave: Discapacidad motriz, giroscopio, robot cartesiano, tetraplejía.

Abstract

Tetraplegia is generated by a spinal cord injury in which control and sensitivity of the extremities is lost. When this state of physical disability occurs, the use of support devices is recommended to obtain greater autonomy in daily activities. Currently, most devices focus on improving the person's movement, leaving aside recreational activities. This work presents the design and construction of a device that allows the population with tetraplegia the possibility of making strokes through the detection of head movements, in order to provide an option that allows expression in writing. The detection of the user's head movements is carried out using an accelerometer with a gyroscope whose data is processed by a microcontroller that sends the action via Bluetooth to a Cartesian robot, achieving user-machine communication that allows written expression to the person with disability.

Keywords: Motor disability, gyroscope, cartesian robot, tetraplegia.

1. Introducción

De acuerdo con el Banco Mundial (Banco Mundial, 2018) alrededor del 15% de la población del mundo experimentan algún tipo de discapacidad y la prevalencia de la discapacidad es mayor en los países en desarrollo. En México, de acuerdo a datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la discapacidad principal es la referente a caminar y moverse (Gómez, 2022). La edad de la población que mayormente presenta alguna limitación ronda entre los 60 a 84 años, como se puede observar en la Figura 1.

De acuerdo con los datos recabados por Bahena y Bernal, se presentan alrededor de 50 casos de lesiones traumáticas

sobre las vértebras por cada millón de habitantes, siendo los menores a 40 años los más susceptibles a esto (Bahena y Bernal, 2007). De acuerdo a los datos obtenidos por el Instituto Guttman (Instituto Guttman, 2022) y la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2013), al producirse una lesión medular se interrumpen o alteran las conexiones nerviosas de la médula espinal provocando una parálisis y pérdida de sensibilidad, de esta parálisis el 54% la constituye la tetraplejía conocida por experimentar parálisis en las extremidades superiores e inferiores, mientras que el 46% la constituye la paraplejía, la cual provoca la parálisis en los miembros inferiores, en la Figura 2 se ejemplifica la diferencia entre ambas condiciones.

*Autor para correspondencia: grey@itspa.edu.mx

Correo electrónico: ciidbimedica@itspa.edu.mx (Ricardo Bladimir Pérez-Silva), grey@itspa.edu.mx (Guillermo Rey Peñaloza-Mendoza), acampos@itspa.edu.mx (Alicia Campos-Hernández), clubbiomedica@gmail.com (Pablo Jonatán Flores-Medina).

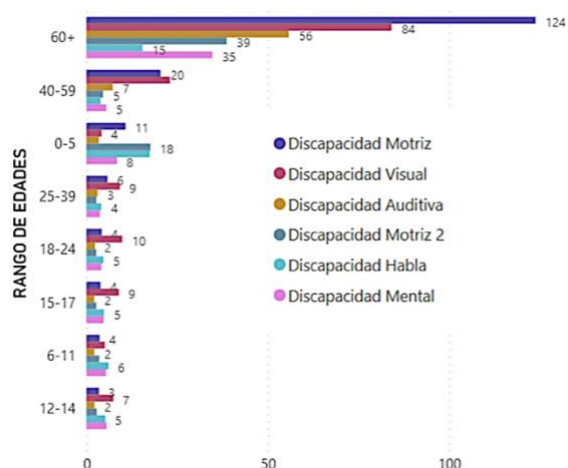


Figura 1: Personas con discapacidad por cada 1000 habitantes por tipo de discapacidad.

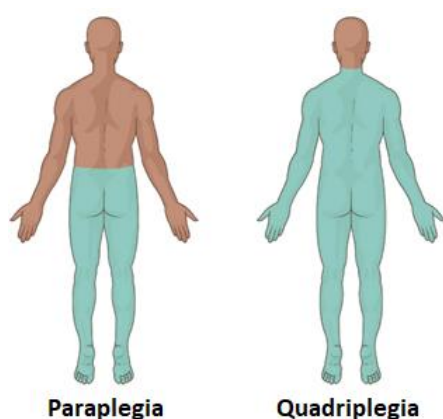


Figura 2: Clasificación de lesión medular, tetraplejía y paraplejía, tomado de <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/spinal-cord-injury/symptoms-causes/syc-20377890>.

