

**Universidad de Buenos Aires  
Facultades de Ciencias Económicas, Ciencias Exactas  
y Naturales e Ingeniería**



**Maestría en Seguridad Informática**

**Tesis de Maestría**

Tema:  
Neurociencia y Ciberseguridad

Título:  
**DISPOSITIVOS INTERFAZ CEREBRO COMPUTADOR. ¿ES POSIBLE EL  
HACKEO DE LA MENTE?**

**Autor:** Lic. Gladys MARTINEZ

**Directora de Tesis:** Lic. Graciela Pataro  
**Co-Directora de Tesis:** Mg. Patricia Prandini

**Año de Presentación:** 2021  
Cohorte 2013

## **Declaración jurada de origen de los contenidos**

Por medio de la presente, el autor manifiesta conocer y aceptar el Reglamento de Trabajos Finales vigente y se hace responsable que la totalidad de los contenidos del presente documento son originales y de su creación exclusiva, o bien pertenecen a terceros u otras fuentes, que han sido adecuadamente referenciados y cuya inclusión no infringe la legislación Nacional e Internacional de Propiedad Intelectual.

FIRMADO  
Gladys Martinez  
DNI 20.443179

## Resumen

Desde el punto de vista del aprovechamiento de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), tanto los Organismos Públicos como los Privados se encuentran actualmente en pleno funcionamiento e inmersos en una etapa de continuo cambio y evolución debido a la interacción de fuerzas que se producen entre el surgimiento de nuevas tecnologías, su necesidad de actualización [1] y las adecuaciones normativas que se van generando en todo el ámbito de su accionar.

Con el vertiginoso avance de la inteligencia artificial, en una era en la que Estados Unidos y China, se disputan el liderazgo, ya ha comenzado la batalla para decodificar las ondas cerebrales, de la misma manera que se logró decodificar el ADN.

Con el advenimiento de esta tecnología disruptiva, surgen nuevos conceptos, como por ejemplo el Hacking cognitivo, neurohacking o neurocrimen entre otros, que emergen para describir y alertar sobre los aspectos relevantes en ciberseguridad asociados a los dispositivos (BCI: *Brain Computer Interface*) diseñados para leer nuestras ondas cerebrales.

En la era del neurocapitalismo, nuestro cerebro necesita nuevos derechos porque la tecnología para leer lo que pensamos está en continuo avance. El presente trabajo presenta los conceptos y metodologías para concientizar sobre las ciberamenazas cognitivas como así también, los lineamientos básicos para el desarrollo futuro de normativa relativa a la producción de dispositivos de interfaz cerebro computador y su utilización en soluciones tecnológicas.

## Palabras Claves

Interfaz neuronal directa (IND) - Interfaz cerebro-computadora (ICC) - En inglés *Brain Computer Interfaces (BCI)*- Hacking cognitivo – Neuroderechos – Neurociencia – Neuroética – Neuroseguridad – Neurocrimen

## Tabla de contenido

<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Conceptos Generales .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Historia y evolución de los BCI .....</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Marco teórico – conceptual.....</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Neuroética y Neuroderechos asociados al uso de la Tecnología BCI .....</b>	<b>28</b>
<b>3. Interfaz Cerebro Computadora: Investigación y Desarrollo en Argentina .....</b>	<b>37</b>
<b>4. Usos y Aplicaciones .....</b>	<b>40</b>
<b>5. Hacking cognitivo .....</b>	<b>47</b>
<b>6 Estado actual de la Tecnología BCI .....</b>	<b>61</b>
<b>7. Lineamientos básicos para el desarrollo futuro de normativa relativa a la producción de dispositivos de interfaz cerebro computador y su utilización en soluciones neurotecnológicas .....</b>	<b>71</b>
<b>8. Conclusiones .....</b>	<b>74</b>
<b>9. Bibliografía .....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXO I .....</b>	<b>86</b>
<b>1. Recursos web relacionados con la iniciativa internacional BRAIN .....</b>	<b>86</b>
<b>2. Listado de siglas.....</b>	<b>86</b>

## Índice de figuras

Figura 1	Elementos de un sistema de interfaz cerebro-computadora.....	7
Figura 2	Técnicas de captura de señales cerebrales.....	8
Figura 3	Algoritmos de clasificación de señales.....	10
Figura 4	Clasificación BCI.....	12
Figura 5	Matriz de electrodos.....	13
Figura 6	Científicos de la Universidad Case Western Reserve crearon una solución para un paciente tetrapléjico.....	14
Figura 7	paciente tetrapléjico logra comer por sí solo después de ocho años.....	14
Figura 8	Esquema donde se colocarán los electrodos en la superficie expuesta del cerebro (ECoG).....	15
Figura 9	Electrodos colocados en la superficie expuesta del cerebro (ECoG).....	15
Figura 10	Ubicación de los electrodos según el sistema internacional 10-20. A) Vista lateral. B) Vista cenital.....	16
Figura 11	BCI tipo vincha. Puede medir los estados de relajación y concentración.....	17
Figura 12	BCI tipo gorro. Dispositivo para pintar cosas con la mente.....	19
Figura 13	Tipos de sistemas BCIs: activos, reactivos, pasivos e híbridos. Los sistemas activos [24] se controlan a voluntad del usuario, los reactivos dependen de un ciclo emisión-recepción, los pasivos proporcionan información sobre el estado cognitivo del usuario y los híbridos extraen información de diversas fuentes fisiológicas.....	19
Figura 14	Clasificación de los sistemas BCI en términos de fiabilidad, método de registro y modo de funcionamiento.....	20
Figura 15	Diferentes técnicas de imagen cerebral, comparadas por resolución espacial y temporal.....	24
Figura 16	Diferentes capas del cerebro y de dónde se toma la señal.....	24
Figura 17	Escáner MEG con paciente.....	25
Figura 18	Imagen de una instalación típica de PET equipada con un escáner.....	26
Figura 19	Resumen de las características del método de adquisición de señales.....	27
Figura 20	Tipos de señales cerebrales.....	27
Figura 21	Tipos de privacidad.....	29
Figura 22	Tipos de Privacidad.....	30
Figura 23	Aspectos de la privacidad impactados por uso de tecnologías BCI y Biométricas.....	32
Figura 24	Usos y Aplicaciones de un BCI.....	39
Figura 25	Campo de aplicación médica de los BCI.....	39
Figura 26	escenarios típicos de aplicación de los BCI.....	40
Figura 27	Sensores implantados en el cráneo de Erik Sorto.....	41
Figura 28	Erik Sorto moviendo el brazo robótico con su pensamiento.....	42
Figura 29	Sistema BCI para pacientes con ELA.....	43
Figura 30	Diagrama simplificado de un sistema BCI comprometido.....	48
Figura 31	Diagrama simplificado de un BCI con el subsistema BCI Anonymizer.....	49
Figura 32	Imagen de un videojuego controlado por un dispositivo EPOC.....	50
Figura 33	Dispositivo Emotive System EPOC.....	50
Figura 34	Ataques a la Ciberseguridad y Seguridad en cada fase del ciclo BCI.....	55
Figura 35	Definición de ataques detectados en el ciclo de los sistemas BCI.....	56
Figura 36	Evolución de los dispositivos implantables hasta el fitbit actual de Neuralink	59
Figura 37	Vista del dispositivo BCI implantable y electrodos implantados.....	60

Figura 38	El dispositivo se carga inductivamente. El cargador tiene un cable con puerto USB-C.....	60
Figura 39	Lectura de la actividad cerebral de un cerdo con un dispositivo neural implantado.....	61
Figura 40	Lectura de la actividad cerebral de un cerdo con implante fitbit.....	61
Figura 41	Distribución de Empresas BCI alrededor del mundo.....	65
Figura 42	Mapa mundial que muestra las iniciativas sobre el cerebro y los programas relacionados en todo el mundo.....	65

## Índice de Tablas

Tabla 1	Definición de contramedidas detectadas en el ciclo de sistemas BCI.....	57
Tabla 2	Relación de Plataformas SW para el Desarrollo de Sistemas BCI.....	67

## **Agradecimientos**

*A Inocencia, mi madre. La mujer que me ha inspirado con su ejemplo a soñar más, a aprender más, a hacer más y a ser más. A José Luis, mi esposo, compañero y gran amor, a mis hermanos Eli, Flavia y Eusebio y a mis sobrinos Sofía, Santiago y Helena. Quienes han sido mi soporte en esta hermosa travesía académica.*

*A los investigadores referenciados en la Bibliografía, cuyos trabajos han servido de base y motivación para este Trabajo Final de Maestría.*

*A mis profesores de la Maestría de Seguridad Informática de la Universidad de Buenos Aires, muy especialmente a mi Directora Graciela Pataro y a mi Codirectora Patricia Prandini, por inspirarme en mi carrera profesional y acompañarme en este camino hacia la Maestría.*

# 1. Introducción

Durante las últimas décadas ha habido grandes avances en la relación entre los seres humanos y la tecnología. Se han desarrollado herramientas para solucionar problemas físicos alterando de forma radical el panorama social y tecnológico. Los avances en Neurociencia y las nuevas Neurotecnologías sentaron las bases para novedosos tratamientos contra el mal de Parkinson, epilepsia, sordera, entre otros, tecnología útil para los discapacitados o los que sufren de condiciones crónicas, permitiendo a los cuadripléjicos y parapléjicos controlar extremidades artificiales o sillas de ruedas, interactuar directamente con las computadoras o interactuar con toda una serie de dispositivos inalámbricos.

Empresas como Facebook, Neuralink de Elon Musk, Kernel, Emotiv y Neurosky, están trabajando en una tecnología cerebral, denominada BCI, interfaz cerebro ordenador, dicen que con fines éticos. La Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de la Defensa (DARPA) está trabajando en el desarrollo de interfaces implantables que permitan a los individuos controlar los objetos con sus mentes. Sin embargo, como señala Rafael Yuste en su libro *Las nuevas neurotecnologías y su impacto en la ciencia, medicina y sociedad*, *“estas tecnologías, combinadas con la inteligencia artificial, podrían usarse para descifrar y manipular procesos mentales y para aumentar cognitivamente a las personas conectándolas a las interfaces cerebro-computadora, alterando lo que significa ser humano.”* [2]

Por lo tanto, más allá de las ventajas y beneficios que la implementación de estos instrumentos pueda producir, también están expuestos a riesgos que es necesario prevenir. Actualmente la tecnología BCI no solo permite leer la actividad neuronal con ayuda de software de inteligencia artificial, sino también escribir en el cerebro. Tal es así, que junto con esos avances han crecido también los riesgos asociados con el mal uso de estas tecnologías, abriendo la posibilidad al crimen neuronal, extendiendo el rango de los delitos informáticos a los dispositivos neuronales. Por tal motivo, resulta necesario indagar en las vulnerabilidades o posibles ataques que estos dispositivos puedan sufrir y en su securización.

## 2. Conceptos Generales

### 2.1 Historia y evolución de los BCI

La historia de los BCI comienza con el descubrimiento por el científico belga Hans Berger de la actividad eléctrica del cerebro humano. En 1924 registró por primera vez la actividad eléctrica cerebral, ondas oscilatorias como la onda alfa<sup>1</sup> (8-13 Hz) dando inicio a la Electroencefalografía o EEG. Por esta razón las ondas alfa son conocidas también como onda de Berger. [3] El trabajo de Berger se inspiró en el descubrimiento del Dr. Richard Caton, quien en 1875 pudo observar la actividad eléctrica de la superficie cerebral de conejos y monos vivos utilizando un galvanómetro<sup>2</sup>. [4]

En 1968, el Dr. Kamiya, en su estudio "Conscious control of brain waves", demostró que las características de la actividad EEG (ondas alfa) podían ser controladas por una persona tras un cierto entrenamiento. Esta investigación sentó las bases para el neurofeedback<sup>3</sup>, también llamado neuroretroalimentación electroencefalográfica, campo interesado en el entrenamiento cognitivo mediante la neuroretroalimentación en tiempo real.

El primer desarrollo de un dispositivo BCI fue en el año 1973 por el Dr. Jacques Vidal [5], con el objetivo de evaluar la posibilidad de capturar la intención de un individuo implícita en las señales eléctricas de su cerebro para controlar una prótesis. Este desarrollo estaba basado en electroencefalogramas utilizando potenciales evocados visuales.

Otro gran trabajo pionero en esta temática fue en el año 1988, cuando Farwell and Donchin, describieron una interfaz de comunicación enfocada en el paradigma de deletreo de palabras, basada en el potencial P300<sup>4</sup>. Este

---

<sup>1</sup> Las ondas **alfa** se originan sobre todo en el lóbulo occipital (la parte posterior del cerebro) durante periodos de relajación, tranquilidad y bienestar. (<https://www.fundacioncadah.org/web/articulo/neurofeedback-que-es-en-que-consiste-es-eficaz-para-tratar-el-tdah.html>) Consultado el 06-12-2021)

<sup>2</sup> Instrumento que sirve para determinar la intensidad y el sentido de una corriente eléctrica mediante la desviación que esta produce en una aguja magnética. Aparato muy sensible que mide la intensidad de pequeñas corrientes eléctricas. (<https://dle.rae.es/galvan%C3%B3metro?m=form>) consultado el 06-12-2021)

<sup>3</sup> El neurofeedback, también llamado retroalimentación electroencefalografía, es un tratamiento neurocomportamental destinado a la adquisición de autocontrol sobre determinados patrones de actividad cerebral y la aplicación de estas habilidades en las actividades de la vida diaria. (<https://www.fundacioncadah.org/web/articulo/neurofeedback-que-es-en-que-consiste-es-eficaz-para-tratar-el-tdah.html>) Consultado el 06-12-2021)

<sup>4</sup> La actividad eléctrica del cerebro produce señales que pueden contener información acerca de una tarea mental específica, sea consciente (por ejemplo ritmos sensoriomotores) o inconsciente (como por ejemplo modulaciones P300).

método permitía escribir caracteres utilizando un teclado virtual que se mostraba al usuario en una pantalla.

Poco después, con el estudio del Dr. Kamiya como precedente, tanto en EEUU como Europa, investigadores desarrollaron BCIs basados en ritmos sensoriomotores (SMR) del córtex, en las ondas oscilatorias  $\mu^5$  (7-13 Hz), usando neurofeedback, es decir, mostrando a los usuarios su actividad del SMR en tiempo real, para que puedan aprender a modularla. Así pues, en 1991 en Estados Unidos, Jonathan Wolpaw y sus colegas desarrollaron un BCI para el control del cursor 1D basado en el condicionamiento operante. [6] Más tarde, en 1993, en Austria, Gert Pfurtscheller y su equipo estaban desarrollando otro BCI basado en el SMR, en el que los usuarios tenían que imaginar explícitamente el movimiento de la mano izquierda o derecha que se traducía en una orden para la computadora mediante el aprendizaje automático. [7]

Durante el mismo período en Europa, Niels Birbaumer y sus colegas trabajaron en un tercer tipo de paradigma de BCI, basados en el potencial cortical lento (SCP), quienes utilizando el principio de neurofeedback diseñaron un Dispositivo de Traducción del Pensamiento (TTD por sus siglas en inglés "Thought Translation Device"), que le permitió a un usuario seleccionar un grupo de comandos u otro aumentando o disminuyendo la amplitud del SCP. Más tarde, y con este mismo principio, en 1999 el TTD fue utilizado por usuarios con parálisis para deletrear letras, permitiéndole comunicarse sólo con la actividad cerebral. [7]

En el año 1998, el investigador Philip Kennedy implantó el primer BCI en un ser humano. En el año 2001, John Donoghue y su equipo de investigadores de la Universidad de Brown diseñaron un BCI comercializado como Neuroport, el cual les permitió a los investigadores identificar actividad

---

La onda P300 (EP300, P3) es un potencial evocado que puede ser registrado mediante electroencefalografía como una deflexión positiva de voltaje con una latencia de unos 300 ms en el EEG. La presencia, magnitud, topografía y duración de esta señal se utiliza a veces en la medición de la función cognitiva de los procesos de toma de decisiones.

(<https://es.wikipedia.org/wiki/P300> consultada 16/12/2020)

<sup>5</sup> Las ondas **Mu** se localizan en la Zona Sensoriomotora (unión lóbulo parietal y frontal) Manifiestan atenuación durante el movimiento o intento de movimiento de extremidades. A diferencia de las ondas alfa (que se encuentran en la misma banda de frecuencia) las ondas  $\mu$  son espontáneas. (<https://docplayer.es/27961034-Interfaz-cerebro-computador-mediante-la-clasificacion-de-senales-electroencefalograficas-angelica-reyes-rueda.html> Consultado el 06-12-2021)

microconvulsiva antes de que los pacientes sufrieran ataques epilépticos. En junio de 2004, a Matthew Nagle fue el primer ser humano en tener implantado este tipo de dispositivos. [3]

A finales de la década de 1990, investigadores de la Universidad Case Western Reserve (EE. UU.) utilizaron EEG para interpretar las ondas cerebrales de una persona tetrapléjica, lo que le permitió mover el cursor de un ordenador a través de un cable que se extendía desde los electrodos implantados en su cuero cabelludo.[8]

En 1995, Grant R. McMillan y su equipo de investigadores en Wright-Patterson Air Force Base, diseñaron un BCI basado en potenciales evocados visuales de estado estable (SSVEP), para controlar el movimiento izquierdo y derecho de un avión en un simulador de vuelo, utilizando dos luces parpadeantes diferentes situadas a la izquierda y a la derecha de la cabina. [9]

Más tarde, en el año 2009 (Iturrate et al., 2009) [10] desarrollaron una interfaz para controlar una silla de ruedas, utilizando el mismo paradigma de Farwell, basado en el potencial evocado P300.

En el año 2013, el entonces presidente de los Estados Unidos Barack Obama, lanzó un proyecto para examinar cómo funciona el cerebro humano y construir un mapa de su actividad. La iniciativa busca hacer lo mismo que el Proyecto Genoma Humano hizo por la genética. En ese mismo año se creó la revista "Brain Computer Interfaces", publicando su primer número en el año 2014. [7]

En el año 2015, se creó la sociedad internacional BCI, con el fin de "fomentar la investigación y el desarrollo que conduzcan a tecnologías que permitan a las personas interactuar con el mundo a través de señales cerebrales" [11]. En el año 2016, se realizó la reunión internacional de BCI a la que asistieron 400 participantes, procedentes de 188 grupos de investigación y organizaciones. [7]

Hasta la fecha existen tecnologías en etapas tempranas de investigación, que podrían ser realidad en las próximas décadas. Investigadores, definieron el concepto de Internet del Cerebro o BTI por sus siglas en inglés "Brain The Internet", en el que el BCI utiliza los servicios de internet como resultados de búsquedas o redes sociales, otros identificaron

que las tecnologías 6G podrían permitir la interconexión de las BCI con Internet. Además, científicos documentaron una fusión entre la nanorobótica neural y los servicios en la nube para adquirir conocimientos, definiendo el concepto de interfaz cerebro humano/nube (B/CI), otro enfoque futurista BtBo “Brain to Brain” es el que permitirá la comunicación directa entre dos cerebros, investigadores documentaron el intercambio de información en tiempo real entre el cerebro de dos ratas, investigación que se ha ampliado para crear redes de cerebros interconectados, conocidas como Brainet que pueden realizar tareas de colaboración entre usuarios y compartir conocimientos, recuerdos o pensamientos a través de cerebros remotos. [12].

En suma, desde el registro de la actividad eléctrica cerebral por primera vez hasta entonces ha habido grandes avances en esta temática, impulsados por el alto rendimiento y el bajo costo del poder computacional, una mayor comprensión de la función cerebral normal y anormal, métodos mejorados para decodificar las señales del cerebro en tiempo real.

## **2.2 Marco teórico – conceptual**

El concepto de cibercerebro y su tecnología BCI podrían considerarse como una idea extraída del Transhumanismo [13], filosofía que postula el uso de la tecnología para eliminar los aspectos negativos de la humanidad como las enfermedades, las anormalidades genéticas o los impedimentos físicos.

El avance de la Neurotecnología [14], combinación de tecnología y neurociencia, ha posibilitado el desarrollo de dispositivos BCI lo cual podría traducirse en mejores capacidades sensoriales, una mejor coordinación motora, la capacidad de acceder a fuentes de información externas y digitales, y la interconexión con otras redes y personas que también estén conectadas de manera similar.

Los dispositivos interfaz cerebro computador, denominados comúnmente BCI por sus siglas en inglés *Brain Computer Interface* en ocasiones son llamados también: [15]

- Interfaz de control neuronal o *Neuronal Control Interface NCI*
- Interfaz Máquina Mente o *Machine-Mind Interface MMI*

- Interfaz Neuronal Directa o *Direct Neural Interface DNI*
- Interfaz cerebro-máquina o *Brain Machine Interface BMI*
- Interfaz de telepatía sintética o *Synthetic Telepathy Interface STI*

### **2.2.1 Definición de BCI**

La comunicación entre las neuronas se realiza a través de impulsos electro-químicos, los cuales generan destellos residuales en forma de potenciales eléctricos. [16] Un dispositivo BCI puede captar estos destellos mediante distintos tipos de sensores capaces de detectar esta actividad y convertirlos en información sensible.

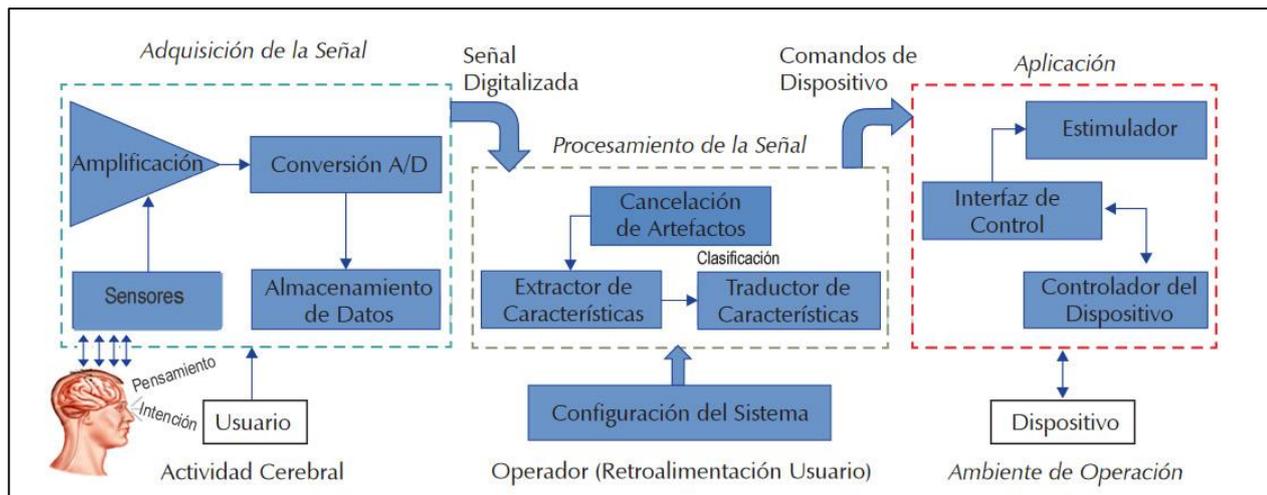
De esta manera, un dispositivo BCI permite la comunicación entre el cerebro y el entorno externo, esta comunicación no se realiza a través de las vías normales de comunicación como los nervios y músculos periféricos del cerebro, sino que las intenciones del individuo registradas a partir de las señales eléctricas, magnéticas, térmicas o químicas que genera el cerebro son traducidas en órdenes que son interpretadas y ejecutadas por un dispositivo, una máquina o una computadora. [17]

En otras palabras, un sistema BCI tiene como entrada la actividad neuronal del individuo, como salida órdenes o comandos y componentes que traducen las entradas en salidas, conocidos como adquisición y procesamiento de señales.

### **2.2.2 Componentes de un sistema BCI [18]**

Tal como puede observarse en la Figura 1, un sistema BCI se compone de cuatro etapas:

- Adquisición de las señales de la actividad cerebral.
- Procesamiento de señales
- Clasificación de las señales
- Aplicación



**Figura 1.** Elementos de un sistema de interfaz cerebro-computadora [18]

### 2.2.1.1 Usuario

Es la persona que genera las señales cerebrales con que se activa todo el sistema BCI, es quien tiene el gorro, vincha, casco o dispositivo implantado.

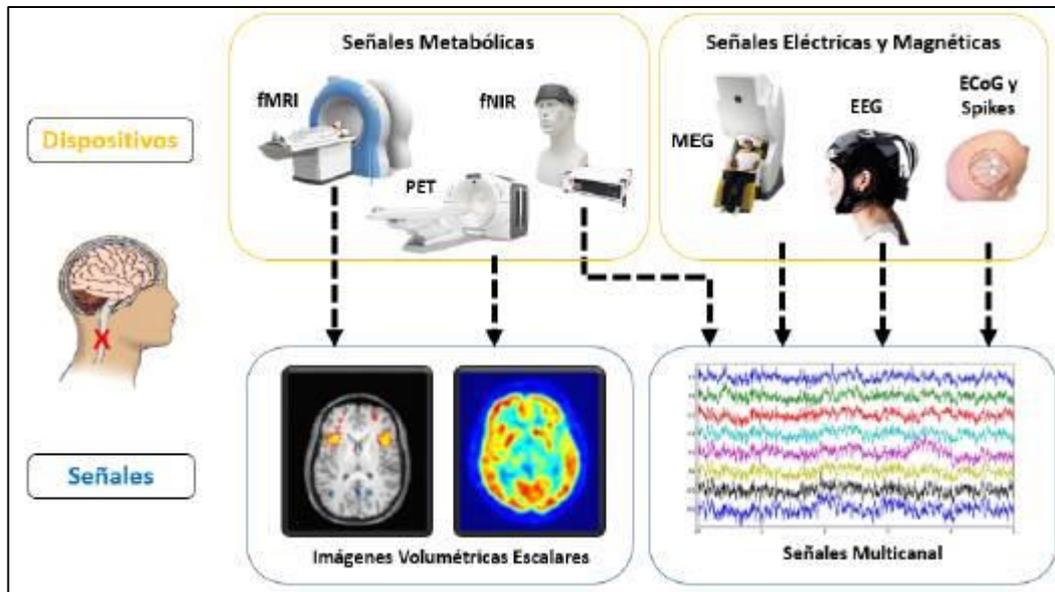
### 2.2.1.2 Adquisición de la señal

La tecnología BCI se integra con distintos sensores, que permiten captar y detectar las señales cerebrales procedentes del habla, la mirada, los gestos, las expresiones faciales, las posturas corporales y diversas modalidades fisiológicas como el ritmo cardíaco, la presión sanguínea, la conductividad de la piel, entre otros.

