

Manipulación de un brazo robótico mediante señales electroencefalográficas

ESQUEDA-ELIZONDO, J*†, HERNÁNDEZ-MANZO, D, BERMUDEZ-ENCARNACIÓN, E, JIMÉNEZ-BERISTAÍN, L y PINTO-RAMOS, M.

Recibido Abril 5, 2016; Aceptado Junio 10, 2016

Resumen

Se presenta un sistema prototipo para el control de un mecanismo (brazo robótico) mediante el análisis de señales electroencefalográficas (EEG). Como plataforma de adquisición de datos se utiliza la diadema o headset EPOC Emotiv (Interfaz cerebro computadora), la cual mide la actividad eléctrica de la corteza cerebral. La señal EEG se envía de forma inalámbrica a una computadora, donde se procesa en Matlab® y se compara con patrones preestablecidos que representan movimiento a la izquierda y a la derecha. Para obtener los patrones, previamente se tomaron varios EEGs y se obtuvo el periodograma de cada toma de muestras y finalmente se obtuvo la potencia promedio medida por cada electrodo y de esa forma se pudo conocer cuales fueron los electrodos de más activos al pensar en izquierda y derecha. La señal medida se compara con el patrón establecido para detectar el sentido y una vez que se detecta si es izquierda o derecha, el programa envía una palabra de control a un procesador Edison conectado al puerto USB de la computadora, para que es lleve a cabo el movimiento del brazo en el sentido detectado.

EEG, Potencia, Patrón, Periodograma, Detección

Citación: ESQUEDA-ELIZONDO, J, HERNÁNDEZ-MANZO, D, BERMUDEZ-ENCARNACIÓN, E, JIMÉNEZ-BERISTAÍN, L y PINTO-RAMOS, M. Manipulación de un brazo robótico mediante señales electroencefalográficas. Revista de Tecnología e Innovación 2016, 3-7: 89-98

Abstract

A prototype system for controlling a mechanism (robotic arm) by analyzing electroencephalographic signals (EEG), is shown. The EEG signals are acquired with the EPOC Emotiv (brain computer interface) platform, which measures the electrical activity of the brain cortex. The EEG signals are sent wirelessly to a computer, where they are processed in Matlab® and compared with preset patterns that represent movement to the left and to the right. In order to obtain the patterns, several EEGs were taken and the periodogram of each case (left-right), then the average power of each electrode were obtained and thus know which were the electrodes of greater importance in the thought of left-right for the decision making movement based on the analysis of the signals. Once detected whether left or right option, the program sends a control word to a processor Edison connected to the USB port, which is responsible for moving the arm in the direction detected.

EEG, Power, Pattern, Periodogram, Detection

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: jjesqueda@uabc.edu.mx)

†Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La electroencefalografía (EEG) es una exploración neurofisiológica que se basa en el registro de la actividad bioeléctrica cerebral en condiciones basales de reposo, en vigilia o sueño, y durante diversas activaciones. Generalmente, la electroencefalografía se aplica para el análisis de la actividad eléctrica en el cerebro humano y con la información recabada se puede hacer un estudio a fondo del comportamiento del cerebro y esto ayuda a prevenir y descubrir enfermedades o trastornos, en efecto. Estas ondas cerebrales, conocidas como señales electroencefalográficas (EEG), proporcionan de manera indirecta información relativa a funciones del cerebro, como pueden ser tareas mentales, acciones motoras o expresiones faciales entre otras.

Actualmente, se han desarrollado interfaces cerebro computadora (BCI, Brain Computer Interfaces), las cuales son dispositivos que captan las señales eléctricas de la corteza cerebral de una persona, para posteriormente enviarlas a una computadora donde para su despliegue o su procesamiento, tal como se muestra en Esqueda Elizondo (2015) y Yaomanee (2012). En la actualidad la investigación se ha extendido hasta lograr muestrear las señales del cerebro para buscar una posible solución a un problema específico.

