

Estado del arte de la Neurociencia Computacional y sus aplicaciones en la Ingeniería Biomédica

Nicolás Escobar

Estudiante de grado de la asignatura SEMINARIO DE INGENIERIA BIOMEDICA 2011, asignatura de grado, de posgrado y de actualización de la Facultad de Ingeniería. **nib** – Núcleo de Ingeniería Biomédica de las Facultades de Medicina e Ingeniería.
nxescobar@gmail.com

Eduardo Mizraji

Prof. Dr. expositor de la conferencia “La investigación de la biología del pensamiento, los modelos neurales y las tecnologías del siglo XXI” de fecha 31 de mayo de 2011
mizraj@fcien.edu.uy

Franco Simini, Daniel Geido, Jorge Lobo y Eduardo Santos

Docentes del **nib**, Núcleo de Ingeniería Biomédica de las Facultades de Medicina e Ingeniería, Universidad de la República, URUGUAY. www.nib.fmed.edu.uy
simini@fing.edu.uy, ldgeido@fing.edu.uy, jlobo@fing.edu.uy, esantos@fing.edu.uy

Resumen. Este trabajo trata sobre las aplicaciones de la Neurociencia Computacional –ciencia interdisciplinaria que estudia cómo se procesa la información en el cerebro–. Toda función cognitiva (ya sea percibir, recordar, pensar o tomar decisiones) activa alguna zona específica del cerebro, y es posible encontrar un circuito físico dentro de éste que la procesa. Es a partir de esta correspondencia estructura-función que se pueden construir sistemas capaces de comunicar una máquina con el sistema nervioso, con el fin de brindar algún tipo de servicio que mejore la salud del ser humano. Entre las aplicaciones típicas podríamos encontrar implantes para personas con trastornos musculares, tecnologías capaces de funcionar con el pensamiento en personas con movilidