

1.- Introducción a los BCI

Investigaciones alrededor del mundo han demostrado que la actividad del cerebro se puede usar para brindar a las personas un nuevo canal de comunicación no muscular, es decir, una forma de comunicación que no usa el sistema nervioso autónomo o motor, para enviar acciones, mensajes y comandos al exterior. Existen varias tecnologías que permiten monitorizar y registrar la actividad del cerebro:

- La imagen por resonancia magnética funcional (fMRI)
- La tomografía de emisión de positrones (PET)
- La magnetoencefalografía (MEG)
- La espectroscopia en el infrarrojo cercano (NIRS)
- La electroencefalografía (EEG)
- La electrocortigrafía (ECoG)

Las tecnologías fMRI y PET son técnicas visuales que requieren equipos grandes, son costosas y necesitan de instalaciones muy especiales, por lo cual su uso se limita a aplicaciones de diagnóstico médico. Asimismo, fMRI se basa en la medición de flujo o de volumen de sangre y PET en la medición del metabolismo del oxígeno o del azúcar por lo que son técnicas de baja resolución temporal. Por otro lado, los dispositivos MEG se basan en la medición de los campos magnéticos producidos por la actividad eléctrica del cerebro, por lo que es un método rápido, sin embargo al igual que fMRI y PET requiere de instalaciones especiales y costosas. Por otro lado, los dispositivos NIRS son más pequeños y menos costosos pero también son lentos ya que se basan en la medición de cambios dinámicos en la sangre. El ECoG es una técnica que mide la actividad eléctrica de pequeños grupos de neuronas mediante la implantación de electrodos dentro del cráneo, lo cual ofrece alta resolución espacial y gran ancho de banda, sin embargo es una técnica altamente invasiva adecuada solamente para aplicaciones médicas. El EEG mide la actividad eléctrica de la corteza cerebral mediante electrodos ubicados en parte exterior del cráneo, lo que la hace una tecnología portátil y económica, razón por la cual es la tecnología más usada para aplicaciones que buscan dar a las personas una nueva forma de comunicación no muscular.

Usualmente, la electroencefalografía se ha empleado para evaluar desórdenes neurológicos, para investigar las funciones cerebrales y hasta como método terapéutico, sin embargo, inicialmente se pensó que también se podría usar para leer las intenciones de las personas. No obstante, esta última aplicación nunca se llegó a desarrollar debido a que decodificar y procesar las señales del EEG era casi imposible por su complejidad.

Recientemente, gracias a los avances en el entendimiento de la actividad cerebral, al desarrollo sistemas computacionales potentes y a la identificación de nuevas aplicaciones, como sistemas de comunicación o transporte para personas con discapacidades motoras o videojuegos operados con la mente, los centros de investigación se han interesado en el estudio y desarrollo de sistemas que permitan identificar las intenciones de las personas usando la actividad eléctrica registrada con el EEG, o más claramente, sistemas que operen como interfaces entre el cerebro y los computadores y que permitan enviar comandos al exterior sin usar comunicación muscular.

1.1.- Actividad eléctrica cerebral

Gracias a que es un método no invasivo, económico y portátil, el EEG es el método más adecuado para registrar la actividad eléctrica cerebral. Con la técnica EEG no se puede medir la actividad eléctrica de una sola neurona, sino que se registra la actividad eléctrica combinada de millones de neuronas en una misma área de la corteza cerebral. La resolución temporal de las señales EEG es buena, sin embargo, la resolución espacial es muy baja. Dependiendo del número de electrodos que se use, se puede llegar a resoluciones espaciales de un centímetro, lo cual es poco en comparación con otras técnicas como MEG y PET.

Para registrar la actividad eléctrica del cerebro o señales EEG, se colocan pequeños electrodos en el cráneo con gel conductor, después las señales obtenidas son amplificadas y digitalizadas, y finalmente se puede obtener una gráfica de potencial eléctrico versus tiempo. Usando varios electrodos se puede registrar varias señales cerebrales de diferentes partes del cerebro con lo cual se puede obtener un mapa de la actividad eléctrica en la corteza cerebral.

Los electrodos se colocan en el cráneo usando el método de ubicación de electrodos llamado sistema internacional 10 - 20. Este sistema estandariza la ubicación física y la nomenclatura de 21 electrodos. Para cubrir todas las regiones cerebrales, el sistema divide la parte exterior del cráneo tomando como referencia las ubicaciones fijas nasion,inion y los puntos preauriculares. Los valores 10 - 20 indican distancias proporcionales en porcentajes (10 % y 20 %) entre las orejas y la nariz donde se escogen puntos para ubicar electrodos. Una vez ubicados, los electrodos son etiquetados con las letras de las áreas cerebrales en que se ubican, *F* (Frontal), *C* (Central), *T* (Temporal), *P* (Posterior) y *O* (Occipital); con números impares para indicar la parte izquierda del cerebro y con números pares para indicar la parte derecha del cerebro. Por ejemplo, el electrodo *O2* se ubica en la región occipital del hemisferio derecho, *T7* se ubica en la región temporal del hemisferio izquierdo. Los electrodos ubicados a lo largo del plano sagital que divide el cerebro en dos hemisferios se nombran con la letra de la región cerebral y la letra *z*, por ejemplo, el electrodo *Fz* se ubica en la región frontal sobre el plano sagital. Este sistema se ha ampliado para ubicar más electrodos y aumentar la resolución espacial tal como se muestra en la figura 1.1.1:

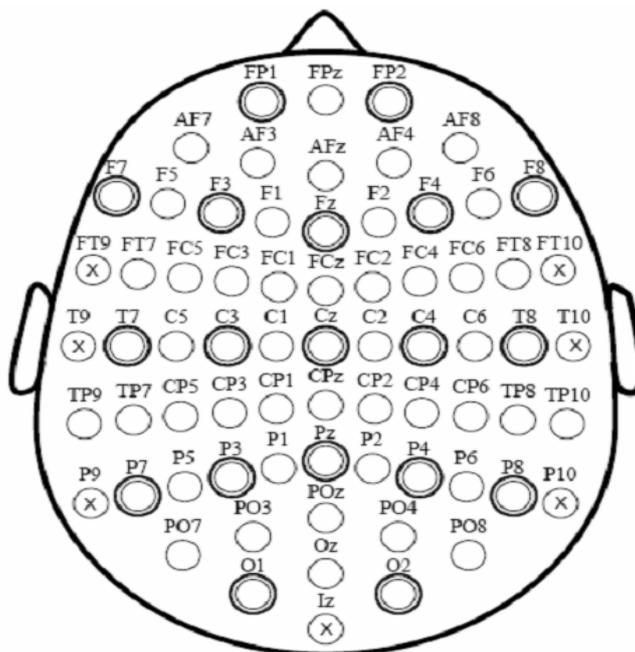


Fig. 1.1.1: Sistema de ubicación de electrodos 10-20.

1.2.- Ritmos electroencefalográficos

Cuando se visualizan las señales EEG, éstas presentan características oscilatorias y repetitivas. Por esta razón la actividad eléctrica en la corteza cerebral o señales EEG se clasifican en diferentes bandas de frecuencias conocidas como *ritmos*. Los ritmos pueden tener amplitudes que varían entre 1 y 100 μV y frecuencias dentro del rango de 0.1 Hz y 45 Hz. En la tabla 1.2.1 se muestran los diferentes tipos y características de ritmos de las señales EEG.

Ritmo	Frecuencia (Hz)	Amplitud (μV)
Delta (δ)	0.1-4	50-100
Theta (θ)	4-7	
Alpha (α)	8-13	<50
Beta (β)	14-30	<30
Gamma (γ)	30-44	
Mu (μ)	10Hz y 40Hz	<50

Tabla 1.2.1: Características de los diferentes ritmos de las señales EEG.

Los ritmos *delta* se producen durante el sueño profundo y son comunes en los bebés. Usualmente no se observan en estado de consciencia o en el adulto promedio, pero sirven para indicar daño o muerte cerebral (encefalopatía). Estos ritmos tienen las frecuencias menores a 4 Hz y a las mayores amplitudes de todos los ritmos. En la figura 1.2.1 se muestra una señal EEG de un segundo que corresponde a un ritmo delta típico.

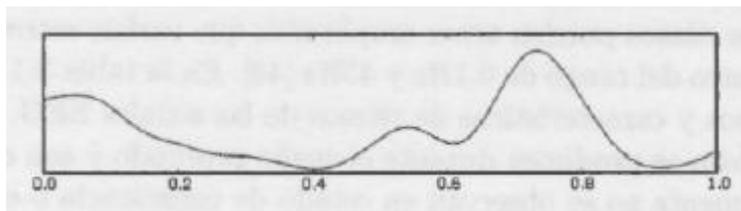


Fig. 1.2.1: Ritmo Delta.