Durante muchos años, una de las principales líneas de investigación acerca de este tipo de aparatos ha sido básicamente el procesamiento de las señales EEG para posteriormente poder extraer una serie de características (features) y así poder clasificarlas con distintos algoritmos.

Estos algoritmos permitirían transformar las señales EEG en algún tipo de comando o función, que puede ser usada para desarrollar una acción o comunicar algo y así mejorar la vida de personas que posean algún tipo de discapacidad motora (por ejemplo, personas tetrapléjicas) o del habla (por ejemplo, personas con trastornos del espectro autista).

En este trabajo se presenta un sistema experimental que convierte la actividad eléctrica generada a partir de las señales cerebrales que proporciona la BCI en el movimiento en una dirección, ya sea derecha o izquierda para convertirlo en el movimiento de un brazo manipulador. Se presenta el sistema prototipo mostrado en la figura 1, en el cual se emplean un sistema de un brazo robótico de dos grados de libertad, el Epoc Emotiv, la computadora y un microprocesador Edison. En esta propuesta se capturan las muestras, se procesan en MATLAB y finalmente se ejecuta la acción detectada, es decir, no se lleva a cabo en tiempo real.

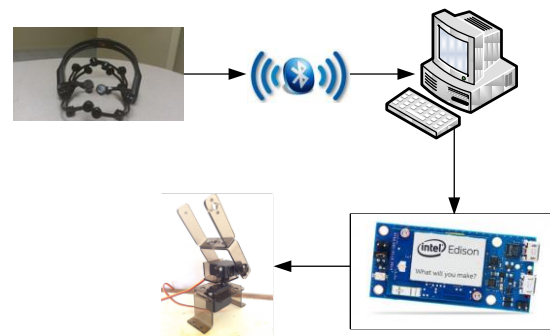


Figura 1 Diagrama a bloques del BCI propuesto.

Analizando la información que puedan proveer las ondas cerebrales, ésta puede ser interpretada y usada para controlar dispositivos electrónicos y así facilitar la vida a una gran cantidad de personas.

Entre las aplicaciones que se han conseguido en los últimos años, destaca principalmente la creación de algoritmos que permiten controlar brazos electrónicos utilizando solo el pensamiento y sin tener que llevar a cabo ningún tipo de movimiento físico. Otras tecnologías que se han conseguido desarrollar corresponden al movimiento del cursor de una computadora con tan solo pensar en la dirección en la cual se quiere mover dicho cursor, tal como lo muestra Alviarez Jorge (2011).

Adquisición de las señales encefalográficas

En la figura 2a se muestra la diadema (headset) EPOC utilizada y en la figura 2b se presenta la distribución de los catorce electrodos (canales), más dos electrodos que se utilizan como referencia. Los electrodos se distribuyen en la parte occipital, parietal y frontal de la cabeza, su nomenclatura indica la región de la misma donde están ubicados: frontal (F), central (C), parietal (P), occipital (O), temporal (T) y fronto-parietal (FP). En la figura 2b se muestra la posición de los electrodos de la diadema EPOC y Duvinage Matthieu (2012) presenta la comparación con la distribución de los electrodos de un encefalógrafo tradicional de 64 electrodos.

Hay que resaltar que los electrodos CMS y DRL son usados como referencia y que este equipo comercial es capaz de adquirir señales encefalográficas con muy buena calidad, tal como lo muestran Yaomanee Kridsakron (2012) y Duvinage Matthieu (2012). Asimismo, el headset tiene un ADC de 16 bits, con una resolución de $0.51 \mu\text{V}$ y descarta los dos bits menos significativos para minimizar los efectos del ruido instrumental.

La herramienta EPOC tiene una frecuencia fija de muestreo de 128 Hz (128 muestras por segundo, SPS), aunque de forma interna se sobremuestra a 2048 Hz por canal, pero este ancho de banda se usa para eliminar señales de muy alta frecuencia de otros aparatos que pueden generar alias a las señales del cerebro. Posteriormente, la señal es filtrada y reducida a un ancho de banda de 128 Hz para la transmisión inalámbrica, finalmente la señal se limita con un filtro digital (de 0.2 a 45 Hz) a un ancho de banda de 43 Hz para evitar interferencias de 50 y 60 Hz. En Esqueda Elizondo (2015 y 2014), se presentan los rangos de frecuencia en los que se clasifican las señales encefalográficas.

