

Interfaces cerebro-ordenador

Un interfaz cerebro-ordenador, en inglés *Brain-Computer Interface* (BCI), es un sistema que permite la comunicación con una máquina o un ordenador sin movimiento. Los BCI registran la señal de electroencefalografía (EEG) y luego procesan esta información extrayendo la parte relevante para controlar una máquina o dispositivo del cual se tiene un *feedback*.



Eloy Opisso
Gestor de proyectos
Oficina de Investigación e Innovación
Fundación Institut Guttmann

La idea de conectar la mente humana con una máquina ha sido siempre algo que hemos visto muy futurista y que ha sido muy común tanto en novelas como películas de ciencia ficción. Unos ejem-

plos de interfaces cerebro-ordenador los podemos encontrar en las novelas *Sueñan los androides con ovejas eléctricas* o *Ubik*, o en conocidas películas como *The Matrix*, *Desafío Total*, *X-Men* o *Avatar*.

Sin embargo, los recientes avances en neurociencia e ingeniería han acercado la posibilidad de esta conexión entre la mente humana y una máquina, hasta el punto que han abierto la posibilidad de



Escena de *The Matrix* (1999, Warner Bros).

A fondo

restaurar y, potencialmente, aumentar las capacidades humanas tanto físicas como mentales.

Quedan ya lejos los implantes cocleares o los estimuladores cerebrales profundos, dispositivos novedosos implantados que utilizaban corriente eléctrica para conseguir hacer llegar información o cambiar las condiciones bioeléctricas del cerebro. Hoy por hoy, estos sistemas, también llamados **neuroprótesis**, se han convertido en opciones terapéuticas plenamente en uso para personas sordas o con enfermedad de Parkinson y ejemplos de cómo se puede establecer un sistema de comunicación de la máquina hacia el cerebro. Aquí, sin embargo, hablaremos de establecer esta comunicación, pero en el otro sentido, es decir, del cerebro hacia la máquina.

Un interfaz cerebro-ordenador, en inglés **Brain-Computer Interface (BCI)** o **Brain-Machine Interface (BMI)**, es un sistema que permite la comunicación con una máquina o un ordenador sin movimiento. Los BCI registran la señal de electroencefalografía (EEG) y luego procesan esta información extrayendo la parte relevante para controlar una máquina o dispositivo de la cual se tiene un feedback.

Según cómo se registra el EEG, hablaremos de BCI invasivos, cuando los electrodos están en contacto con el córtex cerebral (en general, corteza motora) debajo del cráneo, o BCI no-invasivos, cuando los electrodos se colocan sobre el cuero cabelludo.

El estudio de la señal eléctrica del cerebro o EEG es fundamental para que un BCI funcione. Esta señal eléctrica, en forma de las llamadas ondas cerebrales, se debe a la actividad constante de los miles de millones de neuronas que tiene nuestro cerebro, que no cesa ni cuando estamos dormidos. Sin embargo, de toda la actividad eléctrica



Mono usando BCI. (Adaptado de: Carmena, J.M et al. 2003. Learning to control a brain-machine interface for reaching and grasping by primates. PLoS Biology, 1: 193-208. CC-BY).

que producen, solamente nos interesa una parte, aquella que el sujeto puede controlar voluntariamente. El resto solo es ruido eléctrico que oculta la señal de interés. La complejidad de estos sistemas radica en la dificultad de extraer esa información, sobre todo por el ruido existente y porque estamos hablando de señales muy pequeñas, aproximadamente 1 millón de veces más pequeñas que el voltaje que proporciona una pila. Es como si el cerebro fuera el Camp Nou cuando está lleno de gente, y simplemente se quisiera,

actividades sencillas que un sujeto puede realizar a voluntad y, en consecuencia, cuando son detectadas por el BCI mediante actividad EEG relevante, estas se ligan a cierta acción externa. Estas tareas mentales pueden ser tales como contar mentalmente, atender a una pantalla con luces, imaginar navegación espacial, imaginar que mueves una mano, un pie...

