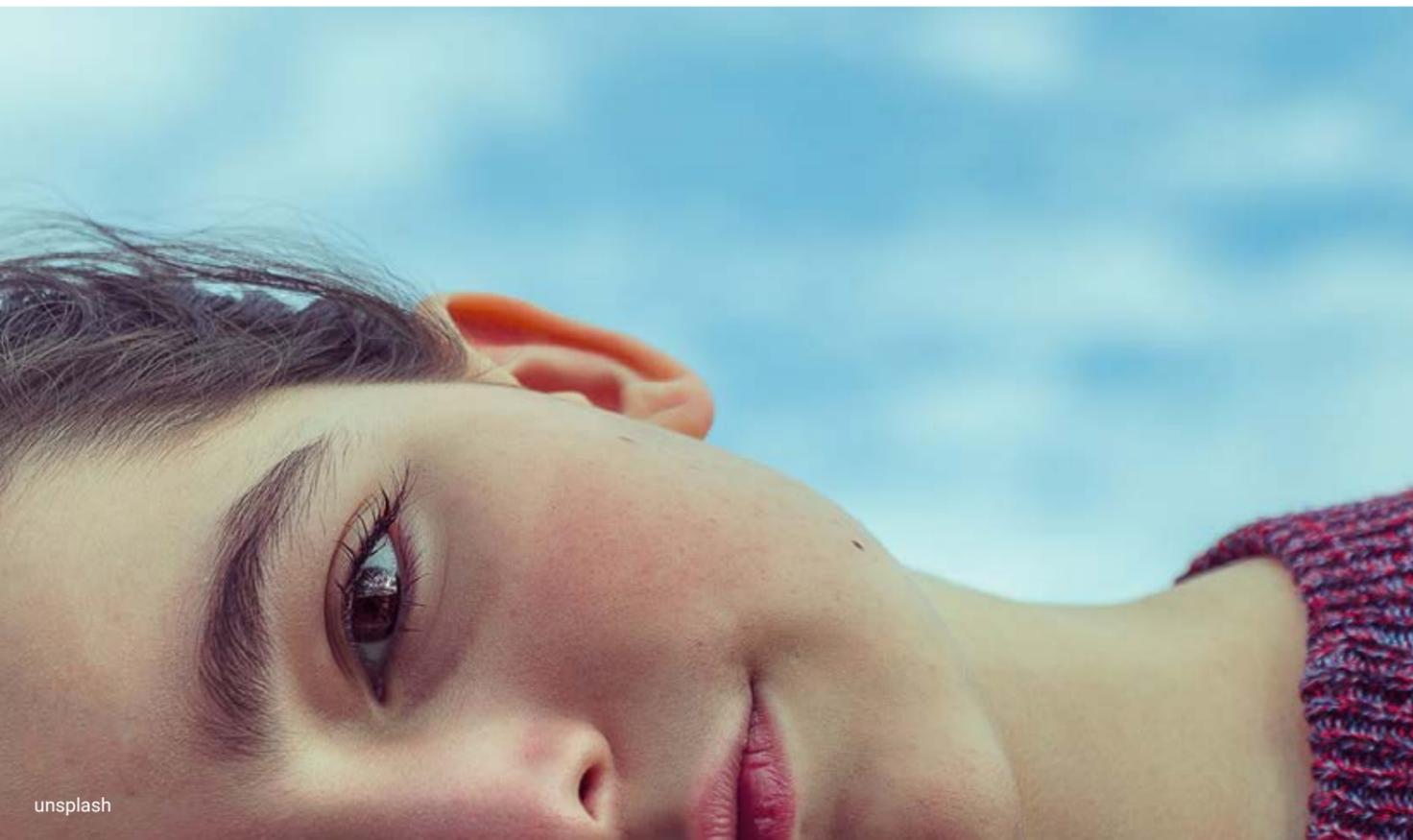


# Avances en microtecnologías y en inteligencia artificial podrían hacer la neurotecnología disruptiva

“Todas las barreras éticas pueden ir rebajándose, adentrándonos en un nuevo mundo que quizá dentro de unas pocas generaciones no se parezca en nada al actual.”

José María de Teresa



**E**n una charla dentro del ciclo de charlas divulgativas “Encuentros con la Ciencia” del 24 de noviembre de 2022, abordaba la cuestión de si la neurotecnología es o puede llegar a ser una tecnología disruptiva (por tecnología disruptiva entendemos aquella que produce un gran impacto en la sociedad y/o en la economía, pudiendo cambiar drásticamente la manera en la que el ser humano desarrolla sus actividades). Trasladaré el hilo conductor de dicha charla a este artículo, y lo enriqueceré con datos muy relevantes proporcionados por la empresa Neuralink en un vídeo que emitió el 30 de noviembre de 2022 y en un artículo publicado previamente en 2019.<sup>1</sup> En dicho vídeo, esta empresa liderada por Elon Musk, mostró los avances que había realizado en los últimos dos años en el campo de los implantes cerebrales. Es realmente sorprendente que el mismo día, el 30 de noviembre de 2022, otra empresa liderada por Elon Musk hiciese pública, y accesible de modo gratuito, una herramienta de inteligencia artificial que se ha hecho viral: ChatGPT-3 (<https://chat.openai.com/chat>). Se trata de un chat avanzado en procesamiento del lenguaje natural que

