

# Diseño de control tipo joystick para vehículos eléctricos como scooter y sillas de ruedas motorizadas

*Joystick type control design for electric vehicles such as scooters and motorized wheelchairs*

NELSON DUGARTE<sup>1,2</sup>, ANTONIO ALVAREZ<sup>1</sup>, NEGMAN ALVARADO<sup>1,3</sup>, EDINSON DUGARTE<sup>2</sup>. ÁLVARO OZAHL<sup>1</sup>.

## RESUMEN

Este artículo trata sobre el diseño de un mando de control electrónico utilizable en vehículos motorizados para personas con movilidad reducida. El instrumento desarrollado consta de dos partes, un hardware electrónico y un software de control. El hardware del prototipo consiste en un circuito electrónico diseñado para controlar la velocidad del vehículo por medio de un joystick miniatura tipo gamer. Esto permite el manejo del aparato con pequeños movimientos y mínimo esfuerzo por parte del paciente. El algoritmo del software es implementado en una tarjeta programable Arduino tipo UNO. Permite el control de dos motores eléctricos de corriente continua (DC) normalmente utilizados en mecanismos de tracción de sillas de ruedas eléctricas y en scooter destinados a personas discapacitadas. La salida del Arduino maneja la velocidad de giro de los motores por medio de un circuito electrónico que limita la potencia utilizando la técnica de modulación del ancho del pulso (PWM). La novedad del sistema consiste en el desarrollo de tecnología propia, donde se incorporan mejoras como la posibilidad de viraje angular pronunciado, que permite al usuario comandar el aparato en espacios reducidos, típicos de los ambientes domésticos comunes. Las pruebas preliminares demostraron la

## ABSTRACT

This article deals with an electronic control unit design usable in motorized vehicles for people with reduced mobility. The developed instrument consists of two parts, an electronic hardware and a control software. The prototype's hardware consists of an electronic circuit designed to control the speed of the vehicle through a miniature gamer-style joystick. This allows handling of the device with small movements and minimal effort on the part of the patient. The software algorithm is implemented in an Arduino type UNO programmable card. It allows the control of two direct current (DC) electric motors, normally used in electric wheelchair traction mechanisms and in scooters intended for disabled people. The output of the Arduino manages the rotational speed of the motors through an electronic circuit that power limits using the pulse width modulation (PWM) technique. The system novelty consists in the development of its own technology, where improvements are incorporated such as the possibility of a pronounced angular turn, which allows the user to control the device in small spaces, typical of common domestic environments. Preliminary tests demonstrated the efficiency of system. The instrument is currently undergoing testing and certification in Regional Institute of Bioengineering (IRB)

1 Instituto Regional de Bioingeniería (IRB), Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Mendoza, Argentina.

2 Grupo de Bioingeniería Regional la Rioja (GEMLAR) – UTN, Mendoza, Argentina.

3 Grupo de Ingeniería Biomédica (GIBULA), Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, Venezuela. Mail: ndj0227@gmail.com, antonioalvarezabril@yahoo.com.ar, edinson0909@gmail.com, gabo\_121\_7@hotmail.com, mgomez\_ar@hotmail.com, jorge.cassia@ypf.com.

eficiencia del sistema. El instrumento se encuentra actualmente en proceso de prueba y certificación en los laboratorios del Instituto Regional de Bioingeniería (IRB) de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Facultad Regional Mendoza (FRM).

**Palabras clave:** Mando electrónico, Manejo de motores DC, Software de control, Sillas de ruedas eléctricas, Discapacidad motriz.

laboratories of the National Technological University (UTN) Mendoza Regional Faculty (FRM).

**Key words:** Electronic control, DC motor management, Control software, Electric wheelchairs, Motor disability.

## INTRODUCCIÓN

Los vehículos eléctricos motorizados para las personas con movilidad reducida, plantean una solución parcial a la discapacidad por deficiencia en las extremidades inferiores. El objeto de estos aparatos es permitir que el usuario se pueda desplazar por medio del control realizado con sus extremidades superiores o con la intervención de otra persona que funge como asistente<sup>(1)</sup>.

