

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Sistema de Neuroterapia para mejorar el rendimiento de los atletas del Comité Olímpico Guatemalteco a través de electroencefalograma y software de retroalimentación al usuario.**

Trabajo de graduación presentado por Miguel Godoy Garin para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2020







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Sistema de Neuroterapia para mejorar el rendimiento de los  
atletas del Comité Olímpico Guatemalteco a través de  
electroencefalograma y software de retroalimentación al  
usuario.**

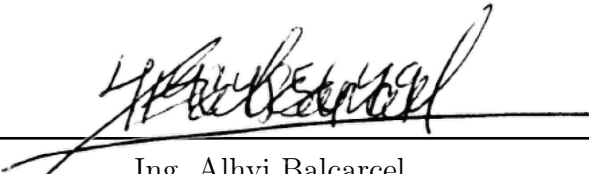
Trabajo de graduación presentado por Miguel Godoy Garin para optar  
al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

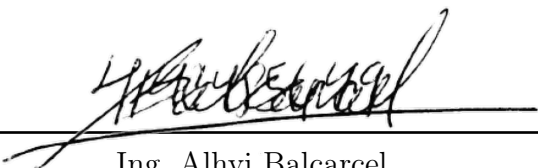
2020

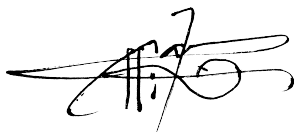


Vo.Bo.:

(f)   
Ing. Alhvi Balcarcel

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Alhvi Balcarcel

(f)   
MSc. Carlos Esquit

(f)   
MSc. Miguel Zea

Fecha de aprobación: Guatemala, 07 de diciembre de 2018.



<b>Lista de figuras</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>IX</b>
<b>Resumen</b>	<b>XII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XIV</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
<b>3. Justificación</b>	<b>5</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>7</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	7
4.2. Objetivos específicos . . . . .	7
<b>5. Alcance</b>	<b>9</b>
<b>6. Marco teórico</b>	<b>11</b>
6.1. ¿Qué es Neurofeedback? . . . . .	11
6.2. Historia del Neurofeedback . . . . .	12
6.2.1. Condicionamiento clásico . . . . .	12
6.2.2. Inicios del Neurofeedback: Ondas SMR . . . . .	13
6.2.3. Meditación y entrenamiento por ondas alfa-theta . . . . .	14
6.2.4. Entrenamiento de funcionamiento óptimo . . . . .	15
6.3. Funcionamiento del Neurofeedback . . . . .	17
6.3.1. Electroencefalograma . . . . .	17
6.3.2. Sistema Internacional 10-20 . . . . .	18
6.3.3. Procesamiento de señales . . . . .	19
6.3.4. Retroalimentación . . . . .	23
6.4. Neurofeedback de alto rendimiento para atletas . . . . .	24
6.4.1. Protocolos de alto rendimiento . . . . .	24

6.4.2. Estudios de Biofeedback y Neurofeedback en atletas de élite . . . . .	25
<b>7. Investigación y análisis</b>	<b>31</b>
7.1. Unidad de Ciencias Aplicadas de la CDAG . . . . .	31
7.2. Departamento de Psicología de la UVG . . . . .	31
7.3. Revisión bibliográfica . . . . .	32
<b>8. Módulo de recopilación de señales por EEG</b>	<b>33</b>
8.1. Precio y funcionalidad de componentes a utilizar . . . . .	33
8.2. Impresión de las piezas . . . . .	34
8.3. Ensamble y conexiones . . . . .	37
<b>9. Módulo de retroalimentación</b>	<b>45</b>
9.1. Herramientas de software consideradas . . . . .	45
9.1.1. Aplicación de OpenBCI . . . . .	45
9.1.2. Plataforma OpenVibe . . . . .	46
9.1.3. Programa en Python . . . . .	49
9.1.4. Interfaz en Visual Studio . . . . .	49
9.2. Software de interpretación de señales . . . . .	50
9.3. Plataforma de videojuegos y estímulos . . . . .	51
<b>10. Conclusiones</b>	<b>57</b>
<b>11. Recomendaciones</b>	<b>59</b>
<b>12. Bibliografía</b>	<b>61</b>

---

## Lista de figuras

---

1.	Experimento de Barry Sterman . . . . .	13
2.	Resultado del experimento de Sterman . . . . .	14
3.	Green realizando EEG a un yogui . . . . .	15
4.	Etapas de la calidad de vida . . . . .	16
5.	Frecuencias cerebrales comunes . . . . .	18
6.	Sistema Internacional 10-20 . . . . .	19
7.	Filtro digital de segundo orden . . . . .	21
8.	Respuesta de filtro eliminador de bandas . . . . .	22
9.	Respuesta de filtro pasa banda . . . . .	22
10.	Transformada de Fourier . . . . .	23
11.	Resorte para electrodos . . . . .	34
12.	Electrodos con cable . . . . .	35
13.	Clip de oreja . . . . .	35
14.	Electrodo para pelo . . . . .	35
15.	Electrodo para piel . . . . .	36
16.	Dimensiones del tornillo . . . . .	36
17.	Dimensiones de la tuerca . . . . .	36
18.	Modelo 3D del casco . . . . .	37
19.	Modelo 3D del casco colocado . . . . .	37
20.	Impresión 3D de partes . . . . .	38
21.	Impresión 3D de partes . . . . .	38
22.	Parte impresa en 3D . . . . .	39
23.	Parte impresa en 3D . . . . .	39
24.	Partes de cada nodo . . . . .	40
25.	Nodos ensamblados . . . . .	40
26.	Nodo con cable . . . . .	41
27.	Nodo, resorte y tornillo . . . . .	42
28.	Casco terminado . . . . .	42
29.	FFT en estado de concentración . . . . .	46
30.	FFT en estado de no concentración . . . . .	47
31.	FFT en estado de concentración . . . . .	47

32.	FFT en estado de no concentración . . . . .	48
33.	Aplicación «Focus» de OpenBCI . . . . .	48
34.	Programa de OpenVibe . . . . .	49
35.	Primer programa funcional . . . . .	51
36.	Programa con usuario no concentrado . . . . .	52
37.	Programa con usuario concentrado . . . . .	52
38.	Menú principal . . . . .	53
39.	Videojuego basado en Flappy Birds . . . . .	54
40.	Videojuego con usuario concentrado . . . . .	54
41.	Estímulos visuales con usuario no concentrado . . . . .	54
42.	Estímulos visuales con usuario concentrado . . . . .	55

---

## Lista de cuadros

---

1.	Frecuencias cerebrales comunes . . . . .	18
2.	Entrada y salida del ADS1299 . . . . .	20
3.	Estudios con ondas Beta . . . . .	26
4.	Estudios con ondas SMR . . . . .	27
5.	Estudios con ondas Alpha . . . . .	28
6.	Estudios con ondas Theta . . . . .	29
7.	Componentes importados . . . . .	34
8.	Componentes locales . . . . .	34



La autorregulación es un elemento importante para mejorar el rendimiento deportivo a través de habilidades como la relajación y la concentración. El objetivo del Biofeedback, y el Neurofeedback específicamente, es realizar un entrenamiento que facilite la autorregulación, por lo que uno de sus campos de aplicación es la psicología del deporte. El Biofeedback se basa en el principio de que, aunque una persona no puede modificar sus funciones autonómicas de manera voluntaria, es posible regular funciones biológicas al tener acceso a información acerca de ellas. Para esto, señales fisiológicas o psicológicas de funciones autonómicas son medidas y retroalimentadas a la persona que puede aprender a cambiarlas e influenciarlas. El control de procesos fisiológicos se logra a través del principio de condicionamiento operante. Un ejemplo de Biofeedback es en el que se retroalimenta a una persona con información acerca de su actividad cerebral, medida utilizando electroencefalograma (EEG). Esto se conoce como «entrenamiento de Biofeedback por EEG», Neuroterapia o Neurofeedback, como le llamamos en el resto del trabajo. [1].

El personal de psicología de la unidad de Ciencias Aplicadas de la Confederación Deportiva Autónoma de Guatemala (CDAG) manifestó su interés en un sistema de Neurofeedback para mejorar el rendimiento de sus atletas. Por este motivo se planteó el proyecto de la implementación de un sistema de Neurofeedback en la Universidad del Valle de Guatemala (UVG). El proyecto consiste en el diseño y la construcción de un Módulo de Obtención de Señales que obtenga información acerca de las ondas cerebrales a través de electroencefalograma y un Módulo de Retroalimentación que interprete estas señales en la computadora y realice los estímulos que le indiquen al atleta si las ondas que está generando cumplen con las condiciones establecidas. Con el proyecto, además de ayudar a mejorar el rendimiento de los atletas de la CDAG, se pretende generar un impacto académico al trabajar de manera multidisciplinaria en el área de la ingeniería electrónica, las ciencias de la computación, la psicología y la neurociencia; y un impacto social al facilitar una herramienta que no solamente se utiliza para mejorar el rendimiento, sino que tiene aplicaciones médicas en varias enfermedades y trastornos.

Para construir el sistema de Neurofeedback se encontró una comunidad de investigadores dedicados a la obtención de señales eléctricas del cerebro humano llamada Open BCI. Las siglas provienen de «Brain-Computer Interface» y en su página web se pueden encontrar diferentes dispositivos de código abierto que pueden ser utilizados para medir y entender

el cerebro utilizando EEG (electroencefalograma), EMG (electromiografía) y ECG (electrocardiograma). Se utilizó el dispositivo de OpenBCI «Cyton Biosensing Board», una interfaz neural que consiste en una placa con un microcontrolador PIC32MX250F128B que trabaja a 50 MHz con 32 bits y un convertidor analógico digital (ADC) ADS1299 con ocho canales de 24 bits. De esta manera, el Módulo de Obtención de Señales consiste en un casco con ocho electrodos para realizar EEG, cuyas señales serán muestreadas por la placa «Cyton» y enviadas a la computadora. El módulo de retroalimentación consiste en un software capaz de interpretar las ondas cerebrales e identificar parámetros específicos configurados por el usuario. A este software se conectará una plataforma de interfaces gráficas de videojuegos que reaccionen realizando un estímulo al usuario cuando sus ondas cerebrales cumplan con los parámetros establecidos.

Self-regulation is an important element to improve sports performance through skills such as relaxation and concentration. The goal of biofeedback, and Neurofeedback specifically, is to perform a training that facilitates self-regulation, so one of its fields of application is the psychology of sports. Biofeedback is based on the principle that, although a person can not modify their autonomic functions voluntarily, it is possible to regulate biological functions by having access to information about them. For this, physiological or psychological signals of autonomic functions are measured and fed back to the person who can learn to change and influence them. The control of physiological processes is achieved through the principle of operant conditioning. An example of biofeedback is in which a person is fed back with information about their brain activity, measured using electroencephalogram (EEG). This is known as textquote EEG biofeedback training, Neurotherapy or Neurofeedback, as we call it in the rest of the work. [1].

The psychology staff of the Applied Sciences Unit of the Autonomous Sports Confederation of Guatemala (CDAG) expressed their interest in a Neurofeedback system to improve the performance of their athletes. For this reason, the project for the implementation of a Neurofeedback system at the Universidad del Valle de Guatemala (UVG) was proposed. The project consists of the design and construction of a Signal Obtaining Module that obtains information about the brain waves through the electroencephalogram and a Feedback Module that interprets these signals in the computer and performs the stimuli that they indicate to the athlete if The waves that it is generating meet the established conditions. With the project, besides helping to improve the performance of the athletes of the CDAG, it is intended to generate an academic impact by working in a multidisciplinary way in the areas of electronic engineering, computer science, psychology and neuroscience; and a social impact by providing a tool that is not only used to improve performance, but has medical applications in various diseases and disorders.

To build the Neurofeedback system we found a community of researchers dedicated to obtaining electrical signals from the human brain called Open BCI. The acronyms come from textquote Brain-Computer Interface and on its website you can find different open source devices that can be used to measure and understand the brain using EEG (electroencephalogram), EMG (electromyography) and ECG (electrocardiogram) . We used the OpenBCI textquote Cyton Biosensing Board device, a neural interface consisting of a board with a

PIC32MX250F128B microcontroller working at 50 MHz with 32 bits and an ADS1299 digital analog converter (ADC) with eight 24-bit channels. In this way, the Signal Obtaining Module consists of a helmet with eight electrodes to perform EEG, whose signals will be sampled by the platform Cyton and sent to the computer. The feedback module consists of software capable of interpreting brain waves and identifying specific parameters configured by the user. This software will connect a platform of graphic interfaces of video games that react by providing a stimulus to the user when their brain waves meet the established parameters.

El cerebro humano está compuesto por aproximadamente cien billones de neuronas y cada una de ellas puede tener cientos de miles de conexiones con otras neuronas [2]. Las ondas cerebrales están asociadas con la activación y desactivación eléctrica de manera cíclica en las neuronas. El electroencefalograma (EEG) es el registro de las señales de las ondas cerebrales. Gracias a la capacidad de obtener imágenes cerebrales, ahora es posible observar la actividad metabólica del cerebro en áreas específicas mientras se realizan actividades cognitivas y emocionales. Utilizando electroencefalograma, los cambios psicológicos pueden ser medidos y cuantificados a un nivel cerebral. El Neurofeedback registra información biológica en la forma de electroencefalograma y retroalimenta al cliente con estímulos auditivos o visuales. La retroalimentación le indica al cliente cada vez que está progresando. Por lo tanto, al mejorar la eficiencia del cerebro, se potencializa el crecimiento psicológico [3].

El Neurofeedback funciona para aumentar el rendimiento mejorando la flexibilidad cognitiva, la creatividad, el control atlético, la sincronización entre hemisferios y la consciencia interna. La Confederación Deportiva Autónoma de Guatemala (CDAG) cuenta con un solo equipo para realizar Biofeedback y no cuenta con un dispositivo que funcione específicamente para Neurofeedback. Los psicólogos de la CDAG mostraron interés en tener un equipo de Neurofeedback debido a los diversos estudios que muestran que mejorar las ondas cerebrales de los atletas se traduce en buen rendimiento y mejores resultados.

El proyecto consiste en el diseño y la construcción de un sistema de Neurofeedback que contribuya a mejorar el rendimiento de los atletas de la Confederación Deportiva Autónoma de Guatemala (CDAG) y comprende toda la investigación en el campo de la psicología y la neurociencia relacionada con la actividad eléctrica del cerebro; la manufactura mecánica del casco que se utilizará para realizar EEG; la evaluación del circuito eléctrico de la placa «Cyton» que muestrea las señales de EEG; la implementación del software que interpretará las señales y realizará la retroalimentación al atleta; y el acompañamiento y la validación del proyecto por parte de psicólogos de la CDAG, psicólogos de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) y psicólogos profesionales independientes que se dedican al Neurofeedback.



En el megaproyecto ANIMA: Métodos no Convencionales de Interfaz en el Control de Robots a Través de la Electroencefalografía y la Electrooculografía, realizado en la Universidad del Valle en el 2009 se utilizaron señales bioeléctricas para el control de un brazo robótico. El proyecto estaba dividido en un módulo motriz, un módulo de potenciales relacionados a eventos, un módulo ocular y un módulo de planificación. El módulo de potenciales relacionados a eventos consistía en la obtención de señales cerebrales y su interpretación en las diferentes bandas de frecuencias. Como parte del proyecto, desarrollaron una aplicación que reaccionaba a la concentración emitiendo sonidos al detectar ondas Alpha.

En sus resultados, se indica que solamente el 29.63 % de los sujetos lograron mantener 10 segundos en estado de ondas Alpha al primer intento. Al segundo intento, todos sus sujetos mostraron mejorías y un 36.84 % logró la prueba de los 10 segundos. A pesar de que este proyecto se realizó con el objetivo de construir un sistema de entrenamiento por Neurofeedback y el megaproyecto ANIMA solamente intentaba crear una interfaz para controlar un robot por electroencefalograma, sus resultados nos indican que las personas pueden ser condicionadas para mejorar su capacidad de generar ondas cerebrales con una mayor amplitud en el rango de Alpha. El dispositivo que utilizaron para obtener las señales fue una placa creada por el proyecto OpenEEG, similar a la utilizada en este trabajo creada por OpenBCI. [4].

En el proyecto THINK, realizado en 2017 en el Georgia Institute of Technology, se creó una plataforma de comunicación entre el cerebro y la computadora utilizando hardware de OpenBCI como el utilizado en este proyecto, descrito en la sección 8.1, y software de OpenVibe como el que se evalúa en la sección 9.1.2. El objetivo del proyecto era crear un sistema en el que se pudiera obtener en una computadora una señal que indicara si un sujeto estaba pensando en el movimiento de su brazo izquierdo o de su brazo derecho. Estudiaron los resultados de ocho sujetos que realizaron dos pruebas diarias durante cinco días. Las pruebas consistían en indicarle al sujeto que pensara en mover alguno de los dos brazos y procesar las ondas cerebrales para intentar reconocer si el brazo en el que pensó era el correcto.

En sus resultados, indican que no se realizó ninguna forma de Neurofeedback, por lo que

los sujetos no recibieron ningún estímulo que les indicara si el sistema reconoció sus ondas cerebrales de forma correcta. En promedio, se tuvo un resultado de 53.4% de aciertos y un 15.0% de desaciertos en todas las pruebas. Al no recibir retroalimentación, los sujetos no mejoraron sus resultados durante los ocho días, por lo que el investigador recomienda incorporar Neurofeedback al sistema en experimentos futuros. Este trabajo fue una referencia importante ya que la plataforma utilizada y el procesamiento de las señales se usó como base para el sistema de Neurofeedback realizado. [5].

En la sección 6.4.2 se describen varios estudios que han investigado la relación entre el Neurofeedback como entrenamiento para el funcionamiento óptimo y el rendimiento de diferentes tipos de atletas. En un artículo publicado en 2017 en la revista «Neuroscience and Biobehavioral Reviews» se plantea una revisión de varios estudios que examinan los efectos del Neurofeedback en los deportes. En la revisión de estudios realizada por [1], de entre 30 estudios se seleccionaron los 14 estudios que reportaban su metodología de forma completa y cumplían con ciertos criterios. Estos debían utilizar datos empíricos, originales y primarios; estar publicados y estar en inglés.

De los 14 estudios evaluados, 12 reportaban efectos positivos del Neurofeedback en atletas. De estos 14 estudios, 10 evaluaban los efectos del Neurofeedback en el rendimiento deportivo. De estos 10, 7 mostraban efectos positivos. Sin embargo, se usaron diferentes protocolos en todos los estudios (se define qué es un protocolo de Neurofeedback en la sección 6.3) por lo que no se puede concluir que exista una relación entre cierto protocolo de entrenamiento y su efectividad en el rendimiento deportivo. Además el estudio concluye que hacen falta investigaciones que utilicen muestras más grandes, más sesiones de entrenamiento y grupos de control para eliminar el efecto placebo. [1].

La Confederación Deportiva Autónoma de Guatemala cuenta con una unidad de Ciencias Aplicadas cuyo objetivo es preservar la salud de los deportistas federados para optimizar su rendimiento físico. Dentro de la unidad se trabajan temas como el anti doping, la investigación, traumatología, fisioterapia, nutrición, psicología y biomecánica. Para realizar biofeedback, se cuenta con un solo equipo, NeXus-10, que cuenta con canales para sensores de electroencefalograma, electrocardiograma, electromiografía y electrooculograma. Además, cuenta con sensores de ritmo cardiaco, flujo sanguíneo, conductancia de la piel, respiración y temperatura. Debido al elevado costo del dispositivo solamente se cuenta con una unidad de biofeedback para toda la CDAG y no se cuenta con un dispositivo que funcione específicamente para Neurofeedback.

A través de los años, el conocimiento científico respecto al cuerpo humano ha aumentado de maneras que han permitido optimizar el rendimiento de los atletas a niveles cada vez más altos. Sin embargo, el funcionamiento del cerebro apenas se está empezando a entender y el estado psicológico de los atletas puede hacer la diferencia que defina sus resultados. A través de la recolección de información se puede aprender acerca de las dietas, rutinas o entrenamientos que llevan a los atletas a un mayor rendimiento. Gracias a la creciente tecnología que se encuentra disponible para cuantificar las características del cerebro, ahora se puede hacer lo mismo desde el punto de vista psicológico.

El Neurofeedback consiste en un sistema que recolecta los patrones de ondas neurológicas a través de encefalogramas y realiza un entrenamiento donde condiciona al individuo a través de estímulos a mejorar su estado mental. Al identificar los patrones eléctricos que se relacionan con la concentración, la velocidad o la falta de estrés, se intenta entrenar al atleta para que pueda replicarlos en cualquier momento. Diversos estudios han demostrado que los mejores atletas del mundo, a pesar de tener condiciones físicas similares a sus contrincantes, logran destacarse como los mejores al tener la capacidad de activar estados mentales que los llevan al éxito. Es por esto por lo que el personal de psicología de la unidad de Ciencias Aplicadas de la CDAG solicitó la implementación de un sistema de Neurofeedback para mejorar el rendimiento de sus atletas.



### 4.1. Objetivo general

Diseñar y construir el módulo de obtención de señales y el módulo de retroalimentación para el sistema de Neurofeedback que será utilizado por atletas de la CDAG para optimizar su rendimiento mejorando su estado psicológico.

### 4.2. Objetivos específicos

- Determinar los mejores componentes a ser utilizados tomando en cuenta el precio y la funcionalidad para cumplir con el objetivo general del proyecto. Estos deben incluir todos los sensores y los componentes necesarios para construir el casco de EEG.
- Fabricar un casco que contenga electrodos de acuerdo con el Sistema 10-20 Internacional para la obtención de señales de EEG. Se utilizarán los diseños disponibles de cascos de OpenBCI y los métodos de fabricación disponibles en la universidad como impresión 3d.
- Crear el software que sea capaz de interpretar las señales en la computadora para determinar cuáles son las bandas de frecuencia de la señal a través de la Transformada Rápida de Fourier.
- Diseñar un sistema de retroalimentación por videojuegos que reaccione a la frecuencia de las ondas de EEG procesadas para dar un estímulo al atleta que le indique si las ondas que está generando en ese momento son las deseadas o no.



El proyecto consiste en el diseño y la construcción de un sistema de Neurofeedback que contribuya a mejorar el rendimiento de los atletas de la Confederación Deportiva Autónoma de Guatemala (CDAG) y comprende toda la investigación en el campo de la psicología y la neurociencia relacionada con la actividad eléctrica del cerebro; la manufactura mecánica del casco que se utilizará para realizar EEG; la evaluación del circuito eléctrico de la placa «Cyton» que muestrea las señales de EEG; la implementación del software que interpretará las señales y realizará la retroalimentación al atleta; y el acompañamiento y la validación del proyecto por parte de psicólogos de la CDAG, psicólogos de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) y psicólogos profesionales independientes que se dedican al Neurofeedback.

Se pretende que el proyecto pueda ser continuado en la UVG por personas del departamento de Ingeniería Electrónica y Mecatrónica, personas del departamento de Ingeniería en Ciencias de la Computación y personas del departamento de Psicología, ya que las investigaciones respecto a los efectos del Neurofeedback aún son escasas y los posibles beneficios que podría tener parecen ser muy importantes en el campo de la salud. Es necesario realizar estudios para validar el Neurofeedback con muestras representativas, grupos de control y evaluaciones psicométricas. Los desafíos de ingeniería que presenta el Neurofeedback también suponen un avance para la investigación en tecnología, desde el aumento de la eficiencia de algoritmos para procesar las señales de manera casi instantánea, hasta la creación de interfaces cerebro-computador avanzadas.



### 6.1. ¿Qué es Neurofeedback?

El Biofeedback consiste en el condicionamiento operante de funciones autonómicas del cuerpo, esto significa que permite regular funciones que normalmente no se controlan de manera consciente a través de la asociación de la conducta con un resultado positivo. Esto se logra registrando y enviando de regreso información biológica a quien está entrenando. El Neurofeedback es un tipo de Biofeedback que utiliza el electroencefalograma (EEG) para guiar a un sujeto a llegar a un rango de frecuencias cerebrales específicas y lo ayuda a mantenerse dentro de ese rango. El cliente recibe retroalimentación que se relaciona con su actividad neuronal subconsciente, recibiendo estímulos auditivos o visuales cada vez que el cerebro opera de manera más eficiente. El objetivo principal es que el entrenamiento de las ondas cerebrales aumente la estabilidad del cerebro y su flexibilidad para moverse entre diferentes estados mentales. [2].

Gracias a la capacidad de obtener imágenes cerebrales, ahora es posible observar la actividad metabólica del cerebro en áreas específicas mientras se realizan actividades cognitivas y emocionales. Utilizando electroencefalograma, los cambios psicológicos pueden ser medidos y cuantificados a un nivel cerebral. Si la psicoterapia es una herramienta para entrenar la mente, el Neurofeedback es una herramienta para entrenar el cerebro. Los psicoterapeutas reciben información psicológica del cliente en la forma de expresiones emocionales o racionales. El psicoterapeuta retroalimenta al cliente con confrontaciones, clarificaciones o percepciones y el cliente tiene la opción de usar esa información para su propio crecimiento. De manera similar, el Neurofeedback registra información biológica en la forma de electroencefalograma y retroalimenta al cliente con estímulos auditivos o visuales. La retroalimentación le indica al cliente cada vez que está progresando. Por lo tanto, al mejorar la eficiencia del cerebro, se potencializa el crecimiento psicológico [3].

Existen dos grupos de candidatos para el entrenamiento por Neurofeedback, según la literatura actual y las investigaciones realizadas hasta el momento. El primer grupo consiste en personas que tienen un desorden específico y desean mejorar su calidad de vida. Existe

una gran cantidad de estudios sólidos que respaldan el tratamiento por Neurofeedback para el déficit de atención y la epilepsia. Otras condiciones sobre las que se están realizando investigaciones incluyen desórdenes de aprendizaje, depresión, ansiedad, abuso de sustancias, migrañas, desorden obsesivo compulsivo y lesión craneal cerrada. Existen experiencias anecdóticas acerca del tratamiento del síndrome de Asperger, síndrome de Tourette, Parkinson, autismo, fatiga crónica, fibromialgia y rehabilitación de derrame cerebral.

El segundo grupo consiste en personas que quieren optimizar su rendimiento. Pueden ser estudiantes, atletas o profesionales, entre otros. Debido a la gran cantidad de desórdenes y objetivos para los cuales el Neurofeedback muestra resultados, algunos de los puntos en común son los siguientes: se mejora la habilidad de mantener la atención; decrece la frecuencia, duración e intensidad de la actividad epiléptica, lo cual no ayuda solamente a las personas epilépticas sino a quienes tienen convulsiones sub-clínicas sin diagnosticar; aumenta la estabilidad y se tienen menos cambios de humor; se normaliza la actividad cerebral en áreas que están demasiado activas y muy poco activas y se normaliza la comunicación entre áreas de la corteza [6].

Según Mason y Brownback [7], los pioneros en el campo del Biofeedback por EEG realizaron investigaciones en el tratamiento de convulsiones [8], déficit de atención [9] y ansiedad [10]. Recientemente se ha utilizado para tratar síndrome premenstrual [11], trastorno disociativo de identidad [7] y depresión [12]. Además de desórdenes clínicos, se han realizado estudios en los patrones de ondas cerebrales de personas con buen rendimiento en la meditación [13], tiro con escopeta [14] [15] [16], creatividad [17] y aviación [18]. Existen estudios en la mejora de buen rendimiento a un nivel superior en tiro con arco [16] y rendimiento académico [19].

## 6.2. Historia del Neurofeedback

### 6.2.1. Condicionamiento clásico

Antes del Biofeedback y del Neurofeedback, Ivan Petrovich Pavlov, un psicólogo ruso, descubrió el principio del condicionamiento clásico. Después de ganar el Premio Nobel por su trabajo en el sistema digestivo, necesitaba grandes cantidades de saliva para continuar sus investigaciones. Para producirla, estimuló el flujo de saliva en un grupo de perros al inyectarles carne en polvo en la boca. Después de un tiempo, Pavlov se dio cuenta de que no necesitaba la inyección, sino que los animales empezaban a salivar solamente con escuchar sus pasos acercándose en el pasillo. Empezó a estudiar los reflejos, así que construyó una cámara de dos partes en la que un perro estaba aislado de un lado y el investigador podía observar las secreciones de saliva en el otro lado. Intentó hacer que el perro relacionara la comida con diferentes estímulos como olores, imágenes, sonidos. Su experimento más famoso es en el que emparejó el sonido de una campana con la carne en polvo. Después de un tiempo, la campana causaba que el perro salivara incluso cuando no se proveía la carne, en lo que se denomina una respuesta condicionada.

Más tarde, Neal E. Miller empezó a utilizar el condicionamiento operante para enseñar a animales de laboratorio a alterar funciones autonómicas que supuestamente no se pueden modificar. Uno de sus experimentos consistía en enseñar a ratas a cambiar su ritmo

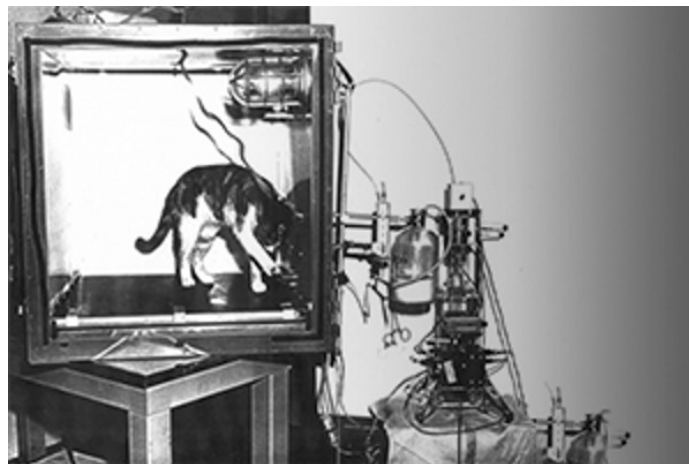
cardiaco, al recompensarlas con una dosis de corriente en el centro de placer del cerebro. En 1969 empezó a realizar investigaciones con seres humanos, en las que le enseñó a un grupo de personas con taquicardia a disminuir su ritmo cardiaco y entrenó a un grupo de sujetos masculinos para subir o bajar su presión sanguínea utilizando como recompensa la visualización de 5 segundos de una imagen de una revista de Playboy.

En 1965, Barry Stermán empezó a realizar experimentos de condicionamiento con gatos, mientras estos tenían un electrodo implantado en el cerebro para realizar EEG. De este modo descubrió el ritmo sensoriomotor (SMR), la onda cerebral con un rango de frecuencia entre 12 y 15 Hz que se localiza en la corteza sensoriomotora y que estaba presente cada vez que los gatos estaban totalmente quietos, pero en estado de alerta. A Stermán se le ocurrió probar si los gatos podían ser condicionados para generar las ondas SMR de manera voluntaria, por lo que fabricaron un filtro electrónico que aislaba las señales de 12 a 15 Hz y se les administraba comida automáticamente al presentar un aumento en la amplitud de estas ondas por medio segundo [2].

### 6.2.2. Inicios del Neurofeedback: Ondas SMR

El primer descubrimiento relacionado con el tratamiento de enfermedades utilizando neurofeedback se dio por accidente. Barry Stermán, PhD. profesor de psiquiatría y neurobiología del Brain Research Institute de la Universidad de California, estaba estudiando los efectos convulsivos de la exposición a un compuesto tóxico para la Fuerza Aérea de Estados Unidos, ya que estos compuestos se utilizan como propulsores en los cohetes. Los estudios con animales indicaban que la exposición resultaba en hiper excitabilidad cortical y convulsiones explosivas. Sin embargo, algunos de los animales utilizados en el estudio no mostraban todos los síntomas. Posteriormente, descubrieron que los animales que mostraban diferente sintomatología eran los mismos que habían sido utilizados en un estudio anterior. A pesar de mostrar el pródromo usual a la toxina, los animales que habían sido utilizados en otro estudio eran resistentes a las convulsiones

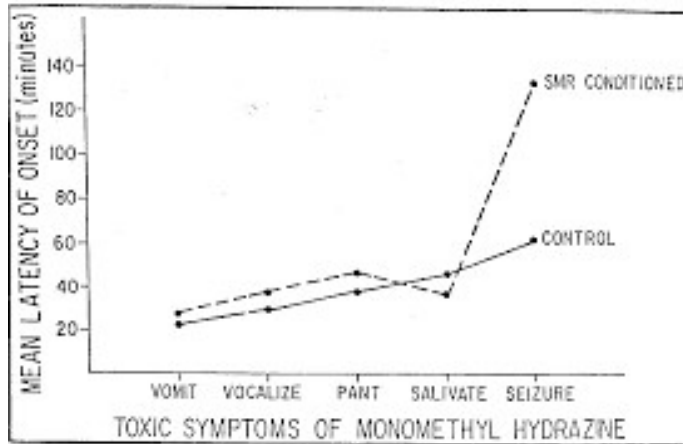
Figura 1: Experimento de Barry Stermán. [20]



El estudio anterior consistía en el condicionamiento operante para incrementar un patrón de electroencefalograma entre 12 y 15 Hz observado en la corteza somatosensorial de los gatos

en estado de alerta, pero sin moverse. A este patrón se le determinó Ritmo Sensoriomotor, o SMR. El hecho de que este descubrimiento se haya hecho por accidente y que los sujetos fueran animales, constituye un experimento con diseño doble ciego ya que se elimina la posibilidad de que exista influencia por el efecto placebo o por el sesgo de los investigadores. Al evaluar la hipótesis de que el entrenamiento de ondas SMR producía la resistencia a las convulsiones, se determinó que el 25 % de los animales entrenados eran totalmente resistentes a las convulsiones, mientras que el 75 % resistía las convulsiones por más del doble que los animales de control.

Figura 2: Resultado del experimento de Sterman donde se observa los gatos condicionados por Neurofeedback son inmunes a las convulsiones [21].



Este descubrimiento desencadenó una serie de experimentos en varios laboratorios buscando otras correlaciones con la actividad SMR. A partir de ellos, se encontró evidencia de que el condicionamiento operante del electroencefalograma sensoriomotor sí puede producir cambios fisiológicos prolongados. Estudios del sueño demostraron que los animales entrenados aumentaban la densidad de “spindles” (períodos de 0.5 segundos de actividad oscilatoria neuronal muy elevada) durante sueño y se estabilizaba su estado del sueño al disminuir la cantidad de despertares durante el sueño no REM. También se demostró que la actividad SMR atenúa la excitabilidad motora, reduciendo las señales corticales al tálamo, el tronco cerebral, el cerebelo y la espina dorsal. Una serie de estudios controlados realizados por Barry Sterman desde 1972 con grupos cada vez más grandes de sujetos epilépticos reportó beneficios clínicos significativos que excedían los que se esperan por un efecto placebo [21].