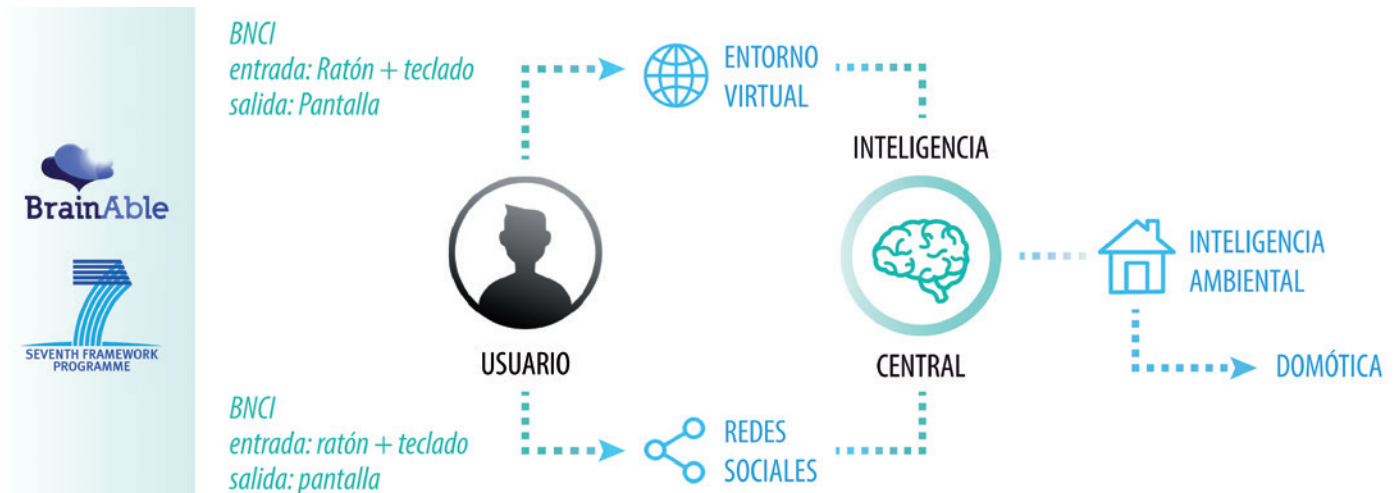
Con independencia de qué tarea se escoja (a algunos individuos les puede resultar más fácil una u otra), un sistema

“La complejidad de estos sistemas radica en la dificultad de extraer sólo aquella actividad eléctrica voluntaria de todo el ruido eléctrico que produce nuestro cerebro.”

con unos micrófonos muy sofisticados, desde fuera o desde dentro (invasivos frente a no invasivos), escuchar una conversación que tiene lugar en el palco que fuera la que te condicionara una comunicación con un elemento externo.

Es sabido que ciertas tareas mentales (conversación del palco) producen cierta actividad EEG localizada y que esta es estable en el tiempo para un mismo individuo. Estas tareas mentales son

BCI siempre requerirá un periodo de entrenamiento en esta tarea, con un doble objetivo: primero, que el sujeto aprenda a realizar la actividad mental de una manera consistente; segundo, que la máquina aprenda cuál es la variabilidad de EEG que el individuo produce y, por lo tanto, interprete de una manera fiable si el sujeto quiere o no realizar cierta acción. En general, las aplicaciones o tareas que se usan en BCI no-invasivos son binarias, es



Proyecto Brainable. Representación del sistema y captura de su funcionamiento.

decir, la interacción del sujeto se limita a "sí o no". Por ejemplo, el hecho de imaginar que "muevo la mano o no" puede estar correlacionado con "encender o apagar" una máquina o, si se controla una silla de ruedas, con el "adelante o para". En BCI invasivos esto es más complicado y se puede llegar a controlar sistemas con múltiples grados de libertad (posibles respuestas), como, por ejemplo, los motores que controlan un brazo robótico.

El nombre de BCI para los interfaces cerebro-ordenador fue acuñado por primera vez por el ingeniero belga Dr. Jacques J. Vidal, que durante los años setenta trabajó en el desarrollo de sistemas de interacción hombre-máquina dentro de un gran proyecto (University of California Los Angeles) financiado por el gobierno de los Estados Unidos.

Hasta la fecha, ha habido muchos investigadores tanto en Estados Unidos como en Europa interesados en los BCI. Uno de los más activos durante muchos años ha sido el médico brasileño afincado en Estados Unidos (Duke University), Dr. Miguel Nicolelis, quien, por muchos años, ha demostrado la viabilidad de usar múltiples electrodos invasivos para controlar un brazo robótico en

primates. El Dr. Nicolelis, además, es conocido porque, gracias a su trabajo, el saque inicial del partido inaugural en el pasado Mundial de Brasil de 2014 lo realizó, simbólicamente, una persona con una paraplejía debida a una lesión medular. La persona, que llevaba un exoesqueleto robótico, fue capaz de realizar el puntapié inicial controlando el exoesqueleto mediante un BCI no invasivo.