Entre las diferentes discapacidades se encuentra la discapacidad motriz<sup>(2)</sup>, la cual puede ser de origen primario (genético, degenerativo) y/o secundario (prenatales, perinatales, infecciosas, autoinmunes, traumáticas, vasculares, tóxicas, metabólicas, paraneoplásicas). También las alteraciones musculares con parálisis (flácida o espástica), así como las deformaciones óseas y alteraciones del sistema nervioso (central y/o periférico), pueden tener simultáneamente diversas causas (primarias y secundarias). Estas discapacidades varían con el tipo y severidad de la causa<sup>(3)</sup>, como por ejemplo, en dolor neuropático o enfermedades de depósito metabólico, deformaciones óseas, ataxias, trastornos cognitivos, enfermedades de motoneurona, atrofas musculares, miopatías, miastenia, trastornos extrapiramidales, trastornos del movimiento, enfermedades desmielinizantes, encefalitis, meningitis, abscesos, granulomas, plexitis, neuritis, traumas, neurotmesis, axonotmesis, neuropraxias, lesiones vasculares encefálicas, mielopatías y/o polineuropatías (tóxica, diabética, hipotiroidea, paraneoplásica, etc.). Entre las comorbilidades de la discapacidad motriz se incluyen trastornos afectivos (depresión, ansiedad), mecanismos de adaptación psicológica, alteraciones

conductuales o de personalidad<sup>(4)</sup>, diferentes grados de dependencia y asistencia, así como diferente acceso a servicios, información, educación, socialización y protección personal, que en conjunto afecta su calidad de vida<sup>(5)(6)</sup>.

Cuando una persona con movilidad reducida dispone de un equipo que lo pueda trasladar de manera independiente, mejora notablemente su calidad de vida, facilitando la igualdad de acceso para elegir y tomar decisiones, acceder a todo tipo de información, participar en el proceso de la educación, el empleo, el ocio y la vida familiar<sup>(7)(8)</sup>.

El primer diseño de silla de ruedas, con características similares a las modernas, se realizó para el rey Felipe II de España en el año 1595. Esta silla permitía que el usuario se pudiese mover, de forma asistida por un ayudante, y entre sus cualidades especiales destacaban el reposapiés y respaldar ajustable<sup>(9)</sup>. Hacia el año 1665, Stephen Farfler, un joven relojero alemán de solo 22 años construyó el primer vehículo autopropulsable para su propio uso<sup>(10)</sup>.

En 1783, surge la silla "Bath", la cual domina el mercado hasta el siglo XIX. Según Baez Martínez, en 1869 se patenta un modelo con las características modernas de ruedas traseras propulsables por el mismo usuario y ruedas delanteras de tamaño reducido. En los años siguientes se añadieron los aros de propulsión y ruedas de goma. En 1900 se introdujeron las ruedas radiadas en las sillas manuales y finalmente en 1916 se fabricó en Londres la primera silla de ruedas propulsada por medio de motores<sup>10)</sup>. Baez Martínez plantea que las primeras sillas motorizadas seguían teniendo la característica de ser manuales, pero adaptadas con

diversos sistemas de engranajes poco eficientes y difíciles de manipular. Posteriormente se adoptaron los motores de DC y sistemas de control más precisos y eficientes. Pero no fue hasta el año 1924 que se desarrolló el primer modelo impulsado eléctricamente <sup>(9)(10)</sup>.

Las últimas décadas han supuesto un enorme avance, tanto para las sillas manuales como para las eléctricas. La introducción de nuevos materiales y nuevas tecnologías en la producción ha permitido mejorar el rendimiento y sobretodo la posibilidad de personalizar las sillas de acuerdo a las necesidades individuales de cada persona. De la misma manera se mejoran los diseños del conjunto motor al desarrollarse motores DC más eficientes, con etapas de potencia con mejor aprovechamiento de la energía, e integrados a baterías con mayor autonomía, menor volumen y por ende menor peso xx.

Con el pasar de los años mejoraron las técnicas para controles electrónicos. La implementación de componentes como el MOSFET y el IGBT hicieron más eficiente la etapa de potencia <sup>(11)(12)(13)</sup>. El diseño con microcontroladores (UPC, 2006) permitió sofisticar la utilidad de los mandos en el manejo de motores DC. La utilización de estas tecnologías permite diseñar mandos de control que mejoran notablemente el movimiento de la silla de ruedas en todas las direcciones.