Las causas más comunes de las lesiones vertebrales traumáticas (Bahena y Bernal, 2007), son las caídas (50.5%), accidentes automovilísticos (34.5%) y agresiones físicas (15%). La Asociación Americana de Lesiones de la Columna Vertebral (ASIA, American Spinal Injury Association) presenta una clasificación internacional de lesiones vertebrales donde escala la graduación de función motora y de deficiencia (ASIA, 2019). La primera escala mostrada en la Tabla 1, indica el nivel de fuerza de los músculos respecto a la gravedad y sirve de referencia para la segunda escala, Tabla 2, que indica el nivel de la lesión medular. En conjunto estas dos escalas permiten determinar que después de una lesión vertebral, aunque el paciente conserve alguna movilidad por debajo de la propia lesión, no siempre será capaz de lograr movimientos normales.

Por otra parte, en (Moreno y Amaya, 2009) se menciona que las personas que padecen lesiones medulares sufren cambios en la forma como viven, debido a que surge la dependencia hacia las personas a su alrededor, afectan su imagen corporal, sus oportunidades de empleo se ven reducidas por lo tanto su economía se ve afectada, así como su interacción social, esto altera la percepción propia del ser, lo que genera una clara amenaza a la propia integridad. Estas personas enfrentan un gran desafío ya que las actividades que se consideraban sencillas o simples de realizar se convierten en un reto, que en ocasiones requieren del apoyo de otras personas o del uso de equipos especiales para realizarlas, lo que genera sentimientos

de frustración (Moreno y Amayo, 2009). Por ello, la actividad fundamental para estas personas y su entorno, es comprender su lesión, sus consecuencias y desarrollar nuevas habilidades para manejar su nuevo estilo de vida, ya que su nivel de independencia será proporcional a su estado de salud y la habilidad en el manejo de nuevas tecnologías.

Actualmente se han desarrollado programas gubernamentales y privados que prometen mantener la salud integral de los pacientes con lesiones en las vértebras, sin embargo, el principal enfoque de estos es mejorar la movilidad física, dejando de lado la salud mental y emocional. Es por ello que se vuelve pieza clave en el mejoramiento de la calidad de vida abarcar esas áreas y brindarles la posibilidad de realizar actividades que les ayuden a expresarse y liberar parte de su estrés mediante pasatiempos como podrían ser escribir o dibujar

Tabla 1: Escala de graduación motora (ASIA, 2019)

Nivel	Graduación Función Motora
0	Parálisis total
1	Contracción visible o palpable
2	Movimiento activo, rango de movimiento (ROM) completo con eliminación de gravedad.
3	Movimiento activo, ROM completo contra la gravedad
4	Movimiento activo, ROM contra resistencia moderada en una posición muscular específica.
5	(Normal) ROM completo contra resistencia total en una posición específica.
NE	No examinable (por inmovilización, dolor intenso que impide calificar al paciente, amputación de una extremidad)

Tabla 2: Escala de deficiencia (ASIA, 2019)

Escala	Descripción
A = Completa	No hay función sensitiva ni motora por debajo de la lesión. Abarca los segmentos sacros S4 y S5
B = Sensitiva incompleta	Hay función sensitiva, pero no motora, por debajo del nivel neurológico de la lesión (NNL) y se conserva cierta sensación en los segmentos sacros S4 y S5
C = Motora incompleta	Hay función motora por debajo del NNL, pero más de la mitad de los músculos claves tienen una fuerza muscular menor de 3 (no son lo suficientemente fuertes para moverse contra la gravedad)
D = Motora incompleta	Hay función motora por debajo del NNL y por lo menos la mitad de los músculos claves tienen una fuerza muscular de 3 o mayor (las articulaciones pueden moverse contra la gravedad).
E = Normal	Las funciones sensitivas y motoras son normales.

2. Marco de referencia

A lo largo de la última década se han desarrollado diversos equipos o dispositivos enfocados a mejorar la calidad de vida de las personas que padecen algún grado de lesión medular, a continuación, se mencionan algunos trabajos que permiten el control de dispositivos a través de señales que una persona con paraplejía o tetraplejía pueda generar.