Pero si hablamos de BCI usados por personas con discapacidades motoras, probablemente, el más espectacular es el caso que salió en la prensa en el 2012, acompañado de una publicación en la prestigiosa revista *Nature* (www.nature.com/articles/nature11076). En esta publicación, investigadores de la Brown University, liderados por el Profesor John Donoghue, demostraron cómo una mujer con una tetraplejía después de un ictus de más de 15 años de evolución era capaz de controlar un brazo robótico y beber autónomamente mediante un BCI invasivo que llevaba una matriz de electrodos, llamada **BrainGate™**.

Durante estos años, el Institut Guttmann ha participado en diferentes proyectos europeos con el objetivo de investigar más en estas tecnologías y proporcionar

a nuestros pacientes la información más actualizada de lo que se puede y no se puede realizar con los BCI. Entre ellos cabría destacar:

BrainAble

Fue un proyecto del séptimo programa marco de la Comisión Europea (2010-2012) que tenía por objetivo el diseño y el desarrollo de un sistema basado en BCI para personas con discapacidad severa para el pleno control de un entorno domótico. El proyecto acabó en un prototipo final que fue probado por pacientes del Institut Guttmann con relativo éxito. Desafortunadamente, el prototipo no acabó convirtiéndose en un producto, en parte debido a la inmadurez de la tecnología y a una falta clara de usabilidad que hacía inviable su transferencia al mercado.

WAY Project

Otro proyecto europeo del séptimo programa marco en el que participó el Institut Guttmann fue el WAY (2012-2015). Este proyecto tenía como objetivo utilizar un sistema BCI para el control de una prótesis de



Proyecto WAY. Esquema de trabajo y aplicación.

mano para personas con amputaciones en el antebrazo, y de una ortesis robótica para personas con debilidad o manos no funcionales debido a una lesión neurológica. El proyecto también acabó con unas pruebas de usabilidad de un prototipo final que tampoco tuvo continuidad debido a lo inmaduro de la tecnología usada. Esperamos que tenga continuidad en futuros proyectos para continuar la evolución de este prototipo.

BNCI Horizon 2020

Finalmente, el Institut Guttmann también participó en un proyecto europeo llamado **BNCI Horizon 2020** (<http://www.bnci-horizon-2020.eu/>). Este proyecto reunió a entidades europeas de diferentes áreas, es decir, universidades, empresas, centros tecnológicos y hospitales, todos ellos expertos en el mundo de los BCI, con el objetivo de trazar una hoja de ruta del futuro de los BCI para los próximos años. El resultado final fue el desarrollo de un documento que recoge en detalle qué se puede esperar de los BCI en los próximos 15-20 años. El documento está escrito en un lenguaje no técnico y puede descargarse en la página web

del proyecto y en el siguiente link: <http://dx.doi.org/10.3217/978-3-85125-379-5>.

En el proyecto se redefine el concepto de BCI, y se complementa al añadir que la información relevante (“conversación del palco”) que se extrae pueda ser usada en 5 escenarios distintos tanto clínicos como no clínicos. En el documento se pueden encontrar ejemplos con dibujos de cada uno de los escenarios, así como las recomendaciones o pasos necesarios para conseguir que estas aplicaciones sean una realidad. Concretamente en cada uno de los escenarios, un BCI se puede usar:

— **Para el reemplazo de funciones** que han sido perdidas debido a una lesión o enfermedad (por ejemplo, los BCI para la comunicación en personas con trastornos de la consciencia o para el control de una silla de ruedas).

— **Para la restauración de funciones perdidas** por una lesión o enfermedad (por ejemplo, los BCI para la estimulación de músculos en una persona con una paraplejia, tetraplejia o hemiplejia, o para la estimulación de nervios para recuperar la función miccional).

