El cerebro es nuestro órgano más complejo. Nos permite pensar, emocionarnos, recordar… Su estudio ha permitido el desarrollo de toda una rama de la tecnología que está revolucionando la ciencia, la vida y la sociedad. Analizamos este viaje desde sus inicios hasta el momento actual.

Cuando, allá por 1924, el neurólogo y psiquiatra alemán Hans Berger comenzó a registrar la actividad eléctrica del cerebro se llevó una profunda decepción y una gran sorpresa. En su afán por entender los fenómenos psíquicos esperaba encontrar respuestas sobre las bases de las enfermedades mentales que trataba en su consulta. En su lugar, se topó con un mar de ondas eléctricas difíciles de catalogar. Así que decidió empezar por lo más simple y evidente. En los electrodos situados en la parte posterior de la cabeza descubrió un ritmo de 8 a 12 ciclos por segundo que emergía de manera consistente cuando el sujeto, en estado de relax, cerraba los ojos. Le llamó Alfa.

Desde Alfa hasta hoy mucho se ha andado en el estudio electrofisiológico del cerebro. Mientras Berger colocaba electrodos externos sobre el cuero cabelludo, otros investigadores se dedicaron a insertar finísimos cables en la materia gris registrando el flujo de iones cerca de sus fuentes. Con los años, descubrieron que el mar de ondas eléctricas externas reflejaba la actividad coordinada de millones de neuronas conectadas en trillones de sinapsis, ejecutando más de 1015 cálculos por segundo y procesando en paralelo la información del mundo externo (Nunez and Srinivasan 2006). El catálogo de ritmos cerebrales se expandió y las neurociencias emergieron como un nuevo campo de conocimiento dedicado al estudio del sistema nervioso, su función y los desórdenes que le aquejan (Kandel et al., 2013).

De Alfa a Gamma

El desarrollo de las neurociencias ha estado íntimamente ligado a la invención de herramientas. Los equipos electrónicos que permiten amplificar la débil señal neuronal han supuesto un ejercicio de invención sin precedentes. Actualmente, es posible registrar simultáneamente la actividad de miles de neuronas con cientos de electrodos a una tasa de adquisición de decenas de miles de muestras por segundo. Las sondas más avanzadas de registro encefalográfico, fabricadas con técnicas micro-electromecánicas, son de dimensiones equiparables a los cuerpos neuronales, integrándose en el tejido nervioso de manera mínimamente invasiva.

Hemos empezado a descubrir los secretos de nuestra capacidad mental

El procesamiento de estas señales mediante métodos analíticos complejos ha supuesto el desarrollo de sofisticados modelos matemáticos y computacionales que, a la par de la aceleración de los procesadores de cálculo, han expuesto la complejidad del código cerebral (Quian Quiroga and Panzeri 2009). Si el cerebro computa, la forma en la que lo hace es única, alcanzando una capacidad de representación y procesamiento que sobrepasa la de cualquier ordenador actual. El truco parece estar en la forma en la que se coordina la actividad de grandes poblaciones de neuronas acompasadas al ritmo de las oscilaciones cerebrales.

A la luz de los avances en neurofisiología y neurocomputación, hemos empezado a descubrir los secretos de nuestra capacidad mental. Desde los 8 o 12 ciclos por segundo que deslumbraron a Berger hasta los más de

40 hercios de las ondas Gamma, una jerarquía de oscilaciones opera para organizar el flujo neuronal mientras experimentamos el mundo. La actividad de cientos de miles de neuronas coordinada durante el día por ritmos como Gamma o Theta (4-12 hercios) vuelve a nosotros durante las fases del sueño envuelta en ritmos lentos como Delta (entre 1 y 4 hercios) y rápidos (más de 100 ciclos por segundo), recreando las representaciones que vivimos e integrándose con los recuerdos ya existentes. El recuerdo de la experiencia queda registrado en esas trazas eléctricas rítmicas solidificado en forma de nuevas conexiones entre neuronas que se han activado juntas porque así lo dispuso la experiencia. Un destello siguió a un sonido y nunca más olvidaremos esa asociación. Las neuronas que representaron ambas experiencias acaban formando una secuencia que adquiere significado (Menéndez de la Prida 2017).

La neurociencia moderna se ha expandido aupada por el desarrollo paralelo de técnicas de imagen ópticas para ver lo más pequeño o del análisis genómico que permite caracterizar la diversidad de tipos celulares residentes en el cerebro. Hoy sabemos que no todas las neuronas son iguales. Se diferencian en su morfología, en sus propiedades eléctricas, en la preferencia de sus conexiones y que son maleables por el aprendizaje y la experiencia. Los circuitos establecidos entre diferentes regiones cerebrales, como el sistema auditivo o el visual, determinan la integración de las representaciones. No solo nos hacen oír y ver, sino darle un sentido a lo que vemos y escuchamos: al destello y al sonido. Hoy en día la neurociencia experimental es capaz de registrar células especializadas en cada una de estas regiones, activarlas o silenciarlas a demanda e influir en la percepción (Emiliani et al., 2015).