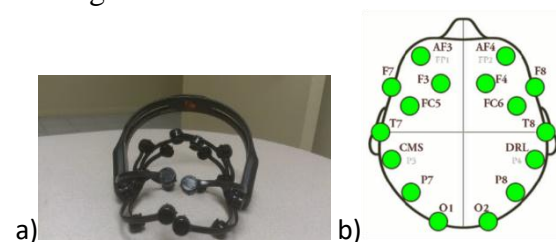


Figura 2 a) Diadema (headset) EPOC Emotiv y **2b)** la distribución de los electrodos en la cabeza

Algoritmos empleados

Las muestras obtenidas en cada prueba se procesan y analizan en Matlab, mediante una metodología basada en el Teorema de Wiener Khintchine, el cual permite encontrar la Densidad Espectral de Potencia, es decir, cómo se distribuye la potencia de la señal eeg en función de la frecuencia para cada electrodo, como lo presenta Esqueda Elizondo José Jaime (2015). De esta forma se puede determinar qué electrodos registraron mayor actividad, con lo cual se puede encontrar valores de potencias significativas que representen cada una de las opciones (izquierda o derecha). Asimismo, se puede determinar qué banda de frecuencia fue la más activa en cada hemisferio, electrodo o región (figura 2b).

Teorema de Wiener Khintchine

El Teorema de Wiener-Khintchine presentado por Proakis (2007) expresa que la Densidad Espectral de Potencia y la Correlación son pares Transformados de Fourier, es decir:

$$S_{xx}(f) = F[R_{xx}(\tau)] \quad (1)$$

$$R_{xx}(\tau) = F^{-1}[S_{xx}(f)] \quad (2)$$

Dónde $S_{xx}(f)$ es el autoespectro o Densidad Espectral de Potencia y $R_{xx}(\tau)$ es la Autocorrelación, ambas referidas a la señal $x(t)$.

Densidad Espectral de Potencia $S_{xx}(f)$

La Densidad Espectral de Potencia se calcula usando aplicando la ecuación (1) a la señal. Primero se calcula la Autocorrelación numérica de las N muestras con $N/4$ atrasos y de la muestra $N/4 + 1$ hasta $N-1$ se insertan ceros para lograr una interpolación en el dominio de la frecuencia, mejora la estimación. A la secuencia generada con los ceros insertados se le calcula la Transformada Discreta de Fourier (TDF) y el resultado es una nueva secuencia en el dominio de la Frecuencia de 7681 muestras, lo cual corresponde a un minuto de muestras, como lo presenta Esqueda Elizondo (2015)

Segmentación

Dado que se conoce de antemano la resolución de la Transformada Discreta de Fourier (TDF), es posible conocer los índices frecuenciales (localidades de memoria en el arreglo que contiene la TDF), se puede estimar entre qué localidades se almacena la DEP para cada banda. Por lo tanto, se separa o recorta la señal al tomar solo las localidades de memoria que definen a cada una de las bandas del espectro. Y el resto de las muestras se rellena con ceros para que no se afecte el número de muestras.

Autocorrelación $R_{xx}(\tau)$

De acuerdo a la ecuación (2), se puede obtener la autocorrelación de una señal a partir de la Densidad Espectral de Potencia al obtener la Transformada Discreta de Fourier Inversa. Por precaución se toma solo la parte real de la Transformada.

Potencia por banda

La potencia total de la banda se obtiene mediante una de las propiedades de la autocorrelación, la cual indica que la potencia total se encuentra en la muestra 1 del arreglo que contiene la autocorrelación calculada mediante el Teorema de Wiener Khintchine. Es decir, se aprovecha la propiedad de la autocorrelación: $P_T = R_{xx}(0)$. Nótese que si la señal no se recorta, se obtiene la potencia total.

