

Las BCI en la robótica y la música: implementación de una Interfaz EEG para el control de un brazo robótico para tocar un teclado musical

Urquiza Diana, Gutierrez Mijael, Alencastre Moisés, Muñoz Lourdes, Elias Milton, Yañez Daniel, Sissa Daniel, García Teruel Gerardo, Renteria Santiago.
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Santa Fe.

dianauf@itesm.mx, mijael.gutierrez@itesm.mx, malencastre@itesm.mx, lmunoz@itesm.mx,
mielias@itesm.mx, daniel_yv@hotmail.com, sissadaniel@gmail.com, A01018057@itesm.mx,
A01335072@itesm.mx

Abstracto— Recientemente gracias al desarrollo científico y tecnológico, los robots han alcanzado aplicaciones más allá del sector industrial y militar. (Zhang, D. et. al. 2009). Los hallazgos de la neurociencia y la inteligencia artificial han permitido que los robots encuentren aplicaciones en campos interdisciplinarios emergentes como el cómputo afectivo (Riek, L. D. et. al 2010) y los instrumentos musicales controlados vía interfaces cerebro-computadora (BCI) (Solis, J., & Ng, K. 2011). El presente artículo expone el proceso de desarrollo de una BCI efectuado por un grupo interdisciplinario de alumnos de la clase de Psicoacústica y Neurociencias de la música, cátedra impartida en el Tecnológico de Monterrey, Campus Santa Fe. El propósito principal de este proyecto fue integrar el conocimiento de la ingeniería mecatrónica con las neurociencias y la interpretación musical. El proceso consistió en desarrollar una Interfaz cerebro-computadora para controlar la acción de un brazo robótico sobre un teclado musical mediante una interfaz EEG. Los resultados obtenidos muestran que el proyecto aún se encuentra en una etapa joven, lo que quiere decir que aún es posible mejorar la interacción mediante la optimización del reconocimiento gestos y el tiempo de entrenamiento requerido por el usuario. Sin embargo se concluyó que el desarrollo de BCI es un área de oportunidad no sólo en la interpretación musical sino también en el desarrollo de tecnología asistiva.

I. INTRODUCCIÓN

El campo aplicado a la producción musical del control de instrumentos mediante las BCI debe su progreso no sólo a la robótica, sino también al desarrollo de los sistemas de electroencefalografía (EEG). Además, la capacidad de comunicar el cerebro con dispositivos periféricos en tiempo real requirió de métodos computacionales específicos para separar e interpretar las señales multivariable provenientes de los EEG (Ouyang, W et. al. 2013).

En el año de 1875 Richard Canton monitoreó por primera vez la actividad eléctrica del cerebro en la superficie cortical de los animales. Posteriormente en 1929 el neurocientífico Hans Berger implementó una técnica análoga en seres humanos y descubrió el patrón Alfa, cuya frecuencia es de 8 a 10 Hz. Este hallazgo motivó a la comunidad científica a desarrollar sistemas estandarizados de electrodos para el diagnóstico clínico. Cabe mencionar que hasta este momento el uso del EEG se limitó solamente a la investigación médica (Prashant, P. et. al. 2015).

Más adelante, la investigación clínica en pacientes con discapacidades motoras, devino en experimentos que involucrarían sistemas de comunicación entre el cerebro y distintos dispositivos externos (Prashant, P. et. al. 2015) (e.j. brazos robóticos, prótesis, sistemas de comunicación alternativa y aumentativa). Dichos experimentos sentaron las bases de lo que actualmente se conoce como interfaz cerebro computadora o BCI por sus siglas en inglés, Brain Computer Interface.

II. ¿QUÉ ES UNA BCI?

Es una interfaz que incorpora sistemas de monitoreo de actividad cerebral y que con la ayuda de software transforma las señales adquiridas en información que posteriormente puede ser interpretada por distintos dispositivos. Uno de los objetivos a largo plazo en este campo interdisciplinario es el desarrollo de un nuevo tipo de comunicación entre computadoras, máquinas y seres humanos (Mados, B. et. al. 2016).