Rodríguez Moya planteó diseñar un prototipo de silla de ruedas que pudiera ser controlado mediante una aplicación Android para mejorar la movilidad y autonomía a las personas con discapacidad física (Rodríguez, 2016). Los autores en (Machado, et al. 2015), mencionan en su artículo que la cuadriplejía imposibilita conducir una silla de ruedas manual o eléctrica, por lo que realizaron un dispositivo de control para una silla de ruedas manual mediante señales eléctricas generadas por la cara, que provocan el desplazamiento de la

silla de ruedas. Además, diseñaron un teclado ocular que permite al usuario escribir a través de los movimientos oculares. En la Universidad de Concepción se realizó un trabajo donde se diseña un modelo funcional de un teclado capacitivo, el cual se activa con el tacto y tiene como finalidad ayudar a las personas con dificultad motora a utilizar de manera más fácil un computador (Ulloa, 2016). Esto se puede adaptar a una persona con lesión medular con el fin de permitirle usar una computadora, lo cual abre todo un abanico de posibilidades de actividades de recreación para el usuario y así ayudar a combatir sus afecciones emocionales. Castillo et al. (2017) presentan el desarrollado un dispositivo apuntador denominado IMU-Mouse, el cual opera con los movimientos de la cabeza interpretados por un acelerómetro y un giroscopio para lograr el control de un mouse enfocado a ayudar a personas con lesiones medulares. El trabajo de los autores Arboleda et al. (2009) presenta un dispositivo que, mediante encefalografía, registra los potenciales evocados generados por el cerebro al observar diferentes letras o íconos, para después interpretar dichas señales y lograr una comunicación que permita que el usuario escriba palabras o elabore mensajes.

3. Planteamiento del problema y solución propuesta

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI, en México el 54.5% de la población presenta discapacidad relacionada con caminar y moverse (INEGI, 2020). Una persona parapléjica ha perdido movilidad y sensibilidad en las extremidades inferiores, mientras que una persona tetrapléjica perdió sensibilidad en ambas extremidades

3.1. Planteamiento del problema

Las personas que presentan paraplejia o tetraplejia no son capaces de realizar actividades cotidianas por sí mismas, como ir al baño, cambiarse, comer, entre otras, esto genera altas probabilidades de que sufra algún grado de depresión al requerir la ayuda constante de otras personas para casi todas sus actividades. Así mismo, esta población es susceptible a presentar sentimientos de depresión generados por su condición, ya que cuentan con pocas opciones de actividades a realizar como entretenimiento, distracción o recreación, siendo una de ellas la posibilidad de expresarse de manera escrita o pictórica para lidiar con los sentimientos de frustración (Moreno y Amaya, 2009).

3.2. Solución propuesta

La directora del Centro Integral de Terapia del Arte (Nosovsky, 2022), indica que mediante el uso de elementos de arte como imágenes o dibujos se logra la expresión de los sentimientos, solución de problemas, desarrollo de habilidades creativas, entre otras. Por lo tanto, a través de la terapia del arte, existe la posibilidad de ayudar a las personas con tetraplejia o paraplejia a disminuir su depresión. Es por esto que se propone diseñar y construir un dispositivo que permita trazar líneas en una superficie como lo puede ser una hoja de papel, a través de la interpretación de movimientos e inclinaciones de la cabeza, para personas que presentan la condición de tetraplejia completa. La velocidad de desplazamiento de los trazos está fijada a un valor constante,

siendo el usuario quien deberá solicitar si quiere una mayor o menor velocidad de movimiento de la estructura móvil.

4. Diseño y construcción del dispositivo

El procedimiento seguido para el diseño y construcción del dispositivo trazador consta de dos diferentes partes, la primera de ellas es la construcción de la estructura del dispositivo trazador donde se toma como referencia el diseño mostrado en Arnold (2017) de un robot cartesiano tipo plotter CNC, posteriormente con el uso de una impresora 3D se obtienen las piezas y se procede a construir el prototipo. Como segunda parte se diseñan y construyen los circuitos de control, el primero de ellos será el encargado de tomar las señales de los movimientos de la cabeza del usuario mientras que el segundo determinará qué acción hacer sobre el dispositivo trazador