En la figura 1.2.2 se muestra una señal EEG que corresponde con un ritmo *theta*, los cuales se encuentran en el rango de frecuencias de 4 a 7 Hz. Se encuentra normalmente en niños, o en adultos durante estados de somnolencia o meditación. Por lo tanto, el exceso de esta actividad sirve para detectar actividad anormal. También se pueden usar para detectar encefalopatía metabólica o hidrocefalia.

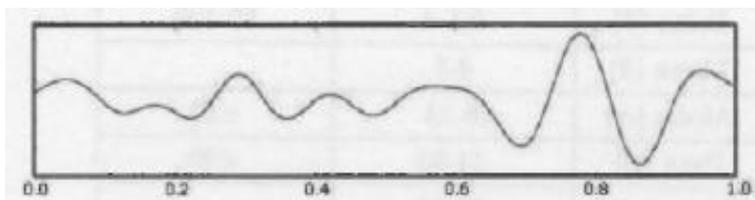


Fig. 1.2.2: Ritmo Theta.

Los ritmos *alpha* se producen en las regiones posteriores del cerebro con mayor amplitud en el hemisferio dominante. Están en el rango de frecuencias de 8 a 13 Hz. Se producen al cerrar los ojos o en relajación. También se conoce como ritmo básico posterior o ritmo alpha posterior que en los jóvenes puede llegar a ser menor a 8 Hz. Dentro del rango del ritmo alpha también se puede encontrar un ritmo particular llamado mu. En la figura 1.2.3 se muestra el ritmo alpha.

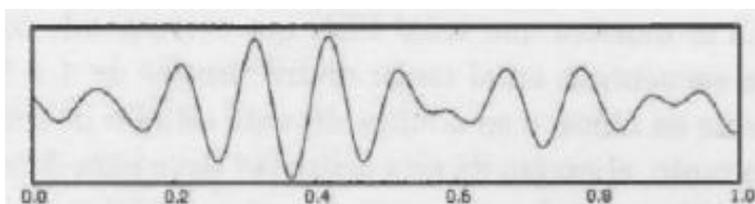


Fig. 1.2.3: Ritmo Alpha.

En la figura 1.2.4 se muestra un ritmo *beta*, los cuales se presentan en el rango de frecuencias de 14 a 30 Hz, principalmente en las regiones frontal y central del cerebro en la corteza sensora y motora. Este tipo de ritmo con amplitud baja y frecuencia variable se asocia con pensamientos activos. Asimismo, los ritmos beta con

frecuencias características dominantes se asocian a varias patologías y al consumo de drogas. Sin embargo, el cerebro no genera actividad alrededor de los 25 Hz, por lo que si se detecta, estas señales se consideran artefactos. Los ritmos beta son importantes para el desarrollo de BCI ya que están asociados con los movimientos y sobre todo porque las personas pueden aprender a controlar su amplitud.

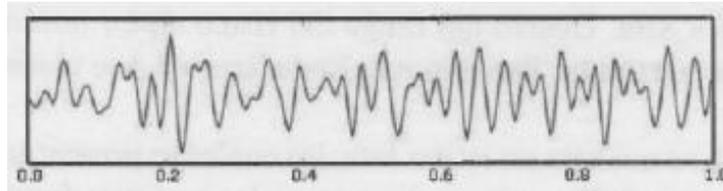


Fig. 1.2.4: Ritmo Beta.

Los ritmos *gamma* tienen frecuencias mayores a 30 Hz y se producen durante estados de procesamiento de acciones motoras y otras actividades mentales. En la figura 1.2.5 se muestra en ritmo gamma típico.

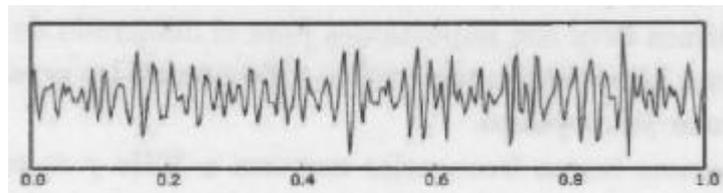


Fig. 1.2.5: Ritmo Gamma.

Como se dijo anteriormente, dentro de la banda del ritmo alpha existe una frecuencia de aproximadamente 10Hz y de amplitud menor a 50 μ V que se conoce como ritmo *mu*. Aunque este ritmo está dentro de la banda del ritmo alpha, se diferencia porque se produce con gran intensidad en la corteza motriz. La característica importante de este ritmo es que se bloquea o se reduce por los movimientos y por la imaginación motriz, razón por la cual son muy usados para el desarrollo de BCI's. Esta característica de reducción ante la producción o imaginación de movimientos se conoce como desincronización relacionada a eventos.

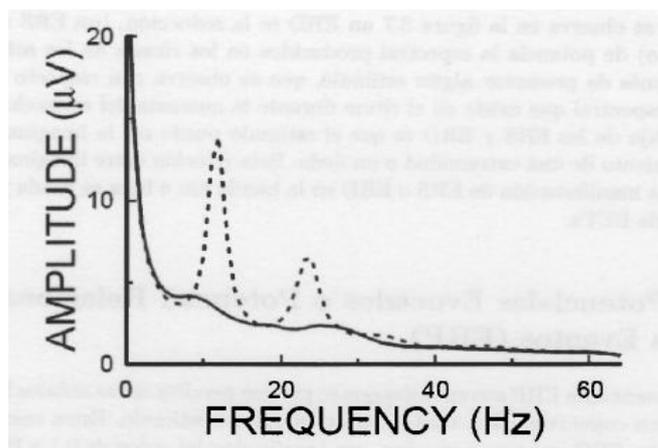


Fig. 1.2.6: Espectro de potencia para un ritmo mu donde se aprecia la reducción de potencia cercana a los 10Hz, lo que da origen a un ERD.

1.3.- Potenciales Evocados o Potencial Relacionado a Eventos (ERP)

Los potenciales ERP son cambios que se pueden percibir en las señales EEG que ocurren como respuesta a un evento particular o estímulo. Estos cambios en las señales EEG son muy pequeños, con amplitudes del orden de 0.1 a 10 μV , por lo cual es difícil separarlos de las oscilaciones aleatorias normales de las señales EEG que están en el orden de 0.1 a 100 μV . Los ERP se dividen en exógenos y endógenos. Un ERP exógeno ocurre hasta 100 ms después de presentarse el estímulo y depende de las propiedades físicas del estímulo como la intensidad, la frecuencia, etc. Por el contrario un ERP endógeno ocurre más de 100 ms después de haber presentado el estímulo y depende en gran medida de las características psicológicas del evento que los produce.

Un ERP no es fácil de extraer a partir del EEG, la forma más común para lograrlo es presentar varias veces el estímulo y adquirir las señales EEG. Si se asume que la señal de interés ERP está correlada en todas las muestras adquiridas después de los estímulos y que la señal EEG no está correlada en todas las muestras después de los estímulos, al promediar todas las muestras obtenidas la señal ERP se intensifica y la señal EEG se reduce.

El ERP más común e importante se denomina P300, el cual es una deflexión positiva en la señal EEG que ocurre 300 ms después de presentar el estímulo. El P300 se produce normalmente durante un paradigma *odd-ball*, en el cual se le pide al participante que responda ante algún estímulo particular que se presenta varias veces de forma aleatoria. En la figura 1.3.1 se muestra un potencial P300. La gráfica de una señal P300, típicamente tiene un ancho de 150 a 200 ms, forma triangular y amplitud de 2 a 5 μV . La señal P300 a su vez está formada por dos componentes denominadas P3a y P3b las cuales responden de manera individual a estímulos diferentes, porque están relacionadas con procesos psicológicos y cognitivos diferentes. Las características de los ERP P300 los hace adecuados para el diseño de BCI's.

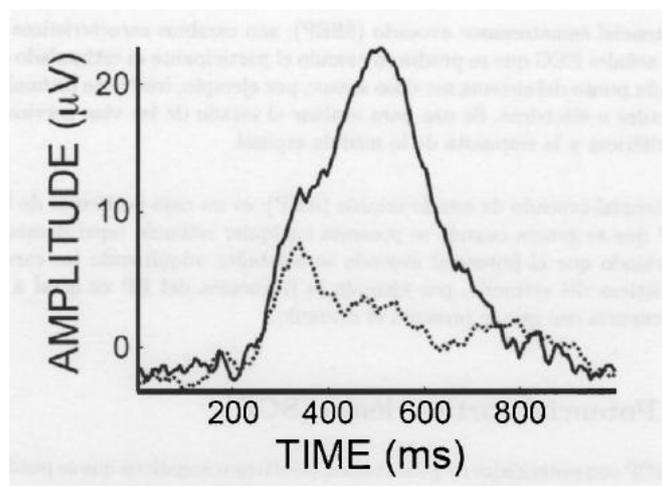


Fig. 1.3.1: Gráfica de un potencial evocado P300. Alrededor de los 300 ms se puede notar el cambio en la forma de onda.