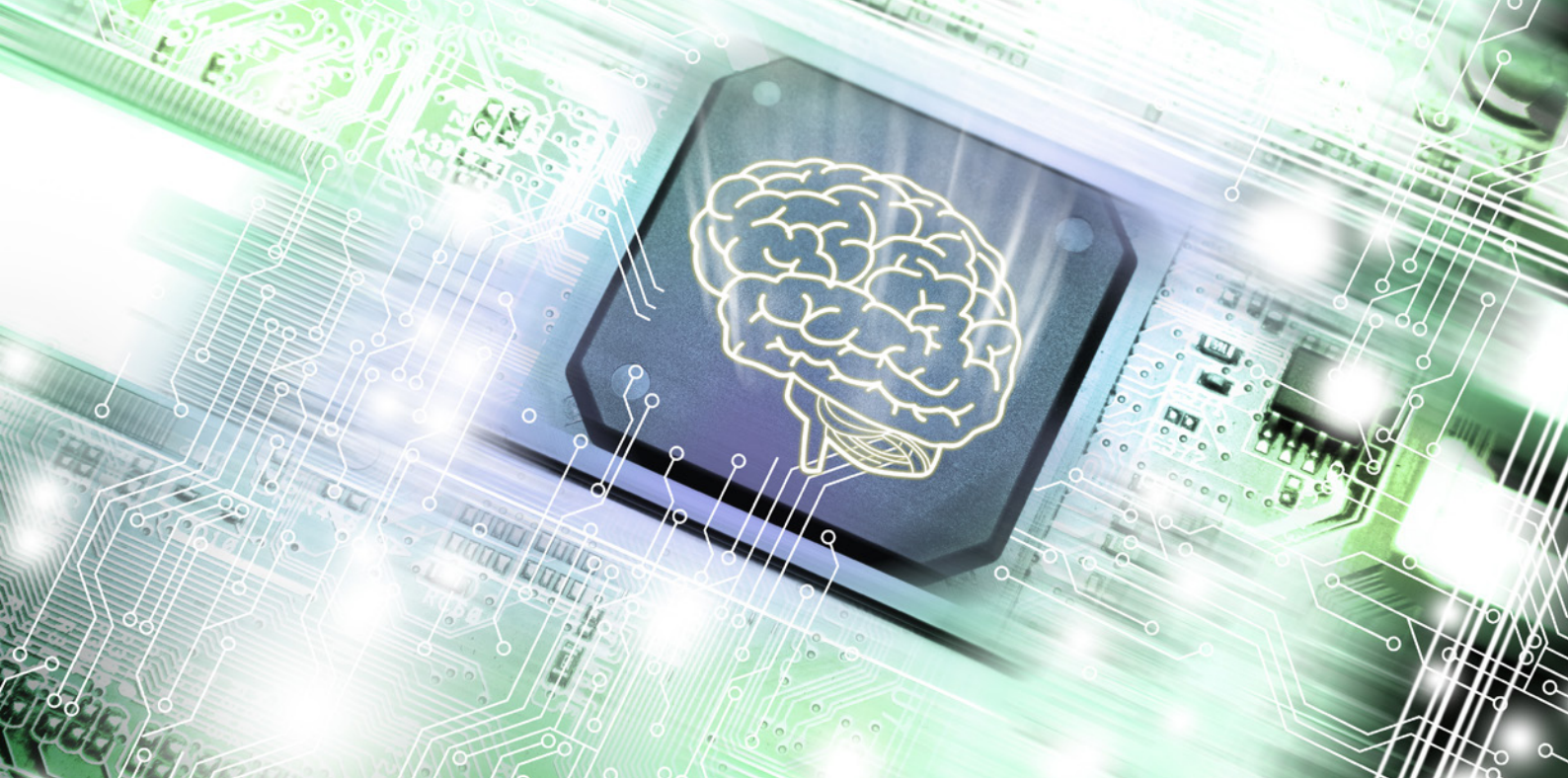
— **Para el entrenamiento de funciones perdidas** (por ejemplo, los BCI usados en rehabilitación del Ictus).

— **Para la mejora de funciones cognitivas** (por ejemplo, los BCI pueden ser usados para la detección de niveles de estrés o problemas de atención durante tareas que requieren alta demanda).

— **Para la investigación de funciones cerebrales** (por ejemplo, el trabajo con los BCI podría ayudar a identificar cuándo y cómo se produce la toma de decisiones).

De cada uno de los escenarios, en el documento se puede encontrar qué existe, hoy por hoy, disponible (como los BCI que utilizan estímulos visuales para escribir letras) y, por lo tanto, es una realidad, en qué se está trabajando (los BCI que son capaces de decodificar movimientos y, por lo tanto, controlar sistemas de múltiples grados de libertad) y qué se prevé que pueda ser una realidad en 20 años (los BCI que sean capaces de decodificar el habla).

