

# Control de un brazo robótico con un sistema BCI empleando procesamiento de señales cerebrales

## Control of a robotic arm with a BCI system using brain signal processing

Recibido: 30 de marzo de 2020 | Revisado: 19 de mayo de 2021 | Aceptado: 13 de setiembre de 2021

Javier Coronado Bautista<sup>1</sup>

### ABSTRACT

The need to develop a BCI brain-computer interface system for the control of a robotic arm in Peru arises from the possibility of interconnecting the human nervous system with a robotic or mechatronic system, and using this concept to recover some motor function. Brain Computer Interface (BCI) is a communication system based on the recording of brain signals (EEG). The electroencephalogram is the basis and support of the BCI technology. It is a novel technology that allows human-machine interaction in a virtual or physical environment, through a communication channel between the central nervous system and a robotic device. In recent years, the aforementioned systems have caused the interest of important research centers worldwide.

**Keywords:** Brain Computer Interface, Human Machine Interface, electroencephalogram, robotic, Fast Fourier Transform (FFT), Artificial Neural Network.

### RESUMEN

La necesidad de desarrollar un sistema de interfaz cerebro ordenador BCI para el control de un brazo robótico en el Perú surge a partir de la posibilidad de interconectar el sistema nervioso humano con un sistema robótico o mecatrónico, y usar este concepto para recuperar alguna función motora. Brain Computer Interface (BCI) es un sistema de comunicación basado en el registro de señales cerebrales (EEG), siendo el electroencefalograma su base y soporte. Es una tecnología novedosa que permite la interacción del hombre con la máquina en un entorno virtual o físico, a través de un canal de comunicación entre el sistema nervioso central y un dispositivo robótico. En los últimos años, los sistemas antes mencionados han causado el interés de los centros de investigación importantes a escala mundial.

**Palabras clave:** Interfaz cerebro-ordenador, interfaz hombre-máquina, electroencefalograma, robótica, Transformada Rápido de Fourier (FFT), Red Neuronal Artificial.

<sup>1</sup> Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima, Perú.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2281-493x>

Correo de contacto: [javiercoronadobautista96@gmail.com](mailto:javiercoronadobautista96@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.24039/cv2020821068>

Este trabajo está basado en un trabajo de tesis: <https://hdl.handle.net/20.500.13084/4996>



## Introducción

Brain Computer Interface (BCI) es un sistema de comunicación basado en el registro de señales cerebrales (EEG). El electroencefalograma es la base y soporte de dicha tecnología. Fue en el año 1929 que el neurólogo alemán Hans Beger logró, por primera vez, observar y registrar la actividad cerebral (variación de señales eléctricas) de un paciente en un galvanómetro, construyendo así los cimientos del estudio de la electroencefalografía.

BCI es una novedosa tecnología que permite la interacción del hombre con la máquina en un entorno virtual o físico mediante un canal de comunicación entre el sistema nervioso central y un dispositivo. En los últimos años, dichos sistemas han suscitado el interés de los importantes centros de investigación a nivel mundial. Actualmente, en diversos campos de la ciencia como la medicina, robótica, industria militar, y la rehabilitación fisiológica, existen diversos programas y proyectos enfocados en el desarrollo de la tecnología BCI.

Existen muchas enfermedades como la esclerosis lateral amiotrófica severa y enfermedades neuromusculares que afectan el sistema nervioso periférico que con el tiempo dejan a las personas en un estado vegetativo, es decir, pierden la capacidad motora de sus extremidades. Con la tecnología BCI se tiene la posibilidad de recuperarlas mediante la creación de un canal de comunicación entre el cerebro y el ordenador. BCI es también una tecnología prometedora para las tecnologías de prótesis de miembros, un área de particular interés para el ejército de EE. UU., debido al creciente problema de pérdida de extremidades entre las tropas que regresan de Irak y Afganistán. (Graham, 2014).

Para la clasificación de las señales EEG se pueden utilizar infinidad de características, con un coste de procesamiento y fiabilidad dispares. Por ello, la selección de las más discriminativas es imprescindible a la hora de diseñar BCI funcionales.

En la presente investigación se implementaron y ampliaron los métodos empleados en trabajos previos, con el fin de ampliar los resultados de clasificación obtenidos hasta la fecha. Para ello, se implementó un sistema basado en algoritmos genéticos (AG) que permitió realizar la selección de las características óptimas para la clasificación de señales EEG

correspondientes a dos estados mentales distintos. Este sistema se validó con un problema de clasificación de dos clases, formadas por los estados mentales de los eventos de reposo y movimiento de la mano derecha. (Lobera & Ignacio, 2012).

En la actualidad, en el Perú existen muchas personas con enfermedades neuromusculares severas y discapacidades físicas, siendo la tecnología BCI una alternativa prometedora para mejorar su calidad de vida.

Según la Comisión Especial de Estudio sobre Discapacidades de enfermedades de tipo degenerativo del Perú y de acuerdo a las estadísticas realizadas, las enfermedades neuromusculares afectan a una de cada 1 000 personas. En el Perú, debe haber entre 25 000 y 30 000 personas afectadas, encontrándose que la tercera parte de ellas reside en Lima. Asimismo, las personas afectadas de estos males se ven obligadas a viajar fuera del país para obtener un diagnóstico y tratamiento adecuado (Zevallos & Fernández, 2004).