es capaz de mantener conversaciones cuasi-humanas y generar contenidos nuevos. Pero la inteligencia artificial va mucho más allá y comienza a impregnar muchos otros campos, como por ejemplo su uso para descodificar las señales cerebrales. Todo hace indicar que nos encontramos en el caldo de cultivo idóneo para que se desarrollen avances muy significativos en neurotecnología, llegando a convertirse en una tecnología disruptiva como en su momento lo fueron la máquina de vapor y la electricidad. Y quién sabe si las generaciones venideras considerarán la fecha del 30 de noviembre de 2022 como una fecha de culto, clave para el desarrollo de la neurotecnología y de la inteligencia artificial.

No cabe duda de que, desde que a finales del siglo XIX dos grandes científicos, Santiago Ramón y Cajal y Joseph John Thomson, iniciaran respectivamente los campos de la neurociencia y la electrónica, se han realizado avances muy significativos en el conocimiento del cerebro y en el desarrollo de los dispositivos electrónicos. La confluencia de ambos campos de trabajo ha conducido al nacimiento de la neurotecnología, entre cuyos objetivos se encuentran el desarrollo de dispositivos que puedan leer e interpretar las señales eléctricas que crean las neuronas en nuestro cerebro, así como estimular eléctricamente las neuronas allí donde sea necesario (cerebro, médula espinal, etc.).<sup>2</sup> La base de esta tecnología reside en el hecho de que la comunicación entre las neuronas se produce intercambiando señales eléctricas y químicas. El objeto de la mayor parte de la investigación actual en el campo de la neurotecnología se centra, por un lado, en conseguir detectar y descodificar esas señales eléctricas y, por otro, en activar las neuronas mediante estimulación eléctrica. ¿Cómo es esto posible?

En la figura de la página siguiente se muestran algunos dispositivos que se han desarrollado para detectar externamente las minúsculas señales eléctricas que se producen cuando se activan las neuronas. Entre ellos podemos observar diademas y bandas como las que ha desarrollado la empresa zaragozana Bitbrain (<https://www.bitbrain.com/es>), cascos como los que ha desarrollado la empresa Kernel (<https://www.kernel.com/>), y pulseras como las que ha desarrollado la empresa CTRL-labs (adquirida en 2019 por Facebook). Dado que estas señales eléctricas son muy débiles y su detección ocurre a distancias relativamente grandes, en muchas situaciones y aplicaciones no es posible obtener información relevante. En ese caso, es necesario acercarse más al lugar en el que estas señales se producen. ¿Podemos hacer esto?

“La inteligencia artificial comienza a impregnar campos como por ejemplo su uso para descodificar las señales cerebrales.”

#### REFERENCIAS

1. E. Musk et al., “An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels”, *J. Med. Internet Res.* 21, e16194 (2019) y vídeo del 30 de noviembre de 2022 disponible en el enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=YreDYmXTYi4>
2. A. Vázquez-Guardado et al., “Recent advances in neurotechnologies with broad potential for neuroscience research”, *Nature Neuroscience* 23, 1522 (2020).



Imágenes cedidas por el autor.

▲  
**Ejemplos de interfaces cerebro-máquina (diadema y banda de la empresa Bitbrain y casco de la empresa Kernel) y de captación de las señales eléctricas neuromotoras (pulsera de la empresa CTRL-labs).**

En la figura de la derecha se muestran las opciones más habituales para detectar las señales eléctricas que se producen en el cerebro, que de mayor a menor grado de invasión corresponden a:

1. EEG o electroencefalografía, colocando electrodos en el cuero cabelludo.
2. ECoG o electrocorticografía, colocando electrodos sobre la superficie del cerebro.
3. Microelectrodos intracorticales, que penetran ligeramente en la corteza cerebral.
4. Electrodo profundos, que penetran hasta el interior del cerebro.

Los electrodos profundos pueden también utilizarse para aplicar voltajes eléctricos controlados, técnica que se denomina estimulación cerebral profunda y que se utiliza para tratar enfermedades graves como Parkinson, epilepsia, distonía, depresión, Alzheimer, etc.<sup>3</sup> En todos estos casos mencionados, los electrodos se conectan externamente mediante cables a equipos electrónicos, por lo que su uso está normalmente restringido a un entorno clínico.