El campo de aplicación de las BCI es muy amplio, debido a que pueden ser utilizadas para generar señales de control para diversos dispositivos, por ejemplo de entretenimiento, telecomunicaciones, sistemas operativos y drones. Por otra parte en medicina ha probado ser una tecnología muy importante en la rehabilitación de pacientes con discapacidades de comunicación y parálisis (Mados, B. et. al. 2016).

III. ESTRUCTURA DE UNA BCI

Las neuronas son las unidades de microprocesamiento del cerebro y generalmente tienen 4 funciones: entrada, activación, conducción y salida. Las interfaces cerebro-computadora procesan la información de las señales eléctricas que ocurren debido a la activación o inhibición de las neuronas. Las neuronas se activan o inhiben respectivamente cuando la información que reciben a través de una sinapsis rebasa o se encuentra debajo de cierto umbral fijado mediante entrenamiento o la experiencia (Prashant, P. et. al. 2015).

Por otra parte, la teoría hebbiana (Hebb, D.O. 1949) describe la plasticidad cerebral, como un mecanismo mediante el cual las conexiones sinápticas se refuerzan gracias a la activación simultánea de las neuronas de ambos lados. Esto permite ver cómo las BCI no sólo actúan desde el cerebro hacia el mundo exterior, sino que también pueden mediante procedimientos de entrenamiento, provocar cambios en el cerebro y así asistir la rehabilitación de pacientes con problemas motrices.

La estructura general de una BCI es la siguiente (ver diagrama 1):

1. Adquisición de datos (EEG)
2. Procesamiento de señal y clasificación
3. Interfaz con la computadora
4. Aplicación

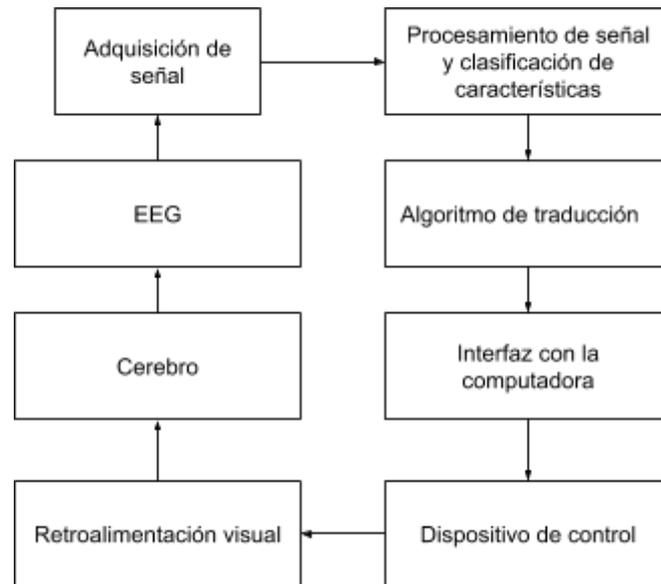


Diagrama 1. Estructura de una BCI

IV. ONDAS CEREBRALES

La actividad eléctrica del cerebro constituye un fenómeno periódico, por lo tanto se describe matemáticamente mediante las propiedades de una onda: frecuencia, fase, periodo y amplitud. El comportamiento ondulatorio es provocado por las diferencias de potencial que ocurren durante la sinapsis neuronal. Es a partir del modelo matemático de la onda que la actividad eléctrica del cerebro puede ser analizada. A continuación se muestra una tabla de las ondas cerebrales y sus correlatos fisiológicos (Ulam, F. A. et. al. 1991).

Patrón (onda)	Frecuencia (Hz)	Amplitud(u V)	Estado mental
Delta	0.1 - 3	20 - 200	Pérdida de consciencia, no se producen sueños.
Theta	4 - 7	20 - 100	Sueño REM, estado de meditación y creatividad.
Alpha	8 - 12	20 - 60	Relajación consciente
Beta	13 - 40	2 - 20	Alerta, concentración. (Altos niveles se asocian con ansiedad)

Tabla 1. Ondas cerebrales

V. ANTECEDENTES

Para el desarrollo de una BMCI (Brain Musical Computer Interface) se requiere un lector preciso de señales cerebrales, ya sea un dispositivo de lectura EEG (o dispositivos Neurosky y Emotiv que tienen una calidad de registro aceptable) y un método que interprete esas señales y las traslade a eventos musicales en tiempo real (Reck-Miranda, 2006).