Recuperar o sustituir funciones motoras ha sido una de las áreas más fascinantes pero frustrantes de las investigaciones del último siglo. La posibilidad de interconectar el sistema nervioso humano con un sistema robótico o mecatrónico y usar este concepto para recuperar alguna función motora ha fascinado a los científicos e investigadores durante años. El paradigma típico de trabajo en un paciente con una lesión medular grave o una enfermedad neuromuscular crónica (esclerosis amiotrófica) que interrumpe el flujo de información neural motora hacia las extremidades del cuerpo. Uno de los aspectos que ha permitido estos desarrollos ha sido el avance en tecnología BCI dado que son sistemas que permiten traducir, decodificar en tiempo real la actividad cerebral, resultado del pensamiento en órdenes para controlar directamente dispositivos robóticos mediante un canal de comunicación directa desde el sistema nervioso central con los dispositivos, evitando el uso de los caminos neuronales que ya no cumplen su función transmisora debido a la presencia de enfermedades neuromusculares, esclerosis lateral amiotrófica, infarto cerebral, parálisis cerebrales o lesiones en la columna vertebral (Minguez, 2011).

El desarrollo del sistema de control de un brazo robótico se basa en el monitoreo de las ondas Beta y Mu, principalmente, debido a que estas se relacionan con la acción e imaginación de los movimientos de la mano derecha e izquierda. Asimismo, existen diversos

estudios que describen similitud en los patrones de señales EEG de seres humanos cuando realizan un MR (Movimiento Real) y la realización de IM (Imaginación de Movimientos); además las personas pueden aprender a controlar su amplitud realizando tareas mentales apropiadas.

Al usar una BCI no invasiva para controlar un brazo robótico que sigue un cursor en la pantalla de una computadora, por primera vez en la historia, se demostró en sujetos humanos que un brazo robótico ahora puede seguir el cursor en forma continua. Mientras que ahora existen brazos robóticos controlados por humanos de manera no invasiva que pudieron seguir un cursor en movimiento con movimientos bruscos y entrecortados

—como si el brazo robótico estuviera tratando de "alcanzar" las órdenes del cerebro— ahora el brazo sigue el cursor con un movimiento continuo y fluido. (Pittsburgh, 2019).

Por lo señalado, el objetivo del trabajo fue implementar un sistema de control para un brazo robótico empleando la tecnología BCI.

## Método

La transformada wavelet es particularmente efectiva para representar varios aspectos de señales no estacionarias, como tendencias, discontinuidades y patrones repetidos donde otros enfoques de procesamiento de señales fallan o no son tan efectivos. En esta investigación, se indagaron Daubechies discretos y ondículas armónicas para el análisis de registros de EEG epilépticos. (Adeli et al., 2003).

Las redes neuronales (también conocidas como sistemas conexionistas) son un modelo computacional basado en un gran conjunto de unidades neuronales simples (neuronas artificiales), de forma aproximadamente análoga al comportamiento observado en los axones de las neuronas en los cerebros biológicos. Cada unidad neuronal está conectada con muchas otras y los enlaces entre ellas pueden incrementar o inhibir el estado de activación de las neuronas adyacentes. Cada unidad neuronal, de forma individual, opera empleando funciones de suma.

Para cumplir con los objetivos planteados se ha desarrollado una tarjeta electrónica avanzada, en la cual se implementaron los algoritmos de adquisición,

procesado y clasificación de señales EEG. Esta tarjeta permite traducir los pensamientos de imaginación motora en comandos de control que se asociarán al controlador del brazo robótico para realizar una función específica.

La tarjeta electrónica consta de dos partes: analógica y digital. La analógica presenta un circuito integrado conversor análogo digital ADS1299 diseñado para captar señales bioeléctricas. Aparte de ello, tiene configurado una ganancia programable para amplificar señales a escalas de microvoltios para luego digitalizarlas. Este circuito integrado cuenta con ocho canales que se han configurado en modo diferencial para cumplir con los objetivos de esta investigación.

La parte digital consta de dos microcontroladores: el Atmega 128RFA1 de 8 bits y el ARM CORTEX M3 Atsam 3x8e de 32 bits. El Atmega128RFA1 gestiona la data digitalizada de las señales EEG previamente amplificadas, haciendo uso del ADS1299 que posee una resolución de 24 bits; luego los almacena en buffers y envía a la computadora para un procesamiento offline mediante un protocolo de comunicación inalámbrica.

El ADS1299 posee un protocolo de comunicación SPI (Serial Peripheral Interface) que se utiliza para configurar los registros desde un microcontrolador, el Atmega128RFA1.

El procesador ARM Cortex M3 de 32 bit ATSAM3X8E se seleccionó para realizar las funciones de procesamiento y clasificación. En esta primera etapa, se implementó el algoritmo Fast Fourier Transform (FFT) que realiza un análisis de la densidad espectral en potencia de los ritmos sensoriomotoras correspondientes a la tarea mental de reposo e imaginación de movimiento. Con el fin de cumplir dicho objetivo, se empleó librerías de Cortex Microcontroller Software Interface Standard (CMSIS).

Para el análisis espectral de Potencia de la data EEG Online se implementó el algoritmo FFT desarrollado en lenguaje C. Para ello, se usó un microcontrolador ARM CORTEX M3 con arquitectura pipeline de 32 bits integrado en la tarjeta electrónica desarrollada con fines de Procesamiento de Señales Digitales (DSP).

Esta investigación es aplicada y cuantitativa en función a las variables de tipo continuo y objetivos planteados. Se desarrolló en los ambientes de la Universidad Nacional Federico Villarreal y Universidad

Nacional de Ingeniería, ambas situadas en la ciudad de Lima, Perú y también se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad de Málaga, España. Se efectuó en un periodo de ocho meses y contó con la participación de docentes de centros de investigación para tal efecto.