En el lado macroscópico, el desarrollo de técnicas de resonancia magnética o de emisión de positrones ha permitido visualizar la anatomía del cerebro entero, con los tractos divergentes y convergentes de las conexiones entre regiones. Esta información, integrada con marcadores funcionales de actividad y con técnicas avanzadas de electro y magnetoencefalografía han aportado una visión sin precedentes de la actividad eléctrica global al servicio de la percepción y la acción. Cuando las señales obtenidas de estas fuentes son acopladas a algoritmos de inteligencia artificial la capacidad de entender e inferir el código neuronal nos devuelve a las sorpresas que deslumbraron a Berger en su tiempo (Nishimoto et al., 2011).

El auge de las neurotecnologías

La neurociencia de sistemas ha propiciado el desarrollo de un ecosistema tecnológico único (Vázquez-Guardado et al., 2020). De acuerdo a algunos informes, se prevé que el mercado de las neurotecnologías alcance un volumen de más de 30 billones de dólares para el 2030. Las interfaces cerebro-máquina representan uno de los productos estrella. Se basan en la adquisición de señales eléctricas, desde ritmos cerebrales a actividad neuronal, y su procesamiento computacional para transformarlas en acciones concretas que el sujeto debe aprender a operar. Los elementos principales son los electrodos de registro, los sistemas de amplificación de las señales y un ordenador que las descodifique.

El sueño inicial de Berger de entender los desórdenes psiquiátricos ha inspirado el avance científico del conocimiento del cerebro. Así, el estudio de su función ha sido también el de su disfunción. El desarrollo de las interfaces cerebro-máquina ha estado tradicionalmente vinculado al tratamiento de parálisis y desórdenes del movimiento. Se busca poder activar motores y actuadores con la propia actividad cerebral. Se trata de cerrar el bucle que va del pensamiento de una acción a su propia ejecución mediante efectores externos, utilizando los mismos trucos con los que el cerebro nos permite asociar destellos y sonidos, mover brazos y piernas o decidir nuestras acciones.

Hoy podemos monitorizar la calidad del sueño midiendo las ondas Delta, utilizar el registro de los ritmos Alfa para medir el nivel de atención o controlar dispositivos entrenando algoritmos inteligentes con las variaciones del ritmo Gamma. Las interfaces cerebro-máquina pueden asistir a personas con movilidad reducida permitiendo el control de ordenadores directamente con el cerebro (Willet et al., 2020). Este juego de imitación es el resultado de años de investigación básica del estudio del cerebro de diferentes especies animales, a fin de comprender mejor la evolución de nuestras capacidades cognitivas.

Cerebro y máquina

En el lado más especializado, toda una industria se moviliza alrededor de las tecnologías emergentes. Un ejemplo es la neurocirugía de precisión, en la que el uso de algunas de las neurotecnologías está permitiendo el registro más detallado de la actividad neuronal cerca de los focos epilépticos, en regiones cercanas a tumores o en núcleos cerebrales afectados en enfermedades como el Parkinson. El análisis de estos datos en tiempo real facilita la identificación de regiones lesionadas, guiar la intervención quirúrgica con micromanipuladores o mejorar la caracterización *in situ* de las biopsias obtenidas avanzando hacia intervenciones más personalizadas.

> Se prevé que el mercado de las neurotecnologías alcance un volumen de más de 30 billones de dólares para el 2030

Estas mismas herramientas, encuentran nuevas aplicaciones en nuevas ramas. La miniaturización de electrodos y componentes permite avanzar en el desarrollo de interfaces más compactas, integradas en dispositivos *wearables*[1]. Con ellos, es posible monitorizar otras variables fisiológicas asociadas con procesos cognitivos como el sueño, el estrés o la falta de concentración que pueden ser monitorizadas en tiempo real. Esto ha facilitado la implementación de técnicas de *neurofeedback* con las que el sujeto puede aprender a controlar sus propios ritmos siendo consciente de su estado de atención o capacidad de relajación.

Las neurotecnologías están a su vez transformando el campo de la inteligencia artificial mediante el uso de algoritmos *neuro-inspirados* que permiten avanzar en el desarrollo de sistemas expertos. Así surge el campo de la visión artificial o visión por ordenadores que permite el procesamiento y reconocimiento de imágenes o el procesamiento de lenguaje natural, que facilita la comunicación verbal o textual entre personas y dispositivos.

El sueño romántico de hibridarnos con las máquinas para extender nuestras capacidades está hoy en el centro del paisaje futurista que se avecina. Como cualquier desarrollo tecnológico, las neurotecnologías cuestionan algunas de nuestras certezas y acuerdos. En el ejercicio de imaginar sus amenazas está nuestra responsabilidad de debatir sobre cómo hacerlas útiles, éticas y respetuosas.