Experimentos realizados

Para este experimento se trabajó con un adulto de 22 años para estudiar su actividad cerebral al pensar en una acción específica. De manera inicial se realizaron pruebas con seis personas de edad similar, pero no se lograron buenos resultados, por lo que se optó por cerrar el experimento a un solo sujeto de prueba.

El sujeto de prueba se sienta con el headset puesto, cerrando los ojos para mejorar su atención al experimento y también bloquear la vista a posibles estímulos visuales. Primero se graba una secuencia en reposo, posteriormente se le pide pensar en izquierda, se graba la señal y finalmente se repite el procedimiento con la derecha. De esta forma se obtienen las señales a partir de las cuales se determinarán los patrones de comparación. En una sección subsecuente se presenta con mayor detalle ambos casos.

Determinación de patrones

Durante esta investigación se realizaron algunas pruebas con métodos distintos para obtener la potencia de los electrodos, para así determinar la relación entre las muestras tomadas del sujeto de prueba y sólo se presentan las relevantes. La detección de patrones se obtuvo mediante el procesamiento de las señales EEG para obtener las potencias de cada uno de los electrodos, a través del promedio total de cada una de las muestras de los pensamientos (Izquierda-Derecha).

En las figuras 3 y 4 se muestra los electrodos con más actividad durante las pruebas realizadas con el pensamiento “Derecha”.

Al tratar de conseguir más exactitud en las pruebas tomadas se optó por hacer una separación de bandas en el espectro de las pruebas realizadas en el sujeto de prueba. Los resultados fueron similares al hacerlo con una sola potencia, la figura 3 muestra el comportamiento de los canales más activos.

Promedio de Potencias por canales

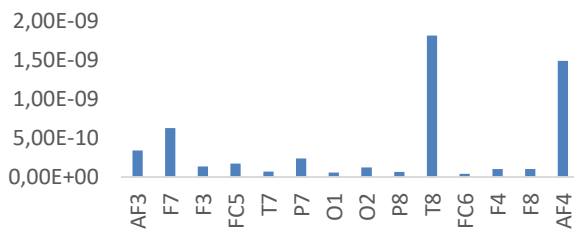


Figura 3 Comportamineto del promedio de potencias por canales.

En la Figura 4 se muestra la potencia promedio en cada banda de los distintos electrodos de la diadema. Se observa claramente que los canales más activos durante el pensamiento específico a la “Derecha” son F7, T8 y AF4, estos resultados son muy similares a los captados con potencia promedio total como se muestra en la Figura 9. Cabe destacar que a través de este método se encontró que el canal FC6 también tiene altos índices de actividad durante la muestra tomada.

La figura 5 indica las potencias por banda obtenidas al pensar en “Derecha” en una lectura particular. Al hacer una comparación de los resultados obtenidos y representados en forma de gráfica de potencias separadas por bandas en las figuras 4 y 5 se muestra que los electrodos con mayor actividad eléctrica son: F7, T8 y AF4, ya que su potencia es mayor visiblemente.

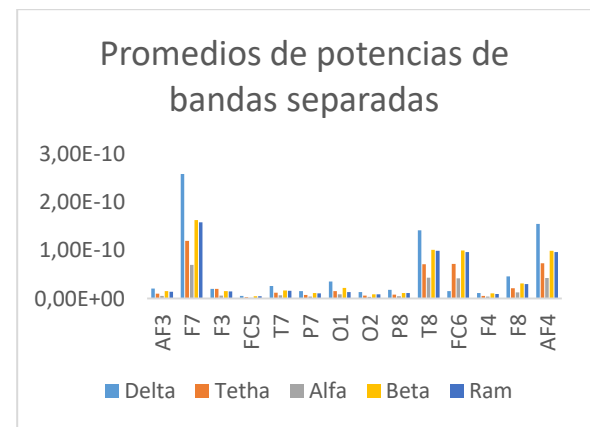


Figura 4 Potencia promedio de bandas separadas del pensamiento “Derecha”.