Las variables de la investigación que se emplearon fueron las siguientes:

- Tarea mental de reposo,  $T_0 \leq T_1 \leq T_2$
- Tarea mental de movimiento,  $T_2 \leq T_3 \leq T_4$
- Frecuencia de muestreo  $0 < f_s < 2f_s$ ,  $f_s = 256\text{Hz}$
- El tiempo  $0 < T < 9\text{s}$ ,  $T = 8\text{s}$
- Ángulo de articulación del Brazo Robótico  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$
- Volumen de trabajo V1 del Brazo Robótico
- Coordenada Px del efector del Brazo Robótico
- Coordenada Py del efector del Brazo Robótico
- Coordenada Pz del efector del Brazo Robótico

La población seleccionada para el desarrollo del proyecto de investigación fue de 40 datos de EEG que corresponden a cuarenta sujetos que se registraron en la Universidad de Málaga, y 10 datos EEG de 10 alumnos de la Universidad Nacional de Ingeniería.

La técnica de muestreo seleccionada para esta investigación fue la no probabilística de tipo conveniencia (Otzen & Manterola, 2017). Son diez datos de EEG que corresponden a diez sujetos con los cuales se realizaron los estudios y pruebas correspondientes para cumplir con los objetivos propuestos.

Los instrumentos y dispositivos electrónicos que se emplearon para desarrollar la investigación, se detallan a continuación.

- Una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments el NI USB 6210.
- Electrodo activo de baja impedancia (AgCl)
- Ordenador portátil Toshiba
- Biosignal Amplifier - g. BSamp. de 16 canales diferenciales
- Arduino Nano de procesador Atmega 328
- Un módulo L298n
- Un módulo relé de 5vdc
- Un motor Pololu con encoders, de 12 VDC (37D Metal Gearmotors).
- Un osciloscopio digital de dos canales marca Hameg.
- Tarjeta electrónica de adquisición y control

desarrollada

Los sensores empleados para la adquisición de señales cerebrales fueron los electrodos de plata (Ag) y el cloruro de plata (AgCl).

Para el registro de las señales eléctricas del cerebro (ritmos sensorio motoras) durante la acción de una determinada tarea mental relacionada con la imaginación del movimiento, empleamos electrodos que se ubican de acuerdo al sistema internacional 10/20 en configuración bipolar.

### Arduino Nano

El Arduino Nano es un módulo de control que tiene un procesador de la gama Atmega 328, ideal para realizar pruebas e implementación de prototipos.

### Osciloscopio

El osciloscopio es un dispositivo electrónico que se emplea para realizar las mediciones de los parámetros de voltaje y corriente en un circuito electrónico y eléctrico.

### NI USB 6210

El NI USB 6210 es un dispositivo de adquisición de datos de la empresa National Instrument, que se empleó durante el desarrollo del presente estudio para la validación de la data EEG registrada por la tarjeta electrónica desarrollada.

### Análisis de datos EEG

Se registraron datos de EEG correspondiente a 10 sujetos con una frecuencia de muestreo de 256Hz. Cada sujeto se sometió a cuatro sesiones con un periodo de duración de ocho segundos en cada sesión y con un descanso de 0.5s por cada dos pruebas, además se empleó señales de EEG de la Universidad Graz de Austria para validar las señales adquiridas para la presente investigación.

Las oscilaciones en la banda alfa y beta (<35 Hz) muestran patrones espaciotemporales característicos durante el procesamiento sensoriomotor. Mientras que la desincronización relacionada con eventos (ERD) durante la preparación motora, la ejecución y las imágenes puede verse como un correlato de un área cortical activada, la sincronización relacionada con eventos (ERS) de componentes de frecuencia entre 10 y 13 Hz puede representar un área cortical desactivada o red cortical inhibida, al menos bajo ciertas

condiciones. Los ritmos beta inducidos (13-35 Hz, beta ERS) se pueden encontrar en las áreas sensoriomotoras después del movimiento voluntario y la estimulación somatosensorial. (Neuper et al., 2006)

Para el EEG de imágenes motoras, se presentó un nuevo algoritmo de reconocimiento de EEG (algoritmo DWT-BP) que combinaba la transformada de ondas discretas (DWT) con la red neuronal BP. En DWT-BP, se estableció una ventana de tiempo racional mediante el cálculo de la potencia promedio de las imágenes del motor EEG en los electrodos C3 y C4, y luego se tomó la potencia promedio durante la ventana de tiempo en DWT. (Ming-Ai et al., 2009)

## Resultados

El primer resultado fue el desarrollo de una tarjeta electrónica integrada, de adquisición, procesada y clasificación de ritmos cerebrales que fue validada con dispositivos electrónicos de instrumentación de National Instrument (NI USB 6210), Biosignal Amplifier - g. BSamp., de 16 canales diferenciales. Durante las pruebas de testeo de la tarjeta electrónica integrada hubo un poco de complicaciones con el primer diseño. Se subsanó el error y diseñó otra segunda tarjeta electrónica integrada que pasó la prueba de testeo y con ello se trabajó en la pruebas y sesiones correspondientes.

### Resultados de la adquisición de ritmos sensorio motoras Beta y Mu mediante la tarjeta electrónica desarrollada correspondiente a dos tareas mentales.

La adquisición de señales EEG se realizó en modo bipolar, empleando el sistema internacional 10/20, priorizando los canales C3, C4 y CZ que corresponden a áreas del cerebro, que están asociadas a la parte motora. En la Tabla 1, observamos los datos adquiridos durante una sesión de prueba de ocho segundos. Podemos ver, claramente, a la variable tarea mental dependiente de 2048 muestras.