La estimulación neuronal es muy útil no solo en el cerebro sino también en otros órganos, de los que aquí re-

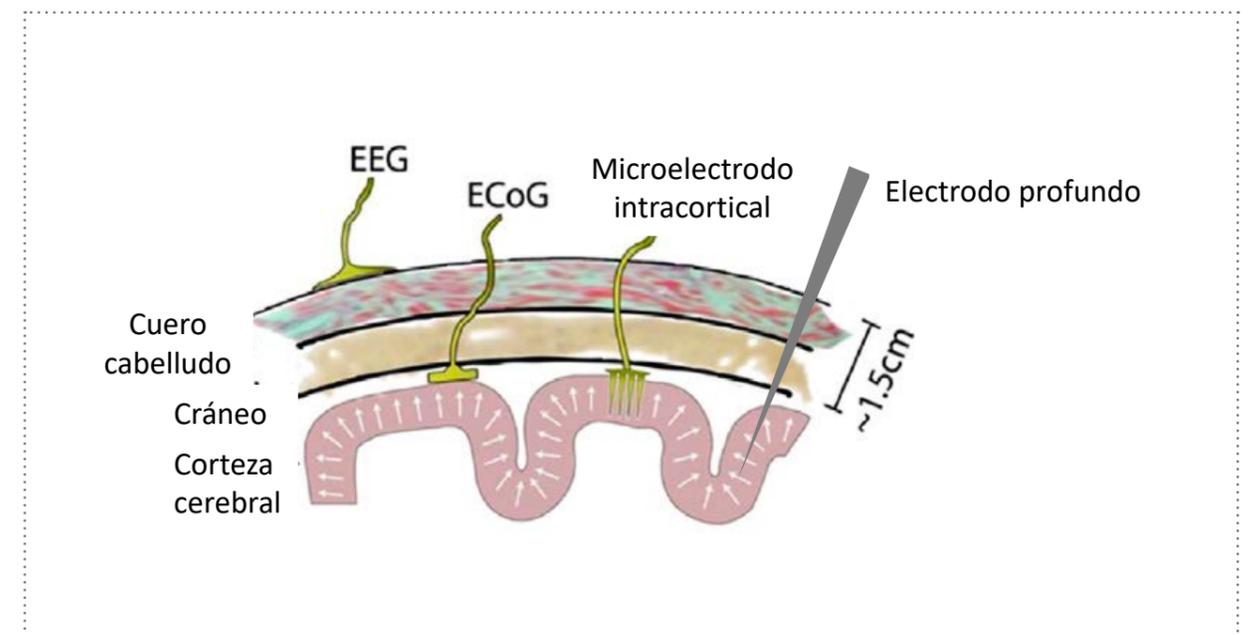
“El implante coclear se introduce en el interior de la cóclea y consiste en un pequeño tubo de material plástico que contiene electrodos.”

cogeré dos ejemplos. El primer ejemplo que consideraremos es el de la estimulación del nervio acústico, que recoge señales en la cóclea, situada en el oído interno, y las lleva hasta las zonas del cerebro (colliculus y cortex auditivo), que las interpreta como sonidos. Esta estimulación se consigue gracias a un dispositivo llamado implante coclear, que se introduce en el interior de la cóclea y consiste en un pequeño tubo de material plástico que contiene electrodos. Estos electrodos crean corrientes eléctricas que estimulan el nervio acústico y sustituyen a la estimulación natural producida por el movimiento de los cilios de la pared de la cóclea. El implante coclear es por tanto una prótesis que se utiliza en casos graves de sordera en los que el circuito del sonido desde el oído externo al interno tiene una deficiencia grave. Hasta la fecha, se han realizado en el mundo más de 700.000 operaciones para implantar estas prótesis que permiten oír con cierta fidelidad a personas que han perdido esa capacidad totalmente o en su práctica totalidad.<sup>4</sup>

El segundo ejemplo que consideraremos es el de la estimulación neuronal en la zona de la médula espinal que regula el movimiento de las extremidades. Es de especial interés para pacientes que han sufrido un accidente grave y tienen dañado el circuito neuronal que desde el cerebro envía las órdenes a las neuronas motoras, como por ejemplo las personas tetraplégicas. Uno de los avances recientes más importantes en este campo fue publicado en 2022 por un grupo internacional de

3. J. K. Krauss et al., “Technology of deep brain stimulation: current status and future directions”, *Nature Reviews Neurology* 17, 75 (2021).
4. G. Clark, “The multi-channel cochlear implant: Past, present and future perspectives”, *Cochlear Implants Int.* 10, 2 (2009).

**Detección de señales eléctricas del cerebro mediante diferentes métodos que se describen en detalle en el texto.**



investigadores liderado por un grupo del centro EPFL en Lausana (Suiza).<sup>5</sup> En este trabajo se describe cómo una estimulación eléctrica específica para cada paciente, realizada de modo inalámbrico desde un ordenador a los electrodos insertados en la médula espinal, permitió a tres pacientes inmovilizados levantarse, andar y nadar en un solo día. Aunque todavía estamos lejos de que esta tecnología pueda implementarse médicamente de modo masivo, estos resultados representan una prueba de concepto prometedora de las importantes aplicaciones que la neurotecnología puede tener en el ámbito médico.