Los estudios concernientes al desarrollo de BCI son diversos en cuanto a su metodología, como ejemplos se tienen los sistemas de exploración neurofisiológica que evalúan la estimulación sensorial y otros que sólo se basan en registros de actividad cerebral. En un estudio aplicado de Grierson (2008), se empleó un método por estimulación y detección del potencial evocado P300 en tiempo real para enviar señales de control a un dispositivo de generación de escalas musicales. El resultado que se obtuvo no fue tan preciso, ya que se requiere de entrenamiento para modelar la respuesta del participante. Cabe mencionar que este potencial evocado está relacionado con procesos atencionales, por lo que el entrenamiento requiere un tiempo considerable.

En otro estudio realizado por Chieh y Caspari (2011) el objetivo fue diseñar una interfaz que permitiera la composición musical libre del usuario con posibilidad de retroalimentación para ajustar el modelo de respuesta mediante la interfaz. Por medio de una matriz los usuarios realizaban la selección de notas musicales con sensores de EEG a través del proceso de atención, mientras que en otra matriz se tocaba la nota dada la selección previa. En este estudio se utilizó el potencial evocado P300, relacionado con estímulos salientes. El audio se controló mediante SuperCollider, un software para la generación de síntesis digital de sonido en tiempo real. Como conclusión se obtuvo que el nivel de adaptación de los usuarios a la selección de las notas fue aceptable. Esto se debe a que los usuarios tenían que seleccionar las notas para formar una escala musical. Algunos participantes lograron esta tarea con una precisión de 8 aciertos cada 20 ensayos. Por lo tanto

para una composición más complicada aún falta un desarrollo más especializado y una optimización del entrenamiento por ensayo/error en la ejecución del usuario.

También para poder comprender los procesos creativos se han utilizado EEG y diversas técnicas de escaneo similares como el MEG (magnetoencefalograma). Se ha reportado a la creatividad como un *meta proceso*, es decir que dispara y coordina procesos autómatas cognitivos como la planificación, el pensamiento divergente, el acceso a los conocimientos almacenados en la memoria a largo plazo y la atención selectiva. Esto nos permite usar los correlatos neurales para materializar los procesos creativos, es decir tomar los parámetros de los procesos creativos usando señales biológicas para controlar instrucciones (Chieh y Caspari, 2011).

Otro ejemplo de estas prácticas es la propuesta de Lisa Park quién en su proyecto “Eunoia” ha utilizado el dispositivo Neurosky de Mindwave, Processing y Max/Msp para controlar patrones musicales, tomando en cuenta las ondas cerebrales y asignándole a éstas un valor musical (<http://www.thelisapark.com/#/>). Análogo es el caso de Lindsay Browder quien realiza una instalación cinética en la cual hace uso de las ondas cerebrales con el dispositivo Neurosky de Mindwave, mediante un dispositivo Arduino para controlar fluidos ferromagnéticos. Los parámetros de control movimiento del fluido fueron relajación y atención. El resultado final son distintas formas visuales de carácter estético. (<http://vimeo.com/66664402>).

Es importante mencionar que se han estado realizando diferentes propuestas tanto artísticas como científicas respecto al uso del biofeedback, como Park y Browder, en lo artístico y Chieh y Caspari, (2011), Reck-Miranda, (2006) y Grierson (2008), en el el ámbito científico y tecnológico. Aunque en una búsqueda a través de diversos medios de divulgación científica se han encontrado numerosos estudios con relación a las bio-interfaces humano-computadora, cabe advertir que los estudios de esta clase son escasos en cuanto a su aplicación musical. Aunque se espera que en el futuro gracias a los avances tecnológicos y las prácticas

interdisciplinarias entre artistas y científicos (Reichle, I 2009) se amplió la investigación en dichos temas.