4.1. Estructura del trazador

El principio de funcionamiento de la estructura de este prototipo permite obtener los movimientos en las 4 direcciones necesarias para realizar trazos, es decir, en el eje X permite el desplazamiento a la derecha y a la izquierda, mientras que en el eje Y permite el movimiento hacia arriba y hacia abajo, todos estos movimientos los hace a través del sentido de giro de los motores y de una sola banda dentada (Arnold, 2017). En la Figura 3 se muestra la estructura del sistema de desplazamiento donde se puede observar la colocación de la banda dentada que permite los 4 movimientos, mientras que la Figura 4 muestra el sentido de movimiento con respecto al giro de los motores. Haciendo uso del software de Fusion 360 de Autodesk, se realizaron los diseños 3D de la estructura del prototipo trazador, así como los diseños de la estructura que contendrá la parte electrónica, mostrado más adelante. Así mismo se realizó el proceso de ensamble de todo el sistema diseñado para depurar errores en las piezas antes de tenerlo en físico. En la Figura 5 se pueden apreciar algunas de las piezas que se diseñaron para el sistema trazador, las cuales toman como referencia el diseño de Arnold (2017) pero son adaptadas al sistema. Obtenido el sistema de desplazamiento en los ejes X y Y del trazador, se procede a realizar las piezas necesarias para el desplazamiento en Z, que en este caso específico solo es el control de la posición del elemento que permitirá el trazado. Las piezas para este fin se muestran en la Figura 6, siendo la Figura 6 a) la encargada de dar soporte al elemento trazador (lápiz, bolígrafo, plumón, entre otros) y la Figura 6 b) es la que permite el montaje del eje Z sobre la estructura de desplazamiento de los ejes X y Y.

Para el armado del prototipo en simulación y en físico, el procedimiento fue el siguiente: El primer paso consiste en la colocación de baleros en la base del soporte central, tal como se ve en la Figura 7, los baleros de color negro colocados horizontalmente son lineales Im8uu y los azules colocados verticalmente son baleros 624zz que cuentan con su respectivo soporte, tornillo y tuerca para su ajuste. Después se colocan 4 espaciadores en los pilares del soporte central base para colocar la parte superior del soporte central que tendrá colocados 4 baleros Im8uu adicionales usando tuercas y tornillos para lograr una sujeción adecuada, tal como se observa en la Figura 8. El siguiente paso es agregar las guías del eje X, estas guías lineales se pasan a través de los baleros

lineales inferiores y al otro extremo de dichas guías se colocan los soportes del eje X, tal como se observa en la Figura 9 a). Enseguida se realiza el mismo procedimiento, pero ahora con las piezas del eje Y, colocando las 2 guías lineales a uno de los soportes del eje Y para después pasar las guías a través de los baleros lineales superiores, y finalmente colocar en el otro extremo el soporte del eje Y restante, ver Figura 9 b). Para el eje Z, en uno de los soportes del eje Y se coloca un balero 624zz, donde se colocará el soporte del eje Z y sobre este mismo el soporte del marcador, tal como se observa en la Figura 9 c).

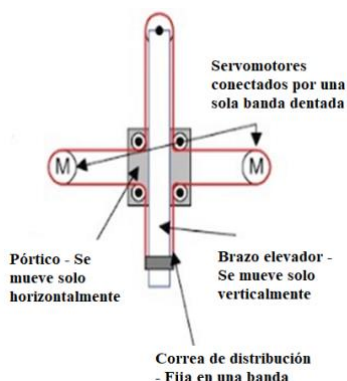


Figura 3: Sistema de desplazamiento del prototipo.

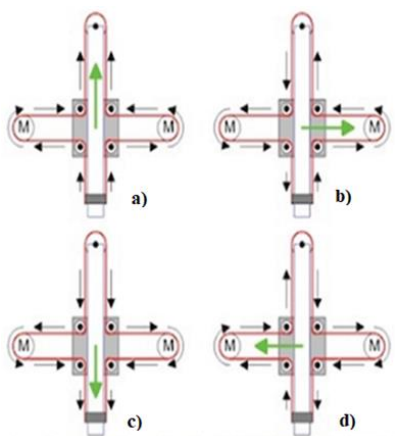


Figura 4: Movimiento del sistema de trazado. Se indica el sentido de giro de los servomotores para logra el movimiento: a) hacia arriba, b) a la derecha, c) hacia abajo y d) a la izquierda.

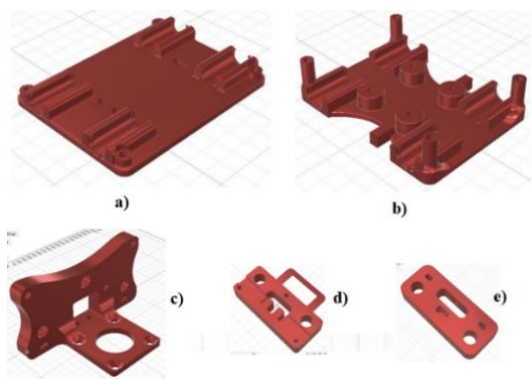


Figura 5: Piezas del sistema de desplazamiento, en a) y b) se muestran las piezas superior e inferior del elemento central, c) es el soporte del eje X, d) y e) son los soportes del eje Y.