Aunque todos estos avances médicos realizados gracias a la neurotecnología son importantes, no serían suficientes para considerarla una tecnología disruptiva, ya que solo serían de aplicación para una pequeña parte de la población que necesita recuperar ciertas capacidades funcionales. Lo que sí que podría hacer a la neurotecnología disruptiva sería el desarrollo de implantes cerebrales que permitiesen, más allá de ser utilizados para aplicaciones médicas, el aumento de las capaci-

dades cognitivas del ser humano (*ser aumentado*) y la comunicación de pensamientos y órdenes de modo inalámbrico (lo que comúnmente ha sido denominado *telepatía*). ¿Es esto posible? ¿Es esto éticamente aceptable? El resto del artículo abordará estas dos cuestiones.

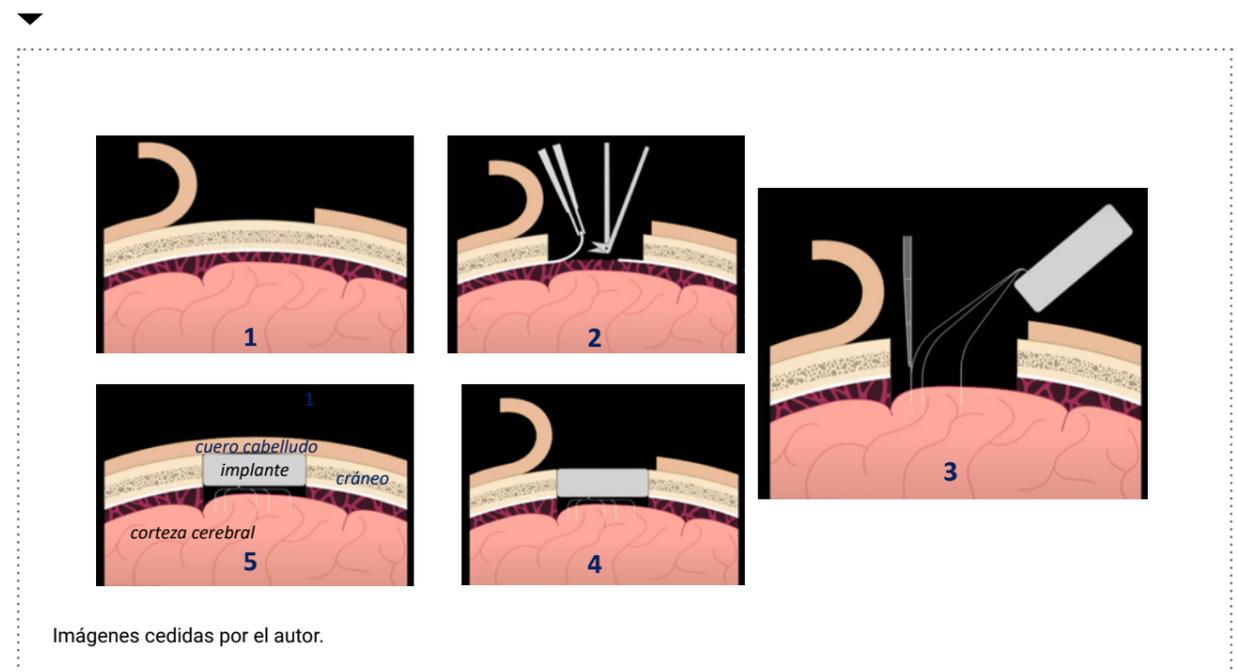
En primer lugar, abordaremos aspectos técnicos sobre los implantes cerebrales que reciben y transmiten información de modo inalámbrico. Aunque hay varias empresas y grupos de investigación trabajando en este tema, si consideramos la información que se ha hecho pública, la empresa Neuralink es la más avanzada en el conjunto de desarrollos tecnológicos que son necesarios para hacer dispositivos utilizables de modo amplio por la población. En concreto, desarrollos relacionados con:

- El robot que hace la implantación del microchip y de los microelectrodos.
- El diseño y fabricación del microchip que captura las señales eléctricas detectadas por los microelectrodos.
- El análisis e interpretación de dichas señales en experimentos realizados con seres vivos.

