Implementación de un control PID en un electroestimulador transcraneal

Panuncio Cruz Francisco
ORCID 0009-0006-5431-930X

Eric Hernández Castillo
ORCID0009-0009-2161-7169

Víctor A. Castellanos Escamilla
ORCID 0000-0001-8511-4477

Eduardo Hernández Márquez
ORCID 0000-0002-6590-1075

Dulce C. Martínez Peón
ORCID0000-0002-3687-5963

Elsa N. Palomo Morales
ORCID 0000-0002-1651-2436

Instituto Tecnológico de Tlalnepantla

Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica

Instituto Tecnológico de Nuevo León

Instituto Tecnológico de Minatitlán

panuncio.cf@tlalnepantla.tecnm.mx

e.castillo@tlalnepantla.tecnm.mx

victor.ce@tlalnepantla.tecnm.mx

eduardo.hernandez@itspozarica.edu.mx

dulce.mp@nuevoleon.tecnm.mx

elsa.pm@minatitlan.tecnm.mx

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo de un prototipo funcional de un dispositivo de aplicación en la biomedicina para el caso de un electroestimulador transcraneal dirigido mediante un controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) con retroalimentación basada en la respuesta galvánica de la piel (GSR) que detecta la sensibilidad del dolor y programada mediante la tarjeta de control ESP32. El objetivo principal fue implementar un sistema capaz de adaptar dinámicamente los pulsos eléctricos generados en el controlador hacia el prototipo, en función del estado emocional del paciente, monitoreado a través del sensor GSR. A través de las pruebas experimentales realizadas, se validó el funcionamiento del prototipo, evidenciando que el dispositivo logra ajustar los estímulos eléctricos en función de los cambios fisiológicos con capacidad de adaptación automática al usuario y con capacidad de análisis para ladisminución de los pulsos eléctricos en relación directa del comportamiento emocional y llegar a tener una estabilidad

ABSTRACT

This paper presents the development of a functional prototype of a biomedical device—specifically, a transcranial electrostimulator—controlled by a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller. The system utilizes feedback based on Galvanic Skin Response (GSR) to detect pain sensitivity and is programmed using an ESP32 control board. The primary objective was to implement a system capable of dynamically adjusting the electrical pulses sent to the prototype based on the patient's emotional state, as monitored by the GSR sensor. Experimental testing validated the prototype's operation, demonstrating its ability to adjust electrical stimuli in response to physiological changes; the device features automatic user adaptation and analysis capabilities that allow it to reduce electrical pulses in direct correlation with emotional behavior, ultimately achieving stability.

Introducción

La electroestimulación transcraneal es una técnica no invasiva que utiliza corrientes eléctricas aplicadas a través del cuero cabelludo para modular la actividad cerebral, particularmente en el tratamiento de trastornos neurológicos, dolor crónico, rehabilitación motora y mejora de las capacidades cognitivas. En este contexto, se presenta la implementación de un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para mejorar la precisión [1], la seguridad y la efectividad de los dispositivos de electroestimulación, utilizando un sensor GSR como señal de retroalimentación para obtener información sobre la respuesta fisiológica del usuario. El trabajo se estructura de la siguiente manera: en la Sección 2 se explica el desarrollo del prototipo; en la Sección 3 se presentan las pruebas experimentales y en la Sección 4 se presentan las conclusiones.

Desarrollo del prototipo

El diagrama del electroestimuladorempleado en este trabajo se muestra en la Figura 1. La alimentación del dispositivo está compuesta por un eliminador de 120 VCA a 6 VCD, encargado de suministrar energía al sistema. El electroestimulador cuenta con dos fuentes de alimentación: una para la sección de potencia y otra

para la sección de control.

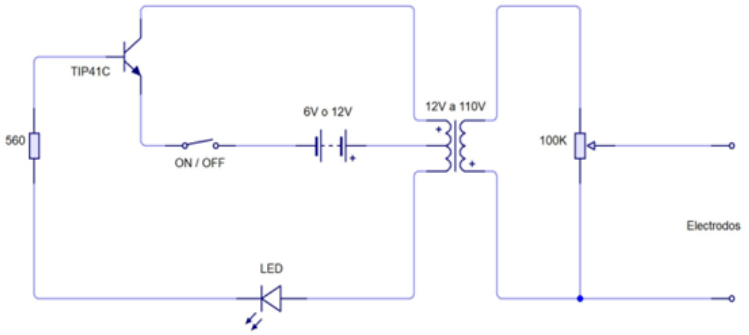


Figura 1. Circuito eléctrico del electroestimulador

Para el armado del prototipo se utilizaron los siguientes componentes:

1. *Sensor de respuesta galvánica de la piel (GSR). El sensor GSR mide la conductancia eléctrica de la piel, la cual varía en función de la sudoración provocada por la actividad del sistema nervioso autónomo, especialmente en situaciones de estrés o estimulación (Figura 2) [2].*

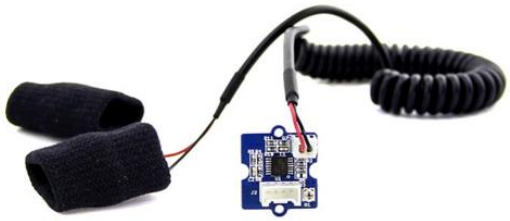


Figura 2. Sensor GSR

2. *Driver de motor y motor de CD. Es un circuito intermediario, como el mostrado en la Figura 3, que permite controlar motores eléctricos mediante señales de bajo voltaje provenientes del microcontrolador. Actúa como un puente que regula la entrega de corriente y la dirección del motor. Recibe señales digitales o PWM del controlador (ESP32) y activa el motor de acuerdo con la instrucción recibida (Figura 4) [3], [4].*

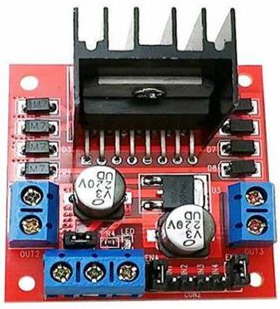


Figura 3. Driver para el motor



Figura 4. Motor de CD

3. *Microcontrolador ESP32. En el contexto del electroestimulador transcraneal, el ESP32 (Figura 5) recibe las señales del sensor GSR, aplica un algoritmo de control (como PID) y ajusta la salida del sistema en tiempo real, permitiendo una estimulación adaptativa basada en la respuesta fisiológica del usuario [5].*



Figura 5. Microcontrolador ESP32.