El tener bien definido los electrodos que registran la máxima actividad (potenica) ayuda a mejorar la detección de las señales que definen Izquierda y Derecha, con lo cual se pueden establecer los parámetros necesarios para diferenciar el pensar en un movimiento o en el otro y de esta forma traducirlo en el control del brazo mecánico.

Por lo que la separación de bandas, así como la toma de una sola potencia por canal son suficientes para poder identificar que canal tiene más actividad en un determinado tiempo, en este caso cuando se tienen pensamientos específicos.

Muestra particular

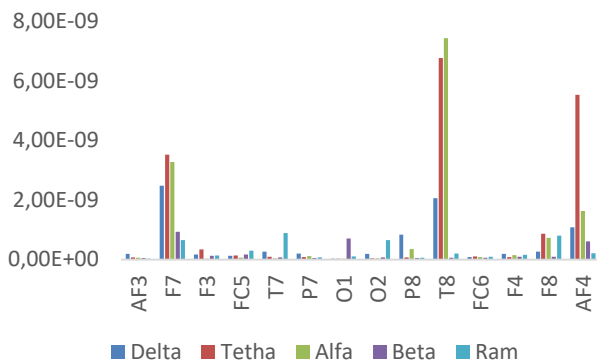


Figura 5 Potencia de bandas separadas del pensamiento “Derecha” en una sola muestra.

Toma de decisión

Una vez obtenidas las potencias para cada una de las tomas de muestras que se realizaron, se obtuvo la media y la desviación estándar de las lecturas. Primero se determinaron cuáles fueron los canales más activos al pensar con los ojos cerrados en “Izquierda” o “Derecha”. Se obtuvo asimismo el promedio de las potencias (media) y la desviación estándar de las potencias de cada uno de los electrodos más activos, tomando esto como punto de partida se llevaron dichas pruebas a un nuevo algoritmo que se describe en forma de diagrama de flujo en la figura 6.

En este algoritmo, se “Abre un puerto serial” para realizar la comunicación MatLab – Edison, después a partir de un comando se carga la grabación de las señales encefalográficas tomadas del sujeto de prueba, se obtiene la potencia del promedio de las muestras de cada canal significativo según este sea pensamiento “Izquierda” o “Derecha” y finalmente se compara con los rangos obtenidos de la desviación estándar en el procesamiento previo de los datos.

Sí el resultado está dentro del rango inferior y superior de dicha desviación se envía una señal al Intel Edison para girar 30 grados en la dirección del pensamiento, esperar 500 milisegundos y regresar a su posición original.

Manipulación del brazo robótico

La etapa electrónica encargada de ejecutar el movimiento del brazo robótico en función de la decisión tomada por el programa de Matlab está basada en el procesador Procesador Intel® Atom™ de doble núcleo a 500 MHz. Una vez que el programa de Matlab analiza los datos y toma una decisión, se envía a través del puerto usb un comando o palabra de control al procesador Edison, el cual la interpreta y manda la señal de activación de los servomotores HS-311 para que el brazo robótico gire en la dirección detectada. De esta manera se puede manipular el movimiento de izquierda y derecha del brazo robótico.