Desde el año 2013, en los laboratorios del Instituto Regional de Bioingeniería (IRB) del Centro Regional de Computación y Neurociencia (CeReCoN) de la Universidad Tecnológica Nacional – Regional Mendoza (UTN - FRM) <sup>(14)(15)</sup>, se realiza un esfuerzo en conjunto entre la Escuela de Ingeniería Electrónica y la Escuela de Ingeniería en Sistemas de Información en el desarrollo de un mando de control con tecnología propia. Este desarrollo pretende aplicar las características de los controles modernos, pero con algunas mejoras incorporadas en el sistema para hacerlo más eficiente. Uno de los problemas que se pretenden solucionar está determinado por la relación de control en el efecto de viraje en espacios reducidos, con el propósito de simplificar el uso de sillas de ruedas eléctricas, especialmente en

ambientes domésticos. Adicionalmente, el desarrollo de un dispositivo de control de este tipo, con tecnología propia, establece un marco tecnológico que asegura el producto a nivel local y garantiza el mantenimiento bajo normas.

La metodología implementada en el sistema desarrollado se puede utilizar en cualquier tipo de mecanismo que utilice motores DC, solo se requiere ajustar los parámetros de los componentes del circuito a las características de los motores a controlar.

## METODOLOGÍA

El diseño del sistema integra una parte hardware y una de software. El hardware está compuesto por los circuitos de control y los de potencia. La etapa de software, permite el manejo de la potencia de los motores como respuesta a las acciones que se realicen sobre la palanca del joystick en los circuitos de control. Los algoritmos del software se diseñaron en el lenguaje de programación de la plataforma Arduino<sup>(16)</sup>. La Fig. 1, presenta la estructura esquematizada del diseño del sistema.

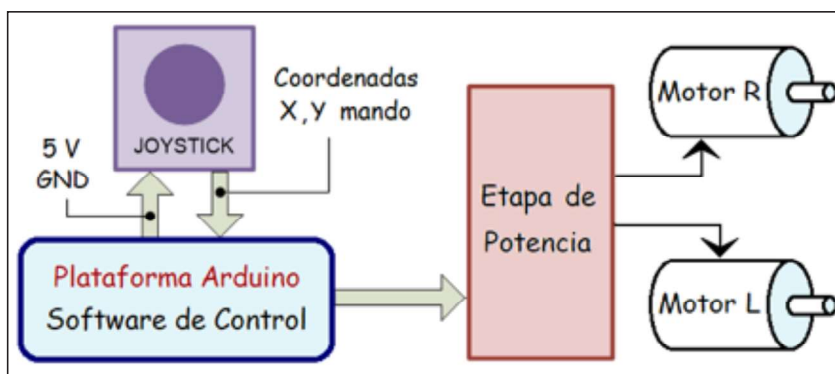
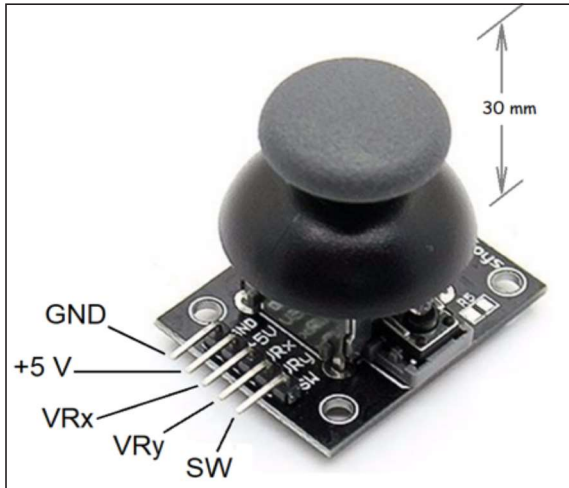


Fig. 1. Esquema simplificado del diseño del sistema.

El sensor de entrada, referenciado en la Fig.1, es un módulo joystick gamer miniatura tipo "thumb control". Este dispositivo electrónico es un selector mecánico de tan solo 30 mm de altura, por medio del cual el usuario puede manejar el aparato como respuesta a las instrucciones de posicionamiento palanca. La Fig. 2, presenta el módulo Joystick miniatura utilizado en el diseño.