1.4.- Definición de BCI

Una interfaz cerebro-computador o BCI es un sistema en el cual los mensajes o comandos que un individuo envía al mundo exterior no pasan a través de los trayectos de salida normales del cerebro como los músculos o los nervios periféricos. Es decir, un BCI es un sistema que le permite a una persona controlar el mundo exterior o enviar mensajes sin usar los músculos, el habla, u otros mecanismos convencionales de comunicación. Esto es posible gracias a que los comandos o mensajes no son simplemente movimientos musculares autónomos sino que implican todo un fenómeno electrofisiológico neuronal en el cerebro. Un computador en una interfaz cerebro-computador es cualquier máquina o dispositivo tecnológico o computacional.

Un BCI es un sistema que provee al cerebro de un nuevo canal de control y comunicación no muscular, es decir, que da la posibilidad a sus usuarios de enviar mensajes, comandos y acciones al mundo exterior sin usar sus músculos, sólo la actividad y el procesamiento cerebral.

1.5.- Clasificación de los BCI

Los sistemas que brindan un nuevo canal de comunicación no muscular o BCI se pueden clasificar en tres categorías, dependiente o independiente, sincrónico o asincrónico e invasivo o no-invasivo.

Un BCI es *dependiente* cuando las señales eléctricas registradas con el EEG dependen o se producen a partir de la actividad motora voluntaria de las personas. Es decir, que requiere que alguna parte del sistema nervioso periférico trabaje para que se produzca una actividad eléctrica asociada en la corteza cerebral. Un claro ejemplo de un BCI dependiente es un sistema que usa potenciales visuales evocados VEP para

identificar mensajes o comandos. En este caso, BCI registra los potenciales producidos en la corteza visual del cerebro por una mirada fija en una dirección dada y después determina la dirección en la cual el usuario desea por ejemplo indicar un sentido, moverse en una dirección o mover un cursor en un monitor.

En contraste, un BCI *independiente* no necesita de ningún trayecto de salida normal del cerebro como la activación muscular. Es decir, los mensajes o comandos no se ejecutan por medio del sistema nervioso periférico y por lo tanto la actividad de estas trayectorias no es necesaria para producir una actividad eléctrica en el cerebro. Un BCI independiente es un sistema que puede usar potenciales evocados P300 para identificar mensajes o comandos. Por ejemplo, si a un usuario de BCI se le presenta una matriz de letras, donde los caracteres se activan de uno en uno aleatoriamente, el usuario produce en la corteza cerebral potenciales P300 sólo mirando los caracteres de interés sin mover músculo alguno.

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.

Por el contrario 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. En este caso las señales se deben analizar y clasificar continuamente, los eventos mentales se debe distinguir entre el ruido y eventos no mentales para finalmente transformarlos en comandos o mensajes.

Cuando se implantan por medio de cirugía electrodos en la corteza cerebral para obtener las señales eléctricas, se obtiene un BCI *invasivo*. Las técnicas invasivas proveen mayor resolución espacial, mayor precisión en las señales obtenidas y menores niveles de ruido por lo que los mensajes y comandos son más precisos y rápidos. Sin embargo los BCI invasivos son muy costosos, delicados y adecuados sólo para aplicaciones clínicas.

En los BCI *no-invasivos*, los electrodos se ubican en la superficie externa de la corteza cerebral del usuario por lo que no es necesaria una intervención quirúrgica. Un BCI de este tipo basa su funcionamiento en la adquisición de la actividad electroencefalográfica. Estas características los hacen muy económicos, sin embargo, son más susceptibles al ruido por lo que requieren sistemas de adquisición y procesamiento de señales muy precisos. Los BCI no-invasivos son los más comunes.

1.6.- Partes de un BCI

Al igual que cualquier sistema de comunicación o control, un BCI cuenta con entradas (actividad eléctrica), salidas (mensajes o acciones), componentes de procesamiento que convierten la entrada en la salida y un protocolo que determina el inicio, tiempo de operación y otras características del sistema. En este sentido, un BCI

está compuesto de cuatro componentes principales, un bloque de adquisición de señales, una parte de procesamiento de señales, un bloque de interfaz con la aplicación y un protocolo de operación. En la figura 1.6.1 se muestra el esquema típico de un BCI.