### 6.2.3. Meditación y entrenamiento por ondas alfa-theta

Uno de los investigadores más importantes en el Biofeedback es Elmer Green, un físico que estaba trabajando en el diseño de cohetes y misiles para el gobierno de Estados Unidos cuando leyó un libro de Entrenamiento Autógeno, por Johannes Shultz que discutía métodos para reducir el estrés a través de la relajación y la autohipnosis. Descubrió que podía resolver problemas matemáticos complejos a través de técnicas de meditación en las que las soluciones aparecían como proyecciones hipnagógicas del subconsciente. En 1962, Elmer Green obtuvo un PhD. en biopsicología y en 1969 propuso y fundó la Asociación de Psicofisiología Aplicada

y Biofeedback. Junto con su esposa y Dale Walters instrumentaron y generalizaron el método de la meditación a través del entrenamiento de neurofeedback de ondas alfa-theta.

Por medio del neurofeedback, Green asegura que se pueden alcanzar los estados de meditación que usualmente tardarían años en lograr por prueba y error. Encontró que, al observar el electroencefalograma de personas altamente creativas, los estados altos de conciencia siempre estaban acompañados de una transición de ondas beta a ondas theta y alfa. Según Green, después de algunas sesiones, las personas que realizan el entrenamiento logran entrar al estado de ondas Theta por varios minutos y encontrar soluciones inconscientes a problemas tales como la adicción.

En 1973, Elmer Green junto con su esposa Alyce Green y un equipo de investigadores viajaron a India para investigar las habilidades psicofisiológicas de los yoguis (practicantes avanzados de yoga). Allí conocieron a Rama Sharma, PhD. jefe del departamento de biofísica del Instituto de Educación Médica e Investigación de Chandigarh, quien, al ser conectado a un encefalograma, vieron que tenía la capacidad de activar ondas Theta instantáneamente de manera voluntaria. Sharma explicó que de joven un gurú le enseñó a meditar para encontrar soluciones a sus preguntas y que lo usaba para encontrar ideas de investigación en su PhD.

Figura 3: Elmer Green realizando EEG a un yogui [22].



Con el instrumento que Alyce y Elmer Green diseñaron para realizar Neurofeedback de ondas Alpha-Theta se creó la Clínica Menninger, donde se tratan se realizan investigaciones de problemas en los EEG y se entrena a diferentes clientes. Green asegura que después de algunas sesiones, los clientes son capaces de permanecer en estados Theta por varios minutos y entrar en estados profundos de conciencia. El entrenamiento de las ondas cerebrales conlleva a cambios psicológicos, tranquilizarían emocional y un nivel de control mental que usualmente se logra con la meditación y el yoga. [23].

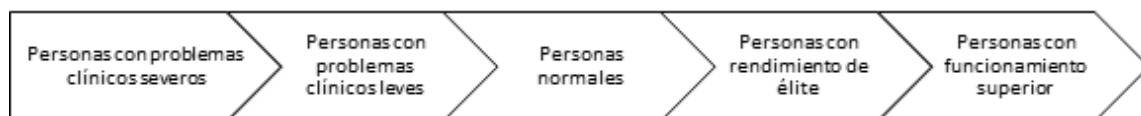
#### 6.2.4. Entrenamiento de funcionamiento óptimo

En el estudio de caso realizado por Mason y Brownback [7], se analizó la efectividad de protocolos de Biofeedback por electroencefalograma para mejorar el rendimiento y el funcionamiento global de vida en una mujer madura diagnosticada con Trastorno Disociativo No Especificado, una forma de disociación patológica que no cumple con el diagnóstico de nin-

guno de los subtipos del Trastorno Disociativo. Se le enseñó al sujeto a entrenar de manera independiente con protocolos para mejorar el rendimiento y realizó 60 sesiones de entrenamiento de quince minutos en dos meses. Se compararon los cambios en su encefalograma con la Base de Datos de Esperanza de Vida de Thatcher por EEG y otras medidas del cambio como autoinformes y retroalimentación de los compañeros de trabajo.

El trabajo de Mason y Brownback se enfoca en el entrenamiento de funcionamiento óptimo para ayudar a personas cuyo funcionamiento es menos del que podría ser debido a un problema clínico. Utilizan un «Quality of Life Continuum», las etapas continuas de la calidad de vida, para demostrar cómo el entrenamiento de funcionamiento óptimo se puede utilizar para mejorar la vida de cualquier persona. En el «Quality of Life Continuum» mostrado en la Figura 4, la calidad de vida se clasifica en una línea continua que contiene a las personas con problemas clínicos severos en un extremo, seguidas de las personas con problemas clínicos leves, personas normales, personas con rendimiento de élite y personas con funcionamiento superior en el otro extremo. Protocolos de rendimiento superior de Neurofeedback podrían permitir a personas mejorar su calidad de vida a la de una categoría superior en el “Quality of Life Continuum”. La diferencia entre los protocolos de mejora de rendimiento y los protocolos generales de entrenamiento de Biofeedback por EEG, es que éstos no se utilizan para tratar un problema en específico, sino más bien para mejorar el rendimiento diario de una persona.

Figura 4: Etapas de la calidad de vida



El sujeto que analizaron Mason y Brownback era una mujer soltera de 49 años cuya historia terapéutica empezó a los 16 años después de un intento de suicidio. Se le diagnosticó Trastorno Disociativo No Especificado a los 29 años y desde entonces, además de la terapia, intentó varios métodos de autoayuda y se enfocó en su espiritualidad para reducir la disociación y otras consecuencias de abuso sexual severo en la infancia. También tuvo 50 sesiones aproximadamente de neuro terapia sin ningún cambio. El sujeto fue instruido para realizar las sesiones de manera individual, en el ambiente de su oficina abierta y con los ojos abiertos. Todo esto para reforzar la meta del entrenamiento de funcionamiento óptimo, que pueda funcionar en cualquier ambiente.

Se realizó un protocolo en el que la meta era disminuir las ondas Theta (de 4 a 8 Hz) e incrementar las ondas Beta (de 11.5 a 13 Hz). Luego se realizaron protocolos para aumentar la actividad de las ondas Alfa (de 8 a 13 Hz) y aumentar el porcentaje de ondas Alfa. El sujeto luego hizo protocolos para aumentar la fase de las ondas Alfa y luego para aumentar la

coherencia de las ondas Alfa. Para todos estos protocolos se utilizó retroalimentación visual y auditiva para alcanzar el objetivo. Además de las mejoras en el electroencefalograma, el sujeto reportó cambios de vida que había querido realizar antes pero no había logrado.

Al final del entrenamiento, el sujeto había perdido 20 libras que atribuía a una mejora en el manejo de los impulsos para comer y a realizar ejercicio tres veces a la semana, cuando antes del entrenamiento realizaba ejercicio esporádicamente una o dos veces al mes. Mejoró su meditación ya que sentía coherencia entre los contenidos de sus pensamientos espirituales y la aplicación en su vida. El cambio que tuvo más significado para ella fue un incremento de energía ya que, a diferencia de antes, podía ser efectiva en el trabajo y tener tiempo y energía para satisfacer su vida personal. Finalmente, experimentó una mejor tolerancia al estrés y la frustración. Tanto ella como sus compañeros de trabajo reportaron que empezó a ser más agradable, paciente y cooperativa. Se redujo la cantidad de veces que se enojaba, lo cual ella atribuye a que empezó a ser menos obsesiva [7].

### **6.3. Funcionamiento del Neurofeedback**

Para poder aplicar un entrenamiento por Neurofeedback, el terapeuta debe seleccionar el ancho de banda de frecuencia que se va a entrenar y la localidad del cerebro en la que se va a realizar el entrenamiento. Un «protocolo» de Neurofeedback es la definición de la frecuencia y la ubicación de los electrodos que se van a utilizar durante el entrenamiento. [1]. Además es necesario realizar un procesamiento electrónico de las señales que se obtienen del cerebro y retroalimentar a la persona que está entrenando a través de estímulos que le indican si sus ondas cerebrales cumplen con las condiciones establecidas.

#### **6.3.1. Electroencefalograma**

El cerebro humano está compuesto por aproximadamente cien billones de neuronas y cada una de ellas puede tener desde cientos hasta cientos de miles de conexiones con otras neuronas [2]. Las ondas cerebrales están asociadas con la activación y desactivación eléctrica de manera cíclica en las neuronas. El electroencefalograma (EEG) es el registro de las señales de las ondas cerebrales. [3]. Cada electrodo de EEG recibe la actividad eléctrica de aproximadamente cien mil neuronas, por lo que el EEG es como una “huella digital” eléctrica del cerebro. [2]. Los neurólogos lo utilizan para diagnosticar examinando la morfología de las ondas sin procesar. Por otro lado, en el Neurofeedback no es tan importante la morfología de las ondas como la frecuencia y la amplitud que se pueden observar al procesar la señal. [3].

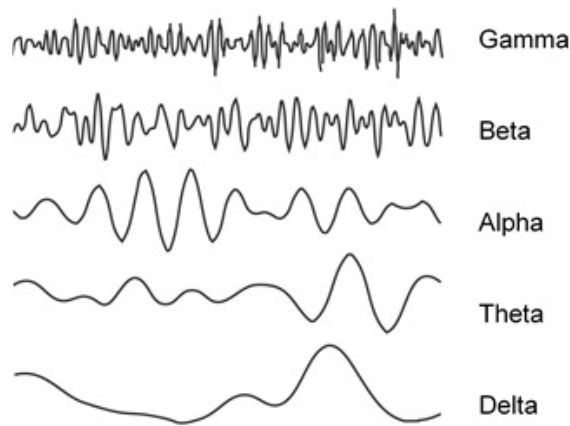
Al procesar la señal con filtros electrónicos, ésta se puede separar en diferentes frecuencias para observar la amplitud de la onda en micro voltios para cada frecuencia. Las frecuencias se han organizado en diferentes rangos, denominados anchos de banda, que tienen diferentes características al ser predominantes en el cerebro. Cuando las frecuencias más bajas predominan en el cerebro, la actividad es lenta y se está reflexionando o preparándose para hacer algo. Cuando dominan las frecuencias altas, el cerebro está realizando varias actividades de forma rápida. El entrenamiento por Neurofeedback busca cambiar la amplitud para cierto

rango de frecuencias. [3].

Nombre del ancho de banda	Rango de frecuencia (Hz)	Características generales
Delta	1-4	Es dominante durante el sueño, la consolidación de memorias o la resolución de problemas complejos. Al estar despierto, está asociado a problemas de aprendizaje, deterioro cognitivo y lesiones cerebrales.
Theta	4-8	Puede estar asociado con creatividad, introspección, pensamientos profundos. En el área posterior del cerebro puede indicar falta de atención y cansancio.
Alpha	8-12	Indica un estado de meditación, estado de alerta o autoconciencia.
SMR	12-15	Está asociada con relajación física, estado de alerta mental, falta de ansiedad e impulsividad.
Beta	15-21	Relacionado con resolución de problemas, aprendizaje, actividad intelectual y atención.
High Beta	20-32	Se puede observar durante la función cognitiva intensa y ansiedad.
Gamma	38-42	Asociada con procesamiento cognitivo, atención intensa, estimulación intensa y mantenimiento de la memoria.

Cuadro 1: Anchos de banda de frecuencias cerebrales comunes [3] [1].

Figura 5: Anchos de banda de frecuencia comunes



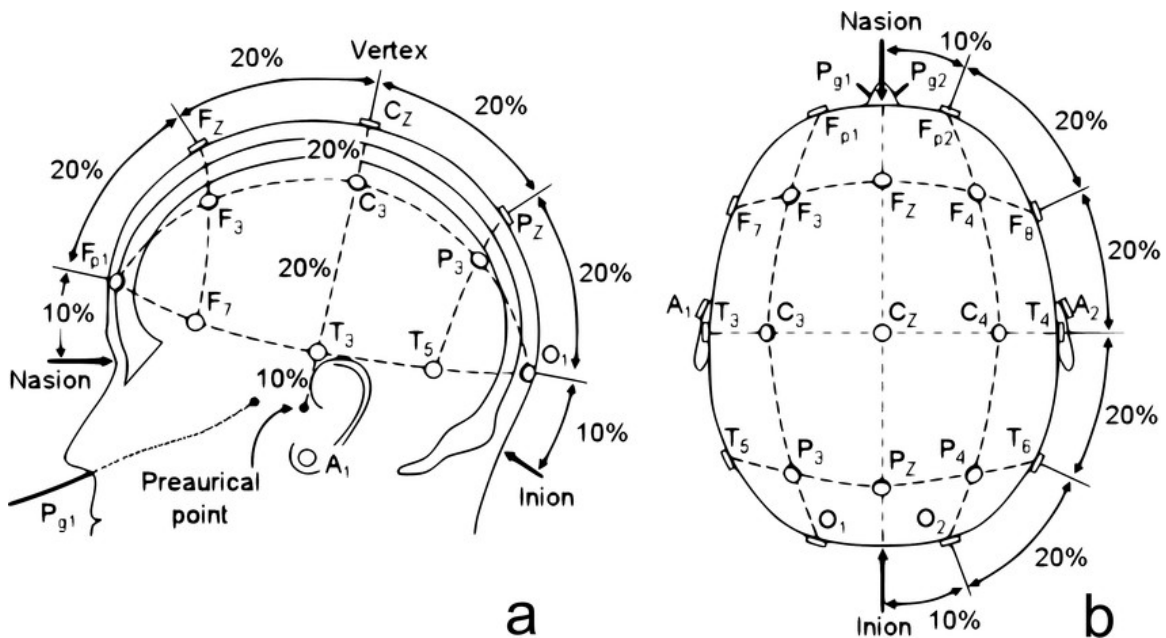
### 6.3.2. Sistema Internacional 10-20

En el Neurofeedback se utiliza el Sistema Internacional 10-20 para localizar regiones cerebrales. En él, se asignan letras y números a 19 sitios principales en la corteza cerebral. Los números impares representan lugares en el lado izquierdo del cerebro y los números pares representan lugares en el lado derecho. La letra F representa lóbulos frontales, Fp representa polos frontales, T representa lóbulos temporales, O representa lóbulos occipitales, P representa lóbulos parietales, C representa la corteza sensoriomotora y Z representa la línea central que separa los hemisferios izquierdo y derecho.[3]. Los electrodos se colocan en puntos específicos del Sistema Internacional 10-20 para aplicar diferentes protocolos en las

áreas correspondientes de la corteza cerebral.

El voltaje que medimos al realizar EEG representa una diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos. Por lo tanto, es necesario definir un punto de referencia con respecto al cual vamos a medir el voltaje en el otro punto. Al punto de referencia se le denomina «tierra». Al colocar los electrodos para el entrenamiento, se debe utilizar un punto en el que no existan ondas cerebrales como la tierra. Usualmente, esta se coloca en el lóbulo de la oreja. Los electrodos que no son la tierra se denominan «activos» y existen dos maneras de colocarlos. En el montaje monopolar se colocan los electrodos activos en el cuero cabelludo y se coloca una referencia en el lóbulo de la oreja en el que no está colocada la tierra. De esta manera, el valor de las ondas es absoluto ya que la referencia es igual a la tierra, por lo que es neutral o cero. En el montaje bipolar, la referencia y los electrodos activos se colocan en el cráneo. De esta manera, no se obtiene un valor absoluto de las ondas cerebrales, sino que la diferencia entre dos lugares activos del cerebro. [3]

Figura 6: Sistema Internacional 10-20. [24]



### 6.3.3. Procesamiento de señales

Para poder analizar las señales, es necesario realizar un procesamiento que convierta el voltaje leído por cada electrodo en un valor numérico en la computadora que represente la cantidad en milivoltios y, posteriormente, la amplitud de cada rango de frecuencia. Para esto es necesario muestrear la señal analógica, aplicar filtros digitales y realizar la transformada rápida de Fourier en el software.

La placa utilizada para el sistema de Neurofeedback, «Cyton» de OpenBCI, tiene integrados un microcontrolador PIC32MX250F128B que trabaja a 50 MHz con 32 bits y un convertidor analógico digital (ADC) ADS1299 de 8 canales y 24 bits con un amplificador de ganancia controlable (de hasta 24), referencia interna y un oscilador incorporado; fabricado

específicamente para EEG. El envío de datos se hace a 250 Hz y en paquetes de 33 bytes. Estos consisten en un byte de encabezado, un byte que indica el número de muestra, 3 bytes para cada uno de los ocho canales de EEG, 6 bytes para el acelerómetro y un byte de cierre. Cada valor de un canal de EEG está en un formato de 24 bits con signo, con el bit más significativo (MSB) al inicio.

## Muestreo y factor de escala

El muestreo consiste en la reconstrucción completa de una señal partiendo de valores conocidos en puntos igualmente espaciados en el tiempo. Esto se puede lograr bajo ciertas condiciones y se explica gracias al teorema de muestreo. Ya que existen un número infinito de posibles señales que pudieron haber generado las muestras bajo las cuales se está reconstruyendo la señal, no deberíamos de esperar que fuera posible la reconstrucción de forma completa sin información adicional. Sin embargo, el teorema de muestreo indica que, si una señal es de banda limitada, es decir que su transformada de Fourier es cero fuera de una banda finita de frecuencias, y si las muestras son tomadas lo suficientemente cercanas unas de las otras en relación con la frecuencia más alta en la señal, entonces las muestras especifican unívocamente la señal y se puede reconstruir perfectamente.

Teorema de Muestreo: Sea  $x(t)$  una señal de banda limitada con  $X(j\omega) = 0$  para  $|\omega| > \omega_M$ , entonces  $x(t)$  se determina unívocamente mediante sus muestras  $x(nt)$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ , si  $\omega_s > 2\omega_M$ . [25].

La frecuencia de muestreo que utiliza la placa es de 250 SPS (muestras por segundo). El ancho de banda de frecuencia más alta que se analiza en Neurofeedback es Gamma que llega hasta 42 Hz, como se puede observar en la Tabla 1. Por lo tanto, se puede concluir que se cumple con el teorema de muestreo y la señal se puede reconstruir unívocamente por las muestras. Una señal muy rápida para las ondas cerebrales, de 50 Hz, se podría reconstruir utilizando 5 muestras por cada período.

Ya que el ADS1299 tiene una salida de 24 bits por cada canal, el bit menos significativo (LSB) es el equivalente a un voltaje de entrada de  $\frac{V_{ref}}{(2^{23}-1)}$ . En donde  $V_{ref}$  es el voltaje de referencia. El término  $2^{23}$  se debe a que el formato de salida es de 24 bits con signo.

Señal de entrada	Código de salida
$\geq V_{ref}$	7FFFFFFh
$+\frac{V_{ref}}{(2^{23}-1)}$	000001h
0	000000h
$-\frac{V_{ref}}{(2^{23}-1)}$	FFFFFFh
$\leq -V_{ref}\frac{2^{23}}{\{2\}^{23}-1}$	800000h

Cuadro 2: Código de salida para cada señal de entrada del ADS1299. [26]

El factor de escala indica el valor de voltaje que equivale a cada conteo de la secuencia binaria. Este valor se puede calcular utilizando el equivalente al voltaje de entrada por cada bit y la ganancia del ADC. El ADS1299 está configurado para utilizar su ganancia

máxima de 24x. Por lo tanto, el factor de escala se puede calcular con la siguiente fórmula.  $SF = \frac{V_{ref}}{(2^{23}-1)G} = \frac{4.5}{(2^{23}-1)*24} = 0.02235 \text{ microVoltios/conteo}$  Este valor se multiplica en el código con cada lectura del microcontrolador para obtener el valor del canal de EEG en micro Voltios. (OpenBCI, n.d., "Cyton Data Format").

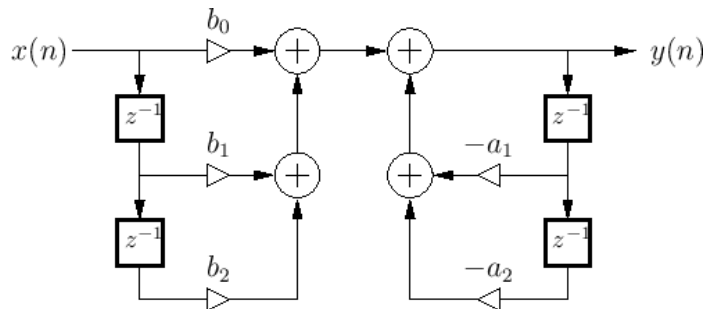
## Filtrado digital

Un filtro electrónico es un circuito o sistema diseñado para realizar procesamiento de señales al suprimir o aumentar un rango de frecuencias en una señal. (Lohninger, "What is a Filter?"). Estos pueden ser analógicos, cuando la señal continua en el tiempo, o digitales, cuando la señal es discreta. El diseño de un filtro comienza con la especificación de su función de transferencia  $H(s)$ , la cual es la razón de la señal de salida  $Y(s)$  a la señal de entrada  $X(x)$  como funciones en el dominio de la frecuencia compleja  $s = \sigma + j\omega$ .

La función de transferencia se debe convertir del dominio de la frecuencia compleja  $s$  al dominio discreto  $z$ , para obtener  $H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)}$  y a partir de la función de transferencia se puede obtener una ecuación de diferencias  $H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_Nz^{-N}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_Mz^{-M}}$ . Al despejar para la señal de salida  $Y(s)$ , la ecuación de diferencias se puede reescribir como  $y[n] = -\sum_{k=1}^M a_k y[n-k] + \sum_{k=0}^N b_k x[n-k]$ . Donde la muestra de salida  $y[n]$  depende de la entrada actual  $x[n]$ , las entradas anteriores  $x[n-k]$  y las salidas anteriores  $y[n-k]$ .

Esta implementación de un filtro se denomina de Forma Directa y se puede observar su funcionamiento en el diagrama de bloques 7. [27] (Smith, J.O. Introduction to Digital Filters with Audio Applications.). Al tener coeficientes de retroalimentación que multiplican a los términos  $y[n-k]$ , el filtro se considera de Respuesta Infinita al Impulso (IIR). Esto implica que siempre que el filtro tenga una señal de impulso en la entrada, la salida presentará infinitos términos [28].

Figura 7: Diagrama de bloques de la implementación por Forma Directa de un filtro digital de segundo orden. [27] (Smith, J.O. Introduction to Digital Filters with Audio Applications.)



Algunos de los tipos de filtros que se pueden implementar son el filtro de Chebyshev, Butterworth, Bessel o Elíptico. Ambos filtros utilizados para procesar las señales fueron filtros Butterworth de segundo orden. Este se caracteriza por tener una respuesta plana en la parte de la señal que no se rechaza. Uno de los filtros se utilizó como un pasa banda entre 1 y 50 Hz que son las frecuencias que se analizan para practicar Neurofeedback. El otro filtro se utilizó como un filtro eliminador de banda en 60 Hz para eliminar el ruido que pueda

provenir de la corriente eléctrica. Los coeficientes de ambos filtros se calcularon utilizando la herramienta de software Matlab. La respuesta en decibeles de ambos filtros se muestra en las figuras 8 y 9.

Figura 8: Respuesta del filtro eliminador de bandas graficada en Matlab.)

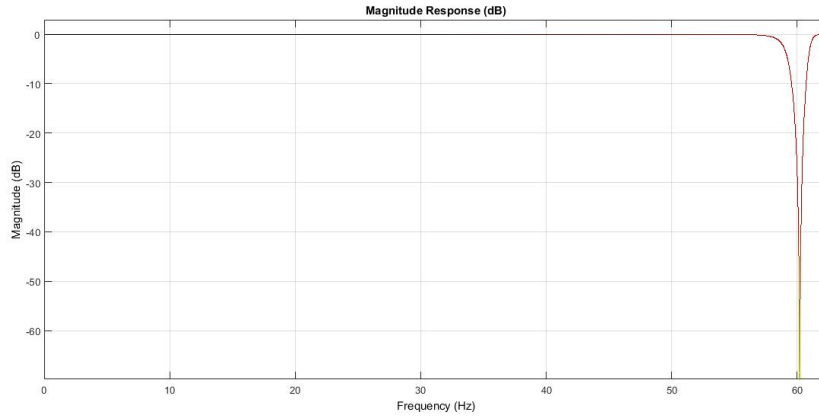
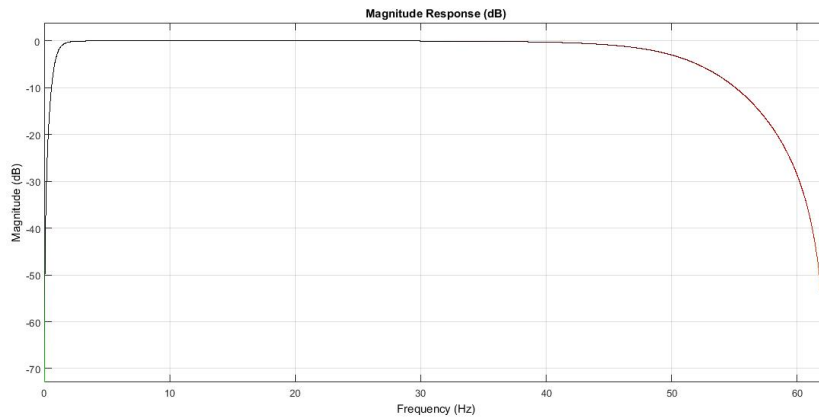


Figura 9: Respuesta del filtro pasa banda graficada en Matlab.

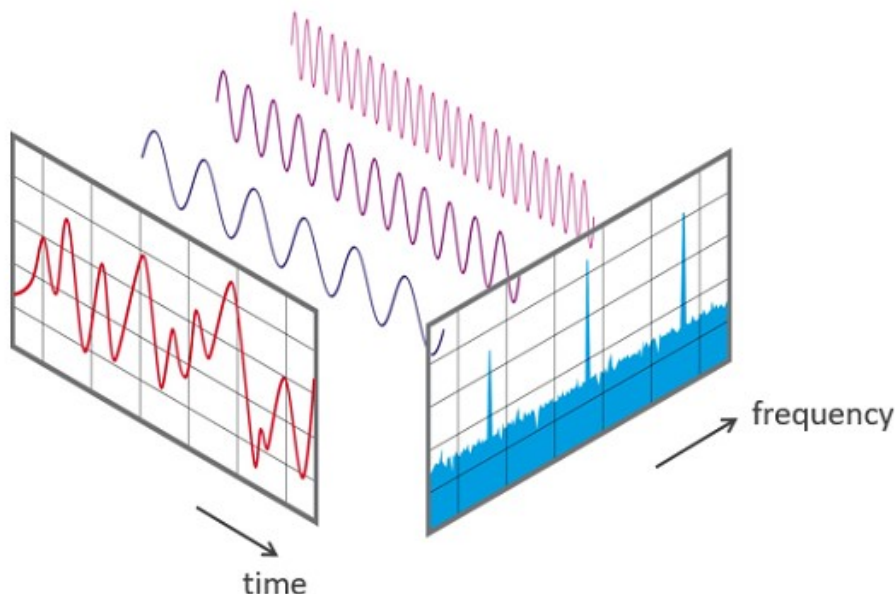


## Transformada Rápida de Fourier

La Transformada Rápida de Fourier es un método para convertir una señal en componentes espectrales individuales de los que se puede obtener la frecuencia. Consiste en un algoritmo optimizado para implementar la Transformada Discreta de Fourier. Una señal muestreada durante un período de tiempo es dividida en oscilaciones sinusoidales individuales de cada frecuencia con su propia amplitud y fase. [29] (Audio, NTi., n.d., How an FFT works).

La anti transformada de Fourier de tiempo discreto se define como:  $x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} X(e^{j\omega}) e^{jn\omega} d\omega$   
 La transformada de Fourier de tiempo discreto se define como:  $X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] e^{-jn\omega}$   
 A partir de ellas, una secuencia aperiódica con duración finita  $x[n]$  se puede considerar como una combinación lineal de exponenciales complejas. La ecuación de la anti transformada

Figura 10: Transformada de Fourier [29] (Audio, NTi., n.d., How an FFT works).



representa  $x[n]$  como una combinación lineal de exponenciales complejas infinitesimalmente cercanas en frecuencia y con amplitudes  $X(e^{j\omega}) \frac{d\omega}{2\pi}$ . Por esta razón, se hace referencia a la transformada  $X(e^{j\omega})$  como el espectro de  $x[n]$ , ya que nos proporciona la información acerca de cómo  $x[n]$  está compuesta de exponenciales complejas a diferentes frecuencias. [25].

La Transformada Rápida de Fourier es un algoritmo para calcular la Transformada de Fourier en tiempo continuo de manera más eficiente. Utilizando la definición, la transformada de una señal con  $N$  puntos tomaría  $N^2$  operaciones aritméticas. El algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier permite que se calcule la transformada con  $N(\log N)$  operaciones. Esto implica un factor de aumento en la velocidad de computación de  $N/\log N$ , lo cual reduce el tiempo a mayor medida mientras la cantidad de puntos  $N$  sea más grande. [30].

### 6.3.4. Retroalimentación

#### Threshold

Después de procesar la señal, es necesario tener un “threshold” (o umbral) que determine a partir de qué amplitud se va a recompensar o inhibir para cierta frecuencia. El threshold determina qué tan difícil será la tarea para la persona que está entrenando. Si se busca disminuir la amplitud para un ancho de banda de frecuencia, se coloca un umbral de inhibición. Si se busca aumentar la amplitud de un ancho de banda de frecuencia, se coloca un umbral de recompensa. Cuando el umbral es de inhibición, se genera un estímulo de refuerzo cuando la amplitud de la onda es menor al umbral. Cuando el umbral es de recompensa, se genera un estímulo de refuerzo cuando la amplitud de la onda es mayor al umbral.

Ya que los protocolos de entrenamiento buscan inhibir o reforzar diferentes ondas, debe ser posible colocar un threshold diferente para cada ancho de banda de frecuencia que se busque inhibir o reforzar. Cuando el cerebro logra mantenerse dentro de todos los límites que han sido definidos, se le da una recompensa en forma de un estímulo visual o auditivo. Este entrenamiento ayuda al cerebro a ganar fuerza y flexibilidad. Es necesario ver el porcentaje de éxito de la persona que está entrenando, ver su gráfica de resultados u observar la cantidad de estímulos que recibió durante la sesión para saber qué tan exitoso está siendo. Los thresholds deben ser establecidos de manera que el cliente siempre se sienta exitoso. Usualmente se busca que los refuerzos se den desde el 50 % hasta el 80 % del tiempo de la sesión. [3]

## Estímulos

Los estímulos que se le dan al cliente como refuerzo pueden ser auditivos o visuales. Los más importantes son los auditivos. Usualmente se repite un golpeteo o se mantiene un sonido constante mientras se cumplan las condiciones de los thresholds. También se puede utilizar un sonido variable que cambie de tono mientras el cliente es más o menos exitoso. Los gráficos suelen ser juegos que consisten en objetos que se mueven en la pantalla o solamente gráficos repetitivos cuando el entrenamiento es exitoso. Es posible que el cliente realice actividades como leer, jugar o dibujar mientras se realiza el Neurofeedback para evitar que sea demasiado aburrido. Es importante permitir a los clientes elegir el estímulo y encontrar uno que les sea agradable. [3]

## 6.4. Neurofeedback de alto rendimiento para atletas

### 6.4.1. Protocolos de alto rendimiento

Como indican los estudios de Mason & Brownback [31] y Elmer Green (1993) [23] descritos anteriormente, el entrenamiento Alpha/Theta (A/T), el entrenamiento de refuerzo de Alpha y el entrenamiento de sincronía de Alpha tienen muchas aplicaciones que no son clínicas. Estos se usan para aumentar el rendimiento mejorando la flexibilidad cognitiva, la creatividad, el control atlético, la sincronización entre hemisferios y la consciencia interna. A pesar de que la psicoterapia es efectiva para tratar varios problemas y mejorar la calidad de vida, la neurología y la fisiología pueden impedir el tratamiento o retardarlo. El entrenamiento A/T tiene la capacidad de reducir la cantidad de tiempo del tratamiento y permite al cliente estar relajado durante la sesión. Muchos investigadores han resuelto problemas emocionales al recompensar Alpha y Theta a través de Neurofeedback.

El entrenamiento A/T consiste en la recompensa de tanto de ondas Alpha como de ondas Theta. También se puede inhibir ondas Beta o High Beta, lo cual sirve para reducir la ansiedad y los pensamientos excesivos durante la sesión. La locación de los sensores se hace en la parte posterior (puede ser en los sitios Oz, O1, O2, Pz, P3 o P4 del Sistema Internacional 10-20). La mejor manera de retroalimentar en entrenamiento A/T es con sonido. El entrenamiento de sincronía de Alpha es un protocolo de dos canales en el que se busca recompensar las ondas Alpha en dos lugares contralaterales de manera simultánea. Usualmente se usan los sitios O1 y O2. Otro protocolo que se puede usar para mejorar el

rendimiento es el Beta/SRM. Estos se aplican en la corteza somatosensitiva (C3, C4 y Cz). Se puede realizar recompensando Beta (15-18 Hz) e inhibiendo Theta en C3, recompensando SMR (12-15 Hz) e inhibiendo Theta en C4, o se puede reforzar tanto Beta como SMR en Cz. Beta se refuerza en Cz para aumentar el estado de alerta y SMR se refuerza en Cz para remitir la impulsividad, en ambos casos se inhibe Theta y High Beta (20-30 Hz). [3].

#### 6.4.2. Estudios de Biofeedback y Neurofeedback en atletas de élite

Un estudio que aplica una combinación de Biofeedback y Neurofeedback en atletas es el realizado por Rijken *et al.* [32] para investigar los efectos de una intervención de entrenamiento psicológico combinado con Biofeedback de electroencefalograma de ondas Alpha o Biofeedback de variabilidad de ritmo cardiaco en factores como estrés, rendimiento, recuperación y calidad del sueño en atletas de élite. Jugadores de fútbol recibieron cuatro sesiones de entrenamiento psicológico combinadas con sesiones diarias de Biofeedback de variabilidad del ritmo cardiaco. Atletas de pista recibieron cuatro sesiones de entrenamiento psicológico combinadas con sesiones diarias de Neurofeedback.

Se realizaron mediciones al momento de empezar el entrenamiento, después de terminar el entrenamiento y después de cinco semanas utilizando electroencefalogramas, electrocardiogramas, Índice de Calidad del Sueño de Pittsburgh, Cuestionario de Descanso y Estrés y Mejora del Deporte-60. El estudio concluye que una combinación de entrenamiento psicológico con Biofeedback, tanto de variabilidad de ritmo cardiaco como de Neurofeedback de ondas Alpha, ayuda a reducir el nivel de estrés en los atletas y a mejorar su rendimiento, aunque es necesario que se hagan estudios con grupos de control para determinar las diferencias en los resultados entre los dos tipos de Biofeedback [32].

En el estudio realizado por [1] se revisaron estudio empíricos que investigaban la aplicación y efectividad de intervenciones de entrenamiento por Neurofeedback en el campo de los deportes. Se eligieron 14 estudios que mejor cumplían con criterios que los validaban como estudios científicos. En las tablas 3, 4, 5 y 6 se puede observar el tipo de entrenamiento que se realizó en cada estudio y sus resultados.

Estudio	Intervención	Localidad del electrodo	Resultados	Disciplina
Rostami <i>et al.</i> , 2012	Inhibir High Beta e incrementar SMR	C3 y C4	Mejora en el rendimiento comparado con el grupo de control.	Tiro con rifle
Paul <i>et al.</i> , 2011	Inhibir High Beta y Theta e incrementar SMR	Cz	Ningún efecto en el rendimiento pero mayor placer en las mediciones antes de las competiciones que el grupo de control.	Tiro con arco
Faridnia <i>et al.</i> , 2012	Inhibir High Beta e incrementar Beta	C3 y C4	Reducción y mejor regulación de la ansiedad en el grupo experimental comparado con el grupo de control.	Nado
Mikicic, 2015	Inhibir High Beta y Theta e incrementar Beta	C3 y C4	Mejora en el \textquoteleft{compromiso autotélico} y mejores resultados en una prueba de aritmética en comparación con el grupo de control.	Nado

Cuadro 3: Descripción y resultados de estudios con ondas Beta. [1]

Estudio	Intervención	Localidad del electrodo	Resultados	Disciplina
Rostami <i>et al.</i> , 2012	Inhibir High Beta e incrementar SMR	C3 y C4	Mejora en el rendimiento comparado con el grupo de control.	Tiro con rifle
Cheng <i>et al.</i> , 2015	Incrementar SMR	Cz	Mejora en el rendimiento comparado con el grupo de control.	Golf
Shaw <i>et al.</i> , 2012b	Incrementar SMR e inhibir Theta y Biofeedback de variabilidad del ritmo cardiaco	Cz y T3	Mejora del balance	Gimnasia
Paul <i>et al.</i> , 2011	Inhibir High Beta y Theta e incrementar SMR	Cz	Ningún efecto en el rendimiento pero mayor placer en las mediciones antes de las competiciones que el grupo de control.	Tiro con arco
Faridnia <i>et al.</i> , 2012	Inhibir High Beta e incrementar Beta	C3 y C4	Reducción y mejor regulación de la ansiedad en el grupo experimental comparado con el grupo de control.	Nado
Mikicic, 2015	Incrementar SMR e inhibir Theta y High Beta	C3 y C4	Mejora en el \textquoteleft{compromiso autotélico} y mejores resultados en una prueba de aritmética en comparación con el grupo de control.	Varias disciplinas

Cuadro 4: Descripción y resultados de estudios con ondas SMR.[1]

Estudio	Intervención	Localidad del electrodo	Resultados	Disciplina
Rostami <i>et al.</i> , 2012	Incrementar Alpha y Theta e inhibir High Beta.	Pz	Mejora en el rendimiento comparado con el grupo de control.	Tiro con rifle
Ring <i>et al.</i> , 2015	Inibir Alpha y Theta	Fz	No mejoro el rendimiento comparado con el grupo de control.	Golf
Gruzelier <i>et al.</i> , 2014b	Inhibir Alpha e incrementar Theta	Pz	Ningún efecto en las medidas de depresión, ansiedad y estrés. Incremento en la creatividad en comparación con el grupo de control.	Baile
Raymond <i>et al.</i> , 2015	Inhibir Alpha e incrementar Theta	Pz	Mejora en el rendimiento comparado con el grupo de control.	Baile
Dekker <i>et al.</i> , 2014	Incrementar Alpha	C3	Ningún cambio en el estado de ánimo ni en la experiencia del entrenamiento en comparación con el grupo de control.	Gimnasia
Ziólkowski <i>et al.</i> , 2012	Incrementar Alpha y Biofeedback de variabilidad de ritmo cardíaco	C3 y C4	Mejora en el tiempo de reacción.	Pista y campo

Cuadro 5: Descripción y resultados de estudios con ondas Alpha. [1]

Estudio	Intervención	Localidad del electrodo	Resultados	Disciplina
Gruzelier <i>et al.</i> , 2014b	Inhibir Alpha e incrementar Theta	Pz	Ningún efecto en las medidas de depresión, ansiedad y estrés. Incremento en la creatividad en comparación con el grupo de control.	Baile
Raymond <i>et al.</i> , 2015	Inhibir Alpha e incrementar Theta	Pz	Mejora en el rendimiento comparado con el grupo de control. Mejora del rendimiento sin ningún efecto en la reducción o regulación de la ansiedad y confianza.	Baile
Kao <i>et al.</i> , 2014	Inhibir Theta	Fz		Golf

Cuadro 6: Descripción y resultados de estudios con ondas Theta. [1]



## 7.1. Unidad de Ciencias Aplicadas de la CDAG

La Confederación Deportiva Autónoma de Guatemala (CDAG) cuenta con una unidad de Ciencias Aplicadas cuyo objetivo es preservar la salud de los deportistas federados para optimizar su rendimiento físico. Dentro de la unidad se trabajan temas como el anti doping, la investigación, traumatología, fisioterapia, nutrición, psicología y biomecánica. El trabajo comenzó con una reunión que se tuvo con los psicólogos de la unidad de Ciencias Aplicadas en la que se discutieron las necesidades que tenía la CDAG y los posibles proyectos que se podrían realizar con el tema «Ciencia Aplicada al Deporte». Uno de los temas en el que se mostraron más interesados fue el entrenamiento psicológico por medio de Neurofeedback.

La CDAG cuenta con un solo equipo para realizar biofeedback, NeXus-10, que cuenta con canales para sensores de electroencefalograma, electrocardiograma, electromiografía y electrooculograma. Además, cuenta con sensores de ritmo cardíaco, flujo sanguíneo, conductancia de la piel, respiración y temperatura. Debido al elevado costo del dispositivo solamente se cuenta con una unidad de Biofeedback para toda la Confederación y no se cuenta con un dispositivo que funcione específicamente para Neurofeedback. Los psicólogos estaban interesados en tener un equipo de Neurofeedback debido a los diversos estudios que muestran que mejorar las ondas cerebrales de los atletas se traduce en buen rendimiento y mejores resultados.

## 7.2. Departamento de Psicología de la UVG

Se realizó un acercamiento con el Departamento de Psicología de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) para evaluar la viabilidad de construir un sistema de Neurofeedback

en la Universidad y colaborar en el diseño y la validación. Se tuvieron varias reuniones con diferentes personas del departamento en las que se empezaron a investigar los protocolos de Neurofeedback y la forma en la que los psicólogos lo usan para el tratamiento de trastornos y para mejorar el rendimiento. Se acordó en realizar el diseño bajo la asesoría del Departamento de Psicología y validar el resultado del proyecto a través de un estudio que se realizaría en conjunto.

### **7.3. Revisión bibliográfica**

Se hizo una investigación de la teoría psicológica y neurológica que se usa como base para el Neurofeedback tanto en libros y documentos que se consiguieron de manera independiente y en cursos que se imparten en la UVG. Como parte del curso Introducción a las Neurociencias, se realizó una revisión bibliográfica de varios estudios en los que se evaluó la efectividad del Neurofeedback para tratar diferentes trastornos o para mejorar el rendimiento de personas en varios ámbitos. Finalmente, se consiguieron los manuales y presentaciones que utilizan en una clínica de Neurofeedback y se realizó una entrevista con la terapeuta en la que se pudo observar su equipo y su clínica.

---

## Módulo de recopilación de señales por EEG

---

La recopilación de las señales se hizo a través de un casco con electrodos para realizar electroencefalograma. El diseño del casco se basó en el casco «Ultracortex Mark III» de la plataforma de código abierto para las interfaces cerebro-computador «OpenBCI». Se eligió ese diseño ya que se podía construir solamente con partes impresas en 3D. Esto permitió construir una herramienta de EEG con un diseño cuya funcionalidad ya estaba comprobada, por lo que el proyecto se pudo centrar en el diseño del sistema de Neurofeedback. Para la construcción del casco fue necesario cotizar y analizar la funcionalidad de los componentes a utilizar, imprimir las piezas en una impresora 3D «Ultimaker», ensamblar las partes y realizar las conexiones que llevarían la señal desde los electrodos hasta la placa.

### 8.1. Precio y funcionalidad de componentes a utilizar

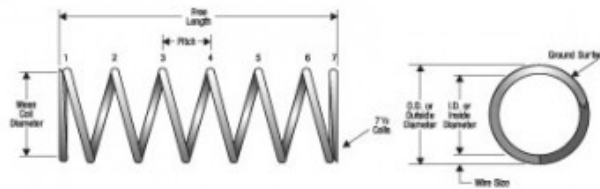
Para el casco de electroencefalograma se utilizó el diseño de código abierto de «OpenBCI», por lo que se imprimieron las piezas que eran necesarias en una impresora Ultimaker y se compraron los componentes que eran necesarios. Se consideró que no era necesario crear un nuevo diseño de casco de electroencefalograma ya que de esta manera el proyecto estaría más enfocado en el diseño del sistema de Neurofeedback, el cual es relativamente nuevo en el país y requiere de una mayor investigación científica, y no en el diseño de un EEG, el cual ya es común y no tan difícil de encontrar.

El diseño del casco se puede encontrar en el documento «Ultracortex Mark III “Nova” and “Supernova” (Revised)» [33], en el cual recomiendan cuales deben ser los componentes utilizados. A continuación se muestra una tabla con los componentes que se compraron en Estados Unidos y una tabla con los componentes que se compraron en Guatemala. Ya que los tamaños y valores que se requieren en el diseño son muy específicos, para asegurar el funcionamiento del casco todos los componentes mandados a pedir son exactamente los

	Tienda	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
Resorte U-4	Century Spring Corp	10	1.942	19.42
Resorte S-845		5	3.047	15.235
Electrodos con cable	OpenBCI Shop	1 (paquete de 10)	29.99	29.99
Clip electrodo de oreja	Florida Research Instruments Web Shop	1	19.95	19.95
Electrodo para pelo		1 (paquete de 10)	7.00	7.00
Electrodo para piel		3	1.00	3.00

Cuadro 7: Componentes que se mandaron a pedir a Estados Unidos.

Figura 11: Resorte S-845 para electrodos [34].



recomendados en el documento.

## 8.2. Impresión de las piezas

El modelo elegido de OpenBCI fue el Mark III Nova ya que éste puede ser construido solamente con partes impresas y no es necesario hacer uso de otros procesos como inyección por molde como con otros modelos. Para esto, se utilizaron las impresoras Ultimaker disponibles en el Makerlab de la Universidad del Valle. El casco se dividió en cuatro partes para que su tamaño estuviera dentro del espacio de trabajo de las impresoras y cada parte,

	Tienda	Cantidad	Precio unitario (Q)	Precio total (Q)
Tornillos grandes	La Casa del Tornillo	10	5.50	55.00
Tuercas	La Casa del Tornillo	20	1.50	30.00

Cuadro 8: Componentes comprados en Guatemala.

Figura 12: Electrodo con cable de OpenBCI [35].

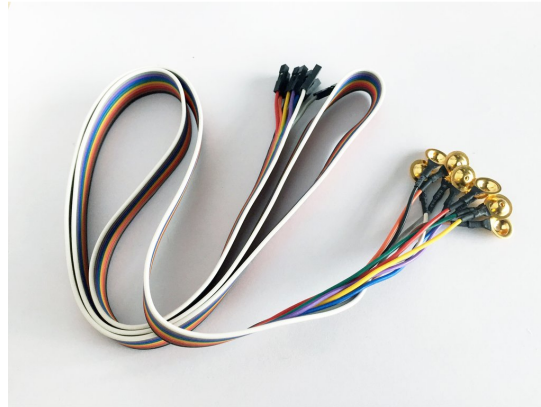


Figura 13: Clip de oreja [36].



Figura 14: Electrodo para pelo [37].



Figura 15: Electrodo para piel [38].



Figura 16: Dimensiones del tornillo [39].

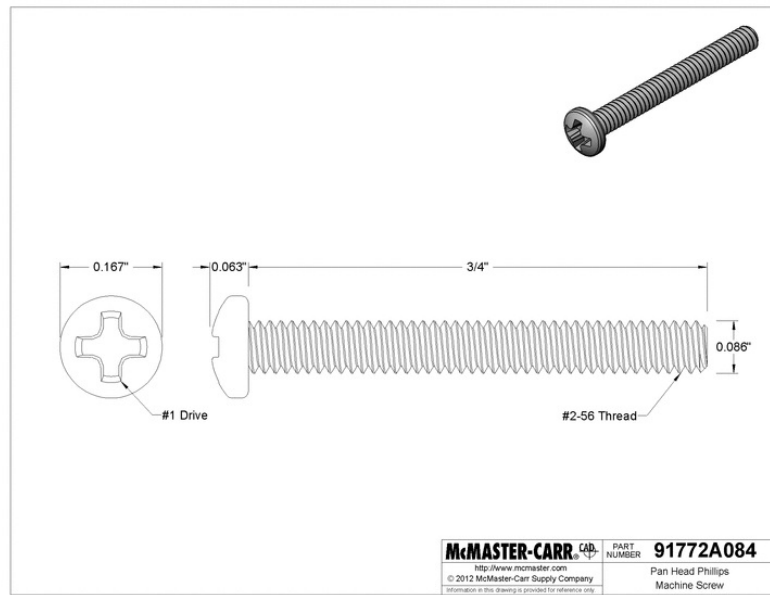


Figura 17: Dimensiones de la tuerca [40].

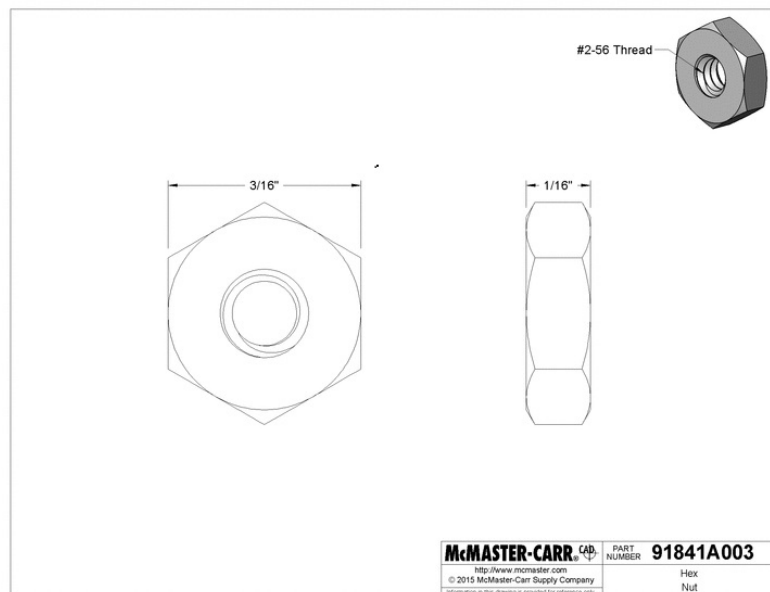


Figura 18: Partes frontal y trasera del modelo en 3D del casco Mark III. [33]

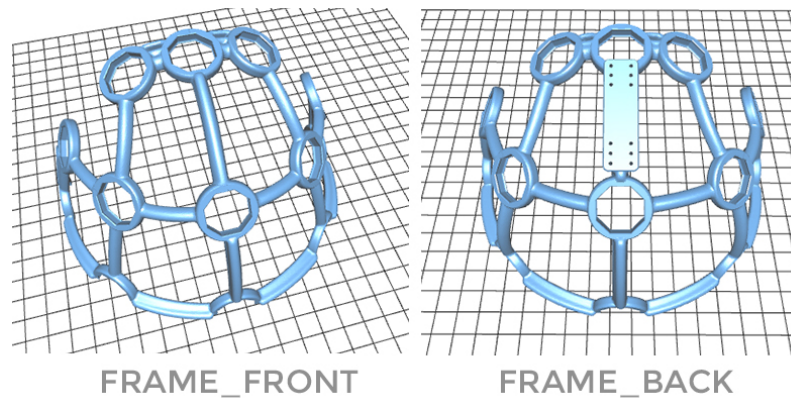
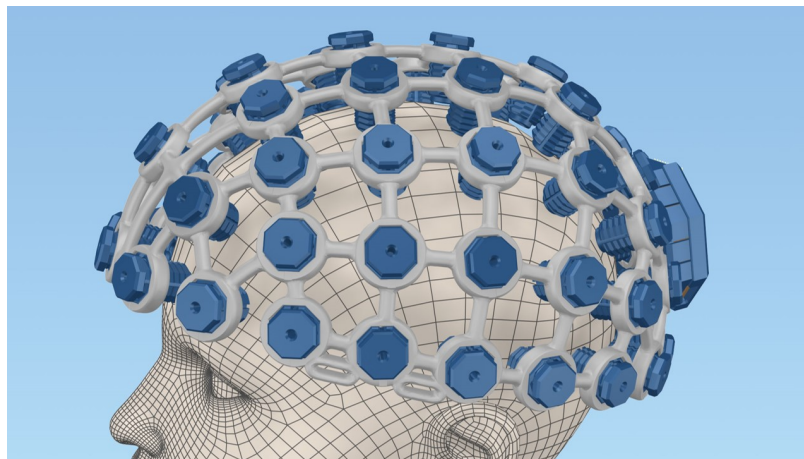


Figura 19: Modelo en 3D del casco Mark III. [33]



frontal derecho e izquierdo y posterior derecho e izquierdo, se fabricó por separado. Las cuatro partes se unieron utilizando goma blanca.

Para los nodos con electrodos, se imprimieron 13 sets de partes mecánicas. Las partes que incluye el set de cada nodo se pueden ver en la figura 27. Esto para poder utilizar 8 de los nodos con electrodos para los 8 canales de las placas y tener 5 nodos sin electrodos que se pudieran utilizar para aliviar la presión sobre la cabeza. El material utilizado para las piezas es ácido poliláctico (PLA), un termoplástico biodegradable. Como material de soporte se utilizó acetato de polivinilo (PVA), un polímero que se usa como adhesivo y que es soluble en agua con el objetivo de poder mantener la geometría elevada del casco durante la impresión.

### 8.3. Ensamble y conexiones

El resultado final del casco para electroencefalograma se puede observar en la Figura 28. Las partes impresas en 3D se pegaron utilizando pegamento blanco y los 13 nodos se enroscaron en sus posiciones. El casco se logró utilizar de forma exitosa en el resto del sistema

Figura 20: Impresión de las partes del casco en la impresora Ultimaker de la UVG.

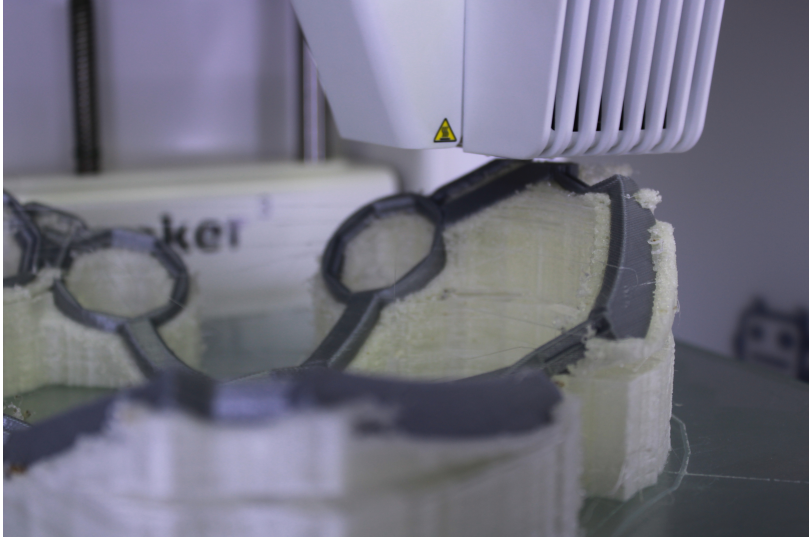


Figura 21: Impresión de las partes del casco en la impresora Ultimaker de la UVG.

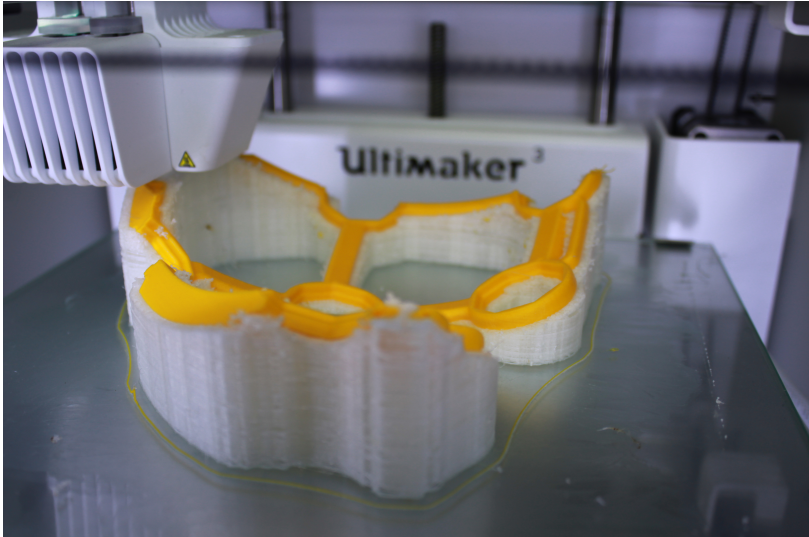


Figura 22: Parte del casco impresa en la impresora Ultimaker de la UVG cuando todavía tiene adherido el material de soporte.

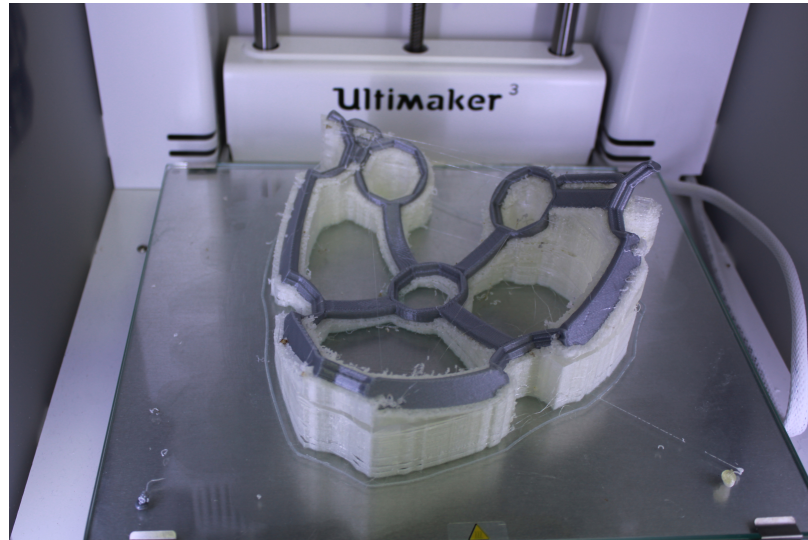


Figura 23: Parte del casco impresa en la impresora Ultimaker de la UVG cuando todavía tiene adherido el material de soporte.



Figura 24: Partes de cada uno de los nodos de electrodos: electrodo, parte impresa, tornillo y tuercas.



Figura 25: Nodos de electrodos con sus partes ya ensambladas.



Figura 26: Nodo de electrodo con sus partes ensambladas y el cable para electrodos prensado bajo la tuerca.

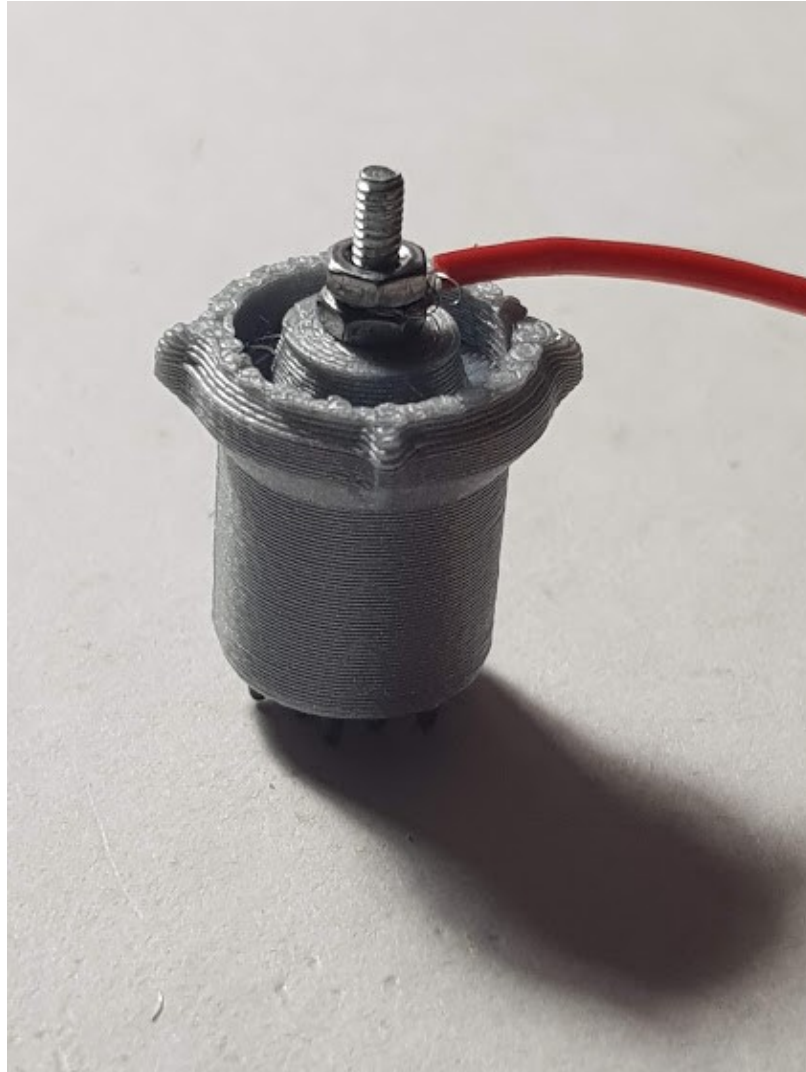


Figura 27: Nodo para electrodos, resorte y tornillo impreso antes de ser ensamblado en el casco.

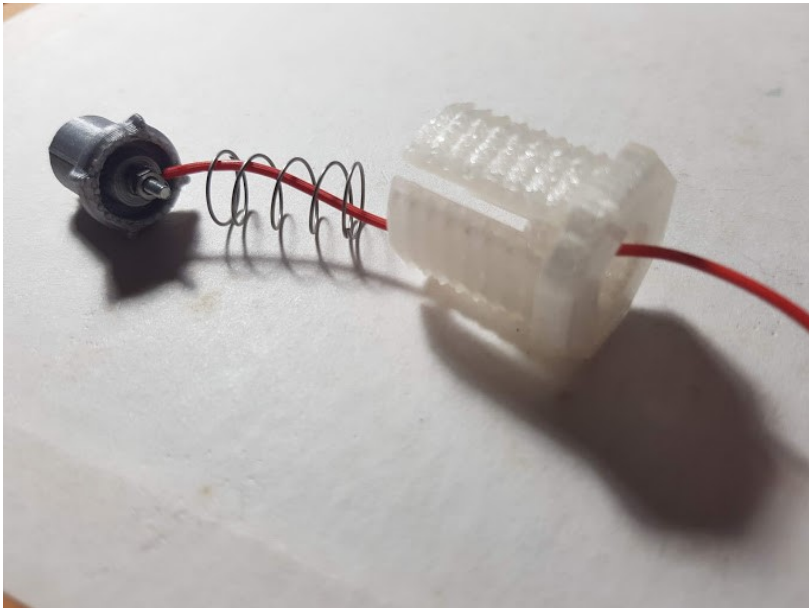
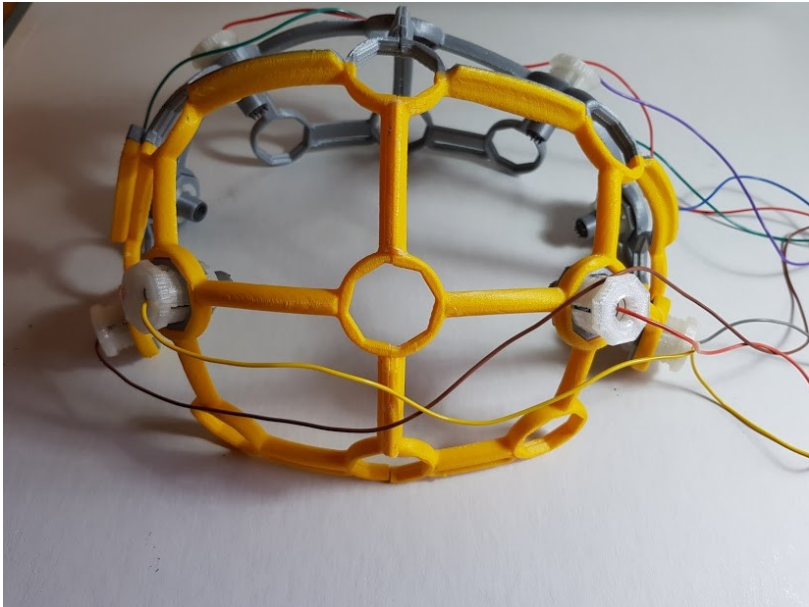


Figura 28: Casco terminado con las cuatro partes de la estructura pegadas y todos los nodos para electrodos ensamblados en sus espacios.



de Neurofeedback al conectar los electrodos a la placa y observar las señales muestreadas en la computadora.



---

## Módulo de retroalimentación

---

El Módulo de retroalimentación consiste en el software que analiza las señales y da un estímulo al usuario cuando éstas están dentro de los límites establecidos para realizar un condicionamiento que lo ayude a mantener las ondas que se quieren reforzar. Para esto, se necesita realizar un procesamiento de la señal obtenida en la que se pueda obtener la amplitud de la onda para cada banda de frecuencias que contiene la señal. Además se requiere una plataforma que realice el estímulo de retroalimentación en el momento indicado. Para esto se consideraron diferentes lenguajes de programación y plataformas de interfase con electroencefalograma.

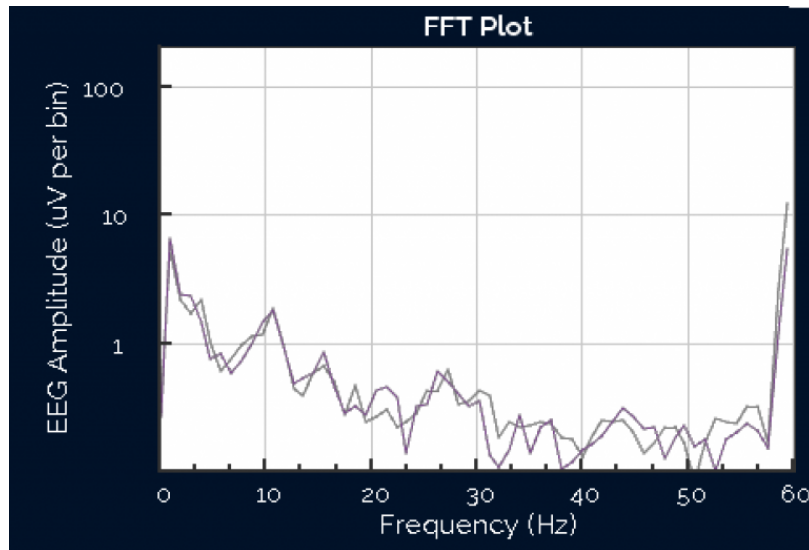
### 9.1. Herramientas de software consideradas

#### 9.1.1. Aplicación de OpenBCI

OpenBCI tiene disponible un programa de computadora para conectarse con la placa Cyton que envía la señal de los electrodos a través de bluetooth. El programa cuenta con una interfaz gráfica que muestra las ondas en cada uno de los ocho canales, la Transformada Rápida de Fourier en donde se puede observar el espectro de frecuencias de cada onda y algunas otras aplicaciones. Se puede observar un mapa del cerebro con el tipo de onda que se está generando en cada área y también tiene una aplicación llamada «Focus» en la que se muestra al usuario la amplitud de sus ondas en Alpha y la amplitud de sus ondas en Beta, permite delimitar «thresholds» para reforzar Alpha e inhibir Beta e indica cuando las condiciones de los «thresholds» se cumplen.

El funcionamiento del algoritmo de la aplicación de «Focus» está descrito en el artículo «Focus detection algorithm and Focus Visualization Widget» [41]. Para determinar las

Figura 29: Transformada rápida de Fourier de las ondas cerebrales en estado de concentración.



diferencias en el EEG entre un estado de concentración (Figura 29) y uno en el que no se estuviera concentrado (Figura 30), observaron la Transformada de Fourier de las ondas para ambos casos.

En las Transformadas rápidas de Fourier pudieron observar que en un estado de concentración, la amplitud de las ondas Alpha se encuentra más alta y la amplitud de las ondas Beta se encuentra más baja que en un estado de no concentración. De manera experimental, después de probar en 20 diferentes personas, determinaron que los valores de «threshold» adecuados eran un límite de recompensa de 0.7 micro Voltios para la amplitud de las ondas dentro del ancho de banda de Alpha y un límite de inhibición de 0.7 micro Voltios para la amplitud de las ondas dentro del ancho de banda de Beta. En la Figura 33 se puede observar la interfaz de la aplicación en la que se muestra la amplitud de las ondas en Alpha y las ondas en Beta, el «threshold» de ambas en 0.7 micro Voltios y un indicador circular que cambia de color para actuar como el estímulo de retroalimentación que indica que se cumplen ambas condiciones.

### 9.1.2. Plataforma OpenVibe

Una de las plataformas existentes gratuitas más utilizadas para las interfaces cerebro-computador es OpenVibe. Esta tiene la función de poder crear diferentes programas para ser controlados con varios dispositivos de obtención de señales cerebrales, como el casco Mark III y la placa Cyton de OpenBCI utilizados. Cuenta con herramientas para el procesamiento de las señales y herramientas de diseño para la interfaz con el programa. Se probaron algunas de las aplicaciones de ejemplo que tiene la plataforma, como la que se puede observar en la Figura 34 donde una nave espacial reacciona a las ondas Beta generadas por el jugador. El software cuenta con un programa llamado «OpenVibe Acquisition Server» donde se conecta con el dispositivo utilizado para obtener las señales y con un programa llamado «OpenVibe Designer» para crear las interfaces que reaccionan a las ondas.

Figura 30: Transformada rápida de Fourier de las ondas cerebrales en estado de no concentración

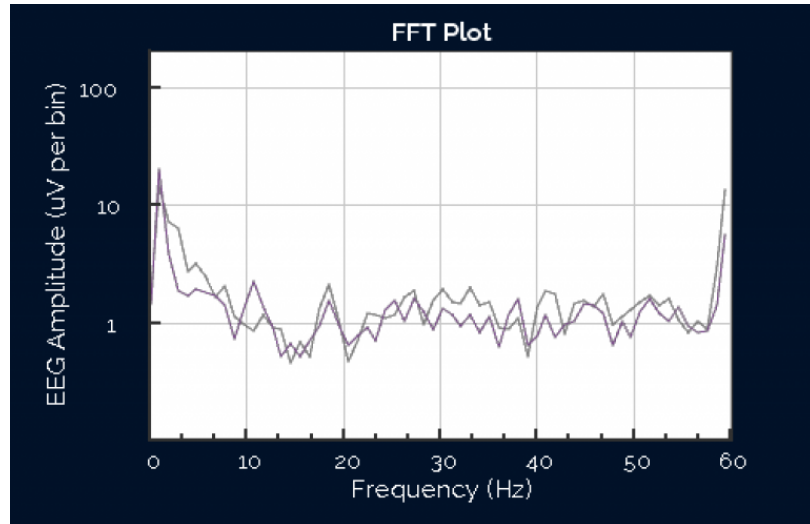


Figura 31: Transformada rápida de Fourier de las ondas cerebrales en estado de concentración con los anchos de banda Alpha y Beta resaltados.

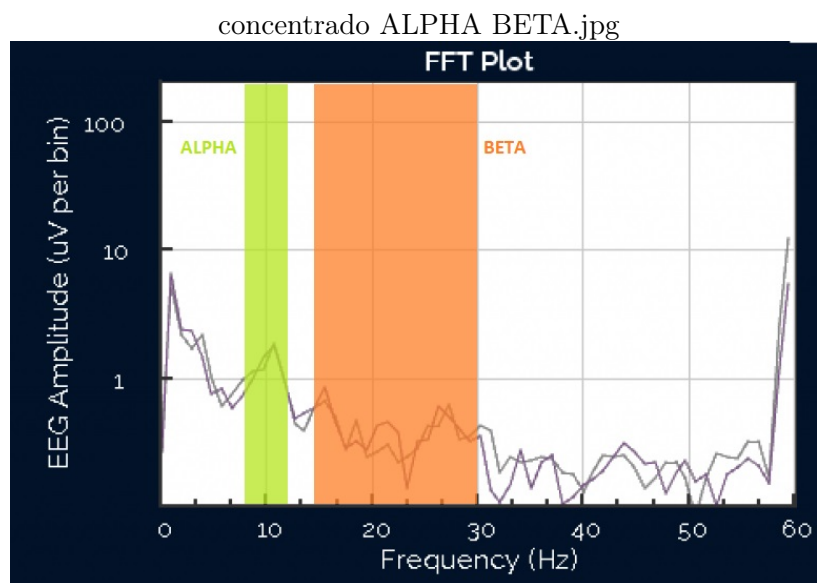


Figura 32: Transformada rápida de Fourier de las ondas cerebrales en estado de no concentración con los anchos de banda Alpha y Beta resaltados.

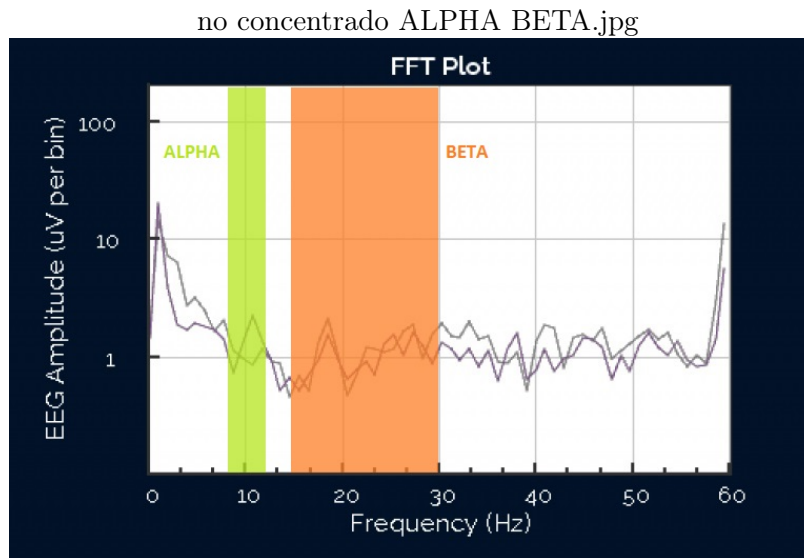


Figura 33: Interfaz gráfica de la aplicación «Focus» de OpenBCI.

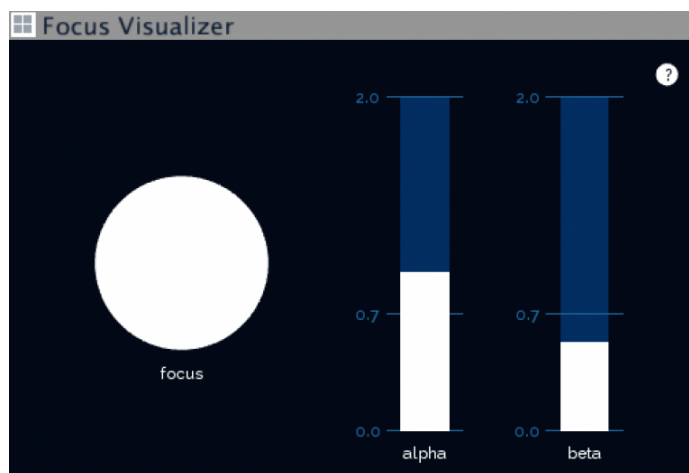


Figura 34: Programa de ejemplo de OpenVibe que reacciona a las ondas Beta elevando la nave espacial.



### 9.1.3. Programa en Python

Python es un lenguaje de programación de alto nivel. Utilizando una librería para poder conectar OpenBCI con Python, se logró crear un programa que obtuviera los datos enviados por la placa. La librería se puede encontrar en el repositorio [https://github.com/OpenBCI/OpenBCI\\_Python](https://github.com/OpenBCI/OpenBCI_Python). Para poder utilizarla, fue necesario instalar Python 2.7, Numpy (una librería con funciones matemáticas como la Transformada rápida de Fourier) y Yapsy (una librería para crear «plugins» en Python). Con esta librería, se realizaron gráficas de los datos obtenidos desde la placa para los diferentes canales. Sin embargo, no se encontraron en la librería herramientas para el procesamiento de las señales y solamente se pudo trabajar con datos crudos. Por lo tanto, se consideró que no era la mejor opción para interpretar las señales y realizar una aplicación útil de Neurofeedback que pueda reaccionar a los diferentes tipos de ondas.

### 9.1.4. Interfaz en Visual Studio

Visual Studio es un entorno de desarrollo integrado (IDE) de Microsoft. Es una plataforma para desarrolladores con herramientas para crear programas, interfaces gráficas, páginas web y bases de datos, entre otros. En el repositorio: [https://github.com/mjukiewicz/OpenBCI\\_GUI](https://github.com/mjukiewicz/OpenBCI_GUI) está disponible un programa escrito en el lenguaje de programación C# para obtener las señales del casco y procesarlas utilizando software de filtrado. Por lo tanto, se creó una interfaz sencilla en Visual Studio que interpretara las señales obtenidas y reaccionara cambiando el color a un botón dependiendo de la frecuencia. Se comprobó que ésta reaccionaba de manera exitosa a las ondas Alpha al intentar concentrarse o cerrar los ojos. Por lo tanto, se empezó la creación de un juego en dos dimensiones que reaccionara a las ondas Alpha. Ya que el juego es de solamente una entrada (la señal que se genera cuando las ondas cerebrales cumplen con la condición del «threshold» de la magnitud de ondas Alpha), éste consiste en un personaje que avanza solamente al recibir la señal indicada y se mantiene inmóvil el

resto del tiempo. Las gráficas para crear el juego se obtuvieron de un sitio en internet con imágenes disponibles gratuitas para la creación de video-juegos llamado Kenney.nl.

## 9.2. Software de interpretación de señales

Se optó por realizar un programa que analice las señales provenientes del casco, permita al usuario ingresar las condiciones del protocolo que se quiere aplicar y determine si las ondas cerebrales cumplen con estas condiciones tomando como base el programa existente de OpenBCI descrito en la sección 9.1.1. Este está escrito en Processing, un IDE «open-source» basado en el lenguaje de programación Java. Las instrucciones para instalar la interfaz gráfica de OpenBCI y correrla desde Processing están en el documento en este enlace ([http://docs.openbci.com/OpenBCI%20Software/01-OpenBCI\\_GUI#the-openbci-gui-running-the-openbci-gui-from-the-processing-ide-open-the-openbci-gui-project-in-processing-launch-it](http://docs.openbci.com/OpenBCI%20Software/01-OpenBCI_GUI#the-openbci-gui-running-the-openbci-gui-from-the-processing-ide-open-the-openbci-gui-project-in-processing-launch-it)). El programa se puede descargar desde el repositorio en este enlace ([https://github.com/OpenBCI/-DEPRECATED-OpenBCI\\_Processing](https://github.com/OpenBCI/-DEPRECATED-OpenBCI_Processing)). Es importante colocar las librerías que trae el programa en la dirección de librerías de Processing como indican las instrucciones.

El objetivo de hacer un programa basado en esta interfaz gráfica en Processing era tener un algoritmo que permitiera al usuario elegir las condiciones que se quiere que cumplan las señales y determinar si las ondas cerebrales las cumplen. Se creó un programa para dar la retroalimentación al usuario utilizando herramientas para el desarrollo de videojuegos descrito en la sección 9.3. Ese programa es el encargado de recibir una señal cuando se cumpliera con las condiciones establecidas y dar un estímulo al usuario en ese momento.

Por lo tanto, el software de interpretación de señales debe comunicar a la plataforma de videojuegos y estímulos cada vez que se deba retroalimentar al usuario. La comunicación se logró haciendo que el videojuego reaccionara a una señal de entrada de teclado (presionar la barra espaciadora) y haciendo que el programa encargado de procesar las señales simulara que este evento era generado por un usuario. Por lo tanto, cada vez que las ondas cerebrales se encuentran dentro de los parámetros deseados, el programa de Processing presionaría por software la barra espaciadora.

El programa de procesamiento de señales estaba programado para responder a la entrada de barra espaciadora deteniendo la transmisión de datos. Por este motivo fue necesario eliminar esta funcionalidad del programa. De lo contrario, la transmisión de datos se detenía y se dejaban de leer las ondas cada vez que el usuario cumplía con las condiciones establecidas. Esta parte del código se encontró en el archivo del programa Interactivity.pde, en el que se revisa si alguna tecla ha sido presionada y si esta fue la barra espaciadora, se activa la función «stopButtonWasPressed()» lo cual se eliminó del código.

Primero se creó un programa similar al programa «Focus», descrito en la sección 9.1.1, pero que en lugar de enfocarse solamente en reforzar las ondas Alpha e inhibir las ondas Beta, se añadió que fuera parametrizable para reforzar o inhibir las ondas Delta, Theta, Alpha o Beta.

Después de una entrevista que se tuvo con la Lcda. Natalie Gutowski, psicóloga dedicada

Figura 35: Primer programa funcional basado en la interfaz gráfica de OpenBCI.



al Neurofeedback, para consultar acerca de la funcionalidad del sistema, se determinó que era necesario añadir más anchos de banda de frecuencia además de Delta, Theta, Alpha y Beta. Esto ya que muchos protocolos requieren reforzar o inhibir diferentes rangos que se encuentran dentro del ancho de banda de Beta o el ancho de banda Gamma que se había omitido por no ser muy común en la literatura. Además, la Lcda. Gutowski señaló que es necesario poder seleccionar los canales en los que se está realizando el Neurofeedback, ya que los protocolos se deben aplicar a una parte específica del cerebro. Indicó que la forma más importante de retroalimentación por estímulos es la auditiva, por lo que es muy importante que la plataforma de videojuegos y estímulos incluya sonidos. Principalmente, la psicóloga sugirió que se dejara el software lo más abierto posible, con la mayor cantidad de opciones para el usuario, de manera que pudiera ser un terapeuta entrenado en Neurofeedback quién decidiera los límites de los anchos de banda, los valores de «threshold», el tipo de estímulo, etc.

### 9.3. Plataforma de videojuegos y estímulos

Unity es una plataforma para la creación de videojuegos en 2 y 3 dimensiones en el lenguaje de programación C#. Se optó por crear la plataforma de juegos y estímulos en Unity debido a que es una de las plataformas más utilizadas para la creación de videojuegos, al conocimiento y experiencia previa que se tiene en el lenguaje de programación C# y a la facilidad para exportar el programa a otras plataformas en caso de que se quisiera realizar una aplicación móvil.

El programa se realizó con la estructura de un menú principal, donde el usuario podría elegir qué tipo de estímulo va a utilizar. En la primera fila se pueden añadir diferentes videojuegos que reaccionen a la barra espaciadora del teclado, presionada por software por el programa de interpretación de señales. En la segunda fila se permite seleccionar archivos multimedia para utilizar como estímulos tanto auditivos como visuales.

Figura 36: Programa basado en la interfaz gráfica de OpenBCI en el que se pueden elegir dos ondas para inhibir y dos ondas para reforzar y los canales activos que se tomarán en cuenta. Situación en la que el usuario no está concentrado. No se cumple con las condiciones del umbral de recompensa en Theta y Alpha y solamente se cumple con la condición del umbral de inhibición en High Beta.



Figura 37: Programa basado en la interfaz gráfica de OpenBCI. Situación en la que el usuario está concentrado, por lo que las ondas cumplen con todas las condiciones (se supera el umbral de recompensa en Theta y Alpha y no el umbral de inhibición en High Beta) y el programa simula que el usuario está presionando la barra espaciadora.

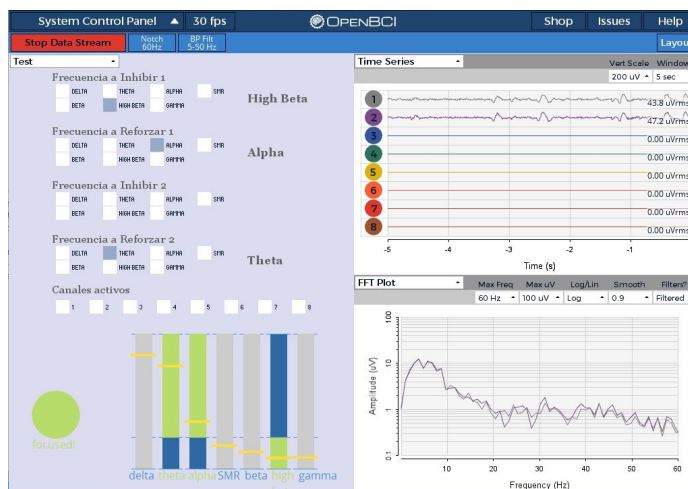
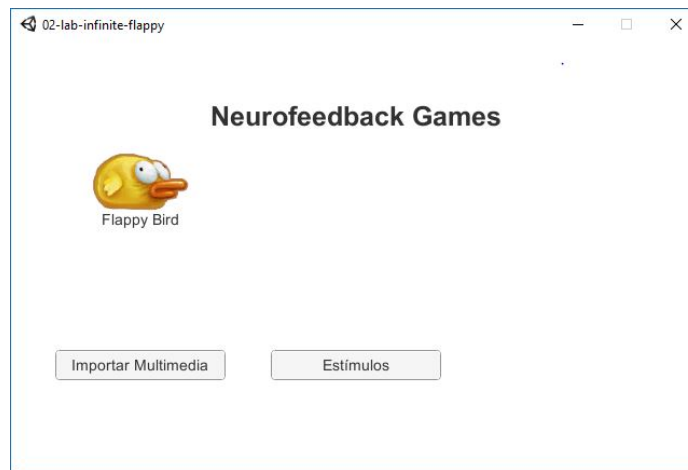


Figura 38: Menú principal de la plataforma de juegos y estímulos.



El juego que se diseñó está basado en el juego popular de celular «Flappy Birds» adaptándolo para poder ser utilizado en Neurofeedback. El juego original consiste en un pájaro que siempre va avanzando y debe volar a diferente altura para esquivar obstáculos. El usuario debe presionar una tecla en los momentos adecuados para hacer que el personaje aumente su altura y se mantenga volando en la altura adecuada. El personaje flota cuando se presiona la tecla y se cae debido a la gravedad en caso contrario. La idea es esquivar columnas de obstáculos que aparecen arriba y abajo.

Ya que en el Neurofeedback el objetivo es que el usuario mantenga la mayor cantidad de tiempo las ondas cerebrales dentro de los parámetros deseados, se cambió el juego para que el objetivo del personaje fuera volar en la parte más alta de la pantalla la mayor cantidad de tiempo posible. De esta manera, cuando se presiona la tecla el personaje se acerca a la parte superior. Se agregaron monedas como incentivos para llevar una contabilidad del tiempo en la parte superior y que el usuario tenga un objetivo en el juego.

La otra parte del software reacciona a las ondas con estímulos auditivos y visuales pero sin un juego. Para los estímulos visuales, se muestra una imagen cuando las ondas se mantienen en los parámetros deseados y se mantiene la pantalla negra en caso contrario. Para los estímulos auditivos, se realiza un sonido solamente mientras las ondas se mantengan dentro de los parámetros deseados.

Finalmente se obtuvo un software de interpretación de señales como el que se puede observar en la Figura 36 y en la Figura 37 en el que se pueden seleccionar dos anchos de banda de frecuencia a reforzar y dos anchos de banda de frecuencia a inhibir al mismo tiempo, se pueden seleccionar los canales activos a utilizar, se muestra en la pantalla la amplitud en tiempo real para cada ancho de banda en diferente color dependiendo si se cumple o no con la condición del umbral para esa onda y se genera una señal de salida cada vez que el usuario cumple con todas las condiciones establecidas.

También se obtuvo la plataforma de videojuegos y estímulos que se muestra en las figuras 38, 39, 40, 41 y 42. Este consta de un videojuego y una plataforma de estímulos auditivos y visuales que responden a la señal generada por el software de interpretación de señales para dar una retroalimentación al usuario cada vez que se deba reforzar o inhibir un ancho

Figura 39: Videojuego basado en «Flappy Birds» cuando el usuario no está cumpliendo con las ondas cerebrales dentro de los parámetros establecidos.