En esta fase, se captura la actividad cerebral del individuo mediante distintos tipos de sensores y de dos formas, utilizando métodos basados en señales metabólicas y los métodos basados en señales eléctricas y magnéticas. Las señales eléctricas pueden registrarse desde el cuero cabelludo, la superficie del cerebro o desde la actividad neuronal.

Las señales metabólicas se obtienen mediante resonancia magnética funcional (fMRI, basado en el flujo o volumen de sangre), por espectroscopía de infrarrojo cercano funcional o resonancia espectroscópica funcional infrarroja (fNIR, basado en la medición de cambios dinámicos en la sangre), mediante la tomografía por emisión positrónica (PET, basado en la medición del metabolismo del oxígeno o del azúcar, es decir, permite medir la actividad metabólica del cuerpo humano). [19]

Las señales eléctricas y magnéticas se obtienen por magnetoencefalografía (MEG), la electroencefalografía (EEG) y la electrocorticografía (ECoG) o adquisición electrocortical.[19]



**Figura 2:** Técnicas de captura de señales cerebrales [20]

El Electroencefalograma o EEG, es el método más empleado para adquisición de las señales y registro de la actividad cerebral por su bajo coste, y por ser una técnica sencilla, no invasiva y portátil.

#### 2.2.1.2.1 Amplificación de la señal

Dependiendo de la técnica que se utilice para adquirir las señales, éstas pueden llegar a ser muy bajo voltaje (señales pequeñas, aproximadamente 1 millón de veces más pequeñas que el voltaje que proporciona una pila) por lo cual se necesita amplificarlas, magnificarlas a un nivel adecuado para su procesamiento.

En este punto se les aplica un filtrado analógico para remover señales indeseables para su posterior análisis.

#### 2.2.1.2.2 Conversión A/D

Como la señal analógica es más sensible a ruidos e interferencias, en esta fase, las señales analógicas adquiridas son convertidas a señales digitales con el propósito de facilitar su posterior procesamiento (codificación, compresión, etcétera).

### **2.2.1.2.3 Almacenamiento de datos**

En esta fase las señales obtenidas se agrupan en bloques de muestras y se transmiten en secuencia a una computadora para su almacenamiento, procesado y posterior estudio

### **2.2.1.3 Procesamiento de la señal**

En esta etapa se extraen las características de interés de la señal digitalizada para que el dispositivo sobre el que el usuario está actuando sea capaz de interpretar sus órdenes. En este bloque se distinguen 3 etapas:

#### **2.2.1.3.1 Cancelación de artefactos**

Los artefactos son señales indeseadas, distorsiones producto de parpadeo, movimiento de un músculo, sudoración. Esta etapa se encarga de eliminar esas señales distorsionadas.

#### **2.2.1.3.2 Extractor de Características**

La etapa de extracción de características sirve para transformar señales cerebrales originales en una representación que facilite la clasificación. [19]

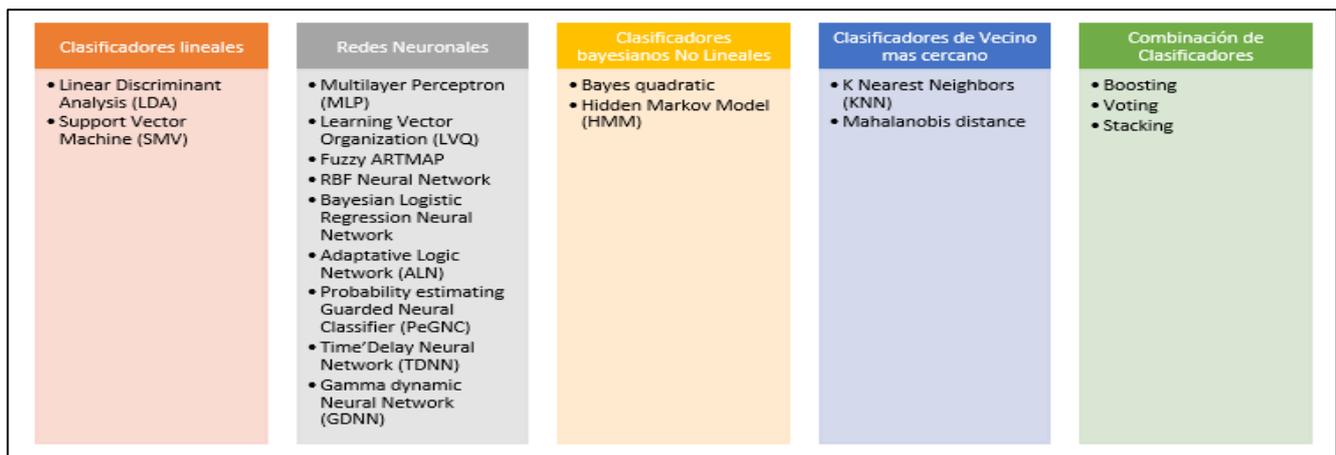
Las características extraídas pueden ser de dos tipos: simples y complejas. Las características simples son una medición directa de la señal (ej., amplitud, frecuencia), las complejas son combinaciones lineales o no lineales, razones, estadísticos u otras transformaciones de las características simples. [20]

#### **2.2.1.3.3 Traductor de Características**

En esta etapa se usan algoritmos de clasificación para asociar las características obtenidas con comandos que expresen la intención del usuario. [21]

El traductor asigna las señales eléctricas (registradas o extraídas, correspondientes a un determinado estado cerebral del usuario), con una determinada salida (usualmente discreta) que será aplicada a la interfaz de control.

Uno de los algoritmos de clasificación utilizados en esta etapa, está basado en la teoría del reconocimiento de patrones. [22] En efecto, existen numerosos tipos de algoritmos de traducción de características a saber, algoritmos basados en la distancia, clasificadores discriminantes, lineales, vectoriales, redes neuronales y algoritmos más avanzados que utilizan una combinación de características espaciales y temporales producidas por uno o más procesos fisiológicos, entre otros. [17] Estos algoritmos de clasificación pueden entrenarse mediante técnicas de aprendizaje automático para reconocer qué características pertenecen a una clase u otra, es decir, qué tipo de tarea mental está realizando el sujeto. [23] Dicho de otra manera, se clasifican los datos en distintas categorías, las cuales corresponden a estados sensoriales, motores, cognitivos o emocionales que se desean identificar en el usuario del sistema. [24]



### Algoritmos de clasificación

Figura 3: Algoritmos de clasificación de señales<sup>6</sup>

#### 2.2.1.4 Aplicación

En esta fase, se recibe la señal de control y en función de la clase detectada, se realiza las acciones predefinidas correspondientes en el dispositivo a través del controlador de éste. [24]

En este bloque se distinguen 3 etapas:

##### 2.2.1.4.1 Interfaz de Control

<sup>6</sup> Imagen extraída y adaptada de Brain Computer Interface ( BCI ) p. 69 <https://es.slideshare.net/carlostoxtli/interfaz-cerebro-maquina> - Consultada el 10-09-2020

La interfaz de control es la que posibilita la traducción de las señales lógicas de control en señales semánticas de control que son apropiadas para el tipo particular de dispositivo a controlar. [22]

#### **2.2.1.4.2 Controlador de dispositivo**

Este bloque recibe las señales semánticas que han sido clasificadas por el bloque traductor de características y las traduce a señales físicas de control para que el dispositivo pueda ejecutar una acción.

#### **2.2.1.4.3 Estimulador**

Algunos sistemas incluyen un estimulador que es manejado por la interfaz de control. Señales de estimulación son enviadas al extractor de características para sincronizar la obtención de estas. [22]

#### **2.2.1.5 Dispositivo**

Son los dispositivos físicos o virtuales que pueden ser controlados por un BCI, como simuladores, sintetizadores de voz, prótesis neurales, procesadores de palabras, sillas de ruedas, interfaces de internet, entre otros.

#### **2.2.1.6 Ambiente de operación**

Es el entorno físico que rodea al usuario del BCI y que puede llegar a incidir en el funcionamiento del sistema como por ejemplo ruido ambiental, temperatura, objetos, personas en el ambiente, etc.

#### **2.2.1.7 Configuración del sistema**

En esta etapa se definen y ajustan los parámetros del sistema. La configuración la puede realizar un operador, el propio usuario o algoritmos automáticos que van ajustando los parámetros en función de la realimentación del usuario del sistema. Así mismo, durante la ejecución de una tarea es deseable presentar información al participante sobre su desempeño (retroalimentación), con el propósito de ayudarlo a modular su actividad cerebral en los intentos posteriores. [24]

### **2.2.2 Clasificación de BCI**

#### **2.2.2.1 Clasificación en base a la posición del dispositivo**

Estos dispositivos se clasifican en tres grupos principales:

- No invasivos

- Semi Invasivos
- Invasivos

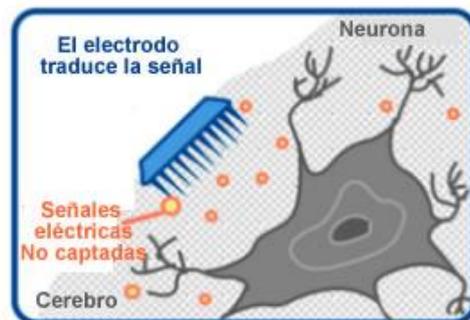
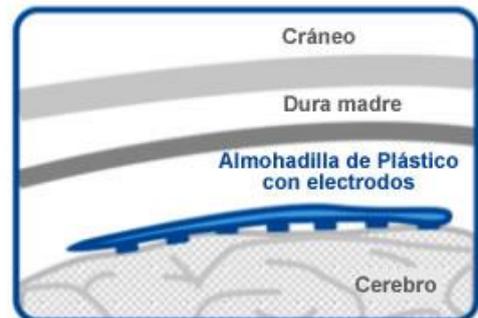


### No Invasivos

Son los dispositivos más utilizados. Captan las señales del cerebro mediante electrodos colocados en el cuero cabelludo

### Semi Invasivos

Los dispositivos se implantan en el cráneo. Las señales del cerebro son débiles debido a la obstrucción del cráneo



### Invasivos

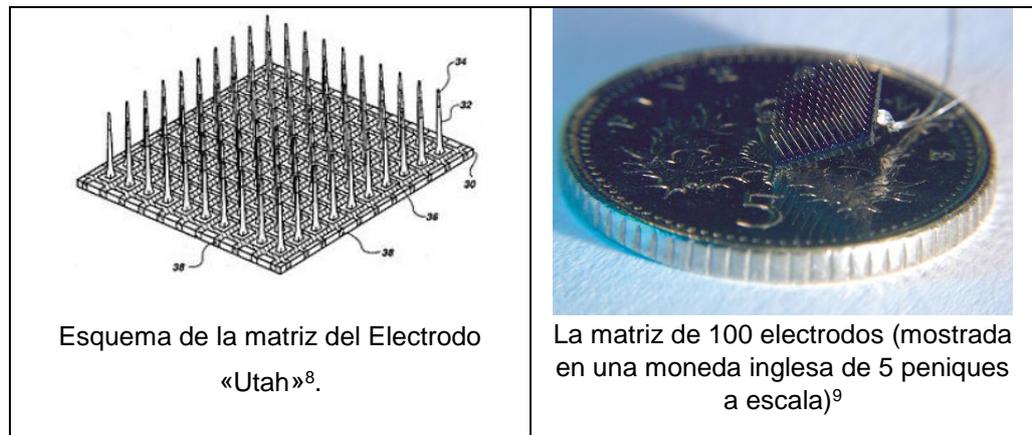
Los dispositivos se implantan en el córtex mediante neurocirugía, para medir la actividad de las ondas intraparenquimales

SCIFORCE

Figura 4: Clasificación BCI<sup>7</sup>

Los dispositivos **Invasivos**, son los situados en el cerebro mediante neurocirugía. Compuesto por miles de electrodos localizados en un pequeño circuito integrado. Hay BCI de una sola unidad, que detectan la señal de una sola zona de células cerebrales, y BCI de varias unidades, que detectan de varias zonas. Los electrodos tienen distintas longitudes, los de 1,5 mm de longitud corresponden a la Matriz de Utah. Este dispositivo (similar a pequeña cama de púas, del tamaño aproximado de una uña meñique) consta de 100 canales por vector. [23] [25]

<sup>7</sup> Imagen adaptada y extraída de <https://medium.com/sciforce/brain-computer-interfaces-your-favorite-guide-15aaa410c4d7> Consultada el 01-12-2021



**Figura 5:** Matriz de electrodos

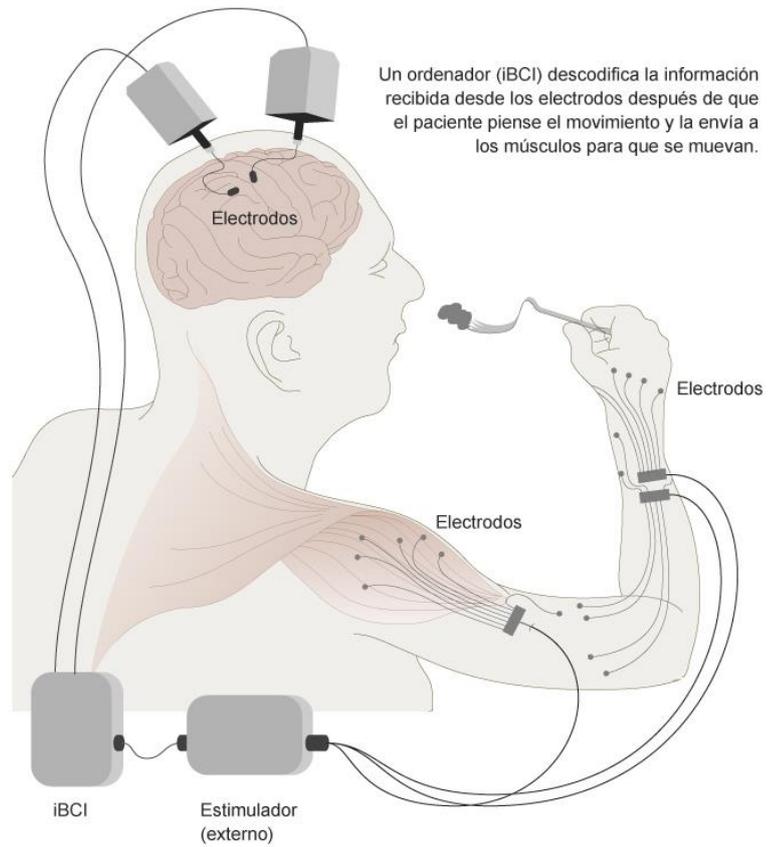
Este tipo de dispositivos proporciona una calidad de señal muy alta, con una alta resolución temporal y espacial, aumentando la calidad de la señal obtenida y su relación señal/ruido. Sin embargo, tiene la desventaja de necesitar una cirugía para implantarse, sumado a ello el cuerpo puede reaccionar a un objeto extraño y formar cicatrices alrededor del electrodo disminuyendo la calidad de la señal. [23] [25]

Debido a que la neurocirugía puede ser un proceso arriesgado y costoso, los dispositivos invasivos suelen usarse principalmente en pacientes ciegos y/o con algún tipo de parálisis.

Científicos de la Universidad Case Western Reserve crearon una solución para un paciente tetrapléjico a causa de un accidente en bicicleta. Implantaron en su cerebro dos vectores de electrodos que registraban la actividad eléctrica de su corteza cerebral motora o córtex motor, esta solución le permitió comer por sí solo luego de ocho años tetrapléjico. [27]

<sup>8</sup> Imagen extraída de [23]

<sup>9</sup> Imagen extraída de [26]



**Figura 6:** Científicos de la Universidad Case Western Reserve crearon una solución para un paciente tetrapléjico



**Figura 7:** paciente tetrapléjico logra comer por sí solo después de ocho años

Los dispositivos **Semi invasivos**, se implantan dentro del cráneo, pero se sitúan fuera del cerebro y no dentro de la materia gris, por ejemplo, electrodos implantados entre las capas de las meninges.

En la siguiente imagen puede apreciarse el área motora, el área sensorial, el corte quirúrgico y las retículas donde irían colocados los electrodos. Las tiras o rejillas de electrodos cubren una amplia zona del córtex (de 4 a 256 electrodos), lo que permite realizar diversos estudios cognitivos. Las señales recibidas de esta forma se obtienen por electrocorticografía. [23]

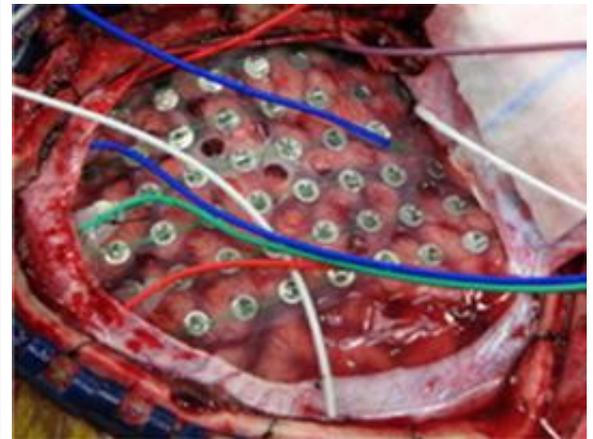
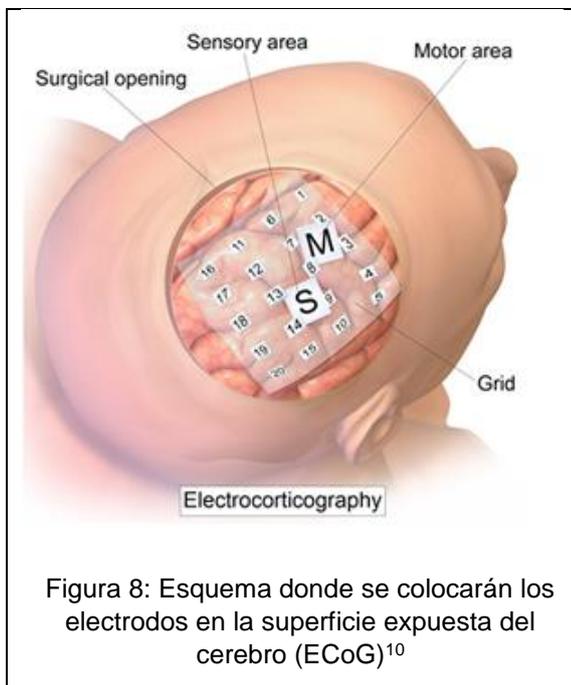


Figura 9: Electrodos colocados en la superficie expuesta del cerebro (ECoG)<sup>11</sup>

La electrocorticografía se utilizó por primera vez en los años 50 en el Instituto Neurológico de Montreal. Los dispositivos semiinvasivos la utilizan para medir las señales eléctricas generadas por la actividad de la corteza cerebral. Estos dispositivos se denominan semiinvasivos porque requieren de una craneotomía para implantar los electrodos, los cuales pueden colocarse fuera de la duramadre (epidural) o debajo de ella (subdural). [23]

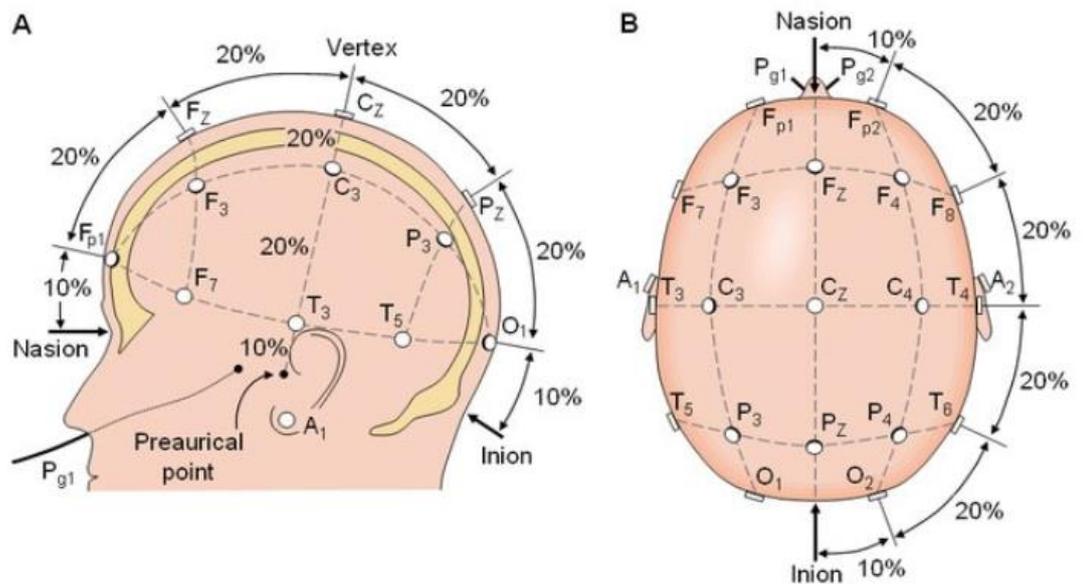
<sup>10</sup> Imagen extraída de <http://learn.neurotechedu.com/introtobci/#references> [12]

<sup>11</sup> Imagen extraída de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110866515000237#b0510> [14]

Los dispositivos **No invasivos**, operan mediante la utilización de electrodos (uno o múltiples canales) utilizando gorros, vinchas y cascos. Éstos recogen la actividad cerebral sin realizar intervención quirúrgica sobre el sujeto.

Un BCI de este tipo basa su funcionamiento en la adquisición de la actividad electroencefalográfica. Estas características los hacen muy económicos, razón por la cual son los más utilizados, sin embargo, son más susceptibles al ruido por lo que requieren sistemas de adquisición y procesamiento de señales muy precisos.

Los sensores de este tipo de dispositivos se colocan en el cuero cabelludo para medir los potenciales eléctricos producidos por el cerebro (EEG) o el campo magnético (MEG).



**Figura 10:** Ubicación de los electrodos según el sistema internacional 10-20. A) Vista lateral. B) Vista cenital.<sup>12</sup>

<sup>12</sup> Sistema Internacional 10-20 para la colocación de los electrodos extracraneales. Las letras señalan el área (Fp, prefrontal; F, frontal; C, central; P, parietal; T, temporal y O, occipital), mientras que los números designan el hemisferio (pares del derecho, nones del izquierdo) y los electrodos de la línea media se señalan con una "z"; por lo que Fz se encuentra frontalmente en la línea media. Figura extraída de: [https://www.researchgate.net/publication/282294960\\_Mapeo\\_Electroencefalografico\\_y\\_Neurofeedback](https://www.researchgate.net/publication/282294960_Mapeo_Electroencefalografico_y_Neurofeedback)

El diseño de los BCI no invasivos depende de la señal empleada y de la información de esta que se utilice para establecer la comunicación cerebro - computadora.



Figura 11: BCI tipo vincha<sup>13</sup>. Puede medir los estados de relajación y concentración



Figura 12: BCI tipo gorro<sup>14</sup>. Dispositivo para pintar cosas con la mente

### 2.2.2.2 Clasificación en base al nivel del control nervioso muscular del usuario

#### 2.2.2.2.1 Sistemas activos

Los sistemas activos son aquellos que obtienen sus salidas mediante el control consciente por parte del usuario. La principal característica de este tipo de sistemas es que el usuario manipula a voluntad una aplicación o un dispositivo externo. El dispositivo puede ser un simulador o un dispositivo físico. [24] Realizan tareas endógenas, es decir, esfuerzos mentales para modular la actividad neuronal significativamente.

#### 2.2.2.2.2 Sistemas reactivos

En los sistemas reactivos el usuario controla una aplicación reaccionando a un estímulo sensorial externo, el cual puede ser visual, auditivo, táctil u olfativo. Aunque este tipo de sistemas se controlan externamente; es decir, se depende permanentemente de la emisión

<sup>13</sup> Imagen extraída de <http://learn.neurotechedu.com/introtobci/#references> [23]

<sup>14</sup> Dispositivo BCI no invasivo que permite pintar cosas con la mente. Imagen extraída de <https://www.ngeeks.com/pintar-con-la-mente/>

(sistema) y recepción (usuario) de estímulos externos, su ventaja principal es que no necesitan un entrenamiento previo y arduo para que el usuario produzca la respuesta neuronal deseada. [24] Son también denominados dependientes porque requiere que alguna parte del sistema nervioso periférico trabaje para que se produzca una actividad eléctrica asociada en la corteza cerebral. [18]. Realizan tareas exógenas, canalizan la atención del usuario por medio de estímulos visuales, auditivos y/o táctiles.

#### **2.2.2.2.3 Sistemas pasivos**

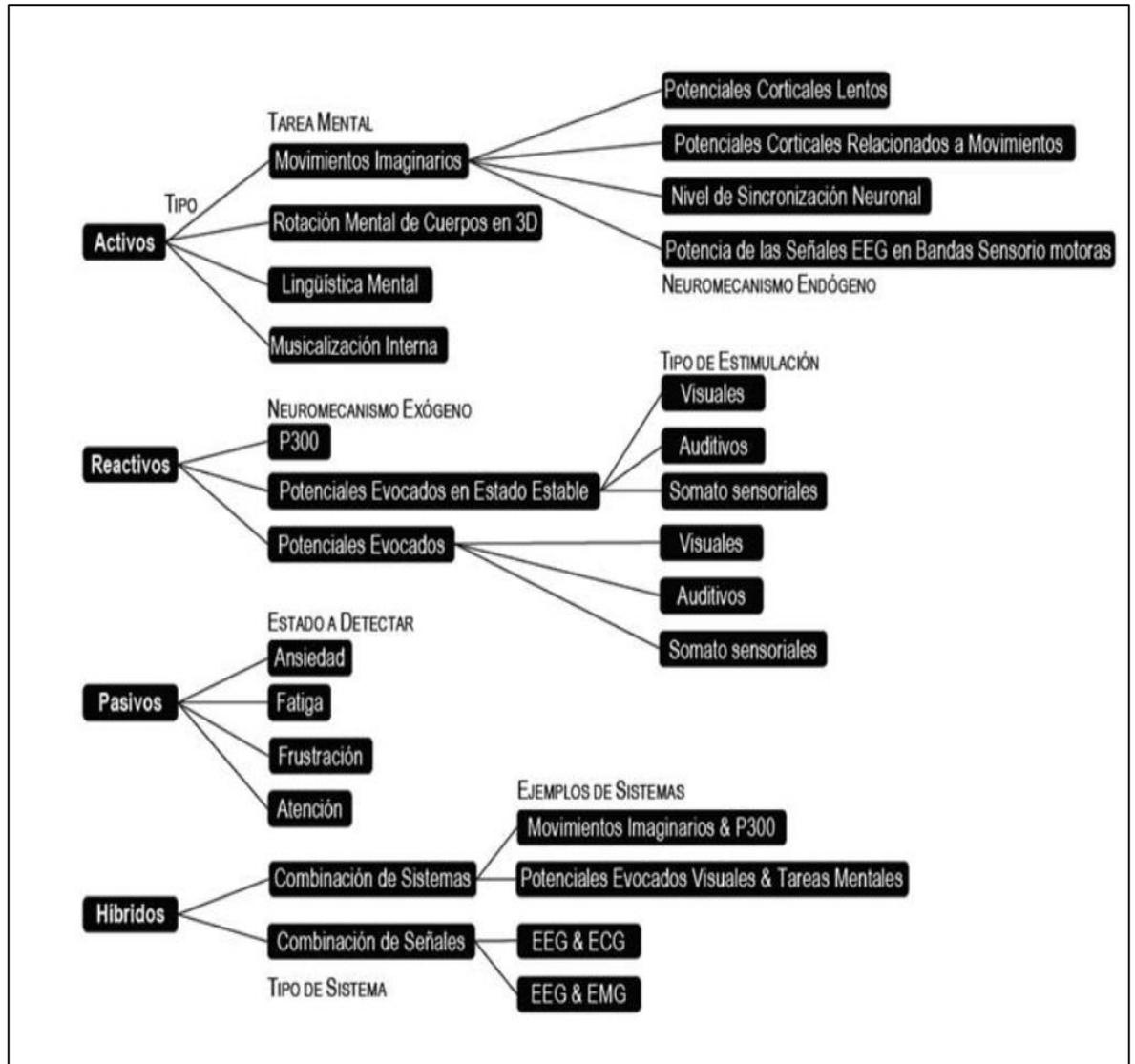
En los sistemas pasivos, la adquisición y análisis de la actividad cerebral se utilizan para descifrar un estado cognitivo del usuario del dispositivo BCI, como por ejemplo cansancio, sueño, nivel de atención, etc. No se utilizan para controlar directamente el dispositivo objetivo, sino para modificar el control de este. En particular para adaptar las reglas de interacción o el contenido de la aplicación.