Otros de los temas estudiados en el proyecto fueron los **aspectos éticos** que conlleva el uso de los BCI y el



control de elementos externos mediante estas interfaces, en especial si se tiene en cuenta su uso a largo plazo y sus múltiples aplicaciones. En una primera instancia, los principales problemas éticos que pudieran surgir no difieren mucho de los problemas que ya nos encontramos con el uso de las tecnologías de la información y la comunicación, como pueden ser temas de privacidad y confidencialidad de los datos personales. Sin embargo, en el campo de los BCI existen otro tipo de dilemas que tienen que ver con la falta de evidencia de los efectos a largo plazo del uso de una parte del cerebro conectado a una máquina de una ma-

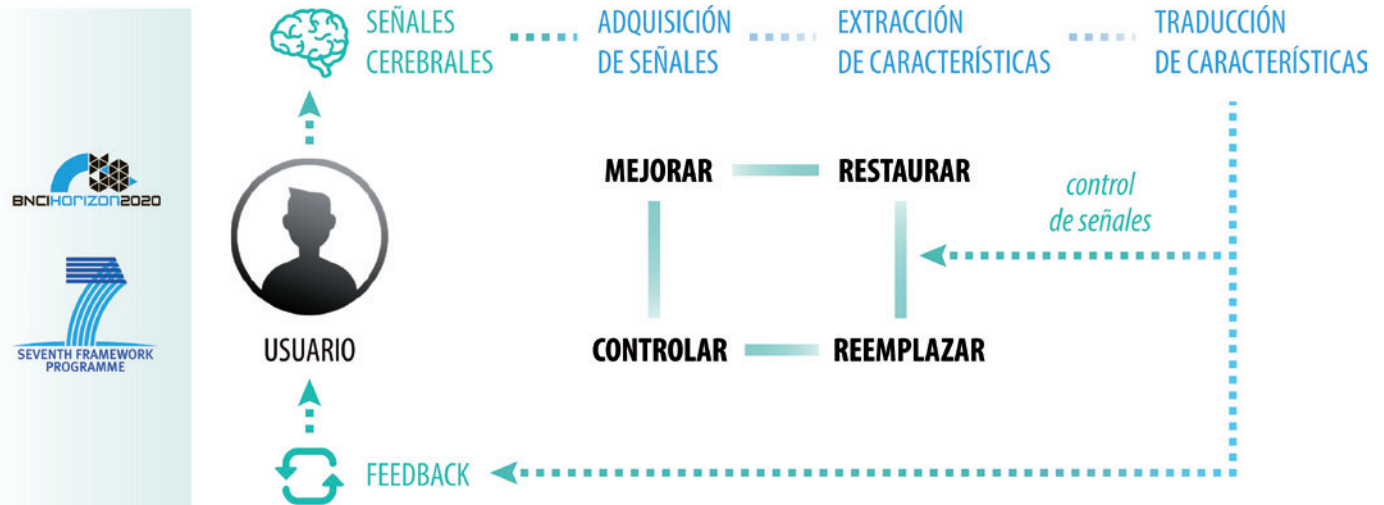
nera intensiva. Por el momento, todo apunta a que aspectos de seguridad, responsabilidad y privacidad jugarán un papel importante debido a la falta de recorrido de las aplicaciones con BCI. Por ejemplo, dada la **plasticidad cerebral** (la capacidad intrínseca del cerebro de modificar sus conexiones y función), se desconocen por completo qué alteraciones a nivel neuronal pueden generar cambios significativos en la personalidad y/o comportamiento del individuo como consecuencia de un uso intensivo de un BCI.