Recientemente, en un experimento desarrollado por Hideroni Butani y Mieko Oshuga (2013) se utilizaron señales de potenciales evocados tal como el P3 (potencial evocado relacionado con estimulación visual) que se caracteriza por tener amplitudes altas. Utilizando el Emotiv headset, se midieron datos a través de 6 canales de lectura de ondas cerebrales basados en el sistema internacional 10-20 mediante las medidas de movimiento ocular y parpadeo. También se analizaron las señales del parpadeo por medio de un método llamado ICA, *independent component analysis* logrando así aislar la características más relevantes que posteriormente fueron utilizadas como parámetros de control. Esto último sugiere que los dispositivos EEG comerciales como EMOTIV pueden proporcionar datos relevantes para el desarrollo de interfaces cerebro-computadora.

VI. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El hecho de que los conceptos de la ciencia y la tecnología se encuentren inmersos en contextos artísticos no es un fenómeno reciente. Una de las primeras muestras del potencial de dicha práctica se encuentra en la exposición *The New Landscape (in Art and Science)* iniciada por Gyorgy Kepes, que en ese tiempo era profesor de diseño visual en el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts). Kepes consideraba, contrariamente a la visión tradicional, que existía una relación significativa entre el arte y la ciencia mediada por el lenguaje visual, así eventualmente se fortalecería a través de la práctica interdisciplinaria. (Reichle, I 2009)

Actualmente se puede observar que la comunidad artística tiene acceso a gran cantidad de herramientas de software y hardware que se integran a su proceso creativo. Las interfaces de electroencefalograma ya no se restringen solamente a estudios clínicos y el avance de la tecnología ha permitido que se comercialicen y lleguen a más personas.

Además, existen distintos campos interdisciplinarios que se benefician del uso de estas interfaces, entre ellos el de la robótica musical. Es por ello, que siguiendo la visión de Gyorgy Kepes, el objetivo principal de esta investigación fue la integración del conocimiento de los alumnos de ingeniería en producción musical, mecatrónica y sistemas computacionales en el diseño de una interfaz-cerebro computadora orientada a la práctica musical. Específicamente se trata del diseño de una interfaz que permita al usuario controlar una mano robótica a partir de gestos faciales que son reconocidos utilizando una diadema que detecta la actividad eléctrica de la corteza cerebral. Una vez que un gesto es reconocido, se envía una señal que activa un dedo de la mano robótica, y este dedo presiona una tecla para tocar una nota. Si el usuario realiza una secuencia de gestos faciales, se puede tocar una secuencia de cuatro notas musicales.

A) Objetivo general

Generar un programa que permita la comunicación de una interfaz de EEG (el headset de Emotiv) para controlar un brazo robótico inMoov (www.inmoov.fr) mediante parpadeos y gestos, de tal manera que sea capaz de tocar una secuencia de cuatro notas mediante la comunicación con el dispositivo Arduino Uno. Cabe mencionar que por el momento no se cuenta con un sistema de desplazamiento autónomo del brazo robótico a través del teclado musical.

B) Objetivos particulares

- Documentar las tecnologías requeridas para implementar una interfaz cerebro-computadora en aplicaciones artísticas.
- Utilizar una interfaz de electroencefalograma para controlar un brazo robótico inMoov a través del microcontrolador Arduino.
- Proveer un método para interconectar las herramientas anteriormente mencionadas.

VII. MÉTODO

A. Participantes

Dos estudiantes de Ingeniería en Mecatrónica de 22 años de edad, sexo masculino, quienes serán entrenados para la adquisición de datos.

B. Adquisición

Se utilizaron todos los canales de medición del headset de Emotiv, AF3, AF4, F7, F8, F3, F4, FC5, FC6, T7, T8, P7, P8, O1 y O2 con base en el sistema internacional 10-20.