**Tabla 1**

*Resultados de la extracción de características de la data EEG, en el dominio de la frecuencia y tiempo.*

Sujetos	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8	S 9	S 10
Banda Reactive (Hz)	8	1	7	8	7	7	9	1	8	9
	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	-1
	2	-1	3	2	1	2	3	1	2	2
		2						2		

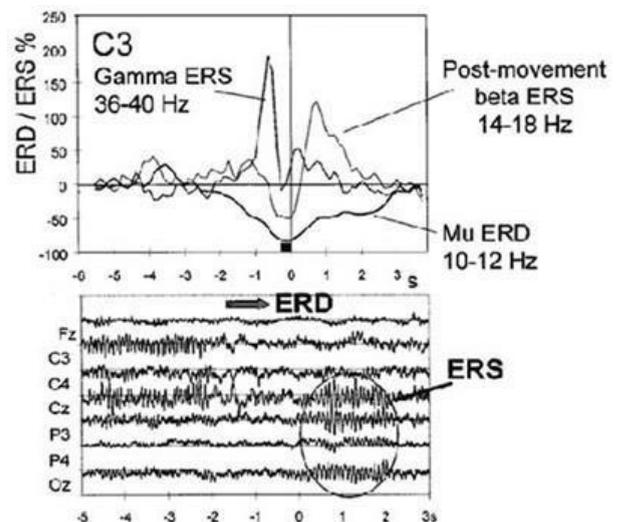
### Resultados de la extracción de características de la data EEG, en el dominio de la frecuencia y tiempo

En esta sección, se aprecian los resultados que se obtuvieron durante el proceso de análisis de datos correspondientes a las dos tareas mentales: de imaginación, de movimiento y reposo.

El procedimiento se siguió una vez adquirido el banco de datos EEG. Durante las cuatro sesiones se procedió a etiquetar después de realizar un análisis espectral de las señales EEG. En la Figura 1, podemos observar el proceso de etiquetado, las muestras correspondientes a t=0 a t=2s. Se etiquetó como tarea mental de reposo, t=2 a t=6, se etiquetó como tarea mental de imaginación movimiento mano derecha, t=6s a t=8s, se etiquetó como tarea mental de imaginación de movimiento mano derecha.

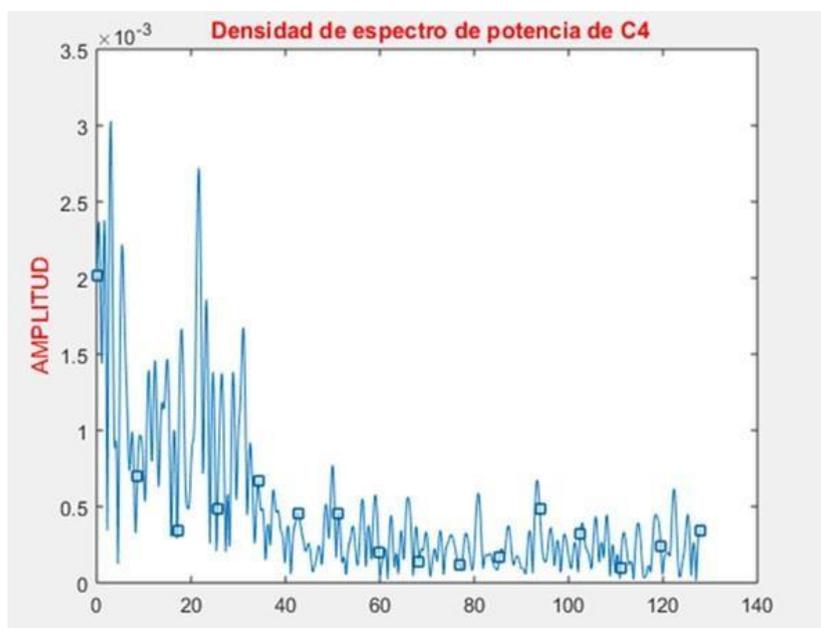
**Figura 1**

*Representación gráfica de los resultados de la extracción de características en la señal EEG*



**Figura 2**

Representación gráfica del análisis espectral de potencial realizada al canal C3 en el dominio de la frecuencia para el sujeto 1.



**Figura 3**

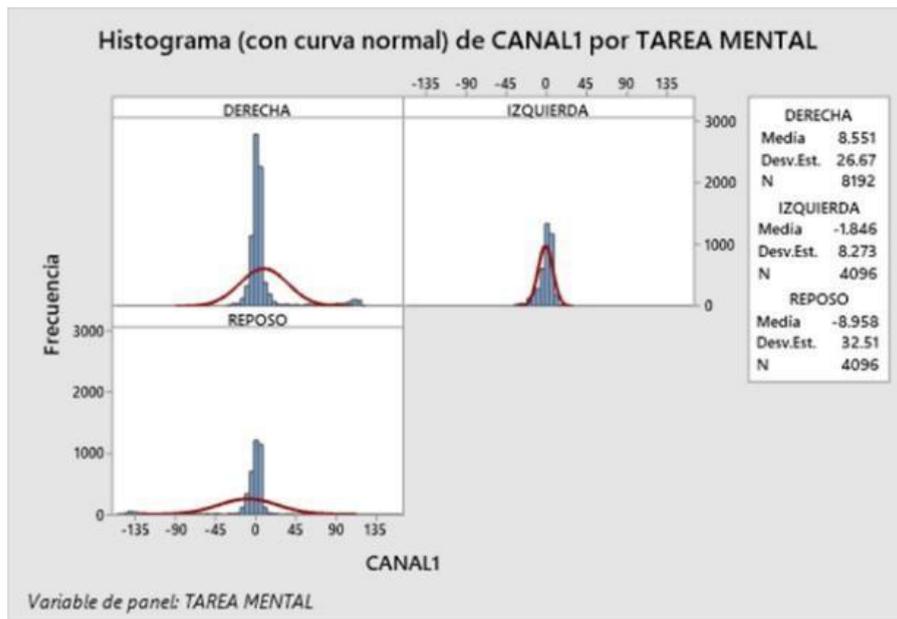
Representación gráfica de los datos estadísticos descriptivos de la variable Tarea mental.