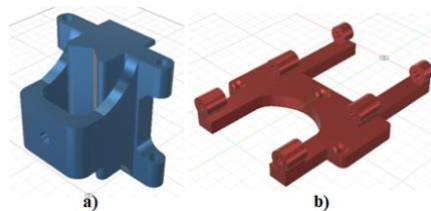


Figura 6: Piezas del eje Z, soporte a) del marcador y b) a la estructura base.

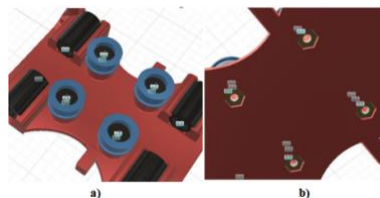


Figura 7: Colocación de los baleros, soportes, tornillos y tuercas en el soporte central, a) vista superior y b) vista inferior.



Figura 8: Ensamble de la estructura del soporte central.

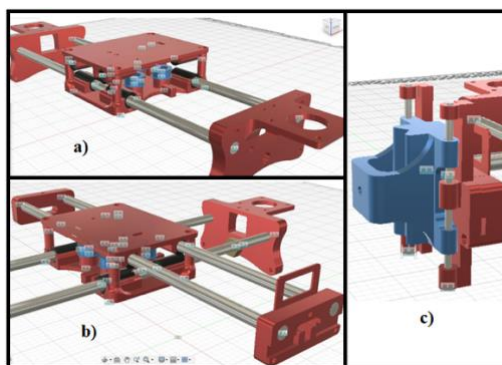


Figura 9: Ensamble y sujeción del a) eje X, b) eje Y y c) eje Z.

El último paso consiste en la colocación de los motores a pasos junto con su polea dentada Gt2, lo que permite colocar la banda dentada en el orden requerido para permitir el movimiento de la estructura. Una vez que se observa que los ensambles fueron adecuados y se ajustaron todas las piezas se proceden a imprimir mediante el uso de una impresora 3D Artillery Sidewinder x2 en material PLA durando un total de 18 horas y 13 minutos, en la Figura 10 se muestra el uso del software Ultimaker Cura para realizar la impresión.

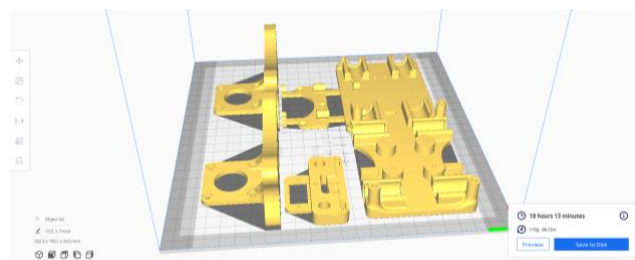


Figura 10: Configuración en el software de Ultimaker Cura de la impresión de las piezas, material usado y tiempo de impresión.

4.2. Circuitos electrónicos

El sistema electrónico usa como base un acelerómetro con giroscopio, este permite detectar los giros e inclinaciones de la cabeza del usuario para así enviar la señal de acción a los motores para realizar el movimiento correspondiente. Para crear los circuitos de conexión se usó el software gratuito de Fritzing, en este se diseñaron las placas para el circuito que adquiere las señales del movimiento de la cabeza y para el circuito que las transforma en movimiento en el dispositivo trazador.

En la Figura 11 a) se muestra el diagrama de conexión para el circuito de adquisición de la señal, donde se conecta un acelerómetro con giroscopio MPU6050, un módulo de bluetooth HC-05 y una tarjeta Arduino Nano. Este diagrama de conexión permite obtener el diseño de tarjeta de circuito impreso (PCB) tal como se muestra en la Figura 11 b).

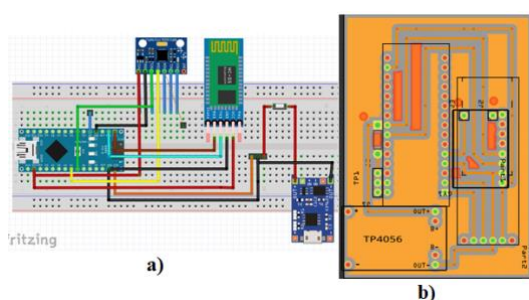


Figura 11: Circuito de adquisición a) diagrama de conexión y b) PCB.