Estos sistemas han sido muy explotados para enriquecer la interacción humano-computadora, son muy utilizados para entrenamiento cognitivo, tratamiento de la depresión, pérdida de memoria, Insomnio, ansiedad, adicciones, déficit de atención e hiperactividad (TDAH), trastornos del sueño de los niños, el rechinar de dientes (bruxismo) y el dolor crónico, entre otros. [24] [15]

#### **2.2.2.2.4 Sistemas híbridos**

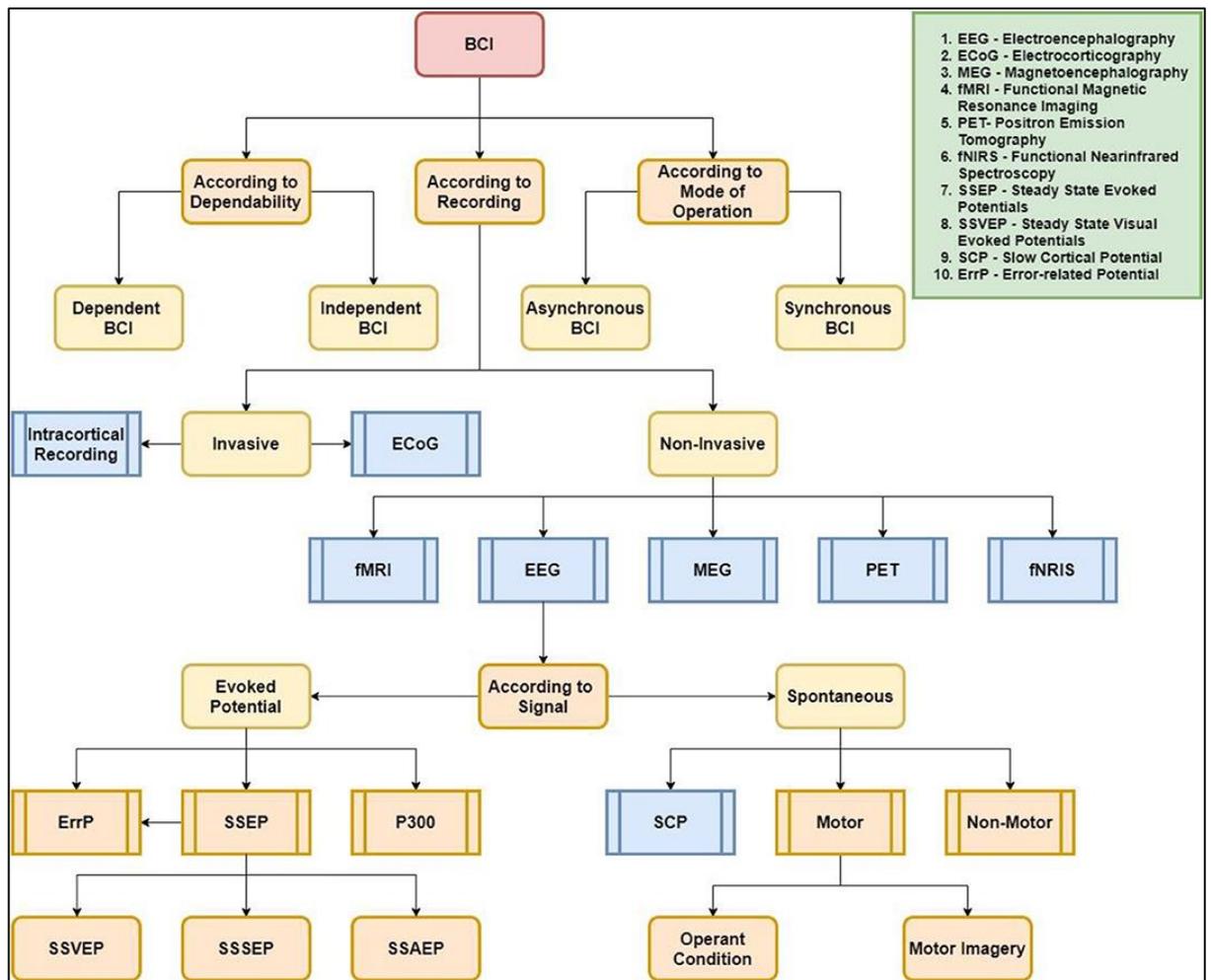
Estos sistemas, controlan el dispositivo o la aplicación objetivo mediante señales fisiológicas tales como ritmo cardiaco, respiración, o conductancia de la piel, en conjunto con la actividad neuronal.

Se los denomina híbridos, porque combinan los mecanismos neurofisiológicos de los BCI activos con los reactivos para mejorar el desempeño del sistema. [24]



**Figura 13** Tipos de sistemas BCIs: activos, reactivos, pasivos e híbridos. Los sistemas activos [24] se controlan a voluntad del usuario, los reactivos dependen de un ciclo emisión-recepción, los pasivos proporcionan información sobre el estado cognitivo del usuario y los híbridos extraen información de diversas fuentes fisiológicas.

### 2.2.2.3 Clasificación de los sistemas BCI en términos de fiabilidad, método de registro y modo de funcionamiento



**Figura 14:** Clasificación de los sistemas BCI en términos de fiabilidad, método de registro y modo de funcionamiento<sup>15</sup>

## 2.2.2.4 Clasificación en base a la modalidad de activación y dependencia

### 2.2.2.4.1 Dependientes

Un BCI dependiente requiere que alguna parte del sistema nervioso periférico trabaje para que se produzca una actividad eléctrica asociada en la corteza cerebral. [8] Es decir, no utiliza las vías de salida normales del cerebro para transmitir el mensaje, sino que se necesita la actividad de estas vías para generar la actividad cerebral que lo transmite. [29]

### 2.2.2.4.2 Independientes

Un BCI independiente no necesita la activación muscular para producir una actividad eléctrica en el cerebro, no depende en absoluto de las vías de salida normales del cerebro, es decir, proporcionan al cerebro vías de salida

<sup>15</sup> Figura extraída de <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnbot.2020.00025> [28]

totalmente nuevas. Por esta razón, tienen mayor interés teórico por su usabilidad en personas con discapacidades neuromusculares severas. [29]

### **2.2.2.5 Clasificación en base a la modalidad de operación**

#### **2.2.2.5.1 Sincrónico**

Los sistemas BCI sincrónicos requieren la presentación de estímulos para que el usuario lleve adelante una consigna, como por ejemplo la de imaginar el movimiento de un miembro.

En un BCI sincrónico el análisis y la clasificación de las señales de los potenciales eléctricos obtenidos de la corteza cerebral están limitados a valores predefinidos de tiempo. En este caso, se conoce perfectamente el inicio de la actividad eléctrica cerebral de interés y por lo general está asociada a la presentación de un estímulo adecuado al usuario. La temporización del control viene regulada por el propio sistema, de modo que el sujeto sólo puede interactuar con el entorno en ciertos momentos indicados por dicho sistema. [19] [24] [30].

#### **2.2.2.5.2 Asincrónico**

En un BCI asincrónico no existe un estímulo para iniciar la actividad eléctrica cerebral deseada, sino que el usuario es libre de intentar producir la actividad cerebral cuando él lo desee. [19]

### **2.2.2.6 Clasificación en base a la señal utilizada.**

Según la naturaleza de la señal de entrada, los sistemas BCI se pueden clasificar en endógenos y exógenos.

#### **2.2.2.6.1 Sistemas BCI endógenos**

El usuario voluntariamente desempeña una tarea mental como un movimiento imaginado para crear cambios en la señal u ondas cerebrales que puedan ser detectadas por un dispositivo BCI. Son BCI activos que utilizan la imaginación motora<sup>16</sup>, basados en imágenes motoras (ritmos sensoriomotores) o en potenciales corticales lentos o SCP, por sus siglas en inglés de Slow Cortical Potentials. Este tipo de sistemas requieren de un período de entrenamiento intensivo. [24] [32]

##### **2.2.2.6.1.1 BCI basado en Potenciales Corticales Lentos**

---

<sup>16</sup> Imaginación motora es el ensayo mental de actos motores simples o complejos que no van acompañados de movimientos corporales manifiestos. [20]

Los SCP son cambios lentos de voltaje generados sobre el córtex cerebral, con una duración variable entre 0.5 y 10 segundos. Los SCP negativos se asocian típicamente con el movimiento y otras funciones que implican una activación cortical, un SCP positivo está asociado a una actividad cortical reducida contraria a un SCP negativo. Un ejemplo de ello son las señales cerebrales que se producen, cuando se realizan dos tareas similares pero que se entienden como contrarias, por ejemplo, abrir y cerrar los ojos. Los usuarios pueden aprender a controlar los SCP con el uso de retroalimentaciones sonoras o visuales. [20] [22] [32]

#### **2.2.2.6.1.2 BCI basado en imágenes motoras o ritmos sensoriomotores**

Se basa en un paradigma de dos o más clases de imágenes motoras (movimiento de la mano derecha o izquierda, de los pies, de la lengua, etc.) u otras tareas mentales (rotación de un cubo, realización de cálculos aritméticos, etc.). Este tipo de tareas mentales producen cambios en la amplitud de los ritmos sensoriomotores  $\mu$  (8-12 Hz) y  $\beta$  (16-24 Hz), registrados sobre la zona somatosensorial y motora del córtex cerebral. Estos ritmos presentan variaciones tanto para la ejecución de un movimiento real como para la imaginación de un movimiento o la preparación al mismo.

#### **2.2.2.6.2 Sistemas BCI exógenos**

Depende de la actividad electrofisiológica originada externamente, dicha actividad es evocada por un estímulo específico, no requiere un entrenamiento extenso, pero se necesita un entorno estructurado. A este grupo pertenecen los potenciales P300 y potenciales evocados visuales de estado estable (SSVEPs por sus siglas en inglés). Normalmente, se presenta al usuario del sistema, de forma simultánea un conjunto de estímulos distintos y cada uno de éstos evoca una respuesta fisiológica distinta. Cada estímulo representa un comando o código. Mediante alguna tarea mental, el usuario modula la respuesta fisiológica del estímulo objetivo y así se reconoce el código que el usuario quiere comunicar. [32]

##### **2.2.2.6.2.1 Sistemas BCI basados en Potenciales evocados P300**

Un potencial evocado P300 usualmente utiliza estímulos visuales que parpadean en una secuencia aleatoria. El estímulo evoca una característica llamada P300, un pico de amplitud que aparece en la región parietal y central del córtex cerebral aproximadamente unos 300 milisegundos después de haberse producido el estímulo auditivo o visual. [32]

#### **2.2.2.6.2.2 Sistemas BCI basados en Potenciales evocados visuales de estado estable**

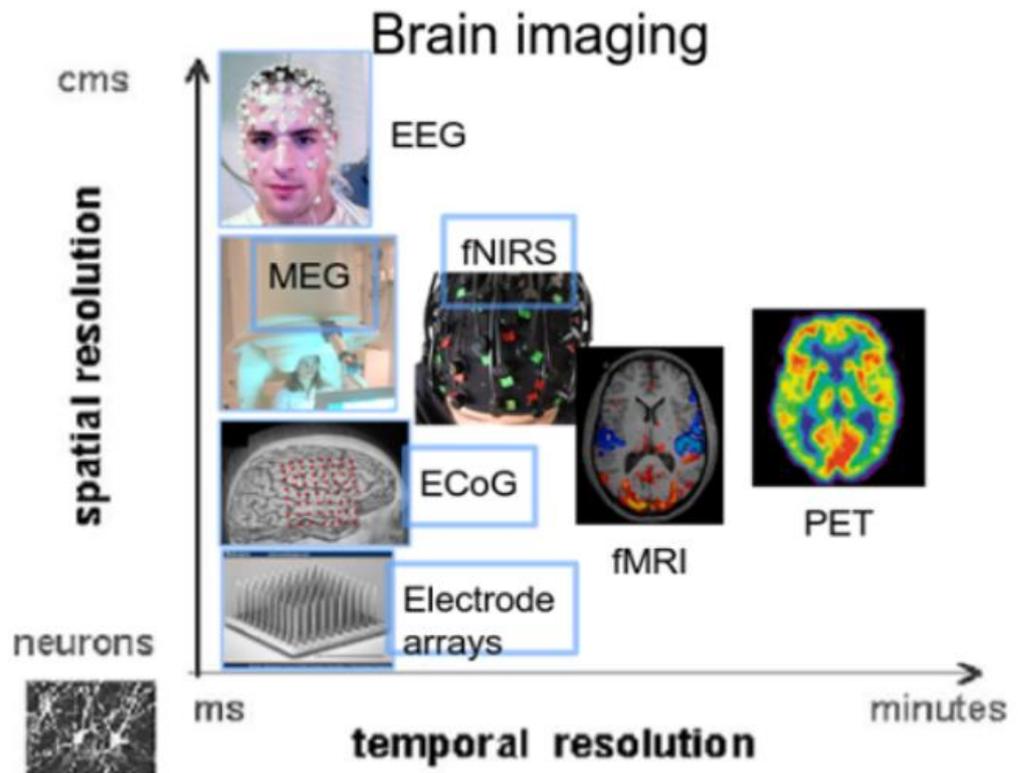
Los potenciales evocados visuales se detectan en el EEG registrado sobre la zona visual del córtex cerebral tras haberse aplicado un estímulo visual al usuario. Los estímulos parpadean continuamente a diferentes frecuencias en un rango comprendido entre los 6 y 30 Hz. Estos potenciales se hacen estables si la tasa de presentación del estímulo visual está por encima de 6 Hz (6 repeticiones por segundo). La teoría de operación básica se puede describir como sigue: se ponen múltiples objetivos sobre un panel visual y se los hace parpadear con diversas frecuencias. Cuando el sujeto mira un determinado objetivo, se induce un SSVEP (por sus siglas en inglés de Steady State Visual Evoked Potentials) en el cerebro cuya frecuencia fundamental es igual a la frecuencia con la que parpadea el blanco. Así, se puede identificar el blanco que el sujeto está observando, mediante un análisis en frecuencia de la respuesta. [22] [32]

#### **2.2.3 Técnicas de registro de actividad cerebral:**

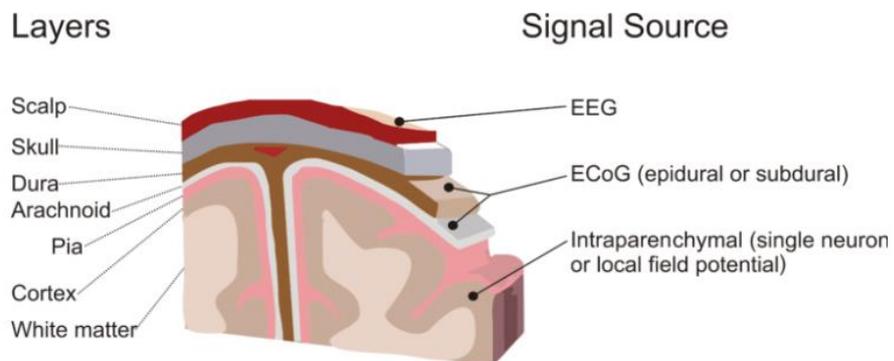
Las técnicas de registro de la actividad cerebral se agrupan en tres categorías en función del tipo de actividad cerebral que capturan: eléctrica, química o metabólica. Cada una de las técnicas tiene características que las hacen idóneas según la información que se desea obtener.

##### **2.2.3.1 Electroencefalografía (EEG)**

La electroencefalografía utiliza electrodos colocados en la superficie expuesta del cerebro para medir la actividad eléctrica de la corteza cerebral. Las ventajas de esta técnica son: alta resolución espacial y fidelidad de la señal, resistencia al ruido, menor riesgo clínico, robustez durante un largo período de registro y mayor amplitud. Sus registros son de 50-100  $\mu\text{V}$  como máximo.



**Figura 15:** Diferentes técnicas de imagen cerebral, comparadas por resolución espacial y temporal<sup>17</sup>



**Figura 16:** Diferentes capas del cerebro y de dónde se toma la señal.<sup>18</sup>

### 2.2.3.2 Magnetoencefalografía (MEG)

La medición de los campos magnéticos generados por las corrientes eléctricas en el cerebro, cerca de la superficie de la cabeza, permite localizar el origen de las corrientes eléctricas y puede utilizarse para mapear la función

<sup>17</sup> Imagen extraída de <http://learn.neurotechedu.com/introtobci/#references> [23]

<sup>18</sup> Imagen extraída de <https://waitbutwhy.com/2017/04/neuralink.html?ref=driverlayer.com> [32]

cerebral cortical. La MEG se basa en el principio de que toda corriente eléctrica genera campos magnéticos.

La fuente principal de los campos magnéticos extracraneales detectados con los instrumentos de MEG se origina principalmente en un flujo de corriente en las largas dendritas apicales de las células piramidales corticales. [23]



**Figura 17:** Escáner MEG con paciente<sup>19</sup>

### **2.2.3.3 Espectroscopia del infrarrojo cercano (fNIRS)**

La espectroscopia funcional del infrarrojo cercano (fNIR o fNIRS), es el uso de la NIRS (espectroscopia del infrarrojo cercano) con el fin de obtener neuroimágenes funcionales. Mide la actividad cerebral a través de las respuestas hemodinámicas asociadas al comportamiento de las neuronas y los cambios en el flujo sanguíneo. Mide la actividad cerebral cortical localizada

---

<sup>19</sup> Imagen extraída de <http://learn.neurotechedu.com/introtobci/#references> [23]

utilizando la luz infrarroja. Las ventajas de esta técnica son: No invasiva, portable y accesible. [23]

#### **2.2.3.4 Imagen Funcional de Resonancia Magnética (fMRI)**

En lugar de utilizar rayos X, las resonancias magnéticas utilizan campos magnéticos (junto con ondas de radio y otras señales) para generar imágenes del cuerpo y el cerebro.

De tecnología similar para rastrear los cambios en el flujo sanguíneo. Cuando las zonas del cerebro se vuelven más activas, utilizan más energía, por lo que necesitan más oxígeno, de modo que el flujo sanguíneo aumenta en la zona para suministrar ese oxígeno. El flujo sanguíneo indica indirectamente dónde se produce la actividad. Esto es lo que puede mostrar una resonancia magnética funcional. [33]

#### **2.2.3.5 Tomografía por emisión de positrones (PET)**

Es una técnica de imagen nuclear utilizada en medicina para observar diferentes procesos, como el flujo sanguíneo, el metabolismo o los neurotransmisores, que tienen lugar en el cuerpo. [23]



**Figura 18:** Imagen de una instalación típica de PET equipada con un escáner [23]

#### **2.2.3.6 Electroencefalografía**

La electroencefalografía (EEG) registra la actividad bioeléctrica del cerebro mediante un conjunto de hasta 256 electrodos de superficie que, aplicados al cuero cabelludo, funcionan por volumen de forma análoga a los

electrocardiogramas. [23]

	Superficie cortical	Intracortical	EEG	MEG	fMRI	fNIRS
Invasividad y cuestiones médicas	Invasivo	Invasivo	No Invasivo	No Invasivo	No Invasivo	No Invasivo
Resolución espacial	Alta	Muy Alta	Baja	Media	Alta	Media
Resolución temporal	Alta	Alta	Media	Meda	Baja	Baja
Portabilidad	Portable	Portable	Portable	No portable	No portable	Portable
Registro de la señal	Eléctrica	Eléctrica	Eléctrica	Magnética	Metabólica	Metabólica

Figura 19: Resumen de las características del método de adquisición de señales<sup>20</sup>

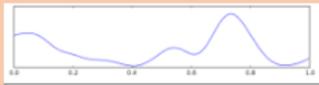
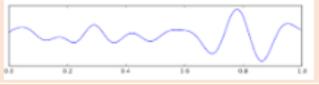
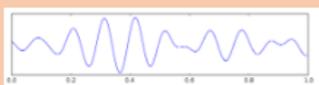
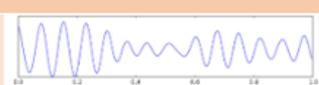
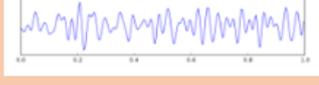
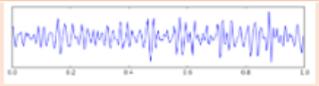
Tipo	Rango de Frecuencia (Hz)	Forma de la señal	Propiedades	Actividad mental
Delta - $\Delta$	1-3		Frontalmente en adultos, posteriormente en niños; ondas de gran amplitud	Ondas suaves durante el sueño profundo y en bebés
Theta - $\Theta$	4-7		Línea media frontal (Fz a Cz en Figura 10)	Ociosidad, inconsciencia, meditación y somnolencia
Alfa - $\alpha$	7-12		Regiones posteriores de la cabeza, ambos lados, con mayor amplitud en el lado dominante.	Relajación y concentración
Mu - $\mu$	8-13		Corteza sensorio-motora	La supresión indica que las neuronas motoras están trabajando
Beta - $\beta$	12-30		Corteza sensorio-motora, entre C3 y C4, distribución simétrica, más evidente frontalmente; ondas de baja amplitud	Alerta, pensamiento y concentración activa.
Gamma - $\gamma$	>30		Corteza somato-sensitiva	Procesamiento somato-sensorial, se muestra durante el emparejamiento en la memoria a corto plazo de objetos reconocidos, sonidos o sensaciones táctiles

Figura 20: Tipos de señales cerebrales<sup>21</sup>

<sup>20</sup> Imagen adaptada de Tabla 1 en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110866515000237#f0030> [15]

<sup>21</sup> Imagen extraída y adaptada de [https://www.researchgate.net/publication/309469900\\_Brain\\_Computer\\_Interface\\_Control\\_Signals\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/309469900_Brain_Computer_Interface_Control_Signals_Review) Consultada el 20-08-2020

## 2.3 Neuroética y Neuroderechos asociados al uso de la Tecnología BCI

### 2.3.1. Neuroética y Privacidad

La Neuroética es una disciplina que nace de la necesidad de quienes trabajan en ética y, particularmente, en Bioética; motivada por el vertiginoso avance tecnológico y científico de las investigaciones en neurociencia<sup>22</sup> y Neurotecnología<sup>23</sup>. [33]

Vale la pena decir que el progreso neurocientífico y neurotecnológico asociado a la tecnología BCI, y la aparición de técnicas de neuroimágenes funcionales (Tomografía Axial Computarizada (TAC), la Resonancia Magnética Cerebral funcional (RMcf) y la Tomografía por Emisión de Fotón Simple (SPECT, por sus siglas en inglés, entre otras), permiten ver la actividad de todas las regiones del cerebro simultáneamente. Si bien estos avances pueden ser muy beneficiosos para los individuos y la sociedad, el mal uso o implementación inadecuada de estas tecnologías implican el riesgo de crear formas sin precedentes de intrusión en la esfera privada de las personas, crear un daño físico o psicológico, amenazas a la libertad mental y a la capacidad de los individuos de gobernar libremente su comportamiento [34] y por ende su autonomía y libre albedrío.

Además, la naturaleza de la investigación de los BCI implica comprender y hacer inferencias sobre los estados mentales, los pensamientos y las intenciones de los usuarios de los dispositivos.

Esto también plantea problemas de privacidad al proporcionar un acceso directo o privilegiado a la vida mental de los individuos, que de otro modo no estaría disponible. [26] Las tecnologías existentes permiten obtener información psicológica a partir de la actividad cerebral registrada cuando se

---

<sup>22</sup> La Neurociencia es el estudio del cerebro y el sistema nervioso, incluyendo su estructura, función y trastornos. (<https://dana.org/explore-neuroscience/brain-basics/key-brain-terms-glossary/> Consultado el 07-12-2021)

<sup>23</sup> La Neurotecnología es un conjunto de herramientas que sirven para analizar e influir sobre el sistema nervioso del ser humano, especialmente sobre el cerebro. Estas tecnologías incluyen simulaciones de modelos neurales, computadoras biológicas, aparatos para interconectar el cerebro con sistemas electrónicos y aparatos para medir y analizar la actividad cerebral. (<http://diccionario.sensagent.com/neurotecnolog%C3%ADa/es-es/> Consultado el 07-12-2021)

la correlaciona con factores situacionales. Nuestras comunicaciones, hábitos de compra y otros comportamientos ya se han hecho más visibles para los demás; en la era de los dispositivos que leen continuamente la actividad cerebral. [35]

Entre las formas de privacidad que los estudiosos han identificado están la informativa (lo que otros pueden saber sobre una persona), la física (el grado en que otros pueden acceder físicamente a la persona), la asociativa (si otros pueden controlar a las personas con las que uno se relaciona) y la decisoria (si los demás pueden limitar la gama de decisiones importantes que uno puede tomar por sí mismo). [26]

Tipos de Privacidad	Definición	Ejemplos de BCI
Física	La condición en la que el acceso de una persona hacia otra (por la vista, el sonido, tacto y presencia) está limitado	Capacidad para realizar algunas actividades de la vida diaria con menor intervención de otras personas. El acceso físico al cráneo puede ser moderado por medio de controles de seguridad
Informativa	La condición en la que la capacidad de los demás para aprender sobre uno, o para hacer inferencias sobre uno, es limitada	Potencial del registro neural para exponer los pensamientos, disposiciones e intenciones. Permiten realizar Inferencias a partir de los datos almacenados.
Decisoria	La capacidad de una persona para tomar decisiones importantes e íntimas sin influencia o control excesivos por parte de otros	Almacenamiento de conversaciones íntimas de BCI Prohibición de participar en estudios basados en criterios de exclusión relativos, por ejemplo, a las decisiones reproductivas

**Figura 21:** Tipos de privacidad<sup>24</sup>

Roger Clarke<sup>25</sup>, en su estudio “Introduction to Dataveillance and Information Privacy, and Definitions of Terms”, identificó cuatro tipos de privacidad, los cuales fueron ampliados a siete tipos por los investigadores

<sup>24</sup> Imagen adaptada y extraída de [https://www.researchgate.net/publication/274724980\\_An\\_Ethics\\_Toolbox\\_for\\_Neurotechnology](https://www.researchgate.net/publication/274724980_An_Ethics_Toolbox_for_Neurotechnology) [26]

<sup>25</sup> Roger Clarke, “Introduction to Dataveillance and Information Privacy, and Definitions of Terms” (Xamax Consultancy, Aug 1997). <http://www.rogerclarke.com/DV/Intro.html>. Consultado 13-12-2021

Friedewald, M., Finn, R., Wright, D., en su estudio "Seven Types of Privacy" [36].