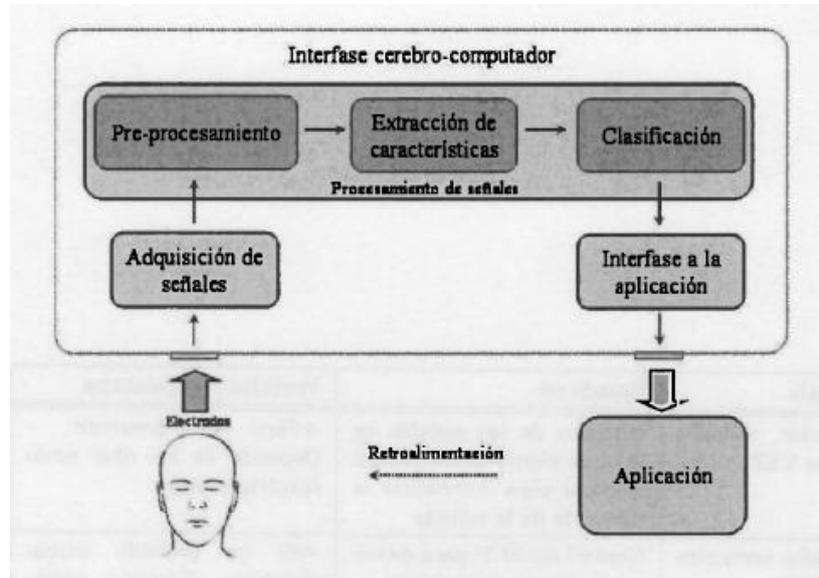


Fig. 1.6.1: Esquema de un BCI.

En el bloque de adquisición de señales se adquiere la actividad eléctrica cerebral por medio de electrodos implantados en el cerebro o ubicados en la corteza cerebral, las señales se amplifican y finalmente se digitalizan para su procesamiento en equipos computacionales.

En el bloque procesamiento de señales, en una primera etapa se eliminan ruidos y señales espurias o artefactos, se filtran las frecuencias indeseadas, se normaliza las señales, etc. Posteriormente, por medio de análisis espectral, temporal u otro, se calculan las características de las señales normalizadas, como energía, media, desviación estándar, frecuencias más importantes, picos en amplitud, etc. Estas características son importantes porque codifican los mensajes o comandos del usuario. Después, se usan algoritmos de clasificación para asociar las características obtenidas con comandos que expresan la intención del usuario.

En el bloque de interfaz con la aplicación, el mensaje o comando se convierte en una acción que afecta al entorno en el que está el usuario. En algunos BCI este dispositivo de salida puede ser un monitor donde se puede seleccionar objetos, letras, o manipular un cursor, en otros BCI puede ser el movimiento de una neuroprótesis, el control de una silla de ruedas robótica o el control de un navegador en Internet, etc.

1.7.- BCI's en operación

Existen varios grupos de investigación que desarrollan BCI's para determinar mensajes y comandos de los usuarios a partir de una gran variedad de señales electrofisiológicas. Basándonos en esto, existen seis diferentes tendencias en BCI, éstas son: sistemas que usan potenciales visuales evocados, potenciales corticales lentos SCP, potenciales evocados P300, ritmos beta y mu, potenciales de acción cortical neuronal y finalmente mapeo de patrones EEG. En la tabla 1.7.1 se muestra una descripción de las características de los actuales sistemas BCI.

Tecnología	Basada en	Ventajas y desventajas
Potenciales visuales evocados VEP	Registro de las señales en la zona visual de la corteza cerebral para determinar la dirección de la mirada	+Fácil de construir; -Depende de los ojos como trayecto motor
Potenciales verticales lentos SCP	Control del SCP para mover un cursor en un monitor	+Se ha probado extensamente; -Necesita entrenamiento
Potenciales evocados P300	Observar el cambio positivo que se genera ante algún estímulo	+No requiere de entrenamiento; -Independiente del estímulo
Ritmos mu y beta	Características ERD y ERS de los ritmos	+Independiente del EEG; +No requiere de la acción motriz
Potenciales de acción	Medición de la actividad de pequeños grupos de neuronas	+Alta precisión; -Requiere equipo especial
Mapeo de patrones EEG		+Alta precisión; -Requiere entrenamiento

Tabla 1.7.1: Descripción de los sistemas BCI.