Así mismo, se diseña el circuito que permite el control de los motores para realizar el desplazamiento, este se observa en la Figura 12 a), se utiliza una tarjeta Arduino Mega con conexión a dos controladores de motores a pasos DRV8825 que controlarán el desplazamiento en el eje X y el eje Y, un módulo bluetooth que permitirá recibir la información de la tarjeta que adquiere la señal del movimiento de cabeza y un servomotor que permitirá el movimiento en el eje Z que posiciona el elemento trazador. En la Figura 12 b) se muestra el diseño de PCB del circuito de control de movimiento. Por último, se realiza el diseño de una caja para montar la tarjeta de adquisición en la cabeza del usuario, esta se muestra en la Figura 13.

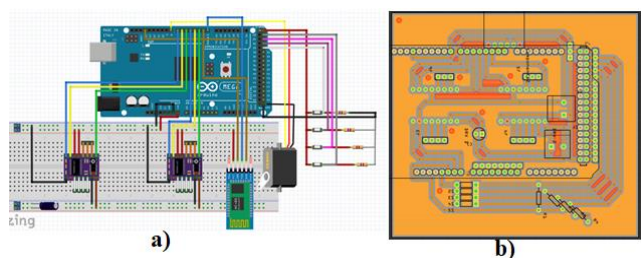


Figura 12: Diseño de circuito de control a) diagrama de conexión y b) PCB.

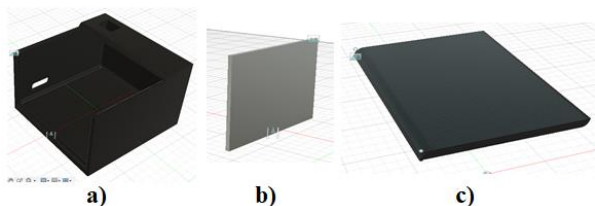


Figura 13: Diseño 3D de la estructura para el circuito de adquisición a) estructura principal, b) tapa lateral y c) tapa superior.

5. Resultados

El prototipo del trazador obtenido mostrado en la Figura 14 tiene un área de trabajo máxima de 18.3 cm x 21.4 cm la cual es menor a una hoja de tamaño carta, por lo cual, se puede usar este tipo de hojas para el trazado, la velocidad de movimiento se encuentra dentro de un rango de 0 a 23mm/s, siendo fijada para las pruebas a 10mm/s. Así mismo, se obtuvieron las tarjetas de los circuitos de adquisición y control.



Figura 14: Ensamble final del prototipo físico.

El prototipo final que se utiliza para pruebas en laboratorio se muestra en la Figura 15, en este la tarjeta de adquisición se empaquetó en la caja diseñada con anterioridad a la que se le coloca una etiqueta con un dibujo que indica cual es el frente de la caja, además se le agrega un conjunto de cintas para fijarlo a la cabeza. Para el circuito de control se hace una caja con material MDF la cual se coloca a un lado del sistema de desplazamiento.



Figura 15: Prototipo final.

5.1. Pruebas de funcionamiento de componentes

Para verificar el funcionamiento se llevaron a cabo diferentes etapas de prueba de los componentes a utilizar, tanto por separado como en conjunto. La primera prueba realizada fue verificar la comunicación bluetooth entre el maestro y esclavo con el dispositivo trazador controlado por medio de un joystick, el cual permite realizar el movimiento de los motores en las 4 direcciones, así como la colocación del elemento trazador sobre el eje Z, en la Figura 16 se observa la prueba realizada en la que se obtuvo que la estructura se mueve libremente.



Figura 16: Prueba del dispositivo trazador mediante joystick.

Posteriormente se realizaron las pruebas de adquisición de movimientos de la cabeza para obtener los ángulos de inclinación yaw, pitch y roll. Se programa el sistema para obtener directamente los tres valores de los ángulos de inclinación mostrándolos en el plotter serial del IDE de Arduino para visualizar en una gráfica el comportamiento de los ejes de inclinación, tal como se observa en la Figura 17, la línea verde corresponde al eje X, la línea roja al eje Y y la línea amarilla al eje Z. En la Figura 17 a) se muestra la gráfica con la cabeza en posición erguida en vertical, donde los valores son cercado a cero, en la Figura 17 b) se observa un movimiento de roll de izquierda a derecha que controla el eje Z del sistema, en la Figura 17 c) se hace un movimiento de pitch de adelante hacia atrás que controla el eje X del sistema y en la Figura 17 d) se tiene el movimiento yaw que es el giro sobre la vertical y que controla el eje Y.