Estadísticas									
Variable	TAREA MENTAL	N	N*	Porcentaje	Media	Error estándar de la media			
						Desv.Est.	Mínimo	Q1	
CANAL 1	DERECHA	8192	0	50%	8.551	0.295	26.672	-30.861	1.768
	IZQUIERDA	4096	0	25%	-1.846	0.129	8.273	-37.056	4.647
	REPOSO	4096	0	25%	-8.958	0.508	32.513	-154.257	5.816
CANAL 2	DERECHA	8192	0	50%	18.327	0.632	57.192	-33.780	2.829
	IZQUIERDA	4096	0	25%	-5.003	0.248	15.890	-62.698	4.934
	REPOSO	4096	0	25%	-	0.945	60.498	-264.084	8.160
					18.055				
Variable	TAREA MENTAL	Mediana	Q3	Máximo	Modo	N para moda			
CANAL 1	DERECHA	1.662	4.242	1189.34	3.92699		19		
	IZQUIERDA	0.257	3.514	3055.9	3.43876	3.83545	12		
	REPOSO	-0.460	3.462	158.831	3.66254		11		
CANAL 2	DERECHA	1.783	4.648	2607.90	2.89418		73		
	IZQUIERDA	-0.134	2.657	345.63	2.89418		23		
	REPOSO	-1.484	2.660	260.606	2.89418		32		

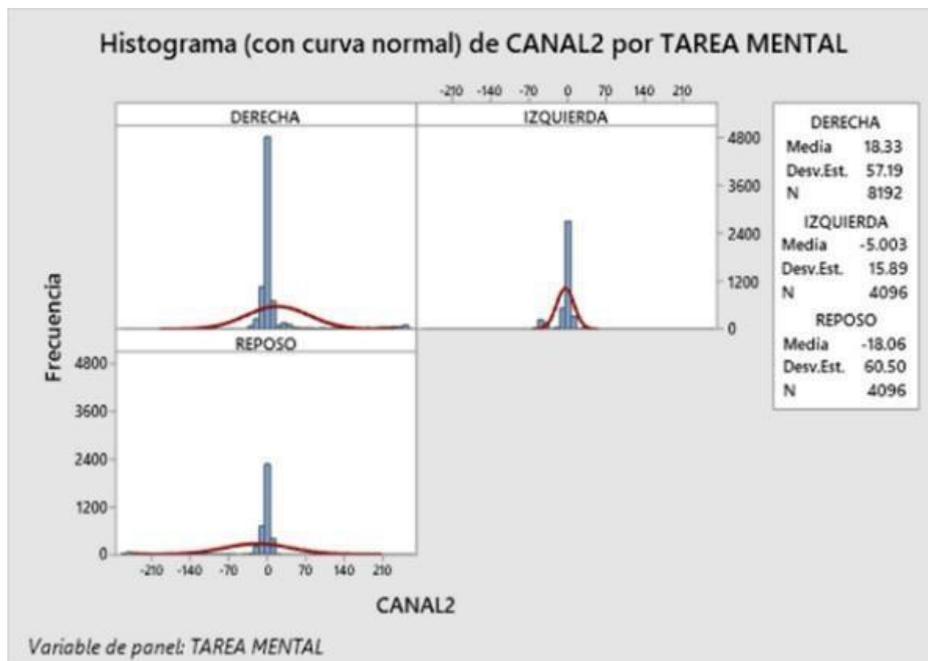
En la Figura 3, los resultados estadísticos muestran la distribución porcentual de dos tareas mentales (reposo y movimiento mano derecha), así como la media de cada tarea mental correspondiente a derecha, reposo e izquierda. El tamaño de la muestra correspondiente

a los ocho sujetos de prueba es de 16384 datos (tareas mentales), distribuidos de la siguiente manera Derecha (8192), Izquierda (4096), Reposo (4096) por cada canal, es decir canal 1 y canal 2.

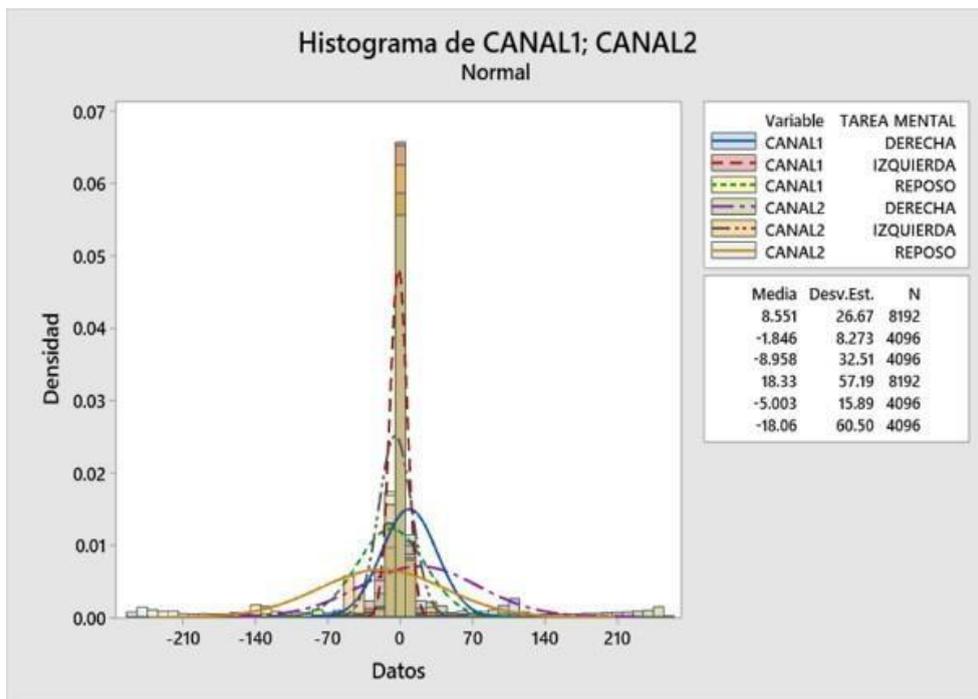
**Figura 4**  
 Representación gráfica de histograma para el canal 1.