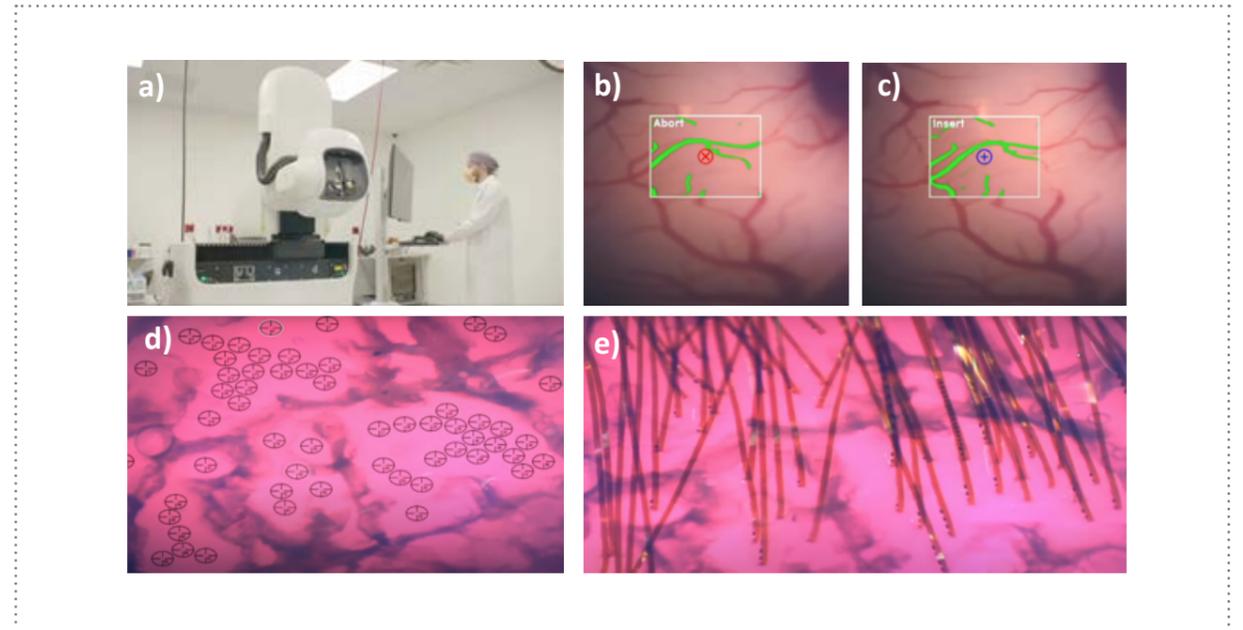
A continuación, iremos desgranando estos avances.

Tal y como se muestra en la figura, Neuralink ha elaborado un método para realizar la implantación del microchip y los microelectrodos que consiste en:

**Esquema de los diferentes pasos seguidos por el robot creado por la empresa Neuralink para realizar implantes cerebrales en seres vivos.**



Imágenes cedidas por el autor.



**a) Robot creado por Neuralink para realizar implantes cerebrales.**

**b) y c) imágenes que toma el robot antes de realizar la inserción de cada microelectrodo con el objetivo de que este no caiga sobre un capilar.**

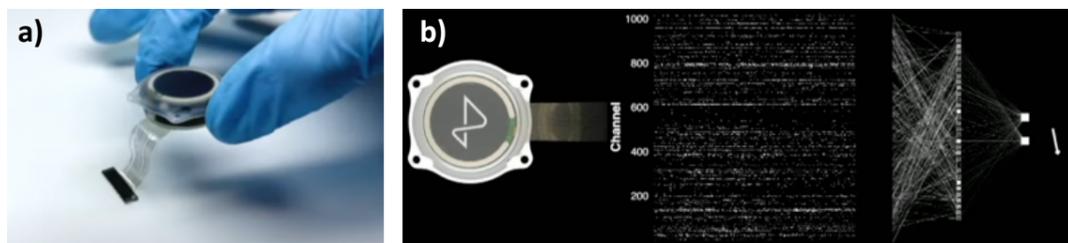
**d) posiciones previstas para implantar electrodos; e) aspecto del cerebro una vez se han realizado las inserciones de los electrodos.**

- Levantar el cuero cabelludo.
- Hacer una perforación en el hueso del cráneo y realizar un corte en las membranas que protegen el cerebro (meninges).
- Implantar los microelectrodos sobre la corteza cerebral.
- Posicionar el microchip en el agujero perforado del cráneo.
- Recolocar el cuero cabelludo.

Este proceso podría realizarlo un neurocirujano, pero Neuralink ha diseñado un robot que puede realizarlo de modo automático y con gran precisión. El desarrollo de este robot ha necesitado de una inversión de al menos 150 millones de dólares, pero ha alcanzado una sofisticación muy notable.<sup>1</sup>

Como se puede observar en la figura, el robot realiza la inserción de los microelectrodos con gran exactitud en zonas de la corteza cerebral donde no hay capilares, lo que es importante de cara a minimizar los daños fisiológicos causados por la inserción de los microelectrodos (por ejemplo, el sangrado). Esta tarea no es nada sencilla ya que, en contra de lo que pudiéramos pensar, el cerebro está en continuo movimiento y, aunque estos movimientos son microscópicos, son suficientes para que la inserción se produzca fuera de la zona objetivo. Pero Neuralink ha conseguido implementar un sofisticado método de visualización de los capilares

5. A. Rowald et al., "Activity-dependent spinal cord neuromodulation rapidly restores trunk and leg motor functions after complete paralysis", Nature Medicine 28, 260 (2022).



Imágenes cedidas por el autor.