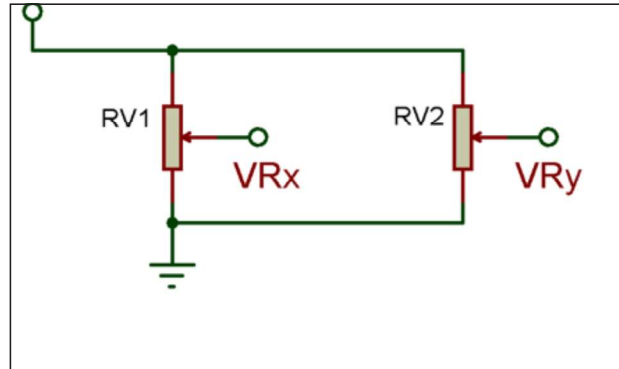
**Fig. 2. Módulo joystick miniatura utilizado en el diseño.**

El módulo joystick utilizado, está compuesto por dos potenciómetros de 10k $\Omega$ , accionados mecánicamente por los movimientos de la palanca. Los potenciómetros, por defecto, se encuentran posicionados al 50% de su valor con el joystick en estado de reposo. La variación de resistencia de los potenciómetros corresponde al movimiento de la palanca con una diferencia específica hasta 90° sobre el plano. Esto define que, el movimiento de la palanca en cualquier dirección ajusta la posición de uno o ambos potenciómetros y por lo tanto cambia el valor de resistencia eléctrica en sus salidas.

En el circuito de control, cada potenciómetro del Joystick se conecta como divisor de tensión, con lo cual, el voltaje de salida señala el sentido de giro y el nivel de potencia que se desea en los motores de tracción del vehículo. Por consiguiente, el valor de la resistencia eléctrica de los potenciómetros señalado por la acción sobre el mando determina con precisión el sentido y velocidad de movimiento del vehículo motorizado. La Fig. 3, muestra el modelo simplificado de la conexión eléctrica del Joystick en el circuito de entrada.

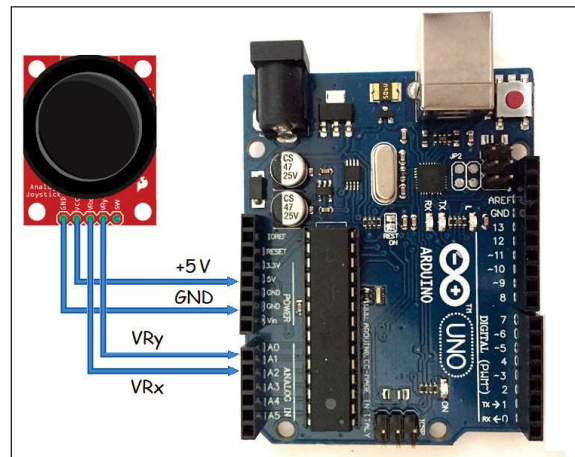
### ETAPA DE CONTROL

Para esta etapa se utilizó una tarjeta programable de la plataforma Arduino, modelo UNO (17). Este dispositivo consta de un Microcontrolador (18) ATmega328 y



**Fig. 3 Modelo simplificado del módulo joystick.**

los circuitos periféricos que le permiten funcionar como una plataforma digital independiente. Se alimenta con 12 Volts (V), los cuales se obtienen de la energía de una de las baterías que se utilizan en los vehículos eléctricos motorizados. Las entradas analógicas A0 y A1 se conectan a VRx y VRy del circuito de entrada del módulo joystick. Los 5 V de alimentación del circuito de entrada los suministra la plataforma Arduino. La Fig. 4, presenta el esquema de conexión entre el módulo Joystick y la tarjeta Arduino UNO.



**Fig. 4. Esquema de conexión entre el módulo Joystick y la tarjeta Arduino UNO.**

Los pines digitales 7, 8, 9, 10 y 12 de la tarjeta Arduino, están configurados como salidas y se utilizan para el manejo del circuito de potencia. Los pines digitales 9 y 10 se utilizan como salidas de pulsos con an-



cho variable "Pulse Width Modulation" (PWM) (19)(20). Estas salidas se utilizan para controlar los circuitos de la etapa de potencia, por medio de cambios en el ciclo de trabajo del tren de pulsos.