Tipo de Privacidad	Descripción
Privacidad de la persona - Intimidad	A veces se denomina "intimidad corporal" Se refiere a la integridad del cuerpo del individuo. Se trata de la inmunización obligatoria, la transfusión de sangre sin consentimiento, la entrega obligatoria de muestras de fluidos y tejidos corporales y la esterilización obligatoria
Privacidad del Comportamiento Personal	Esto se refiere a todos los aspectos del comportamiento, pero especialmente a los asuntos delicados, como las preferencias y hábitos sexuales, las actividades políticas y las prácticas religiosas, tanto en privado como en público. Incluye lo que a veces se denomina "privacidad de los medios de comunicación"
Privacidad de la Comunicación Personal	Se refiere al interés de poder comunicarse entre los individuos, utilizando diversos medios de comunicación, sin que otras personas u organizaciones controlen rutinariamente sus comunicaciones. Esto incluye lo que a veces se denomina "privacidad de la interceptación".
Privacidad de los Datos Personales	Se refiere a que los datos sobre los individuos no deben estar automáticamente a disposición de otros individuos y organizaciones, y que, incluso cuando los datos estén en posesión de otra parte, el individuo debe poder ejercer un grado sustancial de control sobre esos datos y su uso. Esto se denomina a veces "privacidad de los datos" y "privacidad de la información".
Privacidad de los Pensamientos y Sentimientos	Las personas tienen derecho a no compartir sus pensamientos o sentimientos o a que éstos sean revelados. Los individuos deben tener derecho a pensar lo que quieran. Esta libertad creativa beneficia a la sociedad porque se relaciona con el equilibrio de poder entre el Estado y el individuo. De la misma manera debería existir un equilibrio de poder entre el individuo y las tecnologías nuevas y emergentes.
Privacidad del Lugar y del Espacio	los individuos tienen derecho a moverse en el espacio público o semipúblico sin ser identificados, rastreados o vigilados. Esta concepción de la privacidad también incluye el derecho a la soledad y el derecho a la privacidad en espacios como el hogar, el coche o la oficina. Esta concepción de la privacidad tiene un valor social.
Privacidad de la Asociación	Se refiere al derecho de las personas a asociarse con quien deseen, sin ser vigiladas.

Figura 22: Tipos de Privacidad<sup>26</sup>

Gran parte del debate sobre la privacidad relacionada con la tecnología BCI, se centra en la privacidad informativa, las violaciones clásicas en la medida en que otros puedan conocer, acceder a información o hacer inferencias sobre una persona. Si bien la investigación, prácticas y pruebas se llevan a cabo en ambientes e instituciones académicas que tienen políticas estrictas de protección de datos y un reglamento que requiere de los usuarios un consentimiento informado o autorización de los participantes, existe una preocupación legítima de pérdida de cierta intimidad física. [26][35] En ese

<sup>26</sup> Imagen adaptada de [34] y [35]

sentido, tanto la colocación de electrodos, como dispositivos implantables implican una pérdida de privacidad física.

De igual manera, los dispositivos diseñados para entrenamiento cognitivo, o para tratamiento de desórdenes mentales, depresión, implican pérdida de privacidad mental. El debate ético se plantea a partir de estas situaciones, máxime en investigaciones con pacientes privados de movilidad física o con algún tipo de discapacidad, ya sea motora, visual y/o auditiva, pues si bien presentan oportunidades sustanciales para los tratamientos y mejora, en la acumulación sin precedentes de datos cerebrales puede haber una suposición implícita por parte de investigadores, médicos y legisladores que la pérdida de privacidad o un mayor riesgo para la privacidad, es una compensación valiosa frente a los enormes beneficios potenciales para la salud.

El avance en los usos y aplicaciones de la tecnología BCI ha posibilitado a la neurociencia del comportamiento, localizar las partes del cerebro que se supone son responsables de determinados tipos de comportamientos, actitudes y acciones. Basándose en ello, la industria del marketing podría influir en los individuos para que compren determinados productos, o gasten más dinero del que gastarían en otras circunstancias, basándose en una interacción entre el estado de ánimo, el comportamiento de compra y la estimulación externa.

Por otra parte, la industria del juego y el entretenimiento ha mostrado recientemente su interés por la "lectura" de la actividad cerebral para controlar y manipular aplicaciones, con el consecuente efecto potencial de afectar la privacidad del comportamiento.

Al mismo tiempo, podría ser posible la interceptación o el seguimiento de los flujos de datos entre el usuario del BCI y el dispositivo, o de los flujos de datos entre el usuario y el software de comunicación de aquellos sistemas BCI que se utilizan para ayudar a las personas a comunicarse con otras, comprometiendo con ello la privacidad de la comunicación. [26] [35] [36]

La siguiente imagen ilustra que a medida que las tecnologías se desarrollan y proliferan, varios tipos de privacidad que antes no habían sido

considerados o identificados como amenazados pueden verse comprometidos. [36]

Privacidad/Tecnología	Mejora humana mediante tecnologías emergentes	Segunda generación biométrica
Privacidad de la persona - Intimidad	X	X
Privacidad del Comportamiento Personal	X	X
Privacidad de la Comunicación Personal	X	X
Privacidad de los Datos Personales	X	X
Privacidad de los Pensamientos y Sentimientos	X	X
Privacidad del Lugar y del Espacio		X
Privacidad de la Asociación		X

**Figura 23:** Aspectos de la privacidad impactados por uso de tecnologías BCI y Biométricas<sup>27</sup>

En suma, es necesario contar con normas y directrices éticas para la Neurotecnología. El desafío consiste en identificar las complejas cuestiones sociales, jurídicas y culturales relacionadas con la tecnología BCI, así como la seguridad, la privacidad y las consecuencias a largo plazo de su uso ya sea para tratamientos médicos, aplicaciones de bienestar o entretenimiento, aún en contextos laborales, legales o educativos. En todos estos escenarios, las consideraciones éticas se entrelazan con las capas de consentimiento, acceso y control de datos, y posible manipulación. [37]

<sup>27</sup> Imagen extraída y adaptada de [36]. La biometría de primera generación se basa en características estáticas (contraseñas, tarjetas inteligentes o tokens, etc.) para identificar a las personas, la de segunda generación (reconocimiento al caminar mediante análisis de patrones de la marcha, rasgos faciales dinámicos, parpadeo de los ojos, movimiento de los labios, reconocimiento de voz) recoge características dinámicas o de comportamiento. ([https://www.prescient-project.eu/prescient/inhalte/download/PRESCIENT\\_D2.pdf](https://www.prescient-project.eu/prescient/inhalte/download/PRESCIENT_D2.pdf) Consultado el 27-12-2021)

### **2.3.2. Impacto Social**

La tecnología BCI utilizada para la mejora neuronal, clínica, rehabilitación, entrenamiento cognitivo entre otros, tiene una compleja importancia moral relacionada con la justicia social. El uso de Neurotecnologías emergentes trae inevitablemente nuevos retos legales, éticos y sociales, el reto de decidir cómo se puede garantizar igualdad de oportunidades y equidad en el acceso a esta tecnología por parte de la sociedad para disponer de ella. [38]

### **2.3.3. Neuroderechos**

El rápido avance de las tecnologías emergentes, en particular la Neurotecnología asociada a desarrollos de Sistemas BCI plantean importantes desafíos a los derechos humanos que deben abordarse para evitar consecuencias no deseadas. Así pues, las nuevas neurotecnologías abren la puerta a peligros de manipulación e intervención directa sobre nuestro cerebro y nuestro sistema nervioso, amenazando nuestra integridad mental y, con ello, el último reducto de nuestra identidad y nuestra intimidad: la conciencia. [37]

Marcelo Ienca<sup>28</sup>, investigador de la ETH Zurich, y el neurocientífico Rafael Yuste<sup>29</sup> sostienen que el uso indebido de estas tecnologías es tan grande que necesitamos modernizar las leyes, sentar una nueva jurisprudencia de la mente para protegernos, y de esta manera hacer frente a la comercialización de los datos del cerebro en el mercado de consumo. Abogan por añadir nuevos derechos humanos (“los Neuroderechos”) a la

---

<sup>28</sup> El Dr. Marcelo Ienca es miembro afiliado y profesor de la unidad de Ética y Política Sanitaria del Departamento de Ciencias y Tecnología de la Salud, y miembro ordinario de la Competencia de Ingeniería y Ciencia de la Rehabilitación de la ETH de Zúrich (Suiza). (<https://hest.ethz.ch/en/departament/people/people-a-z/personen-detail.html?persid=242412> Consultado el 13-12-2021)

<sup>29</sup> El Dr. Rafael Yuste es miembro del Departamento de Ciencias Biológicas de la Columbia University (Nueva York) donde dirige, desde 2014, el Centro de Neurotecnología. Principal propulsor del Brain Activity Map, adoptado en 2013 por el presidente Obama y que ha dado lugar a la iniciativa BRAIN internacional (Brain Research Through Advancing Innovative Neurotechnologies), que constituye el mayor proyecto neurocientífico de la Historia. Asimismo, está involucrado en la adopción de reglas éticas para la Neurotecnología y la Inteligencia Artificial (los NeuroDerechos) y su incorporación en la Declaración Universal de Derechos Humanos. (<https://zaguán.unizar.es/record/86978/files/BOOK-2020-001.pdf> Consultado el 20-10-2020 [38] )

Declaración Universal de Derechos Humanos para garantizar que esta nueva revolución tecnológica sea canalizada en beneficio de la Humanidad.

Estos derechos deben proteger a la ciudadanía de situaciones que hasta ahora en la historia nunca habían ocurrido.

El Dr. Yuste plantea los siguientes Neuroderechos [38]:

a) **Derecho a la privacidad mental y al consentimiento.** los pensamientos, la actividad mental, define quiénes somos. Esto es la máxima privacidad que existe, quiénes somos. El derecho a la privacidad mental, es el derecho a que no se pueda comerciar con los datos mentales. Que haya una barrera, que todo lo que tenga que ver con la privacidad mental sea intocable.

b) **Derecho a la identidad y a la toma de decisiones.** Asistimos a una era en la que es técnicamente posible conectar a personas, incluso gente que no está en la misma habitación, incluso en otra parte del mundo. Al fusionar el cerebro con el cerebro de otra persona o con una máquina, se pierde la identidad personal. Por lo tanto, la identidad personal también debe ser un derecho intocable de la humanidad. De igual manera, Las personas deben poder tomar y tener control sobre sus propias decisiones, sin la manipulación de neurotecnologías externas desconocidas.

c) **Derecho al aumento cognitivo justo y equitativo.** En base a la Neurotecnología y sistemas BCI, en un futuro será posible el aumento cognitivo de las personas y/o el mejoramiento de las actividades cognitivas, incluso estar conectados a internet con un buen ancho de banda. Tiene que haber un sistema justo y equitativo en la sociedad para evitar que cierto grupo de personas se conviertan en una especie de superhumanos, que evidentemente tendrán muchísimas más oportunidades económicas y vitales, que dejen atrás a otro tipo de población que no pueda permitirse el lujo de aumentarse cognitivamente.

d) **Derecho a la ausencia de sesgos.** La inteligencia artificial lleva muy comúnmente en sus algoritmos sesgos que discriminan a ciertos grupos de la población (mujeres, minorías raciales, minorías religiosas o étnicas) porque los algoritmos no tienen ninguna ética, escogen entre probabilidades. los algoritmos de inteligencia artificial y la Neurotecnología tienen que estar

legislados para que no exista ni un solo sesgo. No deben llegar a la población algoritmos con sesgos que puedan haber sido desarrollados sin el conocimiento de los científicos o los ingenieros involucrados.

El Dr. Ienca, plantea los siguientes Neuroderechos a fin de proteger los estados mentales de posibles intromisiones y manipulaciones [39]:

- a) **Derecho a libertad cognitiva.** Se refiere a la «autodeterminación mental» y sería, en cierto modo, una extensión del mencionado derecho humano a la libertad de pensamiento y de conciencia. Incluye dos conceptos estrechamente relacionados: El derecho de los individuos a usar las neurotecnologías emergentes; y la protección de los individuos contra el uso coercitivo de estas tecnologías y la posibilidad de que la tecnología pueda ser utilizada sin su consentimiento.
- b) **Derecho a la privacidad mental.** Es el derecho de protección de la privacidad mental. Esta protección debería cubrir cualquier tipo de información obtenida del cerebro por medio de las neurotecnologías y distribuida por medios digitales. Significa proteger a las personas frente al uso ilegítimo de su información cerebral y evitar posibles filtraciones de estos datos.
- c) **El derecho a la integridad mental.** Las intrusiones o acciones en el cerebro de una persona pueden crear no sólo una violación de su privacidad sino también un cambio perjudicial para su estatus neuronal.
- d) **Derecho a la continuidad psicológica.** La percepción de un individuo de su propia identidad también puede verse afectada por un uso incorrecto de las neurotecnologías. Estas tecnologías pueden ser utilizadas para monitorear las señales del cerebro, así como para estimular o modular las funciones cerebrales. La estimulación puede, como consecuencia, crear cambios en los estados mentales críticos para la personalidad. Este derecho implica la protección de la identidad personal y la continuidad del comportamiento personal frente a modificaciones no consensuadas por terceros.

Ambos investigadores coinciden en que los Neuroderechos deben preservar la última frontera de la privacidad que es el cerebro. Preservar la integridad mental de accesos no consentidos como reducto último de la identidad personal y de la libertad. Y que se debe proteger dicha libertad frente un uso coercitivo de las neurotecnologías que puede producir daño psicofísico, discriminación e injusticia. Si se canaliza la Neurotecnología y la

inteligencia artificial de una manera efectiva, tendrá lugar un nuevo humanismo. Los Neuroderechos podrán garantizar que así sea. [38] [40]

### **3. Interfaz Cerebro Computadora: Investigación y Desarrollo en Argentina**

La investigación y Desarrollo de la tecnología Interfaz Cerebro Computadora BCI (por sus siglas en inglés) en Argentina es incipiente y mayormente orientada al ámbito médico, investigaciones Neuromusculares, Sensoriales y sobre rehabilitación.

En el año 2006 se realizó la Primera Jornada Argentina sobre Interfaces Cerebro Computadoras (JAICC 2006), en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Entre Ríos (FIUNER). Fue organizada por el Laboratorio de Ingeniería en Rehabilitación e Investigaciones Neuromusculares y Sensoriales de la FIUNER y por la Regional Litoral de la Sociedad Argentina de Bioingeniería (SABI). Participaron investigadores de las universidades nacionales de La Plata, Tucumán y Tres de Febrero, además de un grupo de estudiantes de posgrado de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) de México. [22]

Las líneas de investigación presentadas en dicha jornada fueron:

- Laboratorio de Ingeniería en Rehabilitación e Investigaciones Neuromusculares y Sensoriales (LIRINS) Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Entre Ríos.
  - Implementación de ICCs basadas en ERD/ERS del ritmo mu del EEG y en P300.
  - Eliminación automática de artefactos del EEG en ICC.
  - Análisis funcional entre el EEG y el EMG
- Laboratorio de Electrónica Industrial, Control e Instrumentación (LEICI) - Facultad de Ingeniería –Universidad Nacional de La Plata
  - Amplificadores de instrumentación de aplicación en ICCs.
  - Investigación de nuevos paradigmas de ICCs.
- Instituto Superior de Investigaciones Biológicas (INSIBIO) - Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología – Universidad Nacional de Tucumán.

- Investigación sobre alternativas de codificación neural de los sistemas sensoriales.
- Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Nuevas Tecnologías (LIDeNTec) - ANSES
  - Desarrollo de ICCs inversas.
- Instituto de Automática (INAUT) - Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de San Juan
  - Aplicación de ICCs en el control de robots.

[41] En el año 2009 se realizó la Segunda Jornada Argentina sobre Interfaces Cerebro Computadoras (JAICC 2009). Organizado por el Laboratorio de Ingeniería en Rehabilitación e Investigaciones Neuromusculares y Sensoriales (LIRINS) de Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Entre Ríos. La jornada tuvo un carácter latinoamericano pues se expusieron líneas de investigación no sólo de Argentina sino también de Chile, Colombia y México.

Los trabajos presentados estuvieron enmarcados en el área de las Interfaces Cerebro Computadoras (ICC) basadas en electroencefalograma y potenciales evocados y en el área de las Interfaces Hombre Máquina (IHM) tales como las basadas en señales de electromiograma<sup>30</sup> o electrooculograma<sup>31</sup>, como ser:

- Aspectos neurofisiológicos, tipos de señales y paradigmas.
- Procesamiento digital de señales.
- Reconocimiento de patrones.
- Instrumentación, software y plataformas de experimentación.
- Aplicaciones.

---

<sup>30</sup> El Electromiograma se usa para estudiar el sistema nervioso periférico y los músculos que inerva, y permite diagnosticar enfermedades neuromusculares, así como determinar su intensidad y origen. (<https://www.webconsultas.com/pruebas-medicas/electromiograma-12209> Consultado el 14-12-2021)

<sup>31</sup> El electrooculograma es un examen que consiste en colocar pequeños electrodos cerca de los músculos de los ojos para medir el movimiento de estos. (<https://es.wikipedia.org/wiki/Electrooculograma> Consultado el 14-12-2021)

Desde entonces se han identificado iniciativas y esfuerzos de investigadores orientados hacia tecnologías no invasivas y mayormente en ambientes académicos. En Argentina todavía no ha tenido un estado de madurez necesario para su desarrollo en entornos comerciales.

Pueden encontrarse publicaciones de investigadores argentinos sobre la tecnología BCI, desde el año 2010 hasta el 2017 en el sitio web de la Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Entre Ríos [41], en el sitio web de la Universidad Nacional del Litoral – Research Institute for Signals, Systems and Computational Intelligence [42]

## 4. Usos y Aplicaciones

La tecnología BCI posibilita el uso en distintos ámbitos de aplicación, que abarcan desde el ámbito médico hasta el lúdico. La siguiente figura permite apreciar los usos y aplicaciones de los Sistemas BCI.



Figura 24: Usos y Aplicaciones de un BCI<sup>32</sup>

### 4.1 Aplicaciones médicas

El campo de la salud tiene una variedad de aplicaciones que podrían aprovechar las señales cerebrales en todas las fases asociadas a algunas enfermedades o trastornos, incluyendo la prevención, la detección, el diagnóstico, la rehabilitación y la restauración, como se muestra en la siguiente figura:



Figura 25: Campo de aplicación médica de los BCI<sup>33</sup>

<sup>32</sup> Imagen adaptada de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110866515000237> [24]

<sup>33</sup> Imagen extraída y adaptada de [24]

Según la iniciativa de la Comisión Europea para la investigación de la interfaz cerebro-ordenador, *Brain/Neural Computer Interaction Horizon 2020*, los escenarios típicos de aplicación de los BCI son: [43]

- a) Sustituir el sistema nervioso central (SNC) natural como resultado de una enfermedad o lesión. Por ejemplo, ayudar en un trastorno grave de la comunicación o controlar la silla de ruedas motorizada.
- b) Restablecer las funciones naturales del SNC perdidas. Puede ser la estimulación eléctrica de los músculos de una persona paralizada o el restablecimiento de la función de la vejiga mediante la estimulación de los nervios periféricos
- c) Mejorar el rendimiento del SNC. Algunos ejemplos son los dispositivos para pilotos y conductores que alertan de los lapsos de atención durante la conducción o el pilotaje
- d) Complementar la salida natural del SNC proporcionando un brazo robótico o una opción de selección mediante un joystick
- e) Mejorar el rendimiento del SNC durante la rehabilitación de un accidente cerebrovascular detectando y mejorando las señales de una zona cortical dañada para estimular los músculos con el fin de mejorar los movimientos.
- f) Ayudar en la investigación del SNC en estudios clínicos y no clínicos

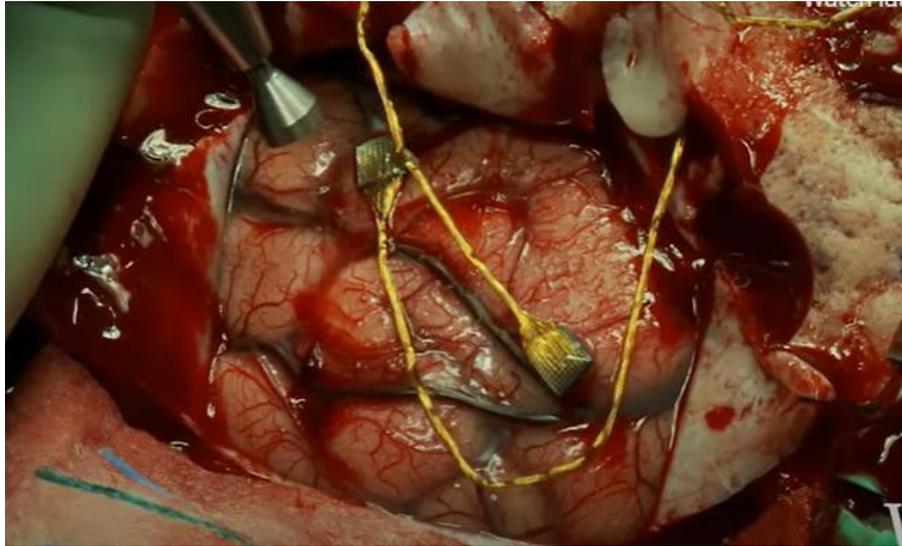


**Figura 26:** escenarios típicos de aplicación de los BCI [43]

En los últimos años gracias al avance en la Neurotecnología, los dispositivos BCI han adquirido gran importancia por su posibilidad de generar aplicaciones para personas con discapacidad y su uso como medios para rehabilitación.

En este sentido un equipo de científicos de la Universidad Johns Hopkins en colaboración con la Universidad de Utah, implantaron unos

sensores dentro del cráneo de Erik Sorto, en contacto directo con regiones diferentes del cerebro.



**Figura 27:** Sensores implantados en el cráneo de Erik Sorto [44]

Estos sensores, con casi cien puntos de contacto con el cerebro, permitieron registrar la actividad eléctrica de sus neuronas. Dicha actividad eléctrica se envió a un brazo mecánico que la interpretó y la tradujo en comandos.

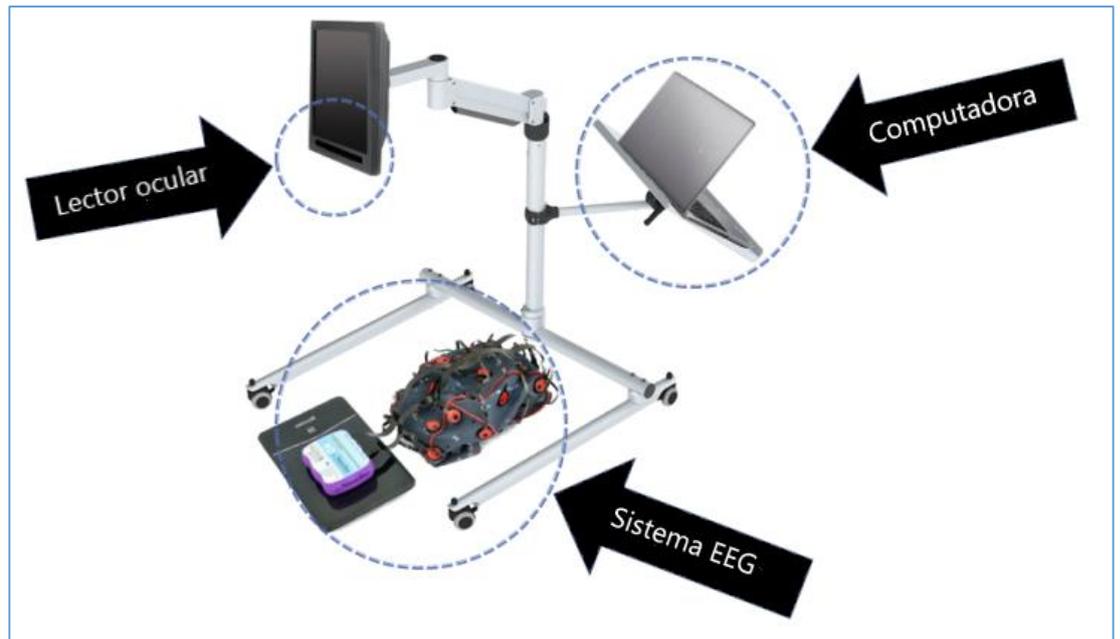
De este modo, Erik Sorto, un norteamericano de 34 años inmovilizado desde el cuello hasta abajo desde los 21 años, pudo beber por primera vez en 13 años una cerveza por sí mismo. Todo ello simplemente pensando en agarrar la cerveza para que el brazo mecánico la tome. [44]



**Figura 28:** Erik Sorto moviendo el brazo robótico con su pensamiento [44]

En el año 2020, los científicos Palani Thanaraj, K., Parvathavarthini, B., Tanik, U., Rajinikanth, V., Kadry, S., Kamalanand, K. en su estudio *“Implementation of Deep Neural Networks to Classify EEG Signals using Gramian Angular Summation Field for Epilepsy Diagnosis”* [45] aprovechando las ventajas de utilizar enfoques de aprendizaje profundo en tareas de clasificación de imágenes para la clasificación de señales de EEG, demostraron la eficacia de esto para la detección de la epilepsia. De forma tal que pueda realizarse un diagnóstico temprano.