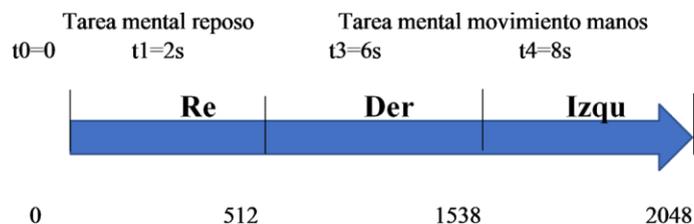
**Figura 5**  
 Representación gráfica de histograma para el canal 2.



**Figura 6**  
Representación gráfica de histograma para la variable Tarea mental.



**Figura 7**  
Representación gráfica del procesamiento de datos.



### Resumen de procesamiento de casos

TAREAMENTAL	Válido		Perdidos		Total		
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje	
CANAL1	DERECHA	1024	12,5%	7168	87,5%	8192	100,0%
	IZQUIERD	512	12,5%	3584	87,5%	4096	100,0%
	REPOSO	512	12,5%	3584	87,5%	4096	100,0%
CANAL2	DERECHA	1024	12,5%	7168	87,5%	8192	100,0%
	IZQUIERD	512	12,5%	3584	87,5%	4096	100,0%
	REPOSO	512	12,5%	3584	87,5%	4096	100,0%
CANAL3	DERECHA	1024	12,5%	7168	87,5%	8192	100,0%
	IZQUIERD	512	12,5%	3584	87,5%	4096	100,0%
	REPOSO	512	12,5%	3584	87,5%	4096	100,0%

**Figura 8**

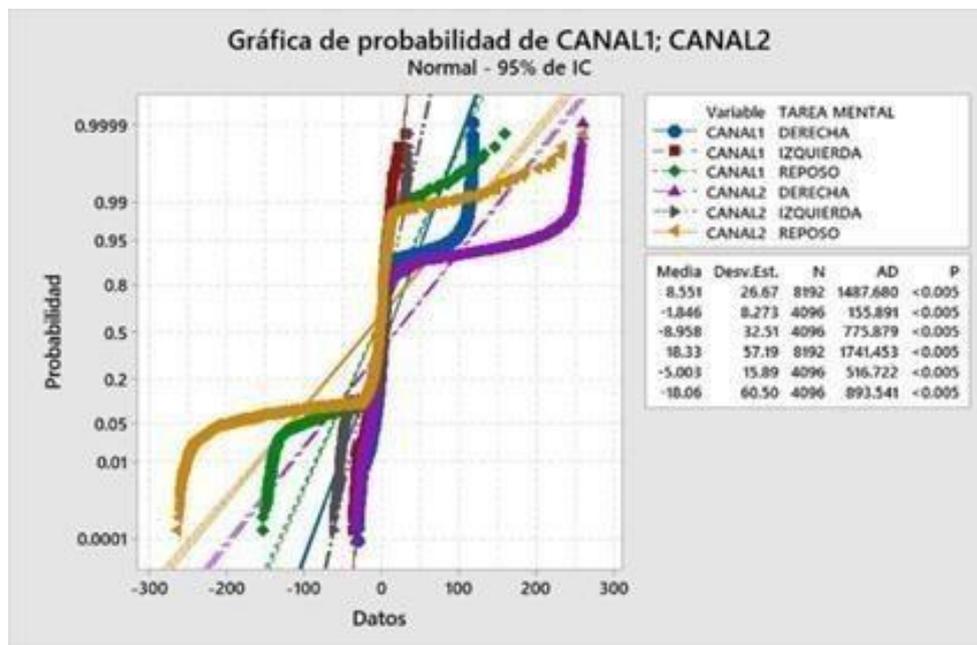
Representación gráfica de la prueba de Kolmogoriv – Smirnov realizada en SPSS.

**Pruebas de normalidad<sup>a,c,d</sup>**

	TAREAMENTAL	Kolmogorov-Smirnov <sup>b</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
CANAL1	DERECHA	,042	1024	,000	,987	1024	,000
	IZQUIERD	,050	512	,003	,983	512	,000
	REPOSO	,043	512	,022	,985	512	,000
CANAL2	DERECHA	,145	1024	,000	,901	1024	,000
	IZQUIERD	,129	512	,000	,915	512	,000
	REPOSO	,145	512	,000	,905	512	,000
CANAL3	DERECHA	,421	1024	,000	,631	1024	,000
	IZQUIERD	,433	512	,000	,607	512	,000
	REPOSO	,430	512	,000	,626	512	,000

**Figura 9**

Representación gráfica de la prueba de normalidad de los datos de la variable Tarea mental.



En la Figura 9, observamos los resultados de la prueba de normalidad de nuestro dato EEG correspondiente a 2048 muestras. Apreciamos los valores estadísticos de la variable tarea mental (reposo, derecha e izquierda). Por ejemplo, vemos en el canal 1 el valor estadístico de 0.5 correspondiente a la tarea mental de imaginación de movimiento de la mano izquierda. Este valor nos indica que el sujeto logró discriminar su curva ERD/ERS.