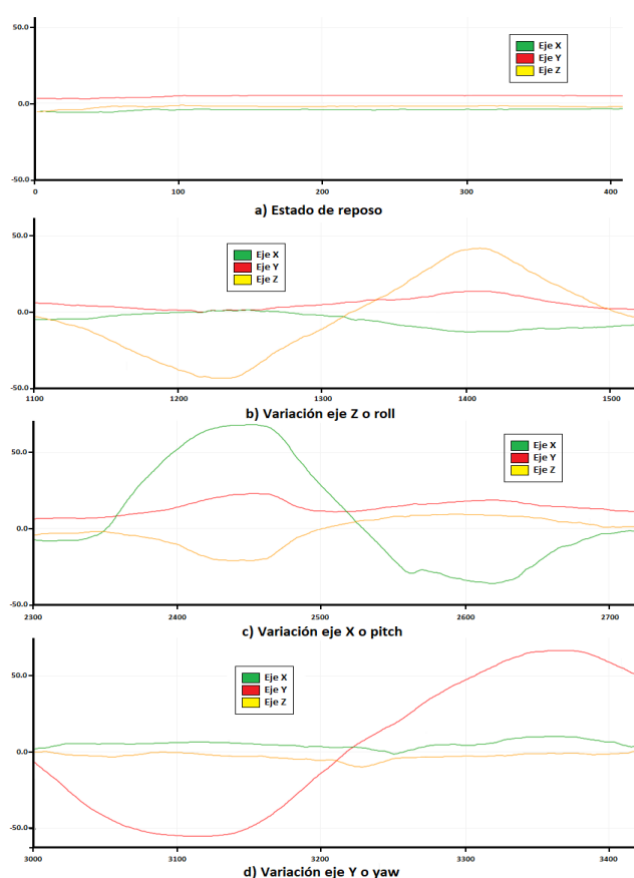


Figura 17: Gráficas de las pruebas de cabeceo.

5.2. Pruebas de funcionamiento de componentes

Listos los componentes separados, se realizaron pruebas en conjunto con el prototipo completo. Para ello, se estableció la comunicación bluetooth entre el circuito de adquisición y el circuito de control, de manera que, dependiendo de los valores de inclinación que detectara el sensor, enviara datos a través de la comunicación bluetooth y con ellos establecer condiciones que indican el momento en que debe moverse cada motor, así como su sentido de giro. Se le solicitó a un usuario utilizar el dispositivo, y durante su uso, este realizó varios trazos. Las pruebas realizadas se enlistan a continuación: línea recta horizontal, línea vertical, líneas rectas horizontales y verticales

en secuencia y escribir su nombre, estos resultados se observan en la Figura 18.

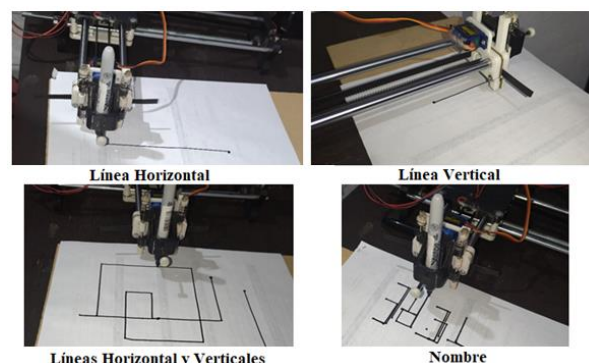


Figura 18: Pruebas de trazado.