En otro orden de aplicación médica, los Doctores Andrew Gerónimo y Zachary Simmons del Penn State Hershey Medical Center de Estados Unidos, desarrollaron un sistema BCI para para mejorar las vidas de las personas con ELA (Esclerosis Lateral Amiotrófica), mediante la ampliación de su capacidad para comunicarse. [46]



**Figura 29:** Sistema BCI para pacientes con ELA [46]

#### **4.2 Neuroergonomía y entorno inteligente**

En el proyecto «Brain-Computer Interface for cognitive training and domotic assistance against the effects of ageing», financiado en la convocatoria de proyectos Cero de la Fundación General del CSIC (Consejo Superior de Investigación Científica de España), se pretende desarrollar nuevas aplicaciones asistidas mediante sistemas BCI basados en imágenes motoras y en potenciales P300. Estas aplicaciones permitirán entrenar diferentes procesos cognitivos y controlar múltiples dispositivos de climatización y calefacción, de iluminación, de entretenimiento (TV, DVD, equipos de música, etc.) y de comunicación (control del teléfono). [47]

#### **4.3 Neuromarketing y publicidad**

Los investigadores de la tecnología BCI han tenido especial interés en el ámbito del *marketing* y la publicidad. En su estudio *The study of brain activity during the observation of commercial advertising by using high resolution EEG techniques*, los investigadores Vecchiato G, Astolfi L, De Vico Fallani F, Salinari S, Cincotti F, Aloise F, Mattia D, Marciani MG, Bianchi L y Soranzo R demostraron las ventajas de utilizar la evaluación del EEG para los anuncios de televisión relacionados con los ámbitos comercial y político.

En esa misma línea de investigación, otros científicos se han interesado en medir la atención generada que acompaña a la actividad de observación y en estimar la memorización de los anuncios de televisión, proporcionando así otro método para la evaluación de la publicidad. [43] [48]

#### **4.4 Educación y autorregulación**

Las aplicaciones BCI orientadas a la neuroretroalimentación o por su nombre en inglés *neurofeedback*, tienen como objetivo mejorar el rendimiento cerebral mediante la auto modulación de la actividad cerebral. Proporciona un medio para mejorar los enfoques terapéuticos cognitivos, para la regulación emocional, para combatir el sentimiento de depresión, así como otros trastornos neuropsiquiátricos a través de sesiones de entrenamiento. También se ha aplicado en competiciones deportivas para controlar el estrés que las acompaña. [43]

#### **4.5 Juegos y ocio**

Un ejemplo sencillo de un dispositivo BCI en este ámbito es *BrainArena*. Los jugadores pueden participar en un juego de fútbol colaborativo o competitivo mediante dos BCI. Pueden marcar goles imaginando movimientos de la mano izquierda o derecha.

Otro ejemplo es *Brainball*. Este dispositivo permite el movimiento de una pelota por un tablero y lo hace mediante la detección de relajación del usuario. Pretende reducir el nivel de estrés. Los usuarios sólo pueden mover la pelota si se relajan; así, el jugador más tranquilo tiene más probabilidades de ser el ganador y, por tanto, aprendería a controlar su estrés mientras se divierte.

Existen juegos en el que se hacen volar helicópteros a cualquier punto de un mundo virtual en 2D o 3D.

Otro tipo de interfaz, además de interpretar acciones básicas, también se basa en el estado emocional de usuario, siendo capaces de reconocer la excitación, tensión, aburrimiento, meditación, frustración, inmersión, etc. como es el caso del dispositivo Emotiv EPOC. [43] [49]

#### **4.6 Seguridad y autenticación**

Todas las personas tenemos una actividad cerebral diferente en los dominios temporales, frecuenciales y espaciales.

La biometría cognitiva, es un área de investigación emergente que investiga cómo se pueden utilizar diferentes bioseñales para autenticación e identificación.

La señal EEG se ha utilizado con éxito para la identificación de usuarios (seleccionar la identidad del usuario de entre un conjunto de identidades) y autenticación de usuarios (verificar si una identidad de usuario declarada es verdadera). Otro mecanismo de autenticación es el denominado “*Pass-thoughts*”, en lugar de escribir una contraseña, requiere que el usuario piense en una contraseña. Se muestra una matriz que contiene caracteres a un usuario y éste se concentra en los caracteres necesarios para deletrear la contraseña. [43] [50]

#### **4.7 Ámbito militar**

La Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa de los Estados Unidos (DARPA) está investigando el uso de esta tecnología con propósitos beligerantes, El programa de Neurotecnología no quirúrgica de próxima generación (N3) tiene como objetivo desarrollar interfaces cerebro-máquina bidireccional de alto rendimiento para miembros del servicio sin discapacidad. Dichas interfaces serían la tecnología que permitiría diversas aplicaciones de seguridad nacional, como el control de vehículos aéreos no tripulados y sistemas de ciberdefensa activa, o el trabajo en equipo con sistemas informáticos para realizar con éxito tareas múltiples durante misiones militares complejas. [51]

## 5. Hacking cognitivo

La Neurotecnología es el conjunto de métodos e instrumentos que permiten una conexión directa de dispositivos técnicos con el sistema nervioso. Estos dispositivos que fueron creados inicialmente con objetivos de ayudar a resolver problemas que con el tiempo casi todo el mundo tiene como por ejemplo: pérdida de memoria, pérdida auditiva, ceguera, parálisis, depresión, insomnio, dolor extremo, convulsiones epilépticas, ansiedad, adicciones, daño cerebral, ataque cerebral isquémico o hemorrágico y que posibilitan además la extracción de datos de la mente (o al menos de aspectos estructurales de la mente ricos en información) pueden ser utilizados potencialmente no solo para inferir las preferencias mentales, sino también para incitar, implantar o activar esas preferencias. [52]

Actualmente la tecnología BCI no solo permite leer la actividad neuronal con ayuda de software de procesamiento de inteligencia artificial, sino también para escribir en el cerebro. Se abre entonces la perspectiva a los riesgos asociados con el mal uso de estas tecnologías. Desde la misma, los BCI son potencialmente vulnerables a la ciberdelincuencia, a lo que podríamos denominar "cibercrimen neuronal", mediante el cual se amplía el rango de los delitos informáticos a los dispositivos neuronales.

Un tipo especial de neurocrimen, "*brain-cracking*" o "*brain-hacking*", es el que explota el dispositivo neuronal para acceder en forma ilícita a la información y manipularla de forma semejante a cuando se hackean las computadoras.

El hacking cerebral [53] es la aplicación de técnicas y/o tecnologías para afectar al estado mental, los procesos cognitivos o el nivel de funcionamiento de un individuo. Estos esfuerzos pueden ser aplicados intencionalmente por el individuo como una herramienta para el desarrollo personal o por un empleador como parte de las iniciativas de bienestar y productividad de los empleados, si esos esfuerzos son de naturaleza ilícita se corresponde con lo que Lenca y Haselager denominan neurocrimen.

lenca y Haselager (2016) han introducido la noción de brainhacking malicioso para referirse a las actividades neurocriminales que influyen directamente en la computación neuronal de los usuarios de neurodispositivos de una manera similar a como se hackean las computadoras en los crímenes informáticos. [54]

Centrándose en las interfaces cerebro-computadora (BCIs), los investigadores identifican cuatro tipos de brainhacking malicioso basados en los diferentes niveles del ciclo de la BCI donde el ataque puede ocurrir. Tres de estos tipos (esto es, cuando el ataque se produce al nivel de la medición, de la decodificación o de la retroalimentación) pueden implicar la manipulación directa de la computación neuronal de una persona. Los agentes maliciosos pueden añadir ruido o anular la señal enviada al dispositivo con el propósito de disminuir o eliminar el control del sujeto de estudio sobre la aplicación, o incluso sustituir el control voluntario de la víctima. Por ejemplo, un criminal podría anular la señal enviada por el sujeto de estudio<sup>34</sup> del BCI y tomar control del dispositivo manejado por el BCI (por ejemplo, un Smartphone o una silla de ruedas electrónica) sin el permiso del usuario<sup>35</sup> del dispositivo. [34]

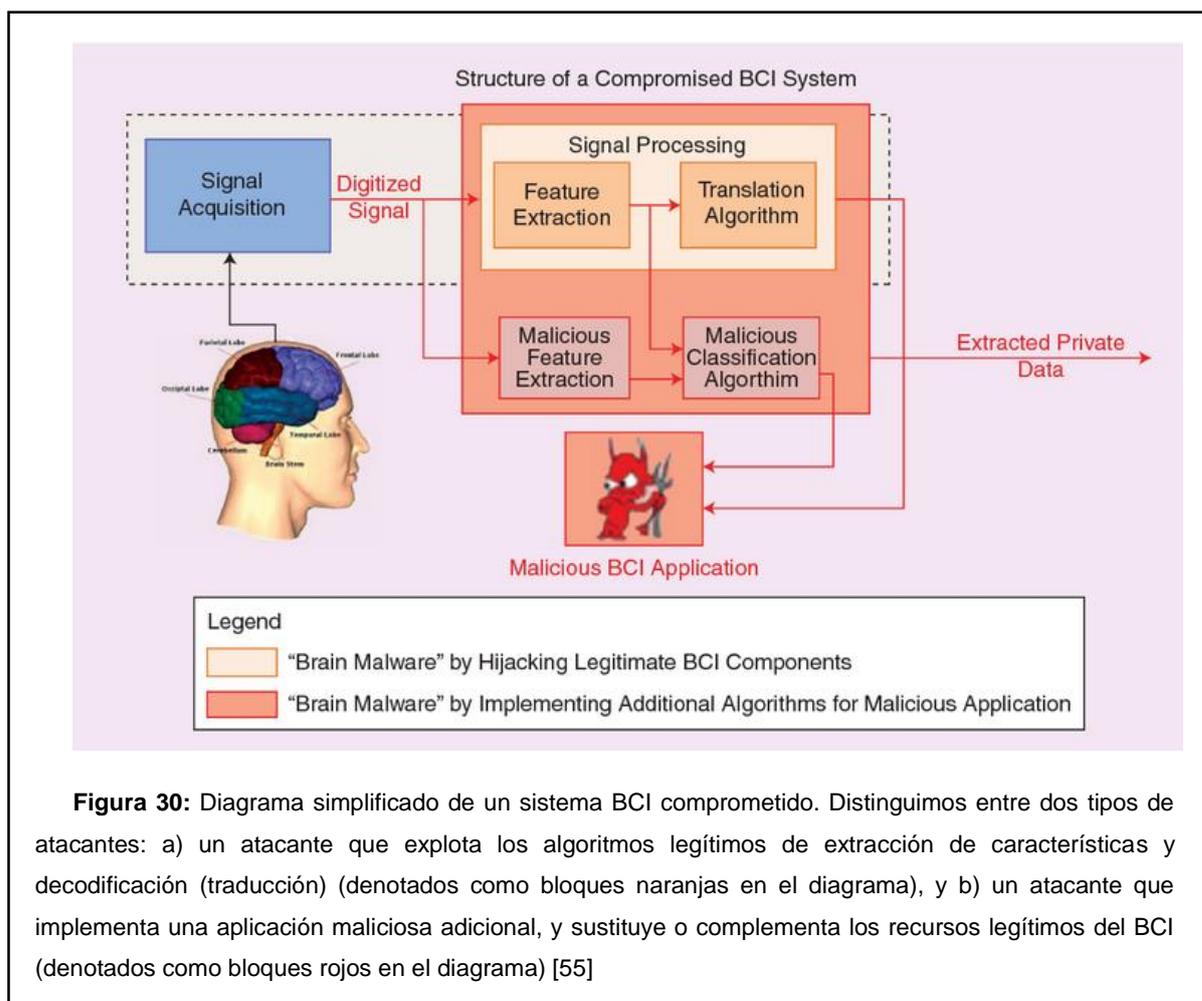
## **5.1 Ciberataque a dispositivos BCI para interrumpir la señal neuronal. [50]**

El avance de la tecnología y las comunicaciones ha posibilitado el desarrollo de las tecnologías BCI y la miniaturización de los dispositivos para facilitar su implante e integración en el cerebro sin mayores dificultades. Junto con este avance crece también la exposición a ciberataques que puedan afectar la actividad natural de las neuronas. Como estos dispositivos estimulan regiones específicas del cerebro un atacante podría enviar señales eléctricas maliciosas al cerebro alterando la terapia de estimulación. Este tipo de ataque es denominado crimen neuronal directo [55]

---

<sup>34</sup> Es la persona que genera las señales cerebrales con que se activa todo el sistema BCI, es quien tiene el gorro, vincha, casco o dispositivo implantado.

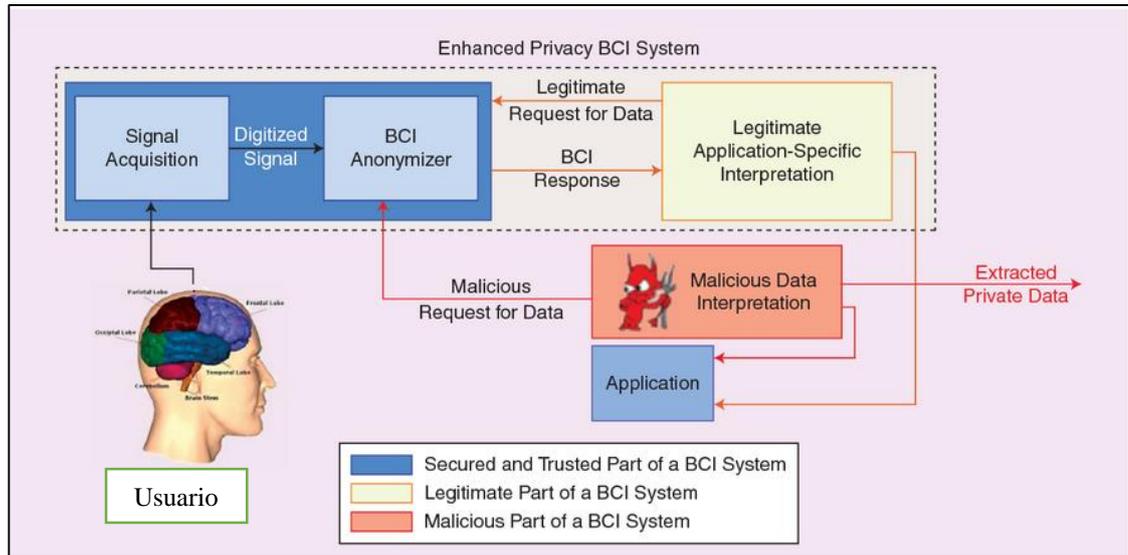
<sup>35</sup> Es la persona que genera las señales cerebrales con que se activa todo el sistema BCI, es quien tiene el gorro, vincha, casco o dispositivo implantado.



En otra instancia, el acceso ilimitado a las señales de ondas cerebrales del sujeto de estudio permitiría extraer información privada del mismo, atacando la transmisión de las ondas al dispositivo asociado al BCI. Este tipo de ataque es denominado neurocrimen indirecto. Para evitar la extracción mencionada es menester la anonimización de las señales neuronales antes de su almacenamiento y transmisión.

Los investigadores Bonaci, T., Calo, R. y Chizeck, J. (2014) en su estudio "App Stores for the Brain: Privacy & Security in Brain-Computer Interfaces" describen un enfoque de ingeniería para mejorar la privacidad y la seguridad neuronal, el uso del "BCI Anonymizer". La idea básica del mismo es preprocesar las señales neuronales antes de ser almacenadas y transmitidas, para eliminar toda la información excepto los comandos BCI específicos. Para prevenir la fuga de información no intencional, nunca se transmiten ni almacenan señales neuronales sin procesar ni los componentes de la señal que no sean explícitamente necesarias para el propósito de comunicación y control del BCI. Puede realizarse tanto en hardware o en

software, como parte del dispositivo BCI del usuario (ver figura), pero no como parte de cualquier red externa o plataforma computacional.



**Figura 31:** Diagrama simplificado de un BCI con el subsistema BCI Anonymizer. Un componente de interpretación legítimo (indicado como bloque naranja claro en el diagrama) solicita datos y recibe la respuesta del anonimizador BCI (indicado como bloque azul claro en el diagrama). Los componentes maliciosos, añadidos por el atacante (indicados como bloque rojo en el diagrama), pueden solicitar datos, pero no recibirán una respuesta del anonimizador BCI. Además, un atacante no puede acceder a los estados y funcionalidades del componente BCI Anonymizer ni interactuar con el bloque de Aplicación. [55]

El neurocrimen indirecto, consiste en el ataque al sistema que interconecta la información cerebral con el dispositivo, o al dispositivo receptor o bien a los dispositivos controlados neuralmente, con fines delictivos. En un estudio presentado por unos investigadores en el Simposio de Seguridad USENIX de 2012, la primera aplicación maliciosa habilitada para BCI no invasivo, denominada "software espía del cerebro", demostró la viabilidad de ataques de canal lateral<sup>36</sup> a estos dispositivos para obtener información privada y sensible como información bancaria, geolocalización y fecha de nacimiento entre otros. [52]

Los investigadores Bonaci, T., Ryan C. y Howard, J. en su estudio "On the Feasibility of Side-Channel Attacks with Brain-Computer Interfaces" [53] diseñaron e implementaron experimentos que demostraron la posibilidad de

<sup>36</sup> Side channel attacks (su nombre en inglés)

ataques para revelar la información privada y secreta de un usuario de un dispositivo de entretenimiento disponible en el mercado, el Emotive EPOC<sup>37</sup>.



En el estudio mencionado, analizaron la viabilidad de esos ataques y demostraron que fueron capaces de revelar información sobre el mes de nacimiento del usuario, su zona de residencia, personas conocidas por el usuario, número de PIN, el nombre de su banco y su tarjeta bancaria preferida.

En el año 2010, el Ing. Cody Brocius con su “Proyecto Cody Emokit”, realizó ingeniería inversa del protocolo utilizado por los auriculares Emotiv EPOC EEG, publicando la clave AES utilizada para cifrar los datos del sensor.

Los siguientes ciberataques (neurocrimen directo) estudiados tienen como base los ciberataques a redes informáticas. Los BCI bidireccionales centrados en la comunicación entre el cerebro y el dispositivo, permiten la adquisición de las señales de la actividad neuronal y la neuroestimulación<sup>40</sup>. Los investigadores López Bernal, S., Huertas Celdrán, A., Martínez Pérez, G. (2021). A Review of Cyberattacks on Miniature Brain Implants to Disrupt Spontaneous Neural Signaling, plantearon que las vulnerabilidades existentes en los dispositivos de estimulación introducen la posibilidad de realizar

<sup>37</sup> <https://www.emotiv.com/> Consultada el 14-12-2021

<sup>38</sup> Imagen extraída de [52]

<sup>39</sup> Imagen extraída de [www.Emotive.com](http://www.Emotive.com)

<sup>40</sup> La neuroestimulación es la modulación intencional de la actividad del sistema nervioso utilizando medios invasivos o no invasivos. La neuroestimulación generalmente se refiere a los enfoques electromagnéticos de la neuromodulación. (<https://en.wikipedia.org/wiki/Neurostimulation> 27-12-2021)

ciberataques neuronales para interrumpir el comportamiento neuronal. Definieron dos nuevos ciberataques neuronales denominados Neuronal Flooding y Neuronal Scanning. [56] [57]

### **5.1.1 Inundación neuronal (*Neuronal Flooding* - FLO)**

En el mundo cibernético, un ciberataque de inundación está diseñado para hacer caer una red o un servicio colapsándola con grandes cantidades de tráfico de red. El tráfico suele ser generado por uno o muchos atacantes (a este último caso se lo denomina distribuido) y se reenvía a una o más víctimas. Extrapolando esta ciberamenaza de red al cerebro, un ataque “Neuronal Flooding” consiste en estimular múltiples neuronas en un instante de tiempo determinado, cambiando el comportamiento normal del proceso de estimulación y generando un impacto de sobreestimulación.

### **5.1.2 Exploración neuronal (*Neuronal Scanning* - SCA)**

En el mundo cibernético, un ciberataque de escaneo de puertos (o “port scanning”) es realizado por los atacantes para descubrir vulnerabilidades en los sistemas operativos, programas y protocolos que utilizan las comunicaciones de red. Su objetivo es probar cada puerto de una máquina de la red, comprobando si está abierto y descubriendo el protocolo o servicio disponible en ese punto final. En el contexto del cerebro, un ciberataque de escaneo neuronal (SCA) estimula neuronas secuencialmente, impactando sólo una neurona por instante de tiempo para obtener la señal neuronal.

## **5.2 Ciberataque a dispositivos BCI para comprobar las vulnerabilidades de seguridad y privacidad de la información.**

Sundararajan, K. (2017) en su investigación “Privacy and security issues in Brain Computer Interface” [58] estudió el BCI no invasivo “Emotiv Insight”<sup>41</sup>, un auricular con 5 canales de EEG que se utiliza para monitorizar la actividad cerebral y controlar dispositivos externos como sillas de ruedas electrónicas y brazos robóticos, para examinar los controles de seguridad y privacidad en el uso de los auriculares, el dispositivo y el emparejamiento de los mismos. Analizó las distintas posibilidades de capturar la información

---

<sup>41</sup> <https://www.emotiv.com/product/emotiv-insight-5-channel-mobile-eeeg/>

transmitida desde el BCI y comprobó la viabilidad de ataques, y la identificación de la vulnerabilidad.

Utilizando el ataque de intermediario (o por su nombre en inglés man-in-the-middle<sup>42</sup>) los ataques que el autor pudo comprobar en un escenario de laboratorio fueron:

- Espionaje pasivo: La información fue capturada pasivamente y grabada en un archivo .pcap. La información incluía datos publicitarios, direcciones MAC del Emotiv Insight y el smartphone, la clave de cifrado, los datos intercambiados entre los dos dispositivos y la solicitud de conexión.
- Interceptación activa: Los datos transmitidos desde el smartphone fueron activamente interceptados. Todos los datos destinados a ser transmitidos al Emotiv Insight podían ser interceptados y también podían ser descartados provocando el mal funcionamiento del Emotiv Insight.
- Denegación de servicio: se utilizó el sniffer<sup>43</sup> Ubetooth-one<sup>44</sup> para causar una interferencia de radiofrecuencia emitiendo datos falsos e impidiendo que el Emotiv Insight se conectase al smartphone.
- Ataque de repetición (replay attack): Los datos que fueron interceptados activamente podrían reproducirse de nuevo en el Emotiv Insight y también podrían ser reproducidos en bucle para realizar la misma acción repetidamente.

---

<sup>42</sup> Es un tipo de ataque basado en interceptar la comunicación entre 2 o más interlocutores, pudiendo suplantar la identidad de uno u otro según lo requiera para ver la información y modificarla a su antojo, de tal forma que las respuestas recibidas en los extremos pueden estar dadas por el atacante y no por el interlocutor legítimo (<https://www.incibe.es/protege-tu-empresa/blog/el-ataque-del-man-middle-empresa-riesgos-y-formas-evitarlo> Consultado el 17-12-2021)

<sup>43</sup> Es un rastreador de red, es una herramienta de software que supervisa o detecta los datos que fluyen a través de los enlaces de red de los ordenadores en tiempo real. Puede ser un programa de software autónomo o un dispositivo de hardware con el software o firmware adecuado. (<https://tecnonautas.net/que-es-un-sniffer-de-red-y-como-funciona/> Consultado el 19-12-2021)

<sup>44</sup> Una plataforma de desarrollo inalámbrica de 2,4 GHz de código abierto adecuada para la experimentación con Bluetooth. (<https://github.com/greatscottgadgets/ubetooth/> Consultado el 19-12-2021)

- Ataque de modificación de datos: Los datos interceptados podrían ser modificados, y luego ser reenviados al Emotiv Insight. Un comando específico, como un comando push, podría cambiarse por un comando completamente diferente, haciendo que Emotiv Insight realice una función diferente a la que se espera que haga.

Para mitigar los ataques a la privacidad, los investigadores Martínez Beltrán, E., Bernal López, S., Quiles, M., Huertas, A. (2021) en su estudio “SecBrain: A Framework to Detect Cyberattacks Revealing Sensitive Data in Brain-Computer Interfaces” [59] proponen un marco para detectar ciberataques que revelen datos sensibles en el uso de los BCI. Este marco fue denominado SecBrain, para la detección de P300s generados por estímulos visuales. Para ello aplican un mecanismo de hash tanto a los datos utilizados para el muestreo de imágenes como a los datos recibidos del EEG, e implementan mecanismos de cifrado a los sockets que intercambian los datos, evitando así una posible fuga de información. SecBrain automatiza estas técnicas para detectar cualquier amenaza que pueda comprometer el ciclo de vida del BCI.

### **5.3 Ataques a la Ciberseguridad y a la Seguridad en cada fase del ciclo del BCI**

El avance tecnológico del paradigma de la web 4.0<sup>45</sup> sumado a la tecnología IOT del Internet de las Cosas y tecnologías 6G trae a la realidad enfoques futuristas como la comunicación entre cerebros o “*Brain to Brain*” (BtB), cerebros conectados a la nube “*Brain to Cloud*” (B/CI), cerebros conectados a internet o “*Brain to Internet*”, redes de cerebros interconectados o “Brainet” que requerirán de normas y soluciones de seguridad basadas en los conceptos de seguridad por diseño y privacidad por diseño.

---

<sup>45</sup> La web 4.0 es la internet de las máquinas que entienden a los humanos y que aprenden cuanto más se usan (utilizan algoritmos de aprendizaje automático o Machine Learning). Es la internet de los pequeños bots, de los agentes inteligentes que chatean cual humanos, de las casas inteligentes, de las ciudades inteligentes. (<https://www.uvic.cat/formacio-continua/es/actualidad/la-web-40-la-internet-de-las-maquinas-inteligentes> Consultado el 20-12-2021)

Conscientes de esta compleja problemática, los investigadores López Bernal, S., Huertas Celdrán, A., Martínez Pérez, G., Barros, M. y Balasubramaniam, S. (2020), en su estudio “Security in Brain-Computer Interfaces: State-Of-The-Art, Opportunities, and Future Challenges” [31] basado en la literatura existente y análisis propio, identificaron los problemas de seguridad en cada fase del ciclo de vida de los dispositivos BCI, los ataques aplicables a cada fase del ciclo, el impacto generado por los ataques y las contramedidas para mitigarlos. Las métricas utilizadas para la evaluación de los ataques de seguridad contra los sistemas BCI fueron<sup>46</sup>:

- **Integridad:** La Integridad es la propiedad de la información, por la que se garantiza la exactitud de los datos transportados o almacenados, asegurando que no se ha producido su alteración, pérdida o destrucción, ya sea de forma accidental o intencionada, por errores de software o hardware o por condiciones medioambientales.
- **Confidencialidad:** Confidencialidad es la propiedad de la información, por la que se garantiza que está accesible únicamente a personal autorizado a acceder a dicha información.
- **Disponibilidad:** Se trata de la capacidad de un servicio, un sistema o una información, a ser accesible y utilizable por los usuarios o procesos autorizados cuando éstos lo requieran.
- **Seguridad,** en el contexto de las tecnologías BCI, el concepto de seguridad se refiere a la preservación de la integridad física de los usuarios de estos dispositivos.