4. *Potenciómetro y pantalla LCD. Para este caso se emplean dos potenciómetros (como el de la Figura 6). Uno de ellos permite fijar el valor de referencia que el sistema buscará mantener (setpoint), mientras que el otro sirve para limitar o ajustar manualmente la respuesta del motor. Para visualizar el valor del sensor GSR, se utiliza una pantalla LCD, como la mostrada en la Figura 7 [6].*



Figura 6. Potenciómetro



Figura 7. Pantalla LCD.

Pruebas experimentales

La Figura 8 muestra el sensor GSR conectado directamente al microcontrolador, enviando señales continuas que representan la conductancia de la piel. Estas señales son procesadas por el ESP32, el cual integra un algoritmo de control PID para regular automáticamente la respuesta del sistema. La señal del sensor también se visualiza en tiempo real mediante una interfaz gráfica (GUI) desarrollada en Visual Studio Code, que permite monitorear el comportamiento fisiológico del usuario a través de una gráfica dinámica. Además, la Figura 9 muestra el prototipo ensamblado.

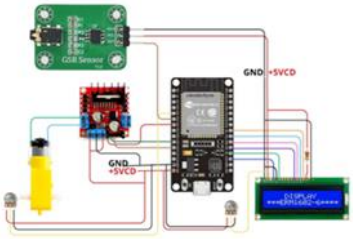


Figura 8. Diagrama de integración del sistema



Figura 9. Prototipo físico ensamblado

Al inicio de la prueba (Figura 10) se registraron valores de GSR elevados, con picos marcados en la gráfica, correspondientes a un posible estado emocional neutro (entre 100 y 300 unidades). De acuerdo a la aplicación experimental, se empezó a tener valores en decremento, dando como resultado una disminución en la activación fisiológica del usuario. La gráfica presenta una caída gradual de la señal, lo que permite un cambio hacia un estado de mayor relajación. Estos resultados sugieren que el sistema es capaz de registrar y visualizar variación en la respuesta fisiológica por el sensor GSR en tiempo real, como se observa en la Figura 11.

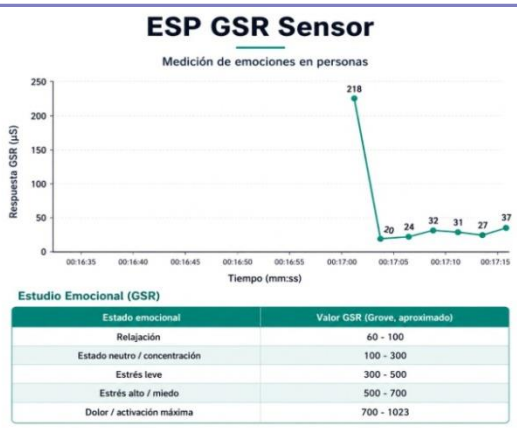


Figura 10. Gráfica del estado emocional neutro.

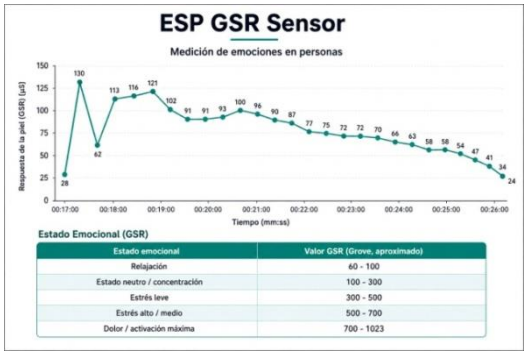


Figura 11. Gráfica del estado emocional relajado

Conclusiones

Este trabajo presentó un prototipo experimental capaz de generar estímulos eléctricos modulados dinámicamente a partir de los datos obtenidos mediante el sensor GSR. Los resultados experimentales mostraron que el controlador PID permite ajustar la respuesta del sistema ante variaciones en la señal fisiológica registrada. Como trabajo futuro, se plantea incorporar técnicas de inteligencia artificial para mejorar la adaptación del sistema en tiempo real ante variaciones en la respuesta fisiológica asociada al dolor.

Referencias

[1] Ogata, Katsuhiko (2010). Ingeniería de control moderna. Prentice Hall.
[2] Seeed Studio (2026). Grove – GSR Sensor. Disponible en https://wiki.seeedstudio.com/es/Grove-GSR_Sensor/
[3] Agelectronica (2026). RB04M022. Disponible en https://agelectronica.lat/pdfs/textos/R/RB04M022.PDF
[4] Smartbotec (2026). L298N driver para motor DC. Disponible en https://smartbotec.com/product/l298n-driver-para-motor-dc-2/
[5] Pasionelectronica (2026). ESP32: características y pines. Disponible en https://pasionelectronica.com/esp32-caracteristicas-y-pines/
[6] Scribd (2026). S08-s1: Potenciómetro-LCD. Disponible en https://es.scribd.com/document/725996501/S08-s1-Potenciometro-LCD