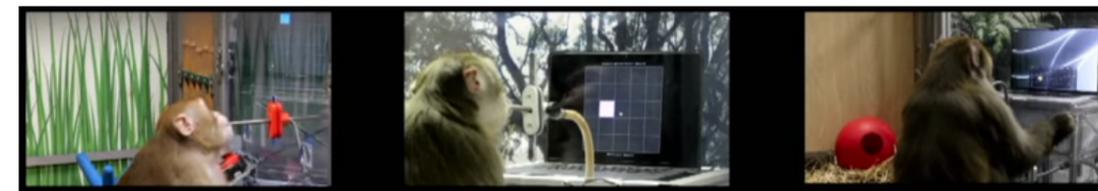
**a) Imagen del implante cerebral utilizado por Neuralink en sus experimentos con monos y cerdos.**

**b) Señales eléctricas detectadas por los electrodos y el tratamiento de dichas señales para interpretarlas correctamente.**

en tiempo real mediante interferometría láser, lo que permite realizar la inserción en una zona libre de capilares. Esta elevada precisión hace posible que pueda programarse la inserción múltiple de electrodos en una zona de la corteza cerebral, y realizarla de modo efectivo, como puede observarse en dicha figura. Estamos sin duda ante una obra notable de microingeniería, e invito al lector a visualizar el video completo que describe el mecanismo de inserción, donde se puede comprobar, por ejemplo, la cantidad de diseños probados de las agujas que utiliza el robot hasta obtener una aguja eficiente en la inserción del microelectrodo.<sup>1</sup>

Una fotografía de la versión actual del microchip que utiliza Neuralink puede verse en la figura. Su tamaño es equivalente al de una pequeña moneda, unos 2,5 cm, y posee 1024 canales de transmisión de información de modo inalámbrico. El software del microchip puede actualizarse también inalámbricamente, por lo que pueden incorporarse nuevas versiones de software que vayan apareciendo y sean compatibles con el hardware. También se han realizado avances significativos en la batería integrada en el implante, habiéndose doblado su tiempo de vida y recargándose de modo inalámbrico. En el vídeo se muestra cómo se atrae a un mono a las cercanías del cargador y, mientras este juega, la batería del microchip se va recargando. Con este implante cerebral, han realizado diversos experimentos con varios monos, tal y como se muestra en la figura. Las tareas que los monos han sido capaces de realizar con su pensamiento, tras un periodo de entrenamiento, han sido, entre otras: hacer click con un ratón a la derecha y a la izquierda, hacer click con un ratón y arrastrarlo, teclear mediante un cursor que se desplaza sobre un teclado virtual, teclear arrastrando el cursor, escribir números y hacer gestos con la mano. Estas tareas son más com-

“Todos estos avances han impactado a la comunidad científica, que ve cada vez más próxima la posibilidad de un uso comercial de los implantes cerebrales y estimuladores neuronales desarrollados por el equipo de Musk.”



*click a derecha e izquierda*

*click y arrastrar el ratón*

*teclear con un cursor*



*teclear arrastrando el cursor*

*escribir números*

*hacer gestos con una mano*

**Fotografías de varios monos con implantes cerebrales utilizados por Neuralink en sus experimentos, donde se les ve realizar las acciones que se mencionan utilizando exclusivamente sus pensamientos.**

plejas que las presentadas en el vídeo anterior del año 2019 en el que se ve a un mono practicando el sencillo juego del Pong con su pensamiento. Los nuevos desarrollos en inteligencia artificial están sin duda ayudando a una correcta descodificación de las señales eléctricas producidas en el cerebro.

Además, Neuralink está desarrollando otro implante que en este caso sirve para realizar estimulación neuronal y que posee 4096 canales de información. Una de las aplicaciones futuras de este tipo de implante se esquematiza en la figura de la página siguiente. El proceso completo consistiría en pensar en la realización de una acción motora, como por ejemplo mover una pierna, que se detectaría mediante el implante cerebral y se transmitiría inalámbricamente al implante de estimulación neuronal

en la zona de las neuronas motoras situada en las proximidades de la médula espinal. La estimulación de dichas neuronas daría lugar a la contracción muscular y al consiguiente movimiento de la pierna. Las aplicaciones de este doble implante, para detección de las señales cerebrales y para la estimulación de las neuronas motoras, son evidentes en el ámbito médico para resolver situaciones de falta de movilidad debido a accidentes u otro tipo de deficiencias en el circuito neuronal que activa el movimiento muscular. Los experimentos en cerdos que se muestran en la figura corresponden a la estimulación del movimiento de flexión de una pata trasera, que se ha conseguido enviando desde un ordenador una señal al implante de estimulación situado junto a la médula espinal, lo que provoca la contracción muscular observada.

Todos estos avances realizados por Neuralink han impactado a la comunidad científica, que ve cada vez más próxima la posibilidad de un uso comercial y amplio de los implantes cerebrales y estimuladores neuronales desarrollados por el equipo de Musk. Y las imágenes que ha mostrado de su centro de fabricación en Austin (Texas, Estados Unidos), que comienzan a parecerse a una factoría industrial de microchips, han reforzado la idea de que la neurotecnología comercial es viable, tanto más cuanto en el mismo evento del 30 de noviembre de 2022 anunciaron que ya habían solicitado permiso para realizar experimentos con seres humanos a la FDA,

que es el organismo que en Estados Unidos da este tipo de autorizaciones y que podría otorgárselo en seis meses (más o menos para cuando este artículo vea la luz en mayo de 2023). ¿Realmente estamos tan cerca de que este tipo de neurotecnología tenga un uso amplio e impacte en nuestras vidas?