### ETAPA DE POTENCIA

El desplazamiento de la silla de ruedas depende del trabajo mecánico realizado por dos motores de corriente continua (DC). Estos motores, son máquinas que transforman la energía eléctrica en energía mecánica, mediante movimientos rotatorios generados por un campo magnético (21).

Cada motor genera el esfuerzo mecánico que impulsa la silla de uno de los lados en particular. De tal forma, el esfuerzo simultáneo de ambos motores impulsa la silla en línea recta. Si solo se mueve el motor derecho la silla gira hacia la izquierda y si solo se mueve el motor izquierdo, la silla gira hacia la derecha. El movimiento combinado de ambos motores permite realizar cambios de dirección en cualquier ángulo.

La etapa de potencia está conformada por los circuitos que permiten controlar la energía que consume cada motor. La potencia de los motores se controla por medio de la interrupción de la corriente en intervalos de tiempo condicionados por el ancho del pulso PWM (22). La Fig. 4, muestra el diagrama de tiempo de la señal de salida en tres estados de control con PWM, donde los niveles ON y OFF indican si hay o no energía sobre el motor. Se nota que el periodo  $T$  en cada gráfica temporal es el mismo pero el tiempo de encendido  $t$  puede reducirse o ampliarse, disminuyendo o incrementando la potencia total suministrada.

Fig. 4. Estados de control con PWM al 10%, 50% y 75% de la potencia total.

Para controlar el sentido de giro y la potencia de cada motor se utilizaron dos circuitos eléctricos idénticos, como el señalado en la Fig. 5. Este circuito implementa una configuración en puente H con 4 transistores Mosfet de potencia (22)(23). Los Mosfet funcionan como 4 interruptores electrónicos distribuidos en 2 ra-

mas. Un nivel lógico 1 en la señal de entrada identificada como Control 1, activa al transistor Q7 y habilita la entrada de PWM 1 para encender Q6, permitiendo que el motor gire en el sentido que proporciona movimiento de avance a la silla. De la misma forma, Un nivel lógico 0 activa a Q5 y habilita la entrada de PWM para encender Q8, permitiendo que el motor gire en sentido inverso, proporcionando un esfuerzo de retroceso a la silla.

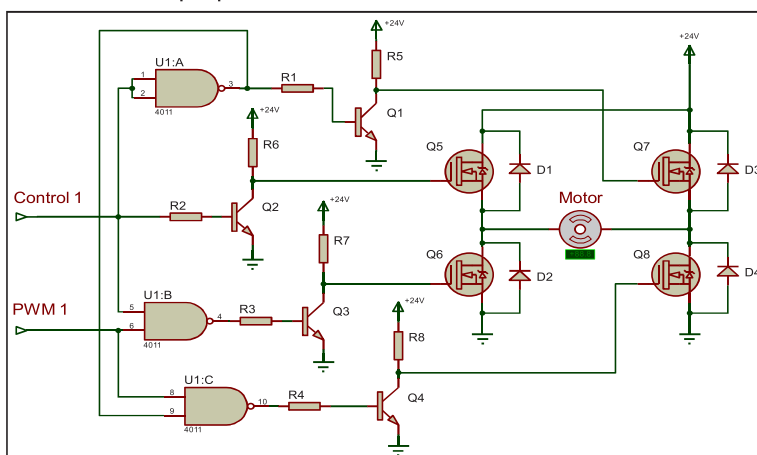
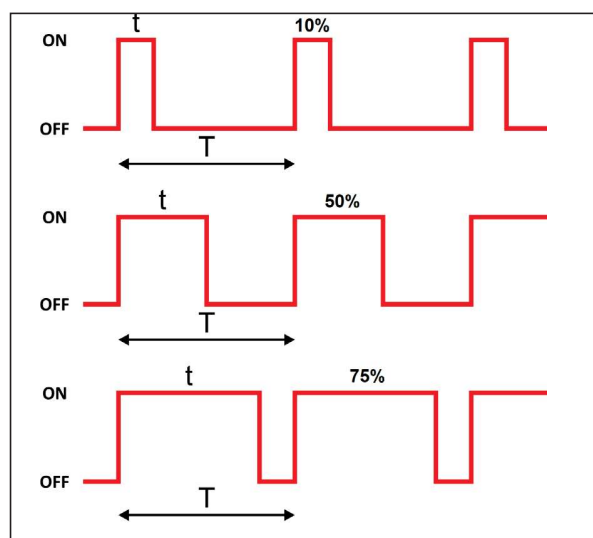


Fig. 4. Diseño esquemático de la etapa de potencia para uno de los motores.