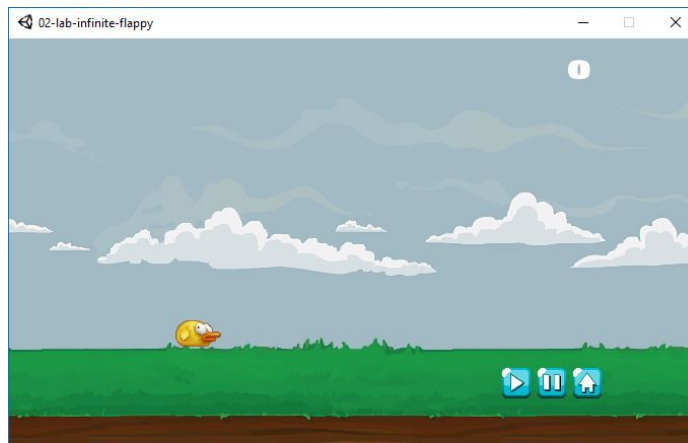


Figura 40: Videojuego cuando el usuario está cumpliendo con las ondas cerebrales dentro de los parámetros establecidos y el contador indica que ha conseguido seis monedas.

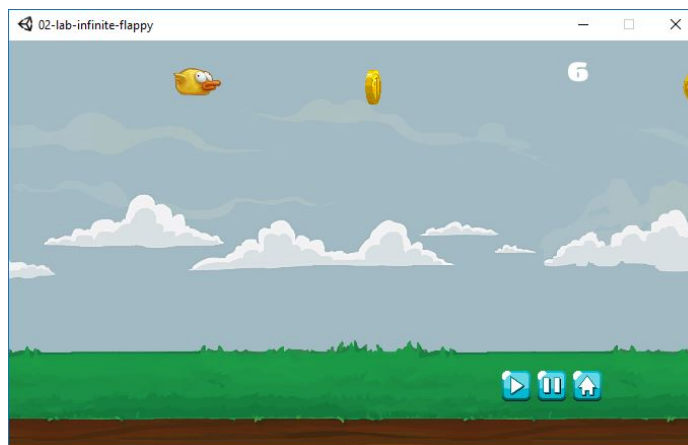


Figura 41: Software de estímulos visuales cuando el usuario no está cumpliendo con las ondas cerebrales dentro de los parámetros establecidos.

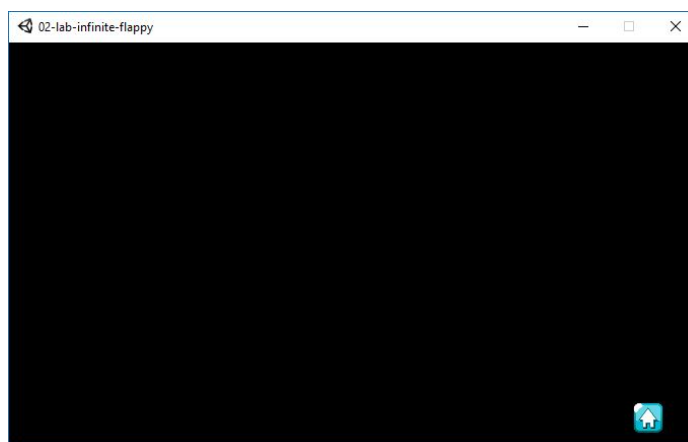
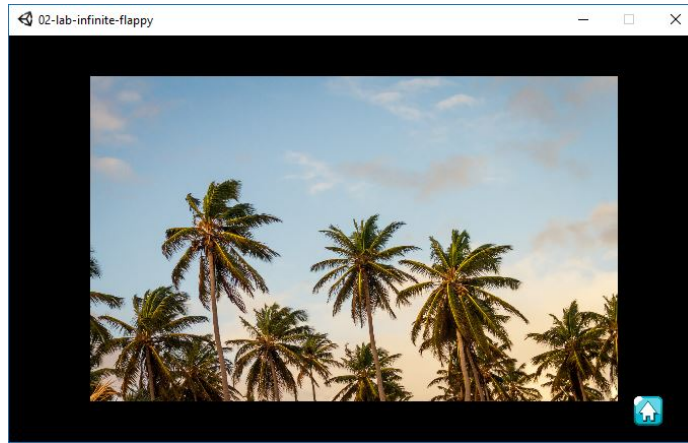


Figura 42: Software de estímulos visuales cuando el usuario tiene las ondas cerebrales dentro de los parámetros establecidos.



de banda de frecuencia para condicionar al usuario a replicar cierto patrón deseado en las ondas cerebrales.



---

### Conclusiones

---

El Neurofeedback es una herramienta para psicólogos especializados en el tema que cuentan con certificaciones para realizarlo y por lo tanto están capacitados para ello. Ya que el entrenamiento de las ondas cerebrales es un tema tan complicado y con consecuencias directas en la salud de una persona, cualquier solución que se genere al respecto debe estar muy bien fundamentada en estudios científicos. Por lo tanto, para el diseño propuesto para un sistema de Neurofeedback la principal área de trabajo fue la investigación. Lo más importante durante el proceso de diseño de Neurofeedback fue la revisión de la bibliografía, las consultas con psicólogos especializados en Neurofeedback, psicólogos de la Universidad del Valle y psicólogos de la CDAG; de manera que la solución planteada realmente resolviera un problema en el campo de la salud, los deportes y la investigación en el campo de la psicología.

Se realizaron consultas con psicólogos de la Confederación Deportiva Autónoma de Guatemala, de la Universidad del Valle de Guatemala y psicólogos de clínicas privadas de Neurofeedback. Lo más importante es que el producto sea utilizable para ellos y que cuente con las herramientas necesarias para mejorar la calidad de vida de las personas a las que entrenen. Se consideró que para que esto fuera posible, la mejor opción sería hacer el sistema lo más parametrizable posible, permitiendo al usuario elegir los anchos de banda, los límites, los tipos de estímulo, los umbrales de refuerzo e inhibición, entre otros, para que quede a discreción de personas capacitadas el protocolo a utilizar. El valor del software está en darle al usuario la mayor cantidad de opciones posibles, de manera que sea él el que decida el uso que le dará al producto y no se limite a lo que el programador define.

La comunidad de código abierto OpenBCI provee herramientas muy importantes para la creación de interfaces humano-computadora. Fueron de extrema utilidad sus diseños de casco para EEG, sus herramientas de software y toda la información que tienen al respecto para que el sistema fuera funcional y accesible. De no existir esta colaboración, la mayor parte del proyecto habría consistido en el diseño de un sistema de electroencefalograma y no se hubiera podido profundizar en algo más complejo como el Neurofeedback. La cultura de código abierto es muy importante para el desarrollo, al tener una comunidad en la que

personas de diferentes partes del mundo contribuyen en un proyecto, se aprovechan las diferentes disciplinas y culturas para generar soluciones que no serían posibles de forma individual.

Es muy importante consultar toda la teoría psicológica y neurológica que está detrás del sistema de Neurofeedback. Ya que el producto se usará en un condicionamiento que puede alterar el funcionamiento del cerebro, y por lo tanto el comportamiento de seres humanos, no es recomendable trabajar en un proyecto similar sin tener los fundamentos científicos y la asesoría de una persona capacitada en el tema.

Las herramientas de código abierto que se pueden obtener en la comunidad OpenBCI son muy útiles y han sido desarrolladas por personas que se han capacitado en las interfaces cerebro-computador.

Este proyecto se basó en un entrenamiento que tiene condiciones de umbrales introducidas por el usuario. Sin embargo, existen sistemas de Neurofeedback que basan sus condiciones en bases de datos para intentar llevar las ondas cerebrales a un patrón que es el normal en la población. Se podría introducir esta funcionalidad al sistema.

Mientras más opciones de retroalimentación tenga el usuario, más útil será el sistema para entrenar a diferentes personas. Por lo tanto, siempre es recomendable añadir juegos, estímulos visuales (fotos o vídeos) y estímulos auditivos a la plataforma para que el entrenamiento no sea tedioso o repetitivo.

La comunicación entre los dos programas, simulando que el usuario presionó la barra espaciadora en el teclado, es funcional aunque tiene el riesgo de que se arruine el entrenamiento al presionar físicamente la tecla. Esto mejoraría al encontrar otra manera de conectar los programas que no pueda ser accesada por el usuario.

En Neurofeedback es muy importante la velocidad del software, ya que si el sistema tarda demasiado en retroalimentar al usuario con el estímulo, las ondas cerebrales pueden haber cambiado por lo que se podría reforzar una onda que no es la deseada. Por lo tanto, se debe aumentar la eficiencia y la rapidez del procesamiento de las señales.



- 
- [1] A. Mirifar, J. Beckmann y F. Ehrlenspiel, «Neurofeedback as supplementary training for optimizing athletes' performance: A systematic review with implications for future research», *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, n.º 75, págs. 419-432, 2017. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2017.02.005.
- [2] J. Robbins, *A Symphony in the Brain: the Evolution of the New Brain Wave Biofeedback*. 2008.
- [3] J. Demos, *Getting Started with Neurofeedback*. 2005.
- [4] G. Martinez y et. al., «Métodos no convencionales de interfaz en el control de robots a través de la electroencefalografía y la electrooculografía», Trabajo de graduación, Universidad del Valle de Guatemala, 2009.
- [5] M. Agarwal, «Think: Toward Practical General-Purpose Brain-Computer Communication.», Dissertation for the Degree Master of Science in the School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, United States., 2017.
- [6] M. Thompson y L. Thompson, *The Neurofeedback Book: An Introduction to Basic Concepts in Applied Psychophysiology*. 2003.
- [7] T. B. L. Mason, «Neurotherapy in the treatment of dissociation», *San Diego: Academic Press*, págs. 145-156, 1999.
- [8] M. Stermán, «EEG biofeedback in the treatment of epilepsy: An overview», *L. White and B. Tursky (Eds.), Clinical Biofeedback: Efficacy and Mechanisms. New York: Academic Press.*, págs. 311-330, 1982.
- [9] J. Lubar, «Discourse on the development of EEG diagnostics and biofeedback for Attention-Deficit/Hyperactivity Disorders», *Biofeedback and Self-Regulation*, vol. 3, n.º 16, págs. 201-225, 1991.
- [10] J. H. J. Kamiya, «Anxiety change through electroencephalographic alpha feedback seen only in high anxiety subjects.», *Science*, n.º 201, págs. 79-81, 1978.
- [11] D. Noton, «PMS, EEG, and photic stimulation», *Journal of Neurotherapy*, vol. 2, n.º 2, págs. 8-13, 1997.

- [12] J. Rosenfeld, «An EEG biofeedback protocol for affective disorders», *Clinical Electroencephalography*, vol. 1, n.º 31, págs. 7-12, 2000.
- [13] J. T. J.E. Bennett, «Hemispheric laterality and cognitive style associated with transcendental meditation», *Psychophysiology*, vol. 14, n.º 3, págs. 293-296, 1977.
- [14] E. Bird, «Psychological processes during rifle shooting», *International Journal of Sport Psychology*, vol. 18, pág. 918, 1987.
- [15] B. Hatfield, D. Landers y W. Ray, «Cognitive processes during self-paced motor performance: An electroencephalographic profile of skilled marksmen.», *Journal of Sports Psychology*, n.º 6, págs. 42-59, 1984.
- [16] D. Landers, S. Petruzello, W. Salazar, D. Crews, K. Kubitz, T. Gannon y M. Han, «The influence of electrocortical biofeedback on performance in pre-elite archers», *Medicine and Science in Sports and Exercise*, vol. 1, n.º 23, págs. 123-128, 1991.
- [17] C. Martindale y D. Hines, «Creativity and cortical activation during intellectual and EEG feedback tasks», *Biological Psychology*, n.º 5, págs. 91-100, 1975.
- [18] M. Sterman y C. Mann, «Concepts and applications of EEG analysis in aviation performance evaluation», *Biofeedback Psychology*, n.º 40, págs. 115-130, 1995.
- [19] H. Rasey, J. Lubar, A. McIntyre, A. Zuffuto y P. Abbot, «EEG Biofeedback for the enhancement of attentional processing in normal college students», *Journal of Neurotherapy*, vol. 3, n.º 1, págs. 15-21, 1996.
- [20] A. Goldstein. (2016). The History of Neurofeedback: Part II, dirección: <https://www.linkedin.com/pulse/history-neurofeedback-part-ii-ari-goldstein-ph-d> (visitado 04-07-2018).
- [21] M. Sterman, «Basic concepts and clinical findings in the treatment of seizure disorders with EEG operant conditioning», *Clinical EEG (electroencephalography)*, n.º 31, págs. 45-55, 2000.
- [22] M. Grasso. (2015). The Material Culture of 1970s Paranormal Researchers: Into the Unknown, Reader's Digest, Part 2, dirección: <http://www.renfusa.com/2015/12/> (visitado 04-06-2018).
- [23] E. Green, «Alpha-Theta Brainwave Training: Instrumental Vipassana?», *Subtle Energies & Energy Medicine*, n.º 10, pág. 221, 1993.
- [24] R. Sepúlveda y et. al. (2015). Classification of Encephalographic Signals using Artificial Neural Networks, dirección: [https://www.researchgate.net/figure/Posicion-de-los-electrodos-acorde-al-Sistema-Internacional-10-20-Figura-vista-desde-a%5C\\_fig1%5C\\_274457110](https://www.researchgate.net/figure/Posicion-de-los-electrodos-acorde-al-Sistema-Internacional-10-20-Figura-vista-desde-a%5C_fig1%5C_274457110) (visitado 04-07-2018).
- [25] A. V. Oppenheim, S. Willsky y S. H. Nawab, *Signals and Systems*. 1997. dirección: [https://www.academia.edu/36617940/signals-and-systems-Alan\\_V.\\_oppenhiem\\_S.\\_willsky\\_and\\_S.\\_Hamid\\_Nawab\\_2nd\\_Edition.pdf](https://www.academia.edu/36617940/signals-and-systems-Alan_V._oppenhiem_S._willsky_and_S._Hamid_Nawab_2nd_Edition.pdf).
- [26] Texas Instruments, *Low-Noise, 8-Channel, 24-Bit Analog Front-End for Biopotential Measurements" ADS1299 datasheet*, 2012. dirección: <https://datasheet.octopart.com/ADS1299IPAG-Texas-Instruments-datasheet-17020782.pdf> (visitado 07-04-2018).
- [27] J. Smith. (2007). Introduction to Digital Filters with Audio Applications. Online book, 2007 edition., dirección: [http://www.vias.org/feee/filters%5C\\_02.html](http://www.vias.org/feee/filters%5C_02.html) (visitado 28-09-2018).

- [28] Renesas. (1999). An Introduction to Digital Filters, dirección: <https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/an96/an9603.pdf> (visitado 28-09-2018).
- [29] Audio, NTi. (n.d.). How an FFT works, dirección: <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transform-fft> (visitado 04-07-2018).
- [30] J. W. Cooley, *The Re-Discovery of the Fast Fourier Transform Algorithm (PDF)*, 1987, págs. 33-45. dirección: <https://carma.newcastle.edu.au/jon/Preprints/Talks/CARMA-CE/FFT.pdf> (visitado 04-07-2018).
- [31] L. A. Mason y T. S. Brownback, «Optimal Functioning Training with EEG Biofeedback for Clinical Populations: A Case Study», *Journal of Neurotherapy: Investigations in Neuromodulation, Neurofeedback and Applied Neuroscience.*, 2001.
- [32] N. H. Rijken, R. Soer, E. de Maar, H. Prins, W. B. Teeuw, J. Peuscher y F. G. J. Oosterveld, «Increasing Performance of Professional Soccer Players and Elite Track and Field Athletes with Peak Performance Training and Biofeedback: A Pilot Study», *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, vol. 41, n.º 4, págs. 421-430, dic. de 2016. dirección: <https://doi.org/10.1007/s10484-016-9344-y>.
- [33] OpenBCI. (2016). Ultracortex Mark III “Nova” & “Supernova” (Revised), dirección: <http://docs.openbci.com/Headware/02-Ultracortex-Mark-III-Nova-Revised#ultracortex-mark-iii-nova-supernova-revised-supernova-add-ons-parts> (visitado 04-02-2018).
- [34] Century Spring. (2011). Compression Springs S-845, dirección: <http://www.centuryspring.com/compression-spring-s-845.html> (visitado 12-04-2018).
- [35] OpenBCI. (2018). Gold Cup Electrodes, dirección: <https://shop.openbci.com/collections/frontpage/products/openbci-gold-cup-electrodes?variant=9056028163> (visitado 12-04-2018).
- [36] Florida-Research-Instruments. (2018). TDE-430 Silver-Silver Chloride Ear Clip Electrode, dirección: [https://fri-fl-shop.com/product/td-430-silver-disc-electrode-ear-clip/?attribute%5C\\_lead-length=60%5C%22+Lead](https://fri-fl-shop.com/product/td-430-silver-disc-electrode-ear-clip/?attribute%5C_lead-length=60%5C%22+Lead) (visitado 12-04-2018).
- [37] Florida-Research-Instruments. (2018). Disposable / Reusable Dry EEG Electrode [TDE-200], dirección: <https://fri-fl-shop.com/product/tde-200/> (visitado 12-04-2018).
- [38] Florida-Research-Instruments. (2018). Disposable / Reusable Wet EEG Electrode [TDE-201], dirección: <https://fri-fl-shop.com/product/tde-201/> (visitado 12-04-2018).
- [39] McMaster-Carr. (2012). Passivated 18-8 Stainless Steel Pan Head Phillips Screw, dirección: <https://www.mcmaster.com/91772a084> (visitado 12-04-2018).
- [40] McMaster-Carr. (2015). 18-8 Stainless Steel Hex Nut, dirección: <https://www.mcmaster.com/91841a003> (visitado 12-04-2018).
- [41] W. Sun. (2016). Focus detection algorithm and Focus Visualization Widget, dirección: <http://openbci.com/community/focus-visualization-widget/> (visitado 12-07-2018).