En los próximos años, la sociedad será testigo de una expansión del uso

de los BCI tanto para el ocio como para aplicaciones de salud y seguridad activa. El intercambio inevitable de los datos personales del cerebro que estas aplicaciones conllevan puede dar lugar a inquietudes en relación con el uso inesperado o no autorizado de estos. La mejora de las capacidades humanas con el uso de los BCI es también un tema controvertido, y seguramente será algo que deberá ser regulado. Además de tener que mejorar las técnicas de análisis y detección de la señal de interés (“conversación del palco”), como se comentaba anteriormente, los BCI, hoy por hoy, siguen teniendo un gran problema de **usabilidad**. Y es

	Disponible	En progreso	Visión
Reemplazo	<i>BCIs de estímulos visuales para deletrear, o de Sí/No</i>	<i>BCIs que decodifican palabras</i>	<i>BCIs que decodifican el habla</i>
Restauración	<i>BCIs que controlan ortesis de mano</i>	<i>BCIs que decodifican movimientos simples</i>	<i>BCIs que decodifican movimientos complejos</i>
Entrenamiento	<i>Registro de EEG durante la rehabilitación</i>	<i>Ensayos clínicos con BCIs/ Uso clínico</i>	<i>BCIs para la rehabilitación domiciliar</i>
Mejora	<i>BCIs que detectan fatiga</i>	<i>BCIs que detectan estados cerebrales</i>	<i>BCIs en las actividades de la vida diaria</i>
Investigación		<i>BCIs en investigación</i>	<i>BCIs interoperables y fáciles de usar</i>

Panorama actual y futuro de los BCIs según los escenarios de aplicación.



Proyecto BNCI Horizon 2020. Esquema de funcionamiento y escenarios de aplicación en la vida cotidiana.

que los BCI siguen siendo sistemas controlados por ordenadores y que en muchos casos son esclavos de amplificadores que deben estar conectados a la red eléctrica. Una de las líneas de trabajo, es, pues, convertir estos sistemas estacionarios en sistemas portátiles o, mejor aún, en sistemas vestibles o “wearables” que puedan ser usados en el día a día por personas con discapacidad, por ejemplo. En los últimos años, sin embargo, ha crecido la oferta de sistemas comerciales

usado, entre otros problemas, para el tratamiento de niños con trastorno con déficit de atención por hiperactividad, aunque su eficacia sigue cuestionada.

Otra de las líneas de trabajo con campo para la mejora son los electrodos. Tanto en los BCI invasivos como no invasivos, los electrodos están conectados físicamente, mediante cables, a los amplificadores. Aunque esto está a punto de cambiar, el Dr. Nicoletis ha publicado recientemente un artículo

los BCI puedan ser utilizados a largo plazo, puesto que con el tiempo el gel se seca y pierde las propiedades de conductividad. En los últimos años se ha trabajado en una solución para eliminar la necesidad de tener que añadir el gel. Esta solución ha venido por medio de unos electrodos sin gel acabados en un baño de oro conocidos como “electrodos secos”, y otros electrodos conocidos como “electrodos de gel sólido”, que llevan un gel en estado sólido que poco a poco se va liberando para mantener la conductividad en niveles aceptables para el correcto registro del EEG.

“En los próximos años, la sociedad será testigo de una expansión del uso de los BCI tanto para el ocio como para aplicaciones de salud y seguridad activa.”

basados en los BCI que se ofrecen a precios muy competitivos y, en parte, solucionan los problemas de usabilidad. Estos sistemas, basados inicialmente en juegos, ofrecen cada vez más aplicaciones terapéuticas (aunque no hay evidencia) que utilizan EEG y otro tipo de señales biomédicas para generar un *feedback* que pueda ser controlado mediante auto-regulación de diferentes estados mentales (como relajación). Esto se conoce con el nombre de **neurofeedback**, y ha sido

donde demuestra la viabilidad de utilizar electrodos sin cables para controlar una silla de ruedas en monos (<http://www.nature.com/articles/srep22170>).

Además, cuando utilizamos BCI no-invasivos, existe aún otro gran problema con los electrodos. Este radica en la necesidad, hasta ahora, de utilizar gel conductor entre el electrodo y el cuero cabelludo para mejorar la calidad de la señal y reducir el ruido eléctrico. La utilización de este gel hace inviable que

Finalmente, el Institut Guttmann tiene la suerte de colaborar estrechamente con dos empresas punteras a nivel mundial en el campo de los BCI como son: la empresa catalana Neuroelectrics® (<http://www.neuroelectrics.com/>) y la empresa austriaca g.tec (<http://www.gtec.at/>), que también tiene oficina en Barcelona. Conjuntamente con ellos y con centros tecnológicos y universidades, creemos que Barcelona reúne la suficiente masa crítica como para esperar que de aquí salgan algunas de las soluciones, basadas en los BCI, a los problemas con que los pacientes del Institut Guttmann se enfrentan a diario.