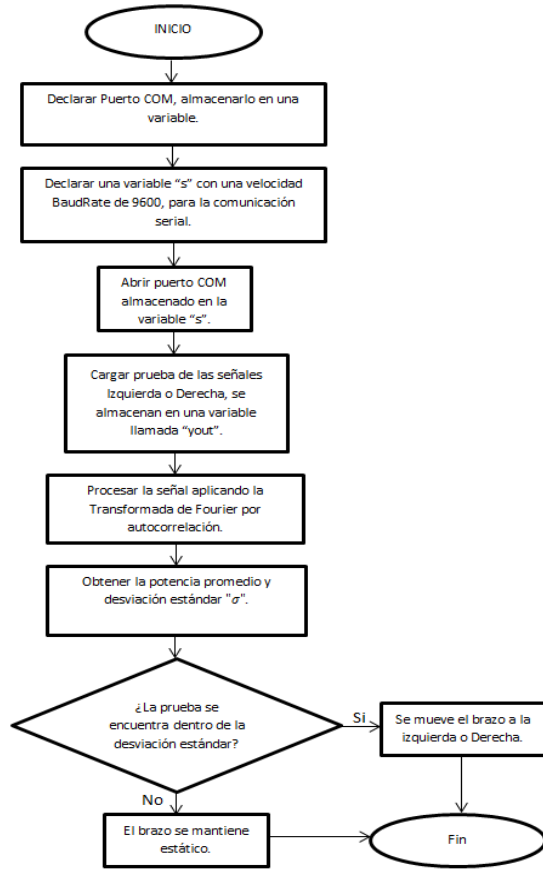


Figura 6 Diagrama de flujo del Algoritmo empleado para la toma de decisiones en el movimiento (EEG – Servo) y comunicación EPOC – Edison – Brazo robótico en MatLab®.

Cabe hacer mención que el brazo robótico de prueba cuenta con dos grados de libertad y sus servomotores HS-311 tienen una velocidad de operación de 0.19 sec/60° a 4.8 volts, y se presenta en la figura 7.

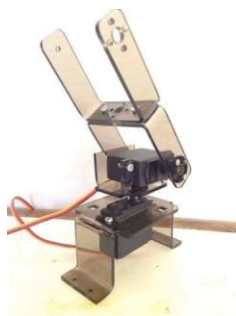


Figura 7 Brazo Robótico de dos grados de libertad con servomotores HS-311.

Resultados con pensamiento a la Derecha

En la figura 8 se utilizaron muestras con un tiempo de 10 segundos cada prueba. El eje horizontal corresponde a los diferentes electrodos (ver la figura 2) y el eje vertical corresponde a la potencia obtenida en Watts, del promedio de cada canal. Se observa que hay actividad predominante en los electrodos AF3, F7 y O1. En la Tabla 1 se muestra la potencia total en nano Watts medida por electrodo, observamos que el canal con mayor potencia es el O2.

PROMEDIO DE POTENCIA DE LOS ELECTRODOS

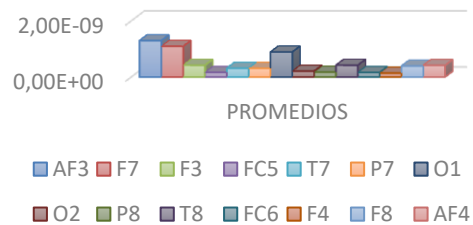


Figura 8 Resultado de potencia promedio por electrodo correspondiente a las 10 pruebas realizadas para el pensamiento derecho con una duración de 10 segundos cada una.

CANALES	Potencia Total (nW)	CANALES	Potencia Total (nW)
AF3	1.3	O2	2.08
F7	1.09	P8	.173
F3	.419	T8	.419
FC5	.67	FC6	.161
T7	.313	F4	.14
P7	.309	F8	.39
O1	0.89	AF4	.415

Tabla 1 Resultado de potencia promedio en nW por electrodo.

Resultados con pensamiento a la Izquierda

En la figura 9 se utilizaron muestras con un tiempo de 10 segundos cada prueba. El eje horizontal corresponde a los diferentes electrodos (figura 2) y el eje vertical corresponde a la potencia obtenida en Watts, del promedio de cada canal. Se observa que hay actividad predominante en los electrodos F7, T8 y AF4.

En la Tabla 2 se presenta la potencia promedio en nano Watts medida en cada electrodo, el canal F7 presenta mayor potencia respecto a los demás.

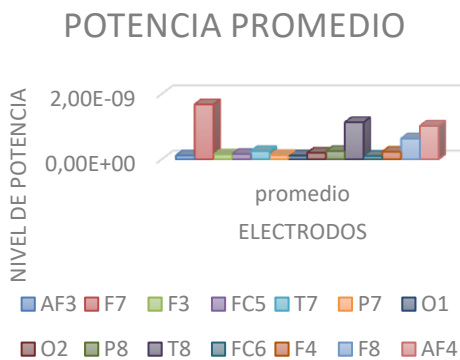


Figura 9 Resultado de potencia promedio por electrodo correspondiente a las 10 pruebas realizadas para el pensamiento izquierdo con una duración de 10 segundos cada una.