---

<sup>46</sup> Definiciones consultadas en [https://www.incibe.es/sites/default/files/contenidos/guias/doc/guia\\_glosario\\_ciberseguridad\\_metad.pdf](https://www.incibe.es/sites/default/files/contenidos/guias/doc/guia_glosario_ciberseguridad_metad.pdf) Consultado el 21-12-2021

Fase	Integridad	Confidencialidad	Disponibilidad	Seguridad
1. Adquisición de la señal	(+) Estímulos externos maliciosos: Alterar las ondas cerebrales adquiridas (-) Ataque de repetición y suplantación: impersonar las ondas cerebrales legítimas	(-) Estímulos externos maliciosos: adquiere información neural de naturaleza privada (por ejemplo, pensamientos, emociones o creencias)	(-) Estímulos externos maliciosos: interrumpen la generación de ondas cerebrales (-) Ataque de ruido: interrumpen el proceso de adquisición	(+) Ataques a la integridad y seguridad de la fase 1 (por ejemplo, interrumpir el control de una silla de ruedas)
2. Preprocesamiento	(+) Ataque de malware: alterar las señales neuronales adquiridas	(+) Ataque de malware: recopilar la información neuronal adquirida	(+) Ataque de malware: interrumpir el procesamiento	(+) Integridad y seguridad ataques de la fase 2 (por ejemplo, alterar los asistentes neurales del habla)
3. Extracción de características	(+) Ataque de malware: uso de características maliciosas	(+) Ataque de malware: obtener acceso a las características	(+) Ataque de malware: alterar el proceso de extracción para evitar la generación de la acción	(+) Integridad y seguridad ataques de la fase 3 (por ejemplo, alterar los sistemas de monitoreo neural)
4. Clasificación	(+) Ataque de malware: enviar acciones maliciosas a la aplicación y al modelo de aprendizaje automático	(+) Ataque de malware: Obtener acceso al módulo o al software de aprendizaje automático	(+) Ataque de malware: evitar comunicación con la aplicación y el sistema de aprendizaje automático	(+) Integridad y seguridad ataques de la fase 4 (por ejemplo, alterar los asistentes de escritura mental)
5. Salida	(-) Ataque Man-in-the-middle: interceptar y modificar la acción enviada a las aplicaciones del BCI	(-) Ataque de espionaje: adquirir información enviada a sistemas o dispositivos externos	(+) Ataque de denegación de servicio: suprimir la salida enviada a Aplicaciones BCI	(+) Ataque de malware: transmitir acciones peligrosas para las aplicaciones BCI
6. Aplicaciones	(-) Ataque de suplantación de identidad: crear aplicaciones maliciosas (+) Ataque de desconfiguración de la seguridad: acceso no autorizado (+) Ataque de desbordamiento del búfer: ejecución de comandos maliciosos	(+) Ataque de malware, inyección, desbordamiento del búfer, desconfiguración de la seguridad: adquisición de información sensible manejada por las aplicaciones BCI	(+) Malware, inyección, desbordamiento del búfer, seguridad Ataque de falsa figuración: denegación de servicio sobre aplicaciones BCI	(+) Ataque de malware: genera daños físicos (por ejemplo, movimientos peligrosos de las prótesis)

**Figura 34:** Ataques a la Ciberseguridad y Seguridad en cada fase del ciclo BCI<sup>47</sup>

<sup>47</sup> Imagen extraída de [56]

## Definición de ataques detectados en el ciclo de los sistemas BCI

Ataque	Descripción
Ataques de adversarios	Presentación de entradas elaboradas intencionalmente a un sistema de aprendizaje automático para alterar su funcionamiento y salida normales.
Ataque de estímulo engañoso	Presentación de estímulos sensoriales o motores maliciosos a los usuarios con el objetivo de generar una respuesta neuronal específica
Ataque de desbordamiento de buffer	Acceso a espacios de memoria fuera de límites debido a implementaciones de software inseguras. Se aprovechan las operaciones sobre búferes de memoria cuyos límites no están bien gestionados.
Ataque criptográfico	Explotar vulnerabilidades en los elementos que definen un sistema, como algoritmos, protocolos o herramientas. Una variedad de técnicas enfocadas a evadir las medidas de seguridad de los sistemas criptográficos.
Ataque de <i>firmware</i>	Extraer o modificar el <i>firmware</i> de un dispositivo, una pieza crítica de software que controlar su hardware.
Ataque de agotamiento de batería	Consumen la batería de un dispositivo, reduciendo su rendimiento o incluso haciéndolo permanentemente inaccesible.
Ataque de inyección	Presentar una entrada a un intérprete que contenga elementos particulares que puedan modificar cómo se ha parseado, aprovechando la falta de verificación de la entrada.
Ataque de <i>malware</i>	Uso de hardware, software o <i>firmware</i> con el objetivo de obtener acceso a dispositivos informáticos para realizar acciones maliciosas de forma intencionada.
Ataque de <i>ransomware</i>	Cifrar los datos de los usuarios y exigir después un rescate económico para descifrarlos
Ataque de <i>sniffing</i>	Adquisición de información privada mediante la escucha de un canal de comunicación. Cuando los datos no están cifrados, los atacantes tienen acceso al contenido de toda la comunicación.
<i>Man-in-the-middle</i>	Alteración de la comunicación entre dos entidades, haciendo creer a los extremos que se comunican directamente entre sí.
Ataque de repetición ( <i>replay</i> )	Retransmisión de datos previamente interceptados para realizar una acción maliciosa, como la suplantación de uno de los participantes legítimos de la comunicación.
Ataque de ingeniería social	Manipulación psicológica para obtener acceso a recursos restringidos. Un ejemplo es el <i>phishing</i> basado en la suplantación de una entidad legítima en la comunicación digital.
Ataque de suplantación de identidad ( <i>spoofing</i> )	Enmascarar una entidad de la comunicación, transmitiendo datos maliciosos. Los ataques de suplantación de identidad más frecuentes en las comunicaciones de red son, entre otros, el IP spoofing y el MAC spoofing.

Figura 35: Definición de ataques detectados en el ciclo de los sistemas BCI<sup>48</sup>

## Definición de contramedidas detectadas en el ciclo de sistemas BCI.

Sesiones de entrenamiento, demos y juegos reales	Iniciativas para incrementar la concientización de los usuarios acerca de los riesgos de esta tecnología.
Notificaciones a los usuarios	Alertar a los usuarios en caso de que se detecte un ataque, para que participen en la defensa (por ejemplo dejar de usar el dispositivo)
Antenas direccionales	Antenas que irradien o reciban la energía principalmente en determinadas direcciones, con el objetivo de reducir las interferencias.

<sup>48</sup> Imagen extraída y adaptada de [12]

<b>Análisis del medio</b>	Monitoreo del medio de comunicación para detectar comportamientos anormales
<b>Baja potencia de transmisión</b>	Reducción de la potencia de transmisión para evitar la interceptación de la comunicación por entidades maliciosas
<b>Salto de frecuencia y de canal</b>	Modelos de comunicación inalámbrica basados en patrones de salto pseudoaleatorios previamente conocidos por el emisor y el receptor
<b>Espectro ensanchado</b>	Transmisión de la información en un ancho de banda más amplio para evitar interferencias en el medio inalámbrico
<b>Mecanismos de control de accesos</b>	Medios para detectar e impedir el acceso no autorizado a determinados recursos.
<b>Gestión de privilegios</b>	Asignar privilegios a diferentes grupos de usuarios basados en roles
<b>Listas blancas y negras</b>	Lista de entidades como sistemas o usuarios, qué tienen permitido o prohibido respectivamente, para realizar acciones específicas.
<b>Mecanismos criptográficos</b>	Uso de técnicas de cifrado para proteger la privacidad de los datos, ya que la información desprotegida puede ser accedida y modificada por los atacantes.
<b>Privacidad diferencial</b>	Mecanismo criptográfico basado en la adición de ruido a los datos con el objetivo de suprimir aspectos sensibles, accesibles cuando se combinan con una gran cantidad de datos de un usuario.
<b>Cifrado homomórfico</b>	Mecanismo criptográfico que permite el cálculo de operaciones matemáticas sobre datos cifrados, generando un resultado cifrado.
<b>Codificación funcional</b>	Mecanismo criptográfico en el que disponer de una clave secreta permite conocer una función de los datos cifrados sin revelar los propios datos
<b>Verificación de la autenticidad</b>	Garantizar que los datos a los que accedemos, o el punto final con el que nos comunicamos, es quien dice ser.
<b>Verificación de la legitimidad</b>	Revisar si una aplicación de software malicioso ha sustituido a una legítima
<b>Limitación de características</b>	Asegurar que cualquier software sólo implementa la funcionalidad específica para la que fue concebido
<b>Actualizaciones periódicas</b>	Corregir las vulnerabilidades detectadas e incluir nuevas funcionalidades para reforzar las contramedidas existentes
<b>Lenguajes de programación robustos</b>	Elegir los lenguajes más adecuados teniendo en cuenta sus puntos fuertes y débiles
<b>Técnicas y opciones de compilación</b>	Capacidades específicas de los compiladores para proteger los accesos fuera de límites a la memoria del dispositivo o a los registros de la CPU (buffer overflow)
<b>Hardening de la aplicación</b>	La modificación de una aplicación para hacerla más resistente a los ataques, como por ejemplo la ofuscación del código de la aplicación.
<b>Aplicación segmentada de las arquitecturas</b>	Aislamiento de arquitecturas y sistemas, estableciendo diferentes contenedores y grupos de seguridad para comunicarse entre sí.

<b>Sandboxing</b>	Aislar la ejecución de diferentes programas, permitiendo su protección contra ataques.
<b>Antivirus</b>	Software centrado en la prevención, detección y eliminación de ataques de malware. Los antivirus modernos ofrecen protección contra una gran variedad de amenazas.
<b>Visualización de malware</b>	Técnica centrada en el análisis de binarios de software de forma gráfica para detectar patrones anómalos de malware.
<b>Cuarentena de dispositivos</b>	Aislamiento del software infectado o potencialmente infectado, para evitar su propagación e infección.
<b>Planes de Backup</b>	Copia recurrente de los datos almacenados en una ubicación diferente para permitir su recuperación en caso de pérdida de datos.
<b>Desarrollo de la defensa</b>	Creación de un segundo modelo ML basado en el original, con menos sensibilidad respecto a las perturbaciones de entrada y que ofrece resultados más suaves y generales.
<b>Saneamiento de datos</b>	Rechazo de muestras que puedan producir un impacto negativo en el modelo, preprocesamiento y validando toda la entrada que contenga información adversa.
<b>Entrenamiento de adversarios</b>	Inclusión de muestras de adversarios en el proceso de entrenamiento para permitir el reconocimiento de ataques en el futuro.
<b>Sistemas de monitorización</b>	Captan y analizan el comportamiento de las entidades de un sistema y sus comunicaciones.
<b>Detección de anomalías</b>	Detección de comportamientos extraños en los sistemas que puedan corresponder potencialmente a una situación de ataque.
<b>Firewall (Cortafuegos)</b>	Sistema de ciberseguridad que sólo permite las comunicaciones de red entrantes o salientes previamente autorizadas.
<b>Sistemas de Detección de Intrusos (IDS Intrusion, Detection System)</b>	Análisis de la actividad de la red para identificar las comunicaciones potencialmente dañinas que pretenden interrumpir el sistema.
<b>Interrupción de la comunicación</b>	Detención de una comunicación activa para mitigar el impacto de un ataque si hay evidencia de su presencia.
<b>Validación de entrada</b>	Análisis y preprocesamiento de las entradas presentadas a un sistema para suprimir las posibles causas de fallo.
<b>Randomización o Aleatorización</b>	La modificación de los datos existentes de forma que no siga un patrón determinista y evite fugas de privacidad.
<b>Anonimizador BCI</b>	Anonimización de las señales cerebrales adquiridas del cerebro para ser compartidas sin exponer información sensible de los usuarios.

**Tabla 1:** Definición de contramedidas detectadas en el ciclo de sistemas BCI. Adaptada de [12]

A pesar de las ventajas de estos dispositivos, la literatura ha demostrado que pueden ser vulnerables a múltiples ciberataques, lo que tiene

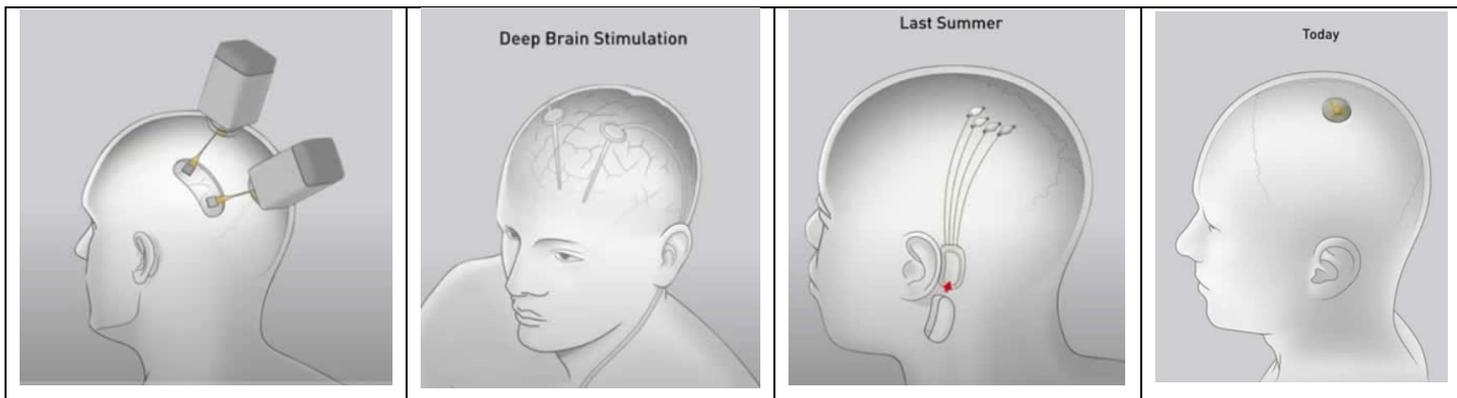
un tremendo impacto en la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los datos y servicios, así como en la seguridad de los usuarios. [57]

## 6 Estado actual de la Tecnología BCI

### 6.1 Neuralink y su plataforma integrada de BCI

En su disertación del 28 de agosto del 2020, Neuralink Progress Update, Summer 2020 [60] Elon Musk<sup>49</sup>, dueño y cofundador de Neuralink<sup>50</sup> presentó una actualización de su dispositivo BCI y expresó que *“el objetivo de la investigación y desarrollo de Neuralink es resolver problemas importantes de la columna vertebral y del cerebro con un dispositivo BCI implantado y que éstos sean asequibles de tal manera que quien lo necesite pueda tener uno”*. Explicó que la actual generación de Neuralink ya no es un chip que va detrás de la oreja, sino que es un *“fitbit”*<sup>51</sup> en el cráneo.

El dispositivo neural consta de 1024 canales, mide 23mm x 8mm, su batería dura todo el día y se recarga por la noche, el dispositivo al cual se conecta es un *smartphone* o teléfono inteligente vía bluetooth con un rango de 5 a 10 m y no es externamente visible como los dispositivos predecesores.



**Figura 36:** Evolución de los dispositivos implantables hasta el *fitbit* actual de Neuralink [60]

El dispositivo es bidireccional, es decir permite leer y escribir en cada canal, posee sensores de movimiento, temperatura y presión. Los filamentos hechos de conductores y aislantes, se insertan en el cerebro en el córtex, y

<sup>49</sup> Elon Reeve Musk es un emprendedor y magnate sudafricano, nacionalizado canadiense y estadounidense. Cofundador de PayPal, SpaceX, Hyperloop, SolarCity, The Boring Company, **Neuralink** y OpenAI. Es director general de SpaceX, de Tesla Motors, presidente de SolarCity y copresidente de OpenAI. ([https://es.wikipedia.org/wiki/Elon\\_Musk](https://es.wikipedia.org/wiki/Elon_Musk) Consultado el 24-12-2021)

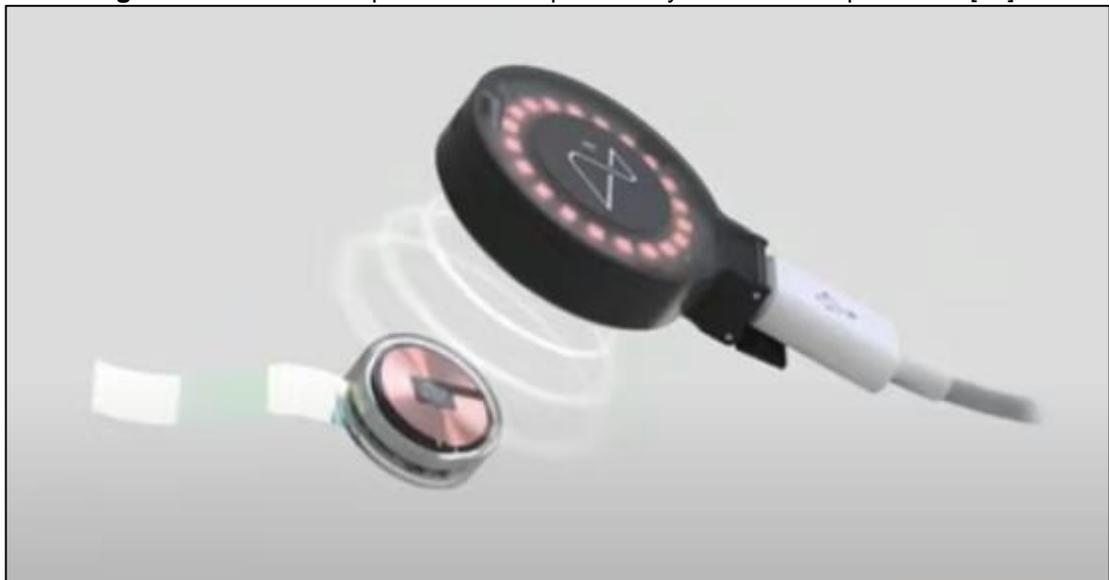
<sup>50</sup> <https://neuralink.com> Empresa de Neurotecnología estadounidense especializada en el desarrollo de interfaces cerebro-computadora, implantables, también conocidos como Brain-Machine Interfaces o BMI, fundada por Elon Musk Consultado el 24-12-2021

<sup>51</sup> Dispositivo portátil diseñado para realizar un seguimiento de la actividad física, para rastrear marcadores importantes de salud y actividad, incluida la frecuencia cardíaca, la calidad del sueño y la cantidad de pasos marcados. (<https://heroesdelaweb.com/TERM/F/fitbit.html> Consultado el 26-12-2021)

son capaces de leer la actividad neuronal. Cada filamento tiene 5 micrones de grosor, y la intención es que duren al menos una década instalados.

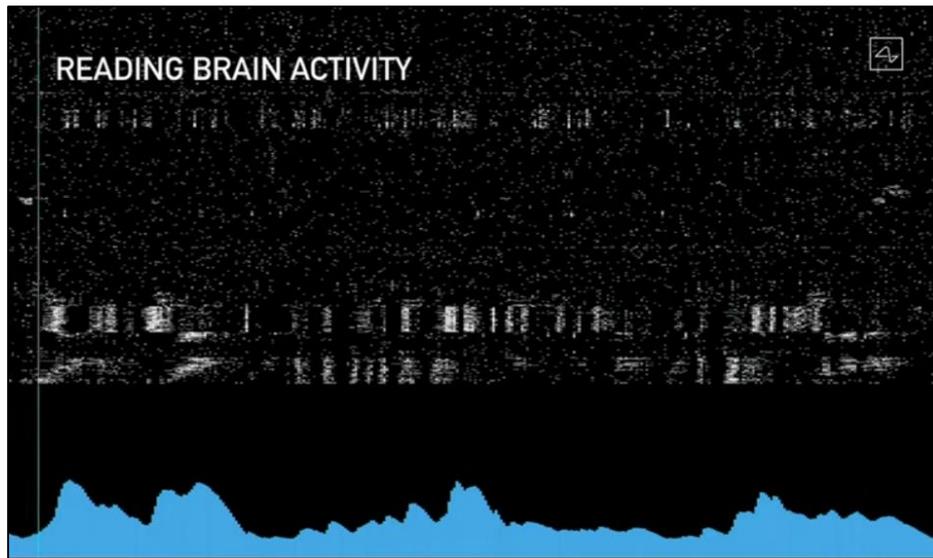


**Figura 37:** Vista del dispositivo BCI implantable y electrodos implantados [60]

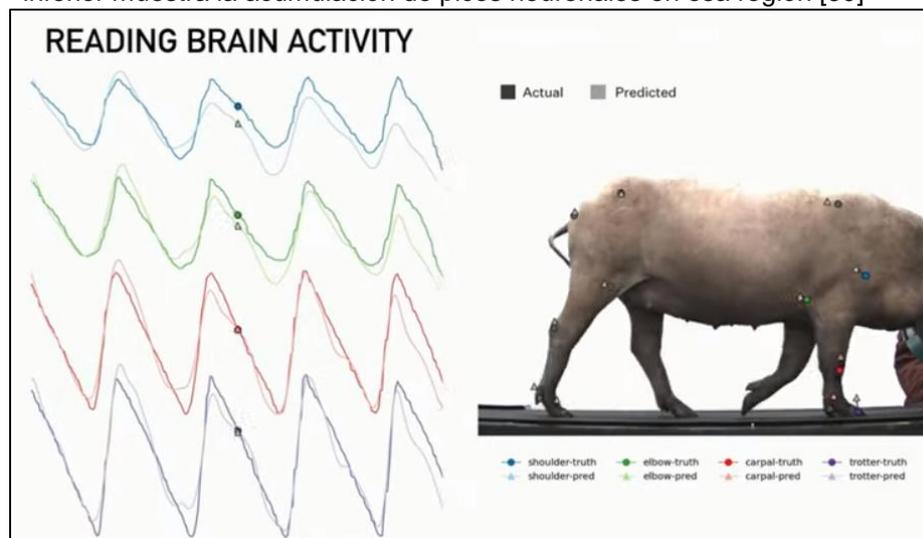


**Figura 38:** El dispositivo se carga inductivamente. El cargador tiene un cable con puerto USB-C [60]

A futuro el objetivo de este BCI es poder leer la actividad neuronal o generar una descarga que le dé una instrucción al cerebro que reemplace una ausente o la corrija, como ceguera, parálisis, problemas de habla, pero todavía se encuentra en fase temprana de investigación.



**Figura 39:** Lectura de la actividad cerebral de un cerdo con un dispositivo neural implantado, cada uno de los puntos representa un pico neuronal. El gráfico azul en la parte inferior muestra la acumulación de picos neuronales en esa región [60]



**Figura 40:** Lectura de la actividad cerebral de un cerdo con implante fitbit, en una cinta de ejercicio, se observa las ondas cerebrales reales al caminar y las que simula una computadora. Un chip podría disparar descargas en el cerebro que estimulen las neuronas correctas y permitan caminar a una persona (o un cerdo, en este caso) [60]

## 6.2 Iniciativas BCI en el mundo [61] [62]

### 6.2.1 Proyecto *Brain*

Rafael Yuste es el impulsor del proyecto Mapa de Actividad Cerebral *Brain Activity Map*, cuyo interés es desarrollar técnicas para mapear la actividad completa de tejidos neuronales y el cerebro. Con tres objetivos bien diferenciados, el primero, es medir la actividad de los circuitos neuronales, el segundo es el desarrollo de técnicas para alterar la actividad cerebral anormal y reencauzarlas y el tercero es analizar los Neurodatos computacionalmente.

Este proyecto fue luego tomado por el entonces presidente de los Estados Unidos Barak Obama en el año 2013 y se convirtió en el proyecto *BRAIN*.

### **6.2.2 Proyecto Cerebro humano o *Human Brian Project***

En el año 2013 la Unión Europea lanzó su Proyecto Cerebro Humano (HBP), un proyecto emblemático de una década de duración financiado conjuntamente por la Comisión Europea, Tecnologías Futuras y Emergentes de la Comisión Europea y los países miembros. Las raíces del HBP están en el Proyecto Blue Brain, una iniciativa de datos cerebrales y de simulación a gran escala con sede en Suiza. Los objetivos del HBP son el desarrollo de una infraestructura científica para la investigación del cerebro y la neurociencia cognitiva; recopilar y difundir datos que describan el cerebro y sus enfermedades; simular el cerebro; construir modelos del cerebro, y el desarrollo de computación informática inspirada en el cerebro, análisis de datos y robots.

### **6.2.3 Proyecto *Blue Brain*<sup>52</sup>**

Blue Brain Project es una iniciativa suiza de investigación sobre el cerebro dirigida por su fundador y director, el profesor Henry Markram.

El objetivo de Blue Brain es establecer la neurociencia de simulación como un enfoque complementario a la neurociencia experimental, teórica y clínica para entender el cerebro, mediante la realización de las primeras reconstrucciones y simulaciones digitales biológicamente detalladas del mundo del cerebro del ratón. Las simulaciones y reconstrucciones basadas en supercomputadoras construidas por Blue Brain ofrecen un enfoque radicalmente nuevo para comprender la estructura y la función multinivel del cerebro.

### **6.2.4 Programa Japan Brain/MINDS (Cerebro/ Mapeo por Neurotecnologías Innovadoras para el estudio de enfermedades)**

---

<sup>52</sup> <https://www.epfl.ch/research/domains/bluebrain/> Consultado el 24-12-2021

En el año 2014, Japón lanzó su programa Japan Brain/MINDS, con tres objetivos, usar un mono tití de corto ciclo de vida, para estudios funcionales, estructurales y genéticos del cerebro, desarrollar herramientas innovadoras para monitorear y manipular diferentes aspectos de la actividad neuronal; y establecer biomarcadores para los trastornos del cerebro.

#### **6.2.5 Proyecto BETTER**

Su objetivo es mediante el uso de BCIs, mejorar las terapias de rehabilitación física de desórdenes de la marcha para personas que han sufrido accidentes vasculares.