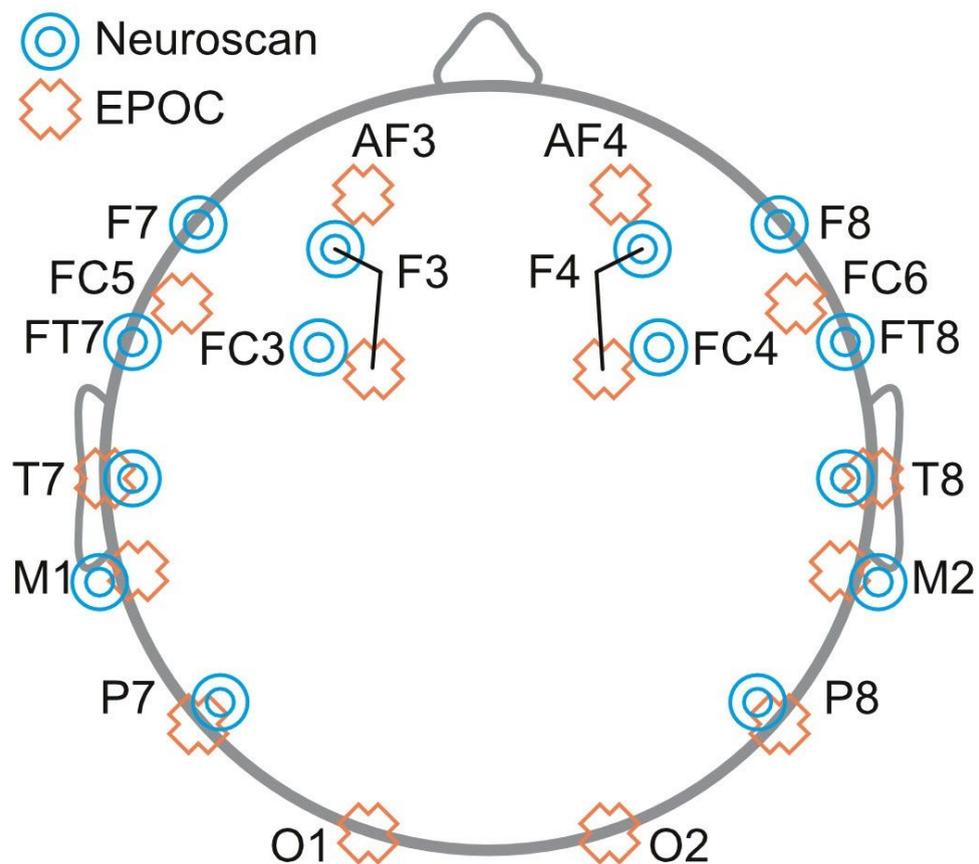


Imagen 0. Diagrama de localización de electrodos en sistema EMOTIV.

A) Tecnología

- Impresora 3D.
 - Emotiv headset EPOC: Interfaz de electroencefalograma con 14 electrodos.
 - Arduino UNO: Microcontrolador y placa de desarrollo.
 - Robot H20: Robot humanoide autónomo con comunicaciones inalámbricas.
- Brazo inMoov: Es un proyecto open source que consiste en los modelos de las partes requeridas para imprimir un robot humanoide (ver imagen 1)
- Servomotor para definir ángulo y apertura de la mano.
 - Computadora.



Imagen 1. Brazo inMoov



Imagen 2. EMOTIV Headset EPOC.

B) Software:

- Xcode: Entorno de desarrollo para lenguaje C++.
- Arduino IDE.
- Librerías de EMOTIV para C++.
- Aplicaciones: Emotiv Xavier Composer, Emotiv Xavier Emokey y Emotiv Xavier Control Panel.

C) Selección de gestos faciales de control:

- Fruncir el ceño.
- Guiñar un ojo.
- Levantar las cejas.
- Sonreír y mostrar los dientes apretados.