Canales	Potencia promedio (nW)	Canales	Potencia promedio (nW)
AF3	.113	O2	.195
F7	1.68	P8	.246
F3	.145	T8	1.13
FC5	.156	FC6	.098
T7	.248	F4	.228
P7	.125	F8	.633
O1	.111	AF4	1.02

Tabla 2 Resultado de potencia promedio en nW por electrodo del pensamiento izquierdo.

Experimentación con diferentes individuos

Esta actividad consiste en obtener señales de 6 diferentes sujetos de prueba que piensen en mover un objeto a la izquierda y a la derecha llevando a cabo la toma de señales con los ojos cerrados. Las muestras tuvieron una duración de 10 segundos cada una.

Posteriormente al hacer el procesamiento de las señales obtenidas, se observó que es difícil determinar qué canales presentan una potencia similar en todos los individuos, ya que los datos difieren significativamente y son muy dispersos. Por lo cual concluimos que no es factible emplear diferentes sujetos de prueba para encontrar un algoritmo que nos permita mover el brazo robótico para muchos usuarios de forma eficiente con esta metodología. Como muestra se presenta el cálculo de la coherencia del canal con mayor potencia O1, del sujeto de prueba 1 y el sujeto 2. En la siguiente figura se muestra que la coherencia no rebasa el 0.5, por lo cual no tienen la similitud necesaria. Esto implica que al comparar la potencia de la señal frecuencia a frecuencia no se encuentra parecido.

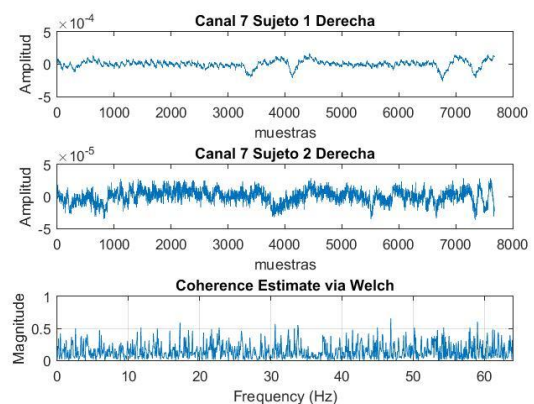


Figura 10 Resultado del procesamiento de coherencia de los sujetos de prueba 1 y 2 en el canal 7 correspondiente al electrodo O1.

Experimentos realizados

En la Tabla 3 se realizaron 14 pruebas a través de grabaciones, para comprobar la efectividad del algoritmo encontrado al pensar en izquierda, para la satisfacción obtenida, coherencia, se considero que porcentaje de la señal se ajustaba a las muestras pregrabadas, para comparar su similitud y así clasificarlas como izquierda y derecha.

Número de Prueba	Satisfacción Obtenida (%)	Número de Prueba	Satisfacción Obtenida (%)
1	30	8	45
2	65	9	23
3	20	10	65
4	40	11	78
5	38	12	41
6	27	13	87
7	56	14	25

Tabla 3 Resultado de las pruebas realizadas para la manipulación del brazo robótico al pensar en izquierda.

Conclusiones

El resultado obtenido fue lograr el movimiento de un brazo robótico mediante las señales encefalográficas generadas al pensar en una palabra específica. Lo cual puede ser un precedente que permitirá mejorar la calidad de vida de las personas con alguna discapacidad motora. En primera instancia, se intentó obtener estos patrones característicos que nos permitieran mover el brazo robótico en tiempo real, sin embargo durante el transcurso de la investigación se optó por procesar señales derivadas de cortas grabaciones, debido a que según las pruebas realizadas los patrones de cada individuo son diferentes.