### Resultados del control del brazo robótico

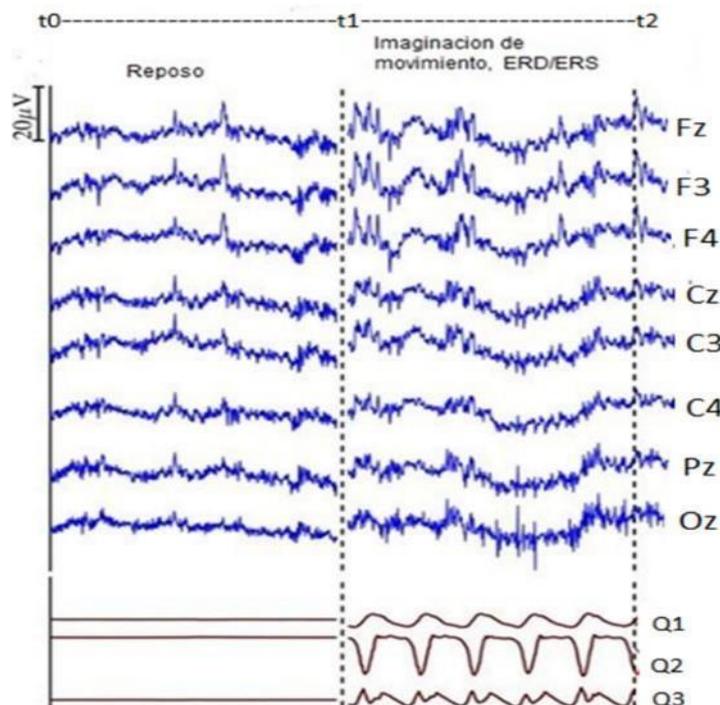
En la fase inicial, se realizó el diseño, la implementación de una tarjeta electrónica integrada portable de bajo coste, para los procesos de adquisición, procesado online y clasificación de ondas cerebrales sensorio motoras Beta y Mu, correspondientes a dos tareas mentales. En la fase 2 se logró realizar la implementación de los algoritmos de adquisición,

procesado, clasificación y la acción de control del brazo robótico en la tarjeta integrada desarrollada con esos fines. En la fase 3, se consiguió realizar las pruebas de adquisición, procesado y clasificación, así como,

controlar el sentido de giro de dos servomotores, asociando los datos de EEG de dos tareas mentales, previamente adquiridas en las sesiones de adquisición.

**Figura 10**

*Representación gráfica de las señales EEG de los canales Fz, F4, Cz, C3, C4, Pz y Oz.*



En la Figura 10, se pueden apreciar dos segmentos: el primero corresponde a la tarea mental de reposo y el segundo a la imaginación de movimiento con las curvas ERS/ERD. Asimismo, se observa Q1, Q2, Q3, salidas en PWM para cada servo motor.

En la sección de análisis de datos, visualizamos las muestras correspondientes a los tres canales (C3, C4, Cz). Las muestras de 0 a 512 corresponden a la tarea mental de reposo, de la muestra 512 a 1538 corresponde a la tarea mental de imaginación mano derecha y de 1538 a 2048 corresponde a tarea mental de imaginación de mano izquierda como está representada en la Figura 7.

Durante las sesiones, los sujetos presentaron la banda reactiva en torno a Mu por debajo de los 10 Hz, como se muestra en la Tabla 1.

Durante el análisis de parámetros de Denavit-Hartenberg para el modelado de la cinemática directa del brazo robótico de tres grados de libertad, se determinó con exactitud la posición de punto final del efector en (Px, Py y Pz) con respecto al sistema de referencia, así como los ángulos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ .

El costo del dispositivo integrado portable desarrollado para cumplir con el objetivo de la investigación es económico en comparación con los sistemas actuales como el ordenador, amplificador de instrumentación y sensores para desarrolla la tecnología BCI.

La tarjeta electrónica integrada desarrollada a nivel hardware se empleó como un instrumento de medición, adquisición y procesado de las señales EEG.

Durante las sesiones de registro de curvas ERD/ERS, se obtuvieron resultados negativos en seis sujetos, ya que no lograron desincronizar sus señales EEG debido al tipo de feedback presentado a los sujetos de prueba. Angevin (2005) sostiene que se obtienen mejores resultados en el entrenamiento con un feedback en realidad virtual ya que se logra mayor inmersión en la prueba.

Las limitaciones que se tuvieron durante el proceso de implementación de esta investigación se relacionan con aspectos económicos y técnicos. Sin embargo, se lograron subsanar contactando con especialistas de las universidades peruanas y europeas.

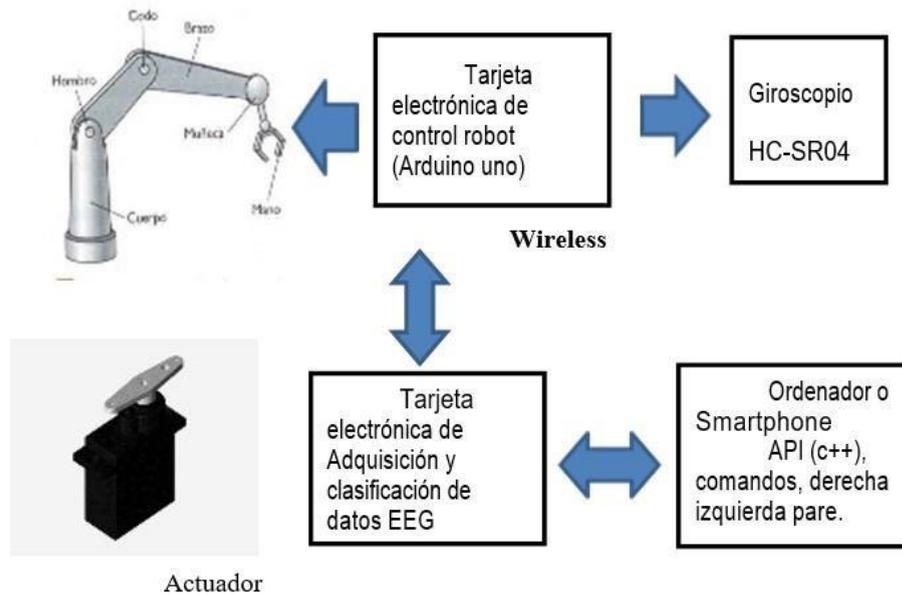
## Resultado de acciones de control del brazo robótico

En la Figura 10, observamos los resultados de las curvas ERD/ERS de los canales C3, C4 y Cz, asociadas con

las salidas PWM para cada servomotor. Es importante resaltar que para obtener el resultado de la Figura 7, se integró el algoritmo de adquisición, procesado, clasificación y acción de control con el algoritmo de control del brazo robótico.