Procedimiento**Fase 1. Prueba de adquisición de datos**

- Max/Msp: Se realizaron pruebas iniciales de interconexión con el protocolo UDP en Max/Msp y Arduino Uno.
- Se conectó el brazo inMoov al microcontrolador Arduino Uno (ver imagen 3).
- Mediante la aplicación Emotiv Xavier Composer y el Emotiv Xavier Control Panel, se realizó la adquisición y monitoreo de datos (ver imagen 3)

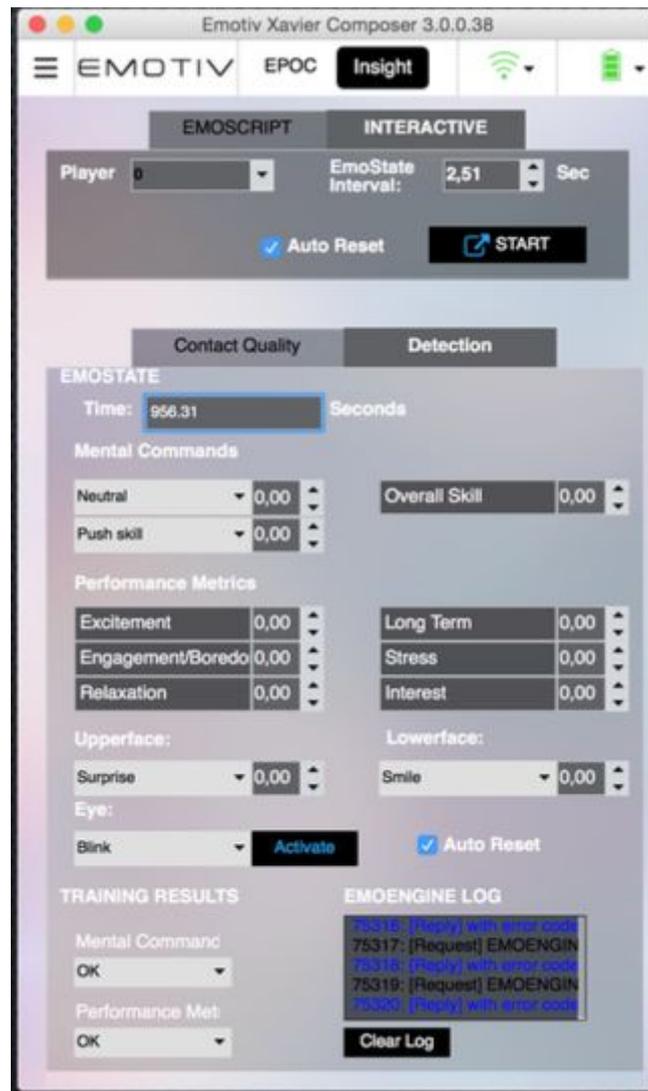


Imagen 3. Emotiv Xavier Composer

Fase 2. Desarrollo de comunicaciones entre dispositivos y software

Con las librerías para EMOTIV MotionDataLogger, FacialExpressionLogger, FacialExpressionComposer se logró establecer la comunicación entre la EMOTIV y Arduino Uno. El flujo de señal fue el siguiente: La señal de la EMOTIV llega a un ejecutable que fue compilado mediante Xcode en C++, el programa detecta los gestos faciales seleccionados y los identifica para saber qué dedo de la mano activar. Posteriormente este programa se comunica con Arduino mediante el puerto serial para accionar los servomotores y así generar movimiento en la mano robótica, (ver imagen 4). Los servomotores se conectaron al Arduino Uno utilizando las salidas analógicas (ver imagen 5).

hacían el movimiento correspondiente, en forma de abrir y cerrar, para presionar las teclas del teclado musical.

- El usuario tuvo éxito en el entrenamiento, y logró mover cada uno de los dedos de la mano por medio de expresiones gestuales y parpadeos.
- La comunicación se logró con una latencia mínima y cercana al tiempo real.
- El microcontrolador/placa de desarrollo que se utilizó (Arduino Uno) fue adecuado para la comunicación.

El usuario entrenado sugirió lo siguiente:

- En ocasiones no se lograba la adquisición de las expresiones faciales detectadas por la EMOTIV en la computadora. La eficiencia de adquisición fue del 80% (calculada a partir de la proporción entre las veces que se reconocía el gesto sobre las las que se intentaba el mismo.)
- El entrenamiento del usuario requería de al menos 7 horas por semana para lograr tocar la escala diatónica correctamente.