#### **6.2.6 Proyecto HIVE (*Hyper interaction viability experiments*)**

Orientado al diseño, desarrollo y testeo de una nueva generación de tecnologías no invasivas de estimulación del cerebro.

#### **6.2.7 Proyecto TREMOR**

Orientado a la validación técnica, funcional y clínica de un nuevo concepto de sistema para reducir el temblor por medio de estimulación eléctrica funcional de los músculos.

#### **6.2.8 Proyecto de Corea del Sur**

En el año 2016, Corea del Sur anunció un proyecto de mapeo cerebral. Las áreas de interés son un atlas del lóbulo parietal del cerebro y un mapa cerebral que aborde las enfermedades cerebrales asociadas al envejecimiento, como parte de un plan de desarrollo de la infraestructura científica del cerebro en el país.

#### **6.2.9 Berlín, Alemania**

El Berlín BCI o BBCI es pionero y actualmente la referente en el desarrollo de herramientas de tratamiento del EEG para sistemas BCI. Su objetivo es, utilizando *machine Learning* y sofisticadas herramientas matemáticas de procesamiento de señal para tratar las EEG, reducir al

máximo si no a cero los tiempos de entrenamiento y calibración de los aparatos, y los efectos de la no estacionalidad de la señal en el tiempo.

#### **6.2.10 Gratz, Austria**

El grupo de Graz, líder europeo en BCI, realiza estudios neuropsicológicos, desarrollo de potentes herramientas de procesamiento de señal para EEG, trabaja en todos los aspectos de los BCI y aplica el conocimiento a deletreadores, juegos, estimulación eléctrica funcional, realidad virtual y a rehabilitación por *neurofeedback*<sup>53</sup>.

#### **6.2.11 Tübingen, Alemania**

El grupo de Tübingen lidera la investigación en la aplicación de la tecnología BCI a pacientes con parálisis cerebral y esclerosis amiotrófica lateral. Este grupo construyó uno de los primeros sistemas no invasivos de comunicación para pacientes reales.

#### **6.2.12 EPFL, Suiza**

El grupo EPFL se especializa en el uso de la tecnología BCI para aplicaciones de inteligencia ambiental, biometría y control de sistemas para rehabilitación como sillas de ruedas o robots. Este grupo fue el primero en demostrar el control efectivo de un robot con el pensamiento y en construir la primera silla funcional controlada con la tecnología BCI.

#### **6.2.13 Fondazione Santa Lucia, Italia**

El trabajo del grupo del Hospital Santa Lucia, está orientado a la aplicación de la tecnología BCI para rehabilitación motora. *Promueve el uso de los BCIs como herramienta de validación (evaluación), como herramienta de rehabilitación en términos de sustitución (por ejemplo, en comunicación y entretenimiento) o recuperación funcional (rehabilitación).*

#### **6.2.14 Otras iniciativas**

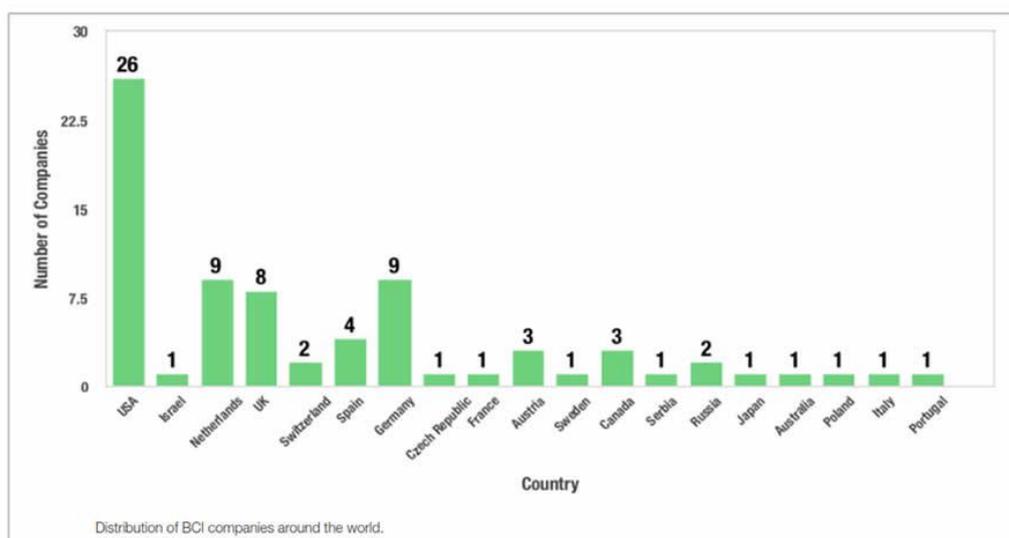
---

<sup>53</sup> también denominado *Neuroterapia*, es una técnica que se basa en medir la actividad cerebral y enseñar a las personas su propia regulación por aprendizaje condicionado.

Los científicos de Canadá y Dinamarca cuyas investigaciones son consideradas meritorias por la Iniciativa BRAIN de Estados Unidos tienen su investigación financiada por el país anfitrión o la Fundación Lundbeck; ambos países también financian las investigaciones a través de sus propios programas.

Organizaciones no gubernamentales y grupos no gubernamentales como la Fundación Kavli, la Fundación Simons Foundation, el Allen Institute for Brain Science, Brain Canada, Brain and Behavior y el Howard Hughes Medical Institute contribuyen con sus actividades a proyectos cerebrales a gran escala.

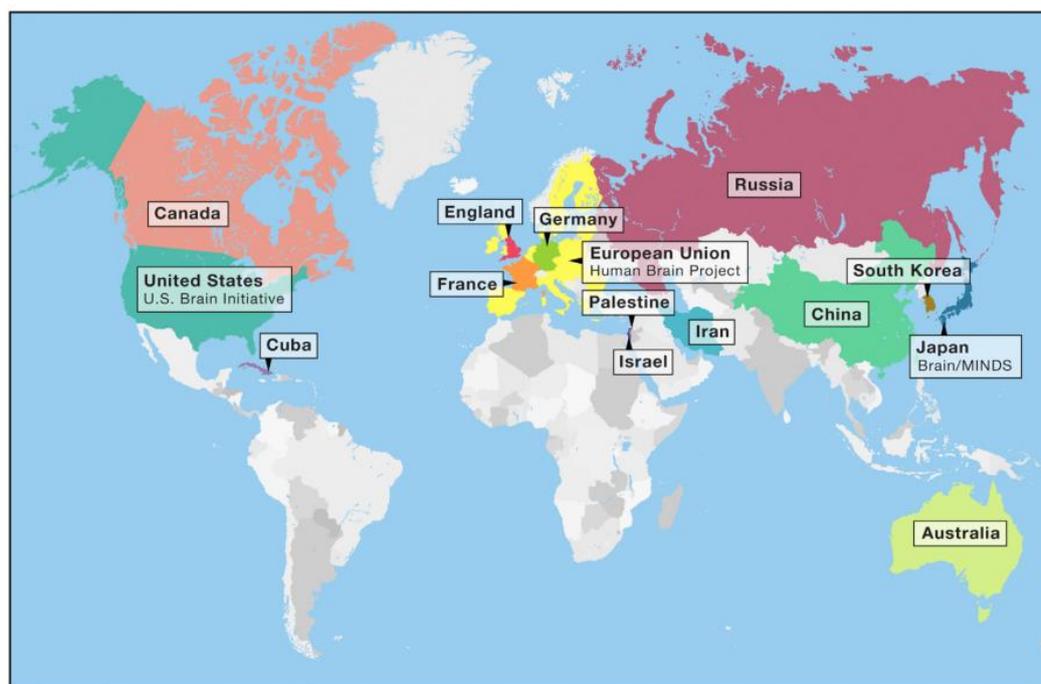
China realiza sus investigaciones a lo largo de dos ejes, la Inteligencia Artificial<sup>54</sup> (IA) por un lado y las enfermedades cerebrales por el otro.



**Figura 41:** Distribución de Empresas BCI alrededor del mundo<sup>55</sup>

<sup>54</sup> La inteligencia artificial, la base de la inteligencia artificial moderna, son las redes neuronales, llamadas así porque están basadas en modelos matemáticos de los circuitos neuronales. Las interfaces cerebro-computadora utilizan algoritmos de IA para decidir qué es lo que la persona quería hacer. Igual que tenemos el autocompletado en el procesador de texto, que adivina la palabra que estás escribiendo, estos algoritmos adivinan la intención de la acción y la completan. [2] **Nota de la autora:** El autocompletar del teléfono no adivina, sino que utiliza una base acumulada de textos escritos previamente por la persona para inferir lo que ese usuario probablemente quiere escribir a continuación, en consecuencia, estos algoritmos de IA utilizan algoritmos de ML para inferir futuras acciones.

<sup>55</sup> Figura extraída de <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnbot.2020.00025> [27]



**Figura 42:** Mapa mundial que muestra las iniciativas sobre el cerebro y los programas relacionados en todo el mundo<sup>56</sup>

Asimismo, Australia, Israel, Francia, el Reino Unido, Rusia, Irán, Palestina y Cuba tienen sus propios proyectos sobre la ciencia del cerebro.

### 6.3 Software y Plataformas para BCI [4]

<sup>56</sup> Figura extraída de DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2017.02.023e>

Plataforma	SO (W: Windows, L; Linux, X:MacOS)	Licencia	Descripción
<b>BCI2000</b>	W,X	GPL	Plataforma para desarrollo de investigación sobre BCI. Actualmente se utiliza para la captación de datos, estímulos y seguimiento de la actividad cerebral.
<b>OpenViBE</b>	W,L	LGPL	Plataforma de software libre y de código abierto para el diseño, prueba y uso de BCI. La plataforma consta de un conjunto de módulos de software que pueden integrarse fácil y eficazmente para desarrollar BCI totalmente funcionales. OpenViBE está diseñado para diferentes tipos de usuarios, incluyendo investigadores, desarrolladores y clínicos. Se abordan sus distintas necesidades y se proponen diferentes herramientas para cada tipo de usuario, en función de sus conocimientos de programación y sus conocimientos de fisiología cerebral. Existe una base de datos que cuenta con un historial de las universidades, institutos, centros médicos y herramientas para personas con discapacidades alrededor del mundo.
<b>BCILAB</b>	W,X,L	GPL	Conjunto de herramientas de código abierto basada en MATLAB para investigación y desarrollo de BCI. Con una amplia colección de métodos establecidos, así como los últimos avances en las investigaciones más recientes. Se enfoca en la realización de test que interactúa activamente con su ambiente con una dinámica conocida en los datos de entrada y salida (tiempo real), la constante evaluación de nuevas aplicaciones BCI, y la comparación de los métodos de BCI.
<b>BCI ++</b>	W	GPL	Conjunto de herramientas para el rápido desarrollo de interfaces cerebro-ordenador y la interacción de persona-ordenador. El primer módulo HIM (módulo de interfaz de hardware) se ocupa de la adquisición de la señal, el almacenamiento, la visualización y el procesamiento en tiempo real. El segundo módulo se llama Aenima y proporciona una interfaz gráfica de usuario (GUI)
<b>TOBI</b> (por sus siglas en inglés <i>Tools for Brain-Computer Interaction</i> )	W,L	GPL, LGPL	Conjunto de interfaces que conectan partes de diferentes sistemas BCI. Estas interfaces transmiten los datos en bruto, características extraídas, salidas del clasificador y eventos de una manera estandarizada. Por lo tanto, facilita la distribución de la investigación entre diferentes sistemas y plataformas BCI. Los módulos están interconectados por diferentes interfaces, denominadas interfaz TOBI A (TiA), interfaz TOBI B (TiB), interfaz TOBI B (TiB) e interfaz TOBI C (TiC). Cada interfaz transmite determinados tipos de señales que se utilizan en los sistemas BCI. El software de interfaz se basa en un motor gráfico muy sofisticado que ofrece una experiencia realista al usuario del sistema BCI y que garantiza a su vez la versatilidad y eficiencia en el desarrollo de aplicaciones.
<b>xBCI</b>	W,X,L	GPL	Plataforma genérica para el desarrollo BCI online. Ofrece a los usuarios una herramienta de desarrollo del sistema fácil de usar y reduce el tiempo necesario para desarrollarlo. De sus características destacamos el diseño extensible y modular del sistema, el desarrollo de sistemas basados en GUI o el soporte multiplataforma. La plataforma consta de varios módulos funcionales (componentes), que pueden ser utilizados para realizar un sistema BCI específico. Cada

**Tabla 2:** Relación de Plataformas SW para el Desarrollo de Sistemas BCI

			componente es completamente independiente (como un plugin) y pueden ser añadidos o modificados sin necesidad de compilar toda la plataforma, y además pueden ser distribuidos por separado.
<b>BF++</b>	W, Multiplataforma	Free	Proporciona herramientas para la aplicación, modelado y análisis de datos de los sistemas BCI. <b>SUS</b> dos elementos principales son el transductor, que es responsable de la adquisición de señales neurofisiológicas y su clasificación, y la interfaz de control, que procesa la salida del clasificador y controla los dispositivos periféricos.
<b>Pyff</b>	Multiplataforma	Free	Es una plataforma para el desarrollo rápido de paradigmas experimentales y la realización de experimentos neurocientíficos. Usa Python como lenguaje de programación; es multiplataforma y proporciona la parte específica del BCI correspondiente a la presentación del estímulo.
<b>AsTeRICS</b>	Multiplataforma	Free	Esta plataforma permite construir de manera fácil y económica lo que se denomina como tecnologías de asistencia, con lo que se trata de un sistema parecido al anterior donde se trata la presentación del estímulo, pudiendo controlar dispositivos diversos como webcam, interruptores, teclados y otros dispositivos conectables a la computadora.

## **7. Lineamientos básicos para el desarrollo futuro de normativa relativa a la producción de dispositivos de interfaz cerebro computador y su utilización en soluciones neurotecnológicas**

La capacidad de leer y escribir en el cerebro de un individuo abre puntos de acceso a los recuerdos e incluso puede utilizarse para cambiar el comportamiento de la persona. [63]

El uso indebido de los dispositivos neuronales con fines ciber criminales no sólo puede amenazar la seguridad física de los usuarios, sino también comprometer las facultades fundamentales de los seres humanos, influir en su comportamiento y alterar su auto identificación como personas. Éste dilema al que se enfrentan los investigadores y desarrolladores en el ámbito de la Neurotecnología asociada a la tecnología BCI, debería ser un foco central de atención por parte de los gobiernos, debido a su compromiso en la promoción de la salud y seguridad de los ciudadanos. De ahí la necesidad de una normativa que acompañe y regule la investigación, desarrollo y uso de esta tecnología emergente. [64]

Si con el uso de estos dispositivos resulta una acción perjudicial para el usuario o la sociedad, se genera una controversia ética, que es “especialmente importante porque la privacidad es una cuestión prioritaria en una sociedad libre, estrechamente vinculada a las libertades civiles, la democracia y los derechos humanos” [64]

Para garantizar que esta tecnología respete normas internacionales y los derechos humanos, las aplicaciones neurales deberían estar estrictamente reguladas, descentralizadas y sujetas a un escrutinio social transparente y con consentimiento del usuario, sobre todo si se consideran sus usos para fines militares. Deben implementarse directrices claras para prevenir vulnerabilidades específicas relacionadas con la autenticación, el control de acceso, la encriptación y la transmisión de datos, que están estrechamente relacionadas con las nuevas tecnologías que sustentan las tecnologías del futuro [63].

La actualización de la normativa se produce a un ritmo mucho más lento que la actualización de la tecnología y las normas de seguridad actuales



son a menudo incapaces de responder eficazmente a los cambios generados por la Neurotecnología en las actividades humanas. [50]

Actualmente no existe un protocolo estándar o específico para el desarrollo seguro de aplicaciones BCI, lo que provoca una debilidad importante en el software y su interacción con el hardware en muchas alternativas actuales. [59] Es necesario que exista una autoridad centralizada encargada de revisar y validar cada aplicación BCI antes de permitir su uso en la población general, como así también elaborar normas para que los diseñadores de aplicaciones, fabricantes y desarrolladores de BCI, diseñen, desarrollen y apliquen buenas prácticas, métodos y herramientas de ingeniería que puedan certificar ante esta autoridad centralizada conformada para tal efecto.

Los investigadores de la comunidad BCI deberían desarrollar marcos y normas para que todas las empresas que fabriquen este tipo de tecnologías deban cumplir requisitos específicos. La protección de la información requiere extensas pruebas de caja negra y caja blanca, evaluación de vulnerabilidades y una valoración completa de los riesgos, antes de su lanzamiento. [58]

Los problemas de privacidad, integridad, confidencialidad, disponibilidad y seguridad de la tecnología BCI requieren de la conformación de un equipo interdisciplinario de ingenieros, neurocientíficos, especialistas en seguridad de la información, especialistas en seguridad informática, especialistas en ética y bioética, juristas y expertos legales (por mencionar algunos), para analizar y enfrentar esta problemática y dar una respuesta coordinada que incluya al gobierno y a la industria. A los fines del diseño de la doctrina y consiguiente normativa, que no sólo reglamente el desarrollo de los BCI sino que incluya además mecanismos para mitigar los problemas de privacidad y desafíos éticos, y también el uso y preservación de datos sensibles como lo son las ondas cerebrales. [55]

Consecuentemente, no sólo se necesitan marcos, normativa y doctrina para el diseño, investigación, desarrollo y producción de los BCI, sino como expresan Ienca, M. y Andorno, R., en [33] una reconceptualización de los derechos humanos existentes o incluso la creación de nuevos derechos relacionados con su uso.



En ese sentido Chile ha dado el primer paso en Latinoamérica en el mes de noviembre al convertirse en el primer país del mundo en reconocer los neuroderechos e incorporarlos a su constitución. El proyecto de reforma constitucional modifica el artículo 19, número 1°, de la Carta Fundamental “para proteger la integridad y la indemnidad mental con relación al avance de las neurotecnologías”. [65]

En abril de 2021, la Comisión Europea presentó su Propuesta de Reglamento [66] sobre un enfoque europeo de la Inteligencia Artificial, con especial énfasis en regular las restricciones a los algoritmos con potencial riesgo para las personas. Por primera vez se habla de Neurodatos y el aprendizaje automático (Machine Learning).

En el ámbito nacional, los abogados Salort, G. y Medina, C. (2020) [67] proponen la modificación de la Ley de Protección de Datos Personales, para incluir una nueva clasificación de datos: los Neurodatos. Para ser encuadrados dentro de la categoría de datos sensibles dispuesta por el Art. 2 de la Ley de Protección de Datos Personales. Fundamentan lo enunciado en que las Neurotecnologías, generadoras de los Neurodatos tiene el potencial de proporcionar un conocimiento sobre las personas, influir en su conducta y revelar el origen étnico, racial, opiniones políticas, convicciones religiosas, filosóficas o morales, afiliación sindical e información referente a la salud o a la vida sexual, es decir, absolutamente todos los datos sensibles consagrados por la Ley 25.326.

En línea con lo postulado por los Doctores Ienca, M., Andorno, R. (2021) [33] y el Dr. Yuste (2020) [38], proponen la inclusión de los Neuroderechos (Derecho a la privacidad mental y a la identidad personal, Derecho al libre albedrío, Derecho al acceso equitativo al aumento cognitivo, Derecho a la protección de sesgos algorítmicos), en el ordenamiento jurídico nacional argentino.

## 8. Conclusiones

Desde el primer desarrollo de un BCI en 1973 por el Dr. Jacques Vidal hasta nuestros días, se ha producido un gran avance en el estudio del cerebro, su relación con la conducta y la Neurotecnología. La convergencia entre ello, la informática y las tecnologías de la información posibilitaron que esta tecnología emergente proliferara fuera del ámbito médico clínico, extendiéndose a los campos del Neuromarketing y ocio, la educación y entrenamiento cognitivo y hasta al ámbito militar. De igual forma, ha proliferado la Neurotecnología de consumo con una vasta cantidad de soluciones comerciales.

Los grandes avances son resultado del alto rendimiento y bajo costo del poder computacional, métodos mejorados para decodificar las señales del cerebro, mejores y más potentes herramientas de cálculo matemático. No obstante, este avance no está acompañado de mecanismos de supervisión adecuados a una normativa que regule y controle que esta tecnología no se use en forma indebida o inadecuada, ya sea por los propios usuarios o por terceros causando un daño físico, psicológico o permitiendo una influencia indebida que altere el comportamiento de las personas, posibilitando el neurohacking o el *brainhacking*.

Del mismo modo no existe un protocolo estándar o específico para el desarrollo seguro de aplicaciones BCI, por lo que es prudente advertir que la protección de la información requiere extensas pruebas de caja negra y caja blanca, evaluación de las vulnerabilidades y una valoración completa de los riesgos inherentes, antes de su lanzamiento para descartar problemas de privacidad, integridad, confidencialidad, disponibilidad y seguridad de la tecnología BCI.

Asimismo, el uso de sistemas BCI suscita inquietudes acerca de la libertad cognitiva, la privacidad mental y la de los individuos, de gobernar libremente su comportamiento y por ende su autonomía y libre albedrío. Así pues, como las señales neuronales registradas pueden utilizarse en aplicaciones para ocio, entretenimiento y relajación, esa información podría



ser utilizada para acciones de neuromanipulación, es decir, coaccionar a la persona para que haga algo y/o alterar su comportamiento. Del mismo modo, la información personal extraída podría ser utilizada para causar daños físicos, emocionales o psicológicos.

De igual forma, un ciberdelincuente no debería poder alterar la configuración de un dispositivo BCI para interferir en la formación normal de recuerdos, estimular o sobreestimar el cerebro de forma insegura alterando la integridad del cerebro. En consecuencia, en el diseño de los sistemas BCI debe contemplarse la anonimización de la información sensible, para garantizar la privacidad, y aplicar técnicas de securización para evitar que un atacante altere la disponibilidad del dispositivo, por ejemplo, desactivándolo y provocando lagunas inesperadas en la memoria de la persona que utiliza el BCI.

Cabe señalar la importancia que adquiere la implementación de normas y políticas que garanticen la seguridad de la información registrada durante todo el proceso del sistema BCI, sobre todo de la base de datos de las señales neurológicas. Puesto que una filtración de los datos tendría un impacto mucho mayor a la fuga de datos tradicional, ya que pondría en riesgo no sólo la identidad, la salud física, emocional y mental de la persona que utiliza el BCI sino también su vida, en caso que esté utilizando un dispositivo BCI de aplicación médica.

En un escenario prospectivo, el hacking de dispositivos BCI de uso militar traería consecuencias de importancia para la seguridad y defensa nacional, por lo que es necesario advertir que el cerebro militar podría transformarse en un nuevo campo de batalla.

En ese contexto resulta prioritario la inclusión de los Neurodatos como datos sensibles en la Ley de Protección de Datos Personales en nuestro país y, a ejemplo de Chile, propugnar el tratamiento jurídico, normativo y ético de la libertad cognitiva, la privacidad mental, la integridad mental y la continuidad psicológica como Neuroderechos.



De igual modo, resulta imprescindible la educación y concientización de la población no sólo de los beneficios de la tecnología BCI sino también de los riesgos y las implicancias asociadas. Ello requiere de la urgente convergencia entre la Neurociencia, la Ciberseguridad, la Bioingeniería, el Derecho Penal y la Neuroética a los efectos de proteger a los usuarios presentes y futuros del acceso y manipulación neuronal indebidos.

En consecuencia, surge el desafío de proteger de amenazas y vulnerabilidades a la última frontera de la privacidad, que es el cerebro humano.