**Figura 11**

*Representación del diagrama de control propuesto y desarrollado.*



En la Figura 11, observamos la integración de los elementos que permitió asociar la tecnología BCI y el sistema de control de brazo robótico.

## Discusión

El método empleado para el desarrollo de un sistema de control del brazo robótico, con un sistema BCI, utilizando la tarjeta electrónica integrada para su implementación nos proporciona un sistema innovador para poder desarrollar este tipo de tecnologías y que sean más accesibles a las personas por su bajo coste, en comparación con los sistemas actuales existentes.

El estudio de los ritmos sensorio motoras Beta y Mu y las Curvas ERD/ERS, correspondientes a los 10 sujetos que se sometieron a las cuatro sesiones, reflejan la capacidad que tuvieron en controlar sus ondas cerebrales ante un feedback presentado, la capacidad de discriminar entre dos tareas mentales, siendo de mucha importancia para cumplir con el objetivo principal, en ese sentido se concluye que el tipo de Feedback es muy

importante en el entrenamiento de este tipo de trabajos de investigación.

Además, se tendrá que desarrollar un feedback en realidad virtual para el entrenamiento de futuros trabajos porque mejora la inmersión de los sujetos de prueba y con ello mejoran las curvas ERD/ERS (Angevin,2005).

De acuerdo con los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación, así como del análisis estadístico en función a los objetivos planteados y los resultados estadísticos obtenidos que muestran la discriminación de las curvas ERS/ERD, se infiere que existe la probabilidad de desarrollar un sistema de control para el brazo robótico con la tecnología BCI en el Perú y que esta pueda mejorar la calidad de vida de las personas con enfermedades neuromusculares, así como intervenir en el desarrollo de prótesis robóticas para aplicaciones en rehabilitación médica.

**Fuente de Financiamiento:** Esta investigación aplicada fue posible gracias al financiamiento que se obtuvo en un concurso de tesis realizado en la Universidad Nacional Federico Villarreal de Lima, Perú

**Conflicto de intereses:** El autor de este artículo declara no tener conflicto de interés alguno.

**Agradecimiento:** Agradezco al grupo de investigación Diseño de Interfaces Avanzados - DIANA de la Universidad Málaga (España), quienes me brindaron su apoyo incondicional para el uso de su laboratorio y equipos y así desarrollar esta investigación. Ello fue posible por la gestión de los doctores Ricardo Ron Angevin y Gonzalo Joya Caparrós a quienes reconozco su valioso respaldo durante mi estancia en Europa.

También agradecer al ingeniero Ricardo Rodríguez Bustinza por facilitarme el acceso al Laboratorio de Control y Automatización y a los equipos biomédicos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería de Lima, Perú.

## Referencias

- Adeli, H., Zhou, Z. & Dadmehr, N. (2003). Analysis of EEG records in an epileptic patient using wavelet transform. *Journal of Neuroscience Methods*, 123(1), 69–87. [https://doi.org/10.1016/S0165-0270\(02\)00340-0](https://doi.org/10.1016/S0165-0270(02)00340-0)
- Angevin, R. (2005). *Retroalimentación en el entrenamiento de una interfaz cerebro computadora usando técnicas basadas en realidad virtual*. [Tesis de doctorado]. Universidad de Málaga.
- Graham, K. (2014). Development of a compact, low-cost wireless device for biopotential [Tesis de Maestría, Universidad de Virginia Commonwealth]. <https://scholarscompass.vcu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4560&context=etd>
- Lobera, M. & Ignacio, D. (2012). *Extracción y selección de características para un sistema Brain Computer interface (BCI) mediante algoritmos genéticos (AG)*. [Tesis de Maestría, Universidad de Zaragoza]. Repositorio de la Universidad de Zaragoza. <https://zaguan.unizar.es/record/9224/files/TAZ-TFM-2012-914.pdf>
- Ming-Ai, L., Rui, W., Dong-Mei, H. & Jin-Fu, Y. (14, 15 y 16 de agosto de 2009). Feature Extraction and Classification of Mental EEG for Motor Imagery [conferencia]. *2009 Fifth International Conference on Natural Computation*, Tianjian, China. <https://doi.org/10.1109/ICNC.2009.220>
- Mínguez, J. (2011). *Tecnología de interfaz cerebro-computador*. Servidor web secundario del DIIS del CPS. [https://webdiis.unizar.es/~jminguez/Sesion001\\_UJI.pdf](https://webdiis.unizar.es/~jminguez/Sesion001_UJI.pdf)
- Neuper, C., Wörtz, M. & Pfurtscheller, G. (2006). ERD/ERS patterns reflecting sensorimotor activation and deactivation. *In Event-Related Dynamics of Brain Oscillations*, 159, 211-222.
- Ortega, A. (2005). Diseño de mecanismos de procesamiento interactivos para el análisis de ondas cerebrales. [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. <https://docplayer.es/6153832-Diseno-de-mecanismos-de-procesamiento-interactivos-para-el-analisis-de-ondas-cerebrales.html>
- Otzen, T. & Manterola, C. (2017). Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. *International Journal of Morphology (Temuco)*, 35(1), 227-232. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037>
- Pittsburgh (19 de junio 2019). Primer brazo robótico controlado por la mente sin implante cerebral. *PRNewswire*. <https://www.prnewswire.com/news-releases/primer-brazo-robotico-controlado-por-la-mente-que-funciona-sin-implantes-cerebrales-842562436.html>
- Zevallos, M. & Fernández, G. (2004). Nota informativa de la Comisión Especial de Estudio sobre Discapacidad.