Existe una estrecha relación entre varias formas de actividad cerebral y estados mentales de índole cognitiva. Esta relación se puede aprovechar mediante el uso de utilizan técnicas especiales como la neuro-retroalimentación (neurofeedback). Ésta es una técnica en la cual se tienen datos fisiológicos que el usuario conoce en tiempo real y le son de ayuda para controlar sus reacciones (Brandmeyer, Sadakata, Spyrou, McQueen, y Desain, 2013).

Además, las BCI se suelen utilizar con pacientes que no tienen daños cerebrales, por lo regular se utilizan cuando sufren accidentes cardiovasculares en donde pierden la movilidad total o parcial de alguna extremidad. Por otra parte con el uso de las BCIs se pretende descifrar patrones de actividad cerebral para permitir

al usuario aprender a manipular dispositivos externos, que pueden ser extremidades adicionales o prótesis. (Leamy, Kocijan, Domijan, Duffin, Roche, Commins, Collins, y Ward, 2014).

En conclusión, la creación de una BCI confiable para fines musicales es necesaria no sólo para la comunidad de músicos sino también para el desarrollo de la tecnología de asistencia, ya que se pueden generar también técnicas de ayuda para personas con ciertas discapacidades o enfermedades.

IX. ÁREAS DE OPORTUNIDAD

- Utilizar un microprocesador más eficiente: una posibilidad es el raspberry.
- Utilizar los parámetros de atención y modo de relajación para controlar los servos de la mano robótica.
- Cambiar los parámetros de entrada de xcode para tener un rango de valores más sensibles para la adquisición.

X. REFERENCIAS

- 1) Ulam, F. A. (1991). An Investigation of the Effects of Binaural Beat Frequencies on Human Brain Waves. California School of Professional Psychology.
- 2) Reichle, I. (2009). Art in the age of technoscience: Genetic engineering, robotics, and artificial life in contemporary art. Wien: Springer.
- 3) Zhang, D., Lei, J., Li, B., Lau, D., & Cameron, C. (2009). Design and analysis of a piano playing robot. 2009 International Conference on Information and Automation. doi:10.1109/icinfa.2009.5205022
- 4) Reck-Miranda (2006) Brain-computer music interface for composition and performance. International Journal on Disability and Human Development. 5 (2), pp 119-126.
- 5) Riek, L. D., Rabinowitch, T., Bremner, P., Pipe, A. G., Fraser, M., & Robinson, P. (2010). Cooperative gestures. Proceeding of the 5th ACM/IEEE International Conference on Human-robot Interaction - HRI '10.

doi:10.1145/1734454.1734474<https://www.cl.cam.ac.uk/research/rainbow/emotions/affrob.html>

- 6) Solis, J., & Ng, K. (2011). *Musical robots and interactive multimodal systems*. Berlin: Springer-Verlag.
- 7) Ouyang, W., Cashion, K., & Asari, V. K. (2013). Electroencephelograph based brain machine interface for controlling a robotic arm. 2013 IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR). doi:10.1109/aipr.2013.6749312
- 8) Prashant, P., Joshi, A., & Gandhi, V. (2015). Brain computer interface: A review. 2015 5th Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE). doi:10.1109/nuicone.2015.7449615
- 9) Mados, B., Adam, N., Hurtuk, J., & Copjak, M. (2016). Brain-computer interface and Arduino microcontroller family software interconnection solution. 2016 IEEE 14th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII). doi:10.1109/sami.2016.7423010
- 10) Grierson, M. (2008) Composing with brainwaves: minimal trial p300 recognition as an indication of subjective preference for the control of a musical instrument. Dept. of Music
- 11) Chieh, D. y Caspari E. (2011) MusEEGk: A Brain Computer Musical Interface. Vancouver, BC, Canada. ACM 978-1-4503-0268-5/11/05
- 12) Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior: A neuropsychological theory*. New York: John Wiley & Sons.