### ETAPA DE SOFTWARE

El algoritmo implementado se desarrolló en lenguaje de programación C asociado al sistema opera-



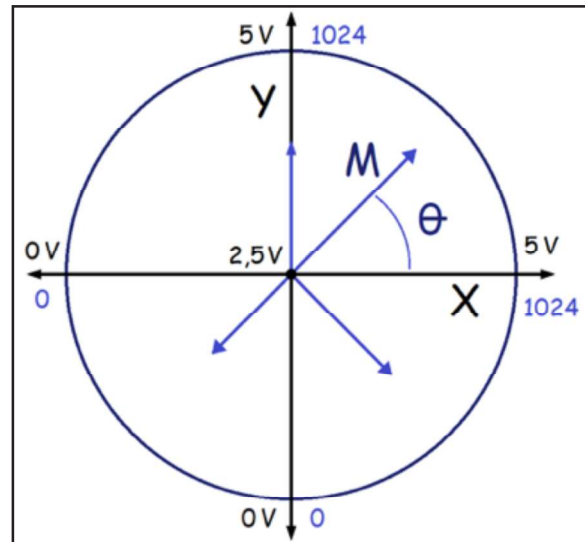
tivo UNIX. El diseño del software se realizó a partir del análisis de los movimientos que se pueden realizar con la palanca del joystick. Si no recibe ningún esfuerzo, los potenciómetros toman por defecto el valor medio de la resistencia eléctrica, con lo cual los divisores de tensión proporcionan 2,5 V en VRx y VRy con respecto a GND. Las señales VRx y VRy se digitalizan utilizando el convertidor analógico a digital (A/D) del Arduino, con 10 bits de precisión. Esto señala que 2,5 V de entrada corresponde al valor de 512, el cual se toma como valor de referencia o nivel de apagado de los motores. La Tabla 1, señala las condiciones preestablecidas para detener o activar los motores en uno u otro sentido de giro.

Joystick	Convertidor A/D	Sentido de Giro
2,6 a 5 V	Entre 514 y 1024	Avance
2,5 V	512	Detenidos
2,4 a 0 V	Entre 510 y 0	Reversa

**Tabla 1. Respuesta de control ante las señales de entrada.**

Los valores mostrados en la columna central de la Tabla 1, corresponden a la conversión A/D de amplitud registrada en el posicionamiento del Joystick, de acuerdo a la expresión de cálculo binario  $2^n$  dada por 10 bits. De esta forma, el sentido de giro de los motores y por ende el desplazamiento de la silla de ruedas estará condicionado por los valores digitales superiores o inferiores a 512.

En la Fig. 5, se aprecian algunas de las múltiples posiciones que puede tomar el posicionamiento de la palanca del Joystick. El vector identificado como "M" corresponde a la intensidad del movimiento de la palanca generada por el usuario, sobre el plano de coordenadas X e Y. Los diferentes valores que puede tomar el vector M se definen por el módulo y la dirección que toma la palanca al moverse.



**Fig. 5. Resultante del movimiento de la palanca del joystick sobre el plano cartesiano.**

El módulo del vector resultante M, determina la potencia en los motores. La ecuación 1, permite calcular el valor del módulo a partir del valor digital resultante de las variaciones de voltaje, en el eje X dado como  $\Delta V_x$ , y en el eje Y dado como  $\Delta V_y$ . Las ecuaciones 2 y 3 definen  $\Delta V_x$  y  $\Delta V_y$  a partir de los valores digitales de VRx y VRy obtenidos del circuito de entrada.