Un uso amplio de implantes cerebrales en seres humanos conlleva riesgos que no son comparables a los que se corren en experimentación animal. Aunque algún mono de Neuralink ha llevado el mismo implante cerebral durante dos años, se sabe que muchos de los monos ya han muerto, sin que las causas se hayan investigado en profundidad o al menos se hayan hecho públicas. Semejante balance de bajas no sería asumible si se tratara de seres humanos, por lo que, en mi opi-

**a) Esquema en el que se describen las diferentes partes involucradas en un futurista dispositivo doble en el que un implante cerebral detecta una señal neuromotora que se transmite inalámbricamente a un implante de estimulación en la zona de la médula espinal que produce una contracción muscular.**

**b) Experimento realizado por Neuralink en un cerdo con un implante de estimulación que produce la flexión de su pata trasera derecha.**



istock

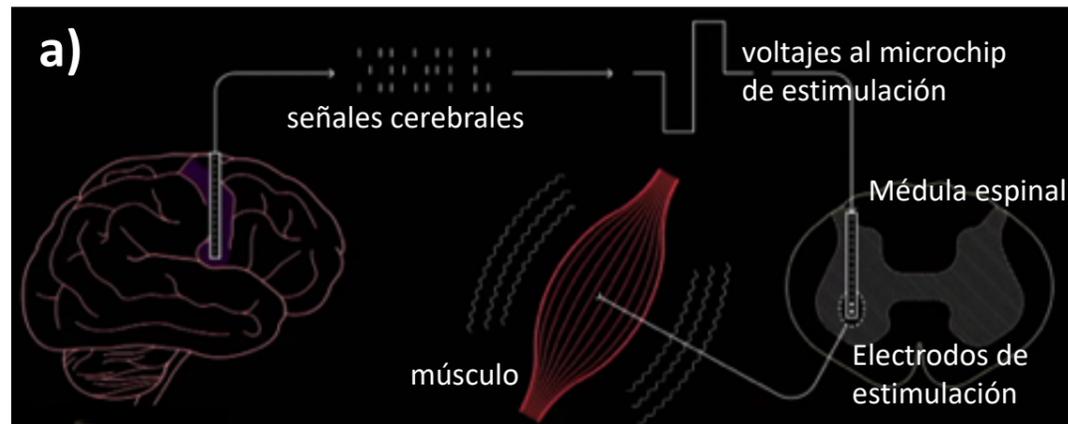


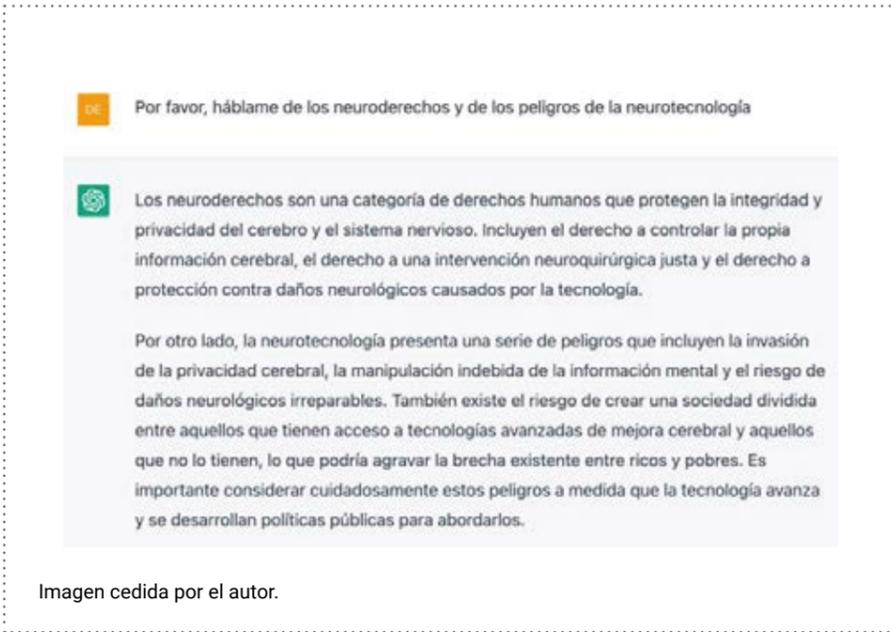
Imagen cedida por el autor.

ción, la tecnología debería perfeccionarse mucho antes de que se permita una investigación a gran escala en seres humanos más allá de algunos casos sin solución médica mediante métodos convencionales. Los retos más importantes a los que esta tecnología se enfrenta son los siguientes:

- Perfeccionar el método de inserción de los electrodos y del resto del implante para que sea totalmente fiable a la vez que suficientemente rápido.
- Garantizar que se minimiza el daño del tejido cerebral próximo al de inserción de los electrodos.
- Mejorar el grado de fiabilidad de las señales eléctricas detectadas y su correcta descodificación e interpretación.
- Asegurar una durabilidad del implante y de la amplitud de las señales eléctricas cerebrales detectadas.