No se encontró una regularidad entre los electrodos más activos, es decir, los electrodos no coincidían.

Gracias a esta investigación se concluyó que con el método inicial de experimentación usando diferentes individuos y recolectando muestras de las EGG en pruebas de 10 segundos por cada pensamiento “Derecha” o “Izquierda” los patrones obtenidos de las señales se presentaron muy dispersos e imposibilitaron la realización de un algoritmo exacto que nos permitiera a partir de la desviación estándar mover el brazo robótico con exactitud, sin embargo con las pruebas realizadas a un solo individuo se observó que las muestras arrojaban un patrón muy similar y ello permitió la ejecución de un algoritmo que moviera con precisión el brazo robótico.

Es por ello que en este trabajo se concluyó que convenía trabajar con un solo sujeto de prueba para disminuir el índice de incertidumbre en los resultados esperados. Asimismo, no es el mejor método, sin embargo se tuvieron resultados aceptables. A partir de esto se recomienda que para futuras aplicaciones se ejecute un algoritmo específico para cada tipo de persona o sujeto de prueba, así como explorar otras técnicas.

Agradecimiento

Se agradece al Programa Interinstitucional para el Fortalecimiento de la Investigación y el Posgrado del Pacífico por permitir la participación de alumnos de otras instituciones (Hernández Manzo Diana Saraí, Rivera Carreño Javier Alejandro, Gástelum León Marco Antonio, González Jiménez Gerardo Aldair, Mercado Velázquez Andrés Aharhel, Reyna Soto Alexis Omar) en proyectos de investigación. Asimismo, se agradece al Dr. César Ortega Corral de la Universidad Tecnológica Tijuana por aportar el procesador Edison, así como la asesoría técnica necesaria.

Referencias

Esqueda Elizondo José Jaime, Bermúdez Encarnación Enrique Guadalupe, Jiménez Beristáin Laura, Rojo Ramírez Yesenia, Ruiz Morales Angélica, Munguía Carrillo Paul Eriel, ZaragozaVilla José María. (2015). Análisis de Señales Electroencefalográficas en un niño con Autismo realizando diferentes actividades de aprendizaje. Congreso Internacional en Ingeniería Electrónica. Mem. Electro, 37, 181-186.

Kridsakron Yaomane, Seth Pan-ngum, Pasin Irasena Na Ayuthaya, "Brian Signal Detection Methodology for Attention Training using minimal EEG channels", 2012 tenth International Conference on ICT and Knowledge Engineering, 2012

Jorge Alviarez, Diego Cid y Mario Ogalde. (10 Marzo 2011). Lifeware: Tres jóvenes que ayudan a discapacitados a usar un PC con la mente. 25 JULIO 2016, de FayerWayer Sitio web:

<https://www.fayerwayer.com/2011/03/lifeware-tres-jovenes-que-ayudan-a-discapitados-a-usar-un-pc-con-la-mente/>

Matthieu Duvinage, Thierry Castermans, Thierry Dutoit, M. Petieau, T. Hoellinger, C. De Saedeleer, K. Seetharaman, and G. Cheron, "AP300-Based quantitative comparison between the Emotiv EPOC headset and a medical EEG device," in Proc. Biomedical Engineering, track 764-071, February 15-17, 2012

José Jaime Esqueda, Laura Jimenez Beristain, Roberto Alejandro Reyes Martinez, Adan Camacho Perales, Eugenio Mena Quevedo, Jesus Alberto Roque Sandoval, "Metodología para el análisis de señales encefalográficas en actividades lúdicas", Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Celaya 2014
John G. Proakis. Dimitris D. Manolakis 2007. Digital Signal Processing principles, Algorithms, and applications, Prentice Hall /pearsoni.s.b.n. 0-13-187374-1.

Rodríguez Bermúdez, Germán et al. Adquisición, procesamiento y clasificación de señales EEG para diseño de sistemas BCI basados en imaginación de movimiento, VI Jornadas de introducción a la investigación de la UPCT, abril 2013, nº 6, 10-12 p. ISSN: 1888-8356