## 9. Bibliografía

- [1] Martínez, G. (2021). Detección. Respuesta y buenas prácticas ante ataques cibernéticos avanzados. Trabajo Final de Posgrado. Universidad de Buenos Aires. [En línea] Disponible en: [http://www.bibliotecadigital.econ.uba.ar/download/tpos/1502-1905\\_MartinezG.pdf](http://www.bibliotecadigital.econ.uba.ar/download/tpos/1502-1905_MartinezG.pdf)/ Consultado el 01-08-2020
- [2] Yuste, R. (2020). Las nuevas neurotecnologías y su impacto en la ciencia, medicina y sociedad. [En línea] Disponible en: [https://www.informaticayderecho.com.ar/index.php?option=com\\_jdownloads&task=download.send&id=122&catid=35&m=0&Itemid=504](https://www.informaticayderecho.com.ar/index.php?option=com_jdownloads&task=download.send&id=122&catid=35&m=0&Itemid=504) Consultado el 23-11-2020
- [3] Sharma, B. (2020). Brain Computer Interface. En: International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). ISSN: 2249-8958 (Online), Volume-9 Issue-6, August 2020. [En línea] Disponible en: <https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v9i6/F1609089620.pdf> Consultado el 22-10-2021
- [4] Lord Cohen of Birkenhead. (1959). Richard Caton (1842-1926). Pioneer electrophysiologist. En: P. Roy. Soc. Med. Vol. 52, 645. [En línea] Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/003591575905200816> Consultado el 06-12-2021
- [5] Alonso-Valerdi, L., Arreola-Villarruel, M., Argüello-García, J. (2020). Brain Computer-Interfaces: Conceptualization, Redesign Challenges and Social Impact. Revista Mexicana de Ingeniería Biomedica. 40. 1-18. 10.17488/RMIB.40.3.8. [En línea] Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/339241529\\_Brain\\_Computer-Interfaces\\_Conceptualization\\_Redesign\\_Challenges\\_and\\_Social\\_Impact](https://www.researchgate.net/publication/339241529_Brain_Computer-Interfaces_Conceptualization_Redesign_Challenges_and_Social_Impact) Consultado el 26-08-2020
- [6] Wolpaw, J., Birbaumer, N., McFarland, D., Pfurtscheller, G., Vaughan, T. (2002). Brain-computer interfaces for communication and control. En: Elsevier. Clinical Neurophysiology 113 (2002) 767–791. [En línea] Disponible en: <https://www.ai.rug.nl/~lambert/projects/BCI/literature/serious/non-invasive/BCI-for-communication-and-control.pdf> Consultada el 09-11-2021
- [7] Chang S. Nam, Nijholt, A., Lotte, F. (2018). Brain-Computer Interfaces Handbook Technological and Theoretical Advances. Taylor & Francis (CRC Press), pp. 1-11, 2018, 9781498773430. fhal-01656743f. [En línea] Disponible en: <https://hal.inria.fr/hal-01656743/document> Consultado el 22-10-2021
- [8] Tullis, P. (2019). DARPA quiere aprender a leer la mente para fabricar supersoldados. En: MIT Technology Review. [En línea] Disponible en:



<https://www.technologyreview.es/s/11551/darpa-quiere-aprender-leer-la-mente-para-fabricar-supersoldados> Consultado el 20-08-2020

[9] McMillan, G.; Calhoun, G.; Middendorf, M.; Schuner, J.; Ingle, D. & Nashman, V., Direct Brain interface utilizing self-regulation of steady-state visual evoked response, En: RESNA, 1995, 693-695. [En línea] Disponible en: <https://stacks.stanford.edu/file/druid:bg042cy5321/bg042cy5321.pdf> Consultado el 15-12-2020

[10] Iturrate, I., Iturrate, J., Antelis, J., Kübler A., Minguez J. (2009). A Noninvasive Brain-Actuated Wheelchair Based on a P300 Neurophysiological Protocol and Automated Navigation. DOI:10.1109/TRO.2009.2020347. [En línea] Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/224442019\\_A\\_Noninvasive\\_Brain-Actuated\\_Wheelchair\\_Based\\_on\\_a\\_P300\\_Neurophysiological\\_Protocol\\_and\\_Automated\\_Navigation](https://www.researchgate.net/publication/224442019_A_Noninvasive_Brain-Actuated_Wheelchair_Based_on_a_P300_Neurophysiological_Protocol_and_Automated_Navigation) Consultado el 15-12-2020

[11] www.Biosociety.org Consultado el 08-12-2021, traducción de la autora

[12] López Bernal, S., Huertas Celdrán, A., Martínez Pérez, G., Barros, M. y Balasubramaniam, S. (2020). Security in Brain-Computer Interfaces: State-Of-The-Art, Opportunities, and Future Challenges. J. ACM 0, 0, Article 0 (2020), 35 pages. <https://doi.org/10.1145/3427376> [En línea] Disponible en: <https://arxiv.org/pdf/1908.03536.pdf> Consultado el 16-08-2020

[13] A HISTORY OF TRANSHUMANIST THOUGHT – Nick Bostrom Faculty of Philosophy, Oxford University [www.nickbostrom.com](http://www.nickbostrom.com) (2005) Consultado el 08-12-2020

[14] Müller, O., & Rotter, S. (2019). “Neurotechnology: Current Developments and Ethical Issues”. Frontiers in systems neuroscience, 11, 93. 2017. [En línea] Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5733340/> Consultado el 17-12-2020

[15] Fouad, S. (2021). Emerging technologies in information technology. Brain Computer Interface. Can't beat em, Join'em. [En línea] Disponible en: <https://1lib.domains/?redirectUrl=/s/Fouad%20Sabry/&e=Fouad+Sabry> Consultado el 05-10-2021

[16] Interfaces cerebro computador: Controlar cosas con la mente. [En línea] Disponible en: <https://neuro-class.com/cerebro-computador-controlar-cosas-con-la-mente/>

[17] Vallabhaneni, A., Wang, T. y He, B. (1970) Brain Computer Interface. 10.1007/0-306-48610-5\_3. [En línea] Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/227160438\\_Brain-Computer\\_Interface](https://www.researchgate.net/publication/227160438_Brain-Computer_Interface) Consultado el 8-11-2021



- [18] Gutiérrez-Martínez, J., Cantillo-Negrete, J., Cariño-Escobar, R., Viñas, D. Los sistemas de interfaz cerebro-computadora: una herramienta para apoyar la rehabilitación de pacientes con discapacidad motora. En: Investigación en Discapacidad. Vol. 2, Núm. 2. Mayo-Agosto 2013. pp 62-69. [En línea] Disponible en: <https://www.medigraphic.com/pdfs/invdis/ir-2013/ir132c.pdf> Consultado el 9-09-2020
- [19] Barranca Vázquez, J. (2013). Introducción a BCI. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. [En línea] Disponible en: <https://docplayer.es/94083408-1-introduccion-a-los-bci.html> Consultado el 28-08-2020
- [20] Alonso-Valerdi, L., Arreola-Villarruel, M., Argüello-García, J. Interfaces Cerebro-Computadora: Conceptualización, Retos de Rediseño e Impacto Social. En: Rev. mex. ing. bioméd vol.40 no.3 México sep. /dic. 2019 Epub 21-Sep-2020. [En línea] Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-95322019000300008#B18](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-95322019000300008#B18) Consultado el 28-08-2020
- [21] Müller, O., & Rotter, S. (2019). "Neurotechnology: Current Developments and Ethical Issues". *Frontiers in systems neuroscience*, 11, 93. 2017. [En línea] Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5733340/> Consultado el 17-12-2020
- [21] Ferrin-Bolaños, C. y Loaiza-Correa, H. Interfaz cerebro-computador multimodal para procesos de neurorrehabilitación de miembros superiores en pacientes con lesiones de médula espinal: una revisión. En: *Rev. ing. bioméd.* vol.12 no.24 Medellín July/Dec. 2018. [En línea] Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-97622018000200035&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-97622018000200035&lng=en&nrm=iso) Consultado el 21-09-2020
- [22] Gentiletti, G., Tabernig, C., Acevedo, R. Interfaz Cerebro - Computadora: Estado del arte y desarrollo en Argentina. En: *Revista Argentina de Bioingeniería*. Vol 13, N° 1 Junio 2007. [En línea] Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/262568028\\_Interfaz\\_Cerebro\\_-\\_Computadora\\_Estado\\_del\\_arte\\_y\\_desarrollo\\_en\\_Argentina](https://www.researchgate.net/publication/262568028_Interfaz_Cerebro_-_Computadora_Estado_del_arte_y_desarrollo_en_Argentina). Consultado el 09-11-2021
- [23] Placido, F. Intro to Brain Computer Interface. [En línea] Disponible en: <http://learn.neurotechedu.com/introtobci/#references> Consultado 26-08-2020
- [24] Abdulkader, S., Atia, A., Mostafa-Sami M. Brain computer interfacing: Applications and challenges. En: *Egyptian Informatics Journal*, Volume 16, Issue 2, 2015, Pp 213-230, ISSN 1110-8665. [En línea] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eij.2015.06.002>.



(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110866515000237>)  
Consultado el 19-04-2021

[25] Warwick K, Gasson M, Hutt B, et al. The Application of Implant Technology for Cybernetic Systems. *Arch Neurol.* 2003;60 (10):1369–1373. doi:10.1001/archneur.60.10.1369. [En línea] Disponible en: <https://jamanetwork.com/journals/jamaneurology/fullarticle/784743>  
Consultado el 19-04-2021

[26] Un tetrapléjico vuelve recuperar control de su brazo y es capaz de comer solo. En: *IngenieríaBiomédica*, Mar 29, 2017. [En línea] Disponible en: <https://www.ingenieriabiomedica.org/post/2017/03/29/un-tetrapl%C3%A9jico-vuelve-recuperar-control-de-su-brazo-y-es-capaz-de-comer-solo> Consultada el 28-11-2021

[27] Rashid M., Sulaiman N., S., P. P. AbdulMajeed A., Musa RM., Ab. Nasir AF., Bari BS. and Khatun, S. (2020). Current Status, Challenges, and Possible Solutions of EEG-Based Brain-Computer Interface: A Comprehensive Review. En: *Frontiers in Neurorobotics*. Vol.14:25. ISSN 1662-5218. DOI:10.3389/fnbot.2020.00025. [En línea] Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/341867823\\_Current\\_Status\\_Challenges\\_and\\_Possible\\_Solutions\\_of\\_EEG-Based\\_Brain-Computer\\_Interface\\_A\\_Comprehensive\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/341867823_Current_Status_Challenges_and_Possible_Solutions_of_EEG-Based_Brain-Computer_Interface_A_Comprehensive_Review) Consultada el 19-08-2020

[28] Wolpaw, J., Birbaumer, N., McFarland, D., Pfurtscheller, G., Vaughan, T. (2002). Brain–computer interfaces for communication and control. En: Elsevier. *Clinical Neurophysiology* 113 (2002) 767–791. [En línea] Disponible en: <https://www.ai.rug.nl/~lambert/projects/BCI/literature/serious/non-invasive/BCI-for-communication-and-control.pdf> Consultada el 09-11-2021

[29] Gatti, R., Escher, L., Carrere, L. y Tabernig, C. (2016). Interfaz Cerebro Computadora basada en OpenViBE y el Dispositivo EPOC: Resultados Preliminares. En: *Laboratorio de Ingeniería en Rehabilitación e Investigaciones Neuromusculares y Sensoriales*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Entre Ríos. [En línea] Disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/argencon2016/trabajos/IEEE\\_ARGENCON\\_2016\\_paper\\_257.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/argencon2016/trabajos/IEEE_ARGENCON_2016_paper_257.pdf) Consultado el 04-12-2021

[30] Porro, C., Francescato, M., Cettolo, V., Diamond, M., Baraldi, P., Zuiani, C., Bazzocchi, V y di Prampero, P. (1997). Primary Motor and Sensory Cortex Activation during Motor Imagery: A Functional Magnetic Resonance Imaging Study. En: *The Journal of Neuroscience*, pp. 7688-7698, 1997. DOI: 10.1007/978-88-470-2194-5\_11 [En línea] Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/14285565\\_Primary\\_motor\\_and\\_sensory\\_cortex\\_activation\\_during\\_motor\\_performance\\_and\\_motor\\_imagery\\_A\\_functional\\_magnetic\\_resonance\\_imaging\\_study](https://www.researchgate.net/publication/14285565_Primary_motor_and_sensory_cortex_activation_during_motor_performance_and_motor_imagery_A_functional_magnetic_resonance_imaging_study) Consultado el 04-12-2021

[31] Villegas Méndez, B., Rojas Fernández, M. (2019). Interfaz cerebro ordenador BCI mediante el uso de Emotiv Insight. En: *RevActaNova*. vol.9 no.1 Cochabamba mar. 2019. versión On-line ISSN 1683-0789. [En línea]



Disponible en:

[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1683-07892019000100002#f1](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892019000100002#f1) Consultado el 26-08-2020

[32] Urban, T. (2017). Neuralink and the Brain's Magical Future. [En línea]

Disponible en:

<https://waitbutwhy.com/2017/04/neuralink.html?ref=driverlayer.com>  
Consultada el 04-12-2021

[33] Rodríguez Suarez, N. (2019). Neuroética: supuestos a través de publicaciones en el campo. En: Revista Colombiana de Bioética. Vol. 14 N° 01. <https://doi.org/10.18270/rcb.v14i1.2223> [En línea] Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/1892/189260608010/html/> Consultado el 15-11-2021

[34] Ienca, M., Andorno, R. (2021). Hacia nuevos derechos humanos en la era de la Neurociencia y la Neurotecnología. En: Análisis Filosófico, vol. 41, núm. 1, pp. 141-185, 2021. Sociedad Argentina de Análisis Filosófico DOI: 10.36446/af.2021.386 [En línea] Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/3400/340067606006/html/> Consultado el 01-11-2021

[35] Farah, M. (2015). An Ethics Toolbox for Neurotechnology. En: Neuron. 86. 34-7. 10.1016/j.neuron.2015.03.038. [En línea] Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/274724980\\_An\\_Ethics\\_Toolbox\\_for\\_Neurotechnology](https://www.researchgate.net/publication/274724980_An_Ethics_Toolbox_for_Neurotechnology) Consultado el 11-11-2020

[36] Friedewald, M., Finn, R., Wright, D. (2013) Seven Types of Privacy. En: European Data Protection: Coming of Age Chapter: Seven Types of Privacy Publisher: Springer Editors: Serge Gutwirth, Ronald Leenes, Paul de Hert, Yves. DOI: 10.1007/978-94- [En línea] Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/258892458\\_Seven\\_Types\\_of\\_Privacy](https://www.researchgate.net/publication/258892458_Seven_Types_of_Privacy) Consultado el 13 de diciembre de 2021.

[37] Weber, C. (2021). "Guidelines that consider societal and cultural impacts of neurotechnology are crucial for ensuring responsible innovation in the field" [En línea] Disponible en:

[https://brain.ieee.org/category/newsletter/?utm\\_source=Twitter&utm\\_medium=Social&utm\\_campaign=2021-Newsletter&utm\\_term=General+Promo](https://brain.ieee.org/category/newsletter/?utm_source=Twitter&utm_medium=Social&utm_campaign=2021-Newsletter&utm_term=General+Promo). Consultado el 13-12-2021.

[38] Ausín, T., Morte, R. y Astobiza, A. (2020). Neuroderechos: Derechos humanos para las neurotecnologías. En: Diario La Ley, N° 43, Sección Ciberderecho, 8 de Octubre de 2020, Wolters Kluwer. [En línea] Disponible en: <https://globenance.org/wp-content/uploads/2020/04/20201008-Neuroderechos- Derechos ....pdf> Consultado el 22-11-2020

[39] Khan, S. y Aziz, T. (2019). Transcending the brain: is there a cost to hacking the nervous system? En: BRAIN COMMUNICATIONS 2019 Pp.1-10. doi:10.1093/braincomms/fcz015 [En línea] Disponible en:

<https://academic.oup.com/braincomms/article/1/1/fcz015/5570173>  
Consultado el 19-11-2020



[40] Yuste, R. (2020). Las nuevas neurotecnologías y su impacto en la ciencia, medicina y sociedad // Rafael Yuste. [En línea] Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/86978/files/BOOK-2020-001.pdf> Consultado el 20-10-2020

[41] Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Entre Ríos. Laboratorio de Ingeniería en Rehabilitación e Investigaciones Neuromusculares y Sensoriales <http://ingenieria.uner.edu.ar/grupos/lirins/index.php/publicaciones#2017> Consultado el 14-12-2021

[42] Universidad Nacional del Litoral – Research Institute for Signals, Systems and Computational Intelligence - Research Brain computer interfaces <https://sinc.unl.edu.ar/grants/brain-computer-interfaces/> Consultado el 14-12-2021

[43] Brain-Computer Interfaces: Your Favorite Guide. Everything you wanted to know about BCI but were afraid to ask. (2020). [En línea] Disponible en: <https://medium.com/sciforce/brain-computer-interfaces-your-favorite-guide-15aaa410c4d7> Consultado el 11-11-2020 Referenciado en Marco teórico Conceptual

[44] Primer brazo robótico controlado a través de un implante cerebral. En: Ingeniería Biomédica. (2015). [En línea] Disponible en: <https://www.ingenieriabiomedica.org/post/2015/05/23/Primer-brazo-rob%C3%B3tico-controlado-a-trav%C3%A9s-de-un-implante-cerebral> Consultado el 10-09-2020

[45] Palani Thanaraj, K., Parvathavarthini, B., Tanik, U., Rajinikanth, V., Kadry, S., Kamalanand, K. (2020). Implementation of Deep Neural Networks to Classify EEG Signals using Gramian Angular Summation Field for Epilepsy Diagnosis. [En línea] Disponible en: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2003/2003.04534.pdf> Consultado el 25-12-2021

[46] Trayendo la Interfaz Cerebro-Computador a casa. (2016) En: Asociación ELA Argentina. [En línea] Disponible en: <http://www.asociacionela.org.ar/index.php/1642-trayendo-la-interfaz-cerebro-computador-a-casa> Consultado el 08-12-2021

[47] Hornero, R., Corralejo, R. y Álvarez. Brain-Computer Interface (BCI) aplicado al entrenamiento cognitivo y control doméstico para prevenir los efectos del envejecimiento. En: LYCHNOS. Núm. 08ISSN: 2171-6463. [En línea] Disponible en: [https://fgcsic.es/lychnos/es\\_ES/articulos/Brain-Computer-Interface-aplicado-al-entrenamiento-cognitivo](https://fgcsic.es/lychnos/es_ES/articulos/Brain-Computer-Interface-aplicado-al-entrenamiento-cognitivo). Consultado el 25-12-2021

[48] Vecchiato G, Astolfi L, De Vico Fallani F, Salinari S, Cincotti F, Aloise F, Mattia D, Marciari MG, Bianchi L y Soranzo R. (2009). The study of brain activity during the observation of commercial advertising by using high



resolution EEG techniques. In: Engineering in Medicine and Biology Society, 2009. EMBC 2009. Annual International Conference of the IEEE. IEEE; 2009. p. 57–60. [En línea] Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5335045> Consultado el 25-12-2021

[49] Interfaz cerebro-computadora. [En línea] Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Interfaz\\_cerebro-computadora](https://es.wikipedia.org/wiki/Interfaz_cerebro-computadora) Consultado el 18-12-2020

[50] Martinovic, I., Davies, D., Frank, M., Perito, D., Ros, T., Song, D. On the Feasibility of Side-Channel Attacks with Brain-Computer Interfaces.

[51] Dr. Emondi, A. Next-Generation Nonsurgical Neurotechnology. [En línea] Disponible en: <https://www.darpa.mil/program/next-generation-nonsurgical-neurotechnology> Consultado el 10-02-2020

[52] 21st USENIX Security Symposium Bellevue, WA, USA August 8–10, 2012. ISBN 978-931971-95-9. [En línea] Disponible en: [https://www.usenix.org/system/files/tech-schedule/sec12\\_proceedings.pdf](https://www.usenix.org/system/files/tech-schedule/sec12_proceedings.pdf) Consultado el 26-03-2021

[53] Definición extraída y adaptada de <https://whatis.techtarget.com/definition/brain-hacking> Consultada el 14-12-2021

[54] Ienca, M., Haselager, P. (2016). Hacking the brain: brain–computer interfacing technology and the ethics of Neurosecurity. [En línea] Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/301335762\\_Hacking\\_the\\_brain\\_brain-computer\\_interfacing\\_technology\\_and\\_the\\_ethics\\_of\\_neurosecurity](https://www.researchgate.net/publication/301335762_Hacking_the_brain_brain-computer_interfacing_technology_and_the_ethics_of_neurosecurity) Consultado el 5-11-2021

[55] Bonaci, T., Calo, R. y Chizeck, J. (2014). “App Stores for the Brain: Privacy & Security in Brain-Computer Interfaces”. En línea] Disponible en: <https://techpolicylab.uw.edu/wp-content/uploads/2018/06/App-Stores-for-the-Brain.pdf> Consultado el 26-03-2020

[56] López Bernal, S., Huertas Celdrán, A., Martínez Pérez, G. (2021). A Review of Cyberattacks on Miniature Brain Implants to Disrupt Spontaneous Neural Signaling. En: Actas de las VI Jornadas Nacionales (JNIC 2021 LIVE). Sesión de Investigación A3: Ciberataques e inteligencia de amenazas [http://doi.org/10.18239/jornadas\\_2021.34.16](http://doi.org/10.18239/jornadas_2021.34.16). [En línea] Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/352258122\\_A\\_Review\\_of\\_Cyberattacks\\_on\\_Miniature\\_Brain\\_Implants\\_to\\_Disrupt\\_Spontaneous\\_Neural\\_Signaling](https://www.researchgate.net/publication/352258122_A_Review_of_Cyberattacks_on_Miniature_Brain_Implants_to_Disrupt_Spontaneous_Neural_Signaling) Consultado el 26-08-2021

[57] López Bernal, S., Huertas Celdrán, A., Fernández Maimo, L., Barros, T., Balasubramaniam, S., Martínez Pérez, G. (2020). Cyberattacks on Miniature Brain Implants to Disrupt Spontaneous Neural Signaling. En: IEEE Access.



Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2020.3017394. [En línea]

Disponible en:

<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9169881>

Consultado el 26-08-2020

[58] Sundararajan, K. (2017). Privacy and security issues in Brain Computer Interface [Tesis de maestría no publicada]. Universidad Tecnológica de Auckland, Auckland, Nueva Zelanda. [En línea] Disponible en:

<http://orapp.aut.ac.nz/bitstream/handle/10292/11449/SundararajanK.pdf>

Consultado el 26-03-2021

[59] Martínez Beltrán, E., Bernal López, S., Quiles, M., Huertas, A. (2021). SecBrain: A Framework to Detect Cyberattacks Revealing Sensitive Data in Brain-Computer Interfaces. In book: Advances in Malware and Data-Driven Network Security (pp.23) Publisher: IGI Global. DOI:10.4018/978-1-7998-7789-9.ch010. [En línea] Disponible en:

[https://www.researchgate.net/publication/356087008\\_SecBrain\\_A\\_Framework\\_k\\_to\\_Detect\\_Cyberattacks\\_Revealing\\_Sensitive\\_Data\\_in\\_Brain-Computer\\_Interfaces](https://www.researchgate.net/publication/356087008_SecBrain_A_Framework_k_to_Detect_Cyberattacks_Revealing_Sensitive_Data_in_Brain-Computer_Interfaces) Consultado el 19-11-2021

[60] 29 de agosto 2020. Neuralink Progress Update, Summer 2020.

<https://www.youtube.com/watch?v=DVvmgjBL74w> Consultado el 30-08-2020

[61] Yuste, R., Bargmann, C. (2017). Toward a Global Brain Initiative. [En

línea] Disponible en: <https://www.cell.com/action/showPdf?pii=S0092-8674%2817%2930201-5> Consultado el 18-11-2020

[62] Minguez, J. (2010). Tecnología de Interfaz Cerebro – Computador. [En

línea] Disponible en: [https://webdiis.unizar.es/~jminguez/Sesion001\\_UJI.pdf](https://webdiis.unizar.es/~jminguez/Sesion001_UJI.pdf)

Consultado el 20-11-2020

[63] Moiola, R., Nardelli, P., Barros, M. (2021). Neurosciences and Wireless Networks: The Potential of Brain-Type Communications and Their Applications. [En línea] Disponible en:

[https://www.researchgate.net/publication/352699143\\_Neurosciences\\_and\\_Wireless\\_Networks\\_The\\_Potential\\_of\\_Brain-Type\\_Communications\\_and\\_Their\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/352699143_Neurosciences_and_Wireless_Networks_The_Potential_of_Brain-Type_Communications_and_Their_Applications) Consultado el 10-12-2021

[64] Ienca, M. (2015). Neuroprivacy, neurosecurity and brain-hacking: Emerging issues in neural Engineering,

[https://www.researchgate.net/publication/303974201\\_Neuroprivacy\\_neurosecurity\\_and\\_brain-hacking\\_Emerging\\_issues\\_in\\_neural\\_engineering](https://www.researchgate.net/publication/303974201_Neuroprivacy_neurosecurity_and_brain-hacking_Emerging_issues_in_neural_engineering) (consultado el 26-12-2021).

[65] Boletín N° 13.828-19.

[https://www.senado.cl/appsenado/templates/tramitacion/index.php?boletin\\_in\\_i=13828-19](https://www.senado.cl/appsenado/templates/tramitacion/index.php?boletin_in_i=13828-19) Consultado el 13-11-2021

[66] Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen normas armonizadas en materia de Inteligencia Artificial



(Acto de Inteligencia Artificial) y se modifican determinados actos legislativos de la Unión <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1623335154975&uri=CELEX%3A52021PC0206>

[67] Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen normas armonizadas en materia de Inteligencia Artificial (Acto de Inteligencia Artificial) y se modifican determinados actos legislativos de la Unión <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1623335154975&uri=CELEX%3A52021PC0206>



## ANEXO I

### 1. Recursos web relacionados con la iniciativa internacional BRAIN

<b>Belmont Report</b>	<a href="https://www.hhs.gov/ohrp/regulations-and-policy/belmont-report">https://www.hhs.gov/ohrp/regulations-and-policy/belmont-report</a>
<b>Brain Initiative</b>	<a href="https://www.braininitiative.nih.gov/">https://www.braininitiative.nih.gov/</a>
<b>Brain 2025 report</b>	<a href="https://www.braininitiative.nih.gov/2025/">https://www.braininitiative.nih.gov/2025/</a>
<b>BRAIN Canadá</b>	<a href="http://www.braincanada.ca/">http://www.braincanada.ca/</a>
BRAIN Foundation Australia	<a href="http://brainfoundation.org.au/">http://brainfoundation.org.au/</a>
<b>Coordinating Global Brain Projects Conference</b>	<a href="http://www.rockefeller.edu/research/intercenter/globalbrain">http://www.rockefeller.edu/research/intercenter/globalbrain</a>
<b>Denmark Lundbeck Foundation-BRAINI</b>	<a href="http://www.lundbeckfonden.com/nih-brain-initiative.516.aspx">http://www.lundbeckfonden.com/nih-brain-initiative.516.aspx</a>
<b>Human Brain Project</b>	<a href="https://www.humanbrainproject.eu/">https://www.humanbrainproject.eu/</a>
<b>Human Frontiers Science Program</b>	<a href="http://www.hfsp.org/">http://www.hfsp.org/</a>
<b>Human Genome Organization</b>	<a href="http://www.hugo-international.org">http://www.hugo-international.org</a>
<b>NeuroData Without Borders Initiative</b>	<a href="http://www.nwb.org">http://www.nwb.org</a>
<b>Japan Brain/MINDS</b>	<a href="http://brainminds.jp/en/">http://brainminds.jp/en/</a>
<b>Simons Collaboration on the Global Brain Project</b>	<a href="https://www.simonsfoundation.org/life-sciences/simons-collaboration-on-the-global-brain-2/">https://www.simonsfoundation.org/life-sciences/simons-collaboration-on-the-global-brain-2/</a>
<b>South Korean Brain Mapping Project</b>	<a href="http://english.yonhapnews.co.kr/news/2016/05/30/">http://english.yonhapnews.co.kr/news/2016/05/30/</a>
<b>02000State of the Brain Keystone Symposium</b>	<a href="http://www.keystonesymposia.org/16R1">http://www.keystonesymposia.org/16R1</a>

### 2. Listado de siglas

**B/CI:** Interfaz cerebro humano/nube

**BCI:** Interfaz cerebro Computador, Brain Computer Interface

**BtB:** Brain to brain

**BTO:** Internet del cerebro, Brain The Internet

**CSIC:** Consejo Superior de Investigación Científica, de España

**ECoG:** Electrocorticografía

**EEG:** Electroencefalograma

**fMRI:** Resonancia magnética funcional, functional Magnetic Resonance Imaging

**fNIR:** espectroscopia funcional del infrarrojo cercano, functional Near Infrared Resonance

**fNIRS:** ver fNIR

**GPL:** General Public License o Licencia Pública General.

**LGPL:** Lesser General Public License o Licencia Pública General Reducida



**MEG:** Magneto encefalografía o campo magnético

**NCD:** Near Control Device - Dispositivo de control cercano

**NIR:** espectroscopia del infrarrojo cercano, Near Infrared Spectroscopy

**P300:** o EP300 o P3, potencial evocado con una latencia de 300 ms

**PET:** Tomografía por emisión de positrones, Positron Emission Tomography

**RMCf:** Resonancia Magnética Cerebral funcional

**SCP:** Potencial cortical lento, Slow cortical potential

**SMR:** Ritmos sensoriomotores

**SNC:** Sistema Nervioso Central

**SPECT:** Tomografía por Emisión de Fotón Simple, Single Photon Emission Tomography

**SSVEP:** potenciales evocados visuales de estado estable

**TAC:** Tomografía Axial Computarizada

**TDAH:** Trastorno por déficit de atención e hiperactividad

**TTD:** Traducción del pensamiento, Thought Translation Device