Sin duda, no podemos obviar el enorme reto ético y legislativo al que nos enfrentamos para integrar la neurotecnología en nuestras vidas, si esta llega a convertirse en una tecnología disruptiva. Una tecnología disruptiva siempre va a llevar acarreados cambios y retos sociales de enorme calado. Para tranquilidad del lector, todavía no hemos llegado a ese punto. En este estadio incipiente, todavía estamos preguntándonos sobre los retos éticos y sociales que nos podría plantear en un

**“Un uso amplio de implantes cerebrales en seres humanos conlleva riesgos que no son comparables a los que se corren en experimentación animal.”**



◀ **Diálogo con el chat de inteligencia artificial ChatGPT-3 en el que este da una respuesta correcta acerca de los neuroderechos y los peligros de la neurotecnología.**

futuro la neurotecnología. Hay investigadores del cerebro, como por ejemplo el profesor español Rafael Yuste que trabaja en la Universidad de Columbia en Estados Unidos, que ya han identificado una serie de neuroderechos. ¿Qué son los neuroderechos? En este punto podemos enlazar con la herramienta de inteligencia artificial que comentaba al principio, ChatGPT-3, y preguntarle directamente. Su respuesta está plasmada en la figura, y, aunque sucinta, es esencialmente correcta. Como existen artículos académicos que han desarrollado en profundidad esta temática, invitamos al lector a consultar alguna de estas referencias bibliográficas.<sup>6</sup> El lector también puede escuchar en formato *podcast* algún debate sobre los desafíos éticos y sociales que presenta la neurotecnología o incluso leer una novela de (*neuro*)ciencia ficción que ha publicado el propio autor, donde se introduce el concepto de *paraíso neuronal* para referirse a un país con legislación laxa en cuanto al desarrollo de la neurotecnología.<sup>7</sup> Aunque este tema daría por sí solo para otro artículo, recalcaremos aquí que nuestro pensamiento es lo más íntimo que tenemos y uno de los elementos clave que define al ser humano, por lo que debemos hacer lo posible para protegernos de su exposición incontrolada y de su explotación con fines espurios o únicamente económicos.

Para concluir este artículo, daré mi punto de vista sobre la cuestión de si la neurotecnología es o puede llegar a ser una tecnología disruptiva. Por un lado, percibo que

hay consenso sobre la utilización de implantes cerebrales para abordar problemas médicos que no pueden solucionarse con métodos convencionales. En cuanto al uso de interfaces cerebro-máquina externas (diademas, cascos, bandas), no percibo barreras infranqueables para su comercialización masiva en los próximos años, más allá de las precauciones habituales en el mundo digital relacionadas con aspectos de privacidad. Sería por supuesto necesario adaptar la legislación actual, incluyendo los riesgos adicionales de esta nueva tecnología, pero, dado que las señales cerebrales así obtenidas son débiles, no existe en este momento una amenaza que impida su desarrollo y comercialización. Sin embargo, estos dos tipos de aplicaciones de la neurotecnología, por su alcance limitado, no son todavía suficientes para que podamos considerar la neurotecnología disruptiva.

Para que la neurotecnología llegase a ser disruptiva, sería preciso un grado elevado de utilización de los implantes cerebrales, con motivaciones más allá de fines médicos. Si estos implantes se realizasen con el objeto de mejorar las capacidades cognitivas del ser humano o en aplicaciones relacionadas con ocio, entonces podría darse un uso masivo, llegando a ser una tecnología disruptiva que modificase nuestra relación con el entorno y con otros seres humanos. Pero para que esto ocurra, existen hoy en día barreras de carácter técnico y ético que lo impiden. En relación con las barreras técnicas, el implante cerebral es todavía una operación quirúrgica

delicada y existen riesgos médicos tanto en el momento de la implantación del microchip como *a posteriori*. Además, todavía hay que demostrar la durabilidad y eficacia de los implantes a medio y largo plazo. En relación con las barreras éticas, no parece que en la mayor parte de los países consideren éticamente aceptable la utilización de implantes cerebrales invasivos para obtener seres aumentados o realizar actividades de ocio. Sin embargo, todas estas barreras pueden ir rebajándose o desapareciendo, adentrándonos en un nuevo mundo que quizá dentro de unas pocas generaciones no se parezca en nada al actual. ¿O es que cuando Goya pintó su *Disparate número trece* (hombres volando gracias a unas rudimentarias alas) alguien podía pensar que en tan solo ocho generaciones el ser humano sería capaz no solo de volar, sino de hacerlo de varias maneras?

6. M. Ienca, "On neurorights", *Frontiers in Human Neuroscience* 15, 701258 (2021)
7. Podcast sobre implantes cerebrales en la web de RNE del 23 de enero de 2023 (<https://www.rtve.es/play/audios/futuro-abierto/>) y novela "2037. Paraíso neuronal" (Mira editores, 2021), de José María de Teresa.

José María de Teresa  
Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón  
(INMA, CSIC-Universidad de Zaragoza)