6. Conclusiones y trabajo futuro

Mediante el desarrollo de este proyecto fue posible obtener el prototipo funcional que se había planteado inicialmente. Se logró obtener un dispositivo capaz de detectar las inclinaciones de la cabeza que una persona realiza, y a partir de esos datos enviar señales de acción a la estructura móvil para desplazar el elemento trazador hacia la dirección en que fue inclinada la cabeza, para así realizar trazos sobre una superficie plana en la que se pueda dibujar. Gracias a las pruebas realizadas por el usuario, fue posible observar algunas áreas de mejora tal como la necesidad de colocar sensores de contacto para indicar el límite de movimiento del robot cartesiano y así evitar posibles daños en los motores y en la estructura en general. La realización de pruebas reales es un aspecto que falta de ser implementado; aun así, se visualizan resultados positivos puesto que el dispositivo elaborado cumple con las expectativas y con su función principal, por lo que puede afirmarse que una persona en condición de tetraplejía podría realizar trazos en una hoja de papel a través de los movimientos de su cabeza. Como trabajo a futuro se piensa añadir un módulo de detección de voz, mediante el cual se puedan procesar comandos de voz que puedan ser utilizados para otorgar más opciones de movimiento y sea más sencillo para el usuario el usar el dispositivo. Otra opción a implementar es la posibilidad de realizar trazos en líneas curvas.

Referencias

- ASIA American Spinal Injury Association. (2019). Normas internacionales para la clasificación neurológica de lesión de la médula espinal. URL: https://asia-spinalinjury.org/wp-content/uploads/2019/11/International-Standards-Worksheet-Spanish-Final_10_28_2019.pdf
- Arboleda, C., García, E., Posada, A. y Torres, R. (2009, Julio). Diseño y construcción de un prototipo de interfaz cerebro-computador para facilitar la comunicación de personas con discapacidad motora. EIA. (11), pp. 105-115. URL: <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n11/n11a09.pdf>
- Arnold, H. (2017). Drawing Robot - Arduino Uno + CNC Shield + GRBL. Thingiverse. URL: <https://www.thingiverse.com/thing:2349232>
- Banco Mundial. (2023, 3 de abril). La inclusión de la discapacidad. URL: <https://www.bancomundial.org/es/topic/disability>
- Bahena-Salgado, Y. y Bernal-Márquez, J. (2007). Calidad de vida de los pacientes con paraplejía secundaria a lesión vertebral traumática. *Acta ortopédica mexicana*, 21 (1), pp. 3-7. URL: <https://www.medigraphic.com/pdfs/ortope/or-2007/or071b.pdf>
- Castillo-Benavides, C. A., García-Arias, L. F. y Duque-Méndez, N. D. (2017, 30 de octubre). IMU-Mouse: diseño e implementación de un dispositivo

- apuntador dirigido al desarrollo de interfaces adaptativas para personas con discapacidad física. *Tecnológicas*, 21(41), pp. 63-79.
- Gómez, W. (2022, 28 de febrero). Personas con discapacidad de acuerdo con el Censo 2020 del INEGI. Laboratorio de datos. URL: <https://obindi.org/trabajos/laboratorio-de-datos/personas-con-discapacidad-de-acuerdo-con-el-censo-2020-del-inegi/#:~:text=El%20Censo%20consider%C3%B3%20seis%20tipos%20de%20discapacidades%3A%20Discapacidad,Mental%20%28Personas%20con%20alg%C3%BAn%20problem>
- INEGI (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. URL: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Institut Guttman. (2019). *Neurorrehabilitación Lesión Medular*. URL: <https://www.guttmann.com/es/treatment/lesion-medular>
- Machado, A. J., Amador, J. F. y Coello, M. J. (2015). *Wheelchair control system for quadriplegics and ocular keyboard*. 2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN), pp. 1-5, Tegucigalpa, Honduras.
- Moreno-Fergusson, M. y Amaya-Rey, P. (2009). Paraplejía: pasado y futuro del ser. *Index de Enfermería*, 18(3), pp. 185-189. URL: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1132-12962009000300010&lng=es&tlng=es
- Nosovsky, G. (2022). Centro Integral de Terapia del Arte. [En línea]. URL: <https://terapia-de-arte.com/ventajas-y-desventajas-de-la-terapia-de-arte/>
- Rodríguez Moya, F. A. (2016, Julio). *Aplicación Android para el control de dispositivos de movilidad usadas en la asociación ASOPLEJICAT*. Universidad Regional Autónoma de los Andes. URL: <http://dspace.uniandes.edu.ec/handle/123456789/4248>
- Ulloa Chandía, M. A. (2016). *Diseño de teclado computacional capacitivo para personas con limitaciones motoras*. [Tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil Biomédico]. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Concepción.
- WHO (2013, 11 de noviembre). *International Perspectives on Spinal Cord Injury (IPSCI)*. Editado por Jerome Bickenbach.