$$M = \Delta V_x^2 + \Delta V_y^2 \quad (1)$$

$$\Delta V_x = |VR_x - 512| \quad (2)$$

$$\Delta V_y = |VR_y - 512| \quad (3)$$

La dirección del vector M establece el sentido de giro y la proporción de potencia que se distribuye entre ambos motores. La dirección del vector M se define por el ángulo  $\theta$ , el cual se calcula con la ecuación 4.

$$\theta = \arctg \frac{\Delta V_y}{\Delta V_x} \quad (4)$$

#### SECUENCIA DEL ALGORITMO DE CONTROL

El primer paso en el algoritmo es declarar las variables que se requieren. Seguidamente, se configuran los puertos como entradas o salidas, y se configura el PWM. En esta etapa, se asigna una frecuencia de 19

KHz como base de oscilación del PWM, para que los motores trabajen de manera eficiente y sin generar ruidos audibles.

Seguidamente se realiza la lectura de las entradas VRx y VRy del Joystick. Si estos valores de entrada identifican en centrado, se considera que no hay acción sobre la palanca del mando y por consiguiente se apagan las señales PWM. Si por el contrario se detecta algún valor diferente a 2,5 V en VRx o VRy, se procede al cálculo del ángulo del vector para identificar el sentido del desplazamiento de la palanca del mando. De acuerdo con el valor obtenido se fijan los valores lógicos de Control 1 y Control 2 para designar los sentidos de giro de los motores.

El siguiente bloque del algoritmo contiene las instrucciones que permiten generar las señales PWM que controlan la etapa de potencia. El ciclo de trabajo del PWM para cada motor dependerá del módulo y el ángulo del vector de posicionamiento de la palanca del mando, respondiendo en función del resultado M que se obtiene de la ecuación 1.

## RESULTADOS

El desarrollo de los circuitos concluyó en el ensamblaje definitivo de los componentes. La Fig. 6, muestra una vista destapada del prototipo construido. Las pruebas de funcionamiento del prototipo desarrollado se realizan en el Instituto Regional de Bioingeniería (IRB) de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN).

Fig. 6. Ensamblado del prototipo de control.

Los ensayos iniciales se realizaron visualizando en osciloscopio las diferentes señales PWM de salida de la plataforma Arduino en función a distintas posiciones aleatorias impuestas en la palanca del joystick. Los resultados obtenidos demostraron la generación de los pulsos PWM con los intervalos de tiempo correspondientes en cada periodo.

Las pruebas preliminares de la etapa de potencia se realizaron conectando los circuitos de control y dos motores DC en configuración derecha e izquierda. Se realizaron movimientos aleatorios del mando thumb control contrastando en todo momento la activación y el sentido de rotación correcto de los motores.

No se detectaron errores en las pruebas de las salidas digitales destinadas controlar el sentido de giro de cada motor y la salida digital para realizar la liberación de los frenos electromecánicos. La respuesta de potencia de los motores al control con PWM corresponde a lo esperado en variabilidad de velocidad.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que el algoritmo programado en la plataforma Arduino es eficiente permitiendo un control de las velocidades y sentidos de rotación de los motores, discriminando adecuadamente módulo, dirección y sentido del mando thumb control.

El prototipo obtenido se encuentra apto para continuar el desarrollo en otras aplicaciones, tales como la generación de una función que permita el inicio amortiguado del movimiento de los motores. Esto permitiría un control más suave y amigable, en especial para personas con temblor o inestabilidad de posicionamiento en sus manos.

Cabe destacar que el desarrollo de tecnología propia asegura el mantenimiento y la calibración del instrumento desarrollado, así como la incorporación de nuevas tecnologías que surjan con el avance de las investigaciones.



## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al apoyo técnico e institucional de los departamentos de Ingeniería Electrónica e Ingeniería en Sistemas de la Facultad Regional Mendoza

(FRM) y al Grupo de Investigación Regional La Rioja (GEMLAR), de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) en Argentina, por su colaboración en el desarrollo y certificación del producto. De la misma forma, se hace extensivo el agradecimiento a todas las instituciones que han permitido que este proyecto sea factible.

## REFERENCIAS

- Dugarte N., Alvarez A., González A., Graciá F., Vicencio D., Balacco J. "Desarrollo de un sistema de bipedestación moderno". Congreso de Ingeniería de Procesos y Productos. Marzo de 2016. Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF) - Definición y clasificación de la discapacidad. Disponible en: <https://www.unicef.org/lac/media/7391/file>. (Consultado mayo de 2021).
- Ślusarz R, Olkiewicz J, Bonek R, Filipka K, Biercewicz M, Wiśniewski A. The Impact of Motor Disability and the Level of Fatigue on Adherence to Therapeutic Recommendations in Patients with Multiple Sclerosis Treated with Immunomodulation. *Int J Med Sci*. 2021 Aug 27;18(15):3609-3614.
- Binzer M, Eisemann M, Kullgren G. Illness behavior in the acute phase of motor disability in neurological disease and in conversion disorder: a comparative study. *J Psychosom Res*. 1998 Jun;44(6):657-66.
- Kołątaj B, Kołątaj WP, Panasiuk L, Sobieszczanski J, Karwat ID. Importance of most frequent needs of the disabled in shaping areas of support in public health. *Ann Agric Environ Med*. 2021 Dec 29;28(4):692-704.
- Ebrahim S, Adamson J, Ayis S, Beswick A, Gooberman-Hill R. Locomotor disability: meaning, causes and effects of interventions. *J Health Serv Res Policy*. 2008 Oct;13 Suppl 3:38-46.
- Pousada T., Pereira J. "Evaluación del efecto de la silla de ruedas sobre la calidad de vida de las personas con una Enfermedad Neuromuscular". Universidade da Coruña. Febrero de 2012. A Coruña, Galicia, España.
- Valle I. "Sillas de ruedas eléctricas. Opciones de mandos de control y cambios de postura". Centro de Referencia Estatal de Autonomía Personal y Ayudas Técnicas. Septiembre de 2013. España.
- Lederman, C., Junjing S. "Electric Folding Wheelchair Standard KD Smart Chair Electric Wheelchair". NYU Steinhart. 2015. New York, USA.
- Baez Martínez L. Minusval2000 - Breve historia de la silla de ruedas. Disponible en: <http://www.minusval2000.com/otros/reportajes.html>. (Consultado 11 de mayo de 2018).
- Barkhordarian V. "Power MOSFET Basics". 2014. International Rectifier, El Segundo, California, USA.
- Sattar A., "Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Basics". 2008. IXYS Corporation, California, USA.
- Balogh L. "Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits". Texas Instruments. 2017. Texas, USA.
- Instituto Regional de Bioingeniería (IRB), Centro Regional de Investigación y Desarrollo en Computación y Neuroingeniería (CeReCoN). Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza, Argentina. Disponible en: <http://irbutn.org/>. (Consultado 10 de mayo de 2018).
- Laboratorios - CeReCoN. Disponible en: <http://irbutn.org/laboratorios-cerecon/>. (Consultado 18 de mayo de 2018).
- Parlante N. "Essential C". Stanford CS Education. 2003. Stanford California, USA.
- Arduino, CL – Arduino Uno. Disponible en: <http://arduino.cc/arduino-uno/>. (Consultado 21 de mayo de 2018).
- Universidad Politécnica de Cartagena (UPC). "Introducción a los Microcontroladores". Departamento de publicaciones de la Facultad de Electrónica. 2006. Cartagena, España.
- Hirzel T. PWM. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial>. (Consultado 21 de mayo de 2018).
- Shirriff K., Badger P. Secrets of Arduino PWM. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial>. (Consultado 23 de mayo de 2018).
- Pernía M. "Conceptos Básicos de Máquinas de Corriente Continua". Universidad Nacional Experimental del Táchira. Departamento de publicaciones de la Facultad de Ingeniería Electrónica. 2011. San Cristóbal, Venezuela.
- Muñoz-Galeano N., Cano-Quintero J. B., López-Lezama J. M. Enseñando el Funcionamiento de los Inversores Puente H: Análisis del Intercambio de Potencia entre Bobinas y Condensadores. *Formación Universitaria*. 2016; 9 (1): 117-124. Medellín, Colombia.
- Ros Fernández J., Villarejo Mañas J. A. "Controlador de velocidad de una máquina de continua". Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica de Cartagena. 2015. Cartagena, España.

Recibido: 29 de mayo de 2022

Aprobado: 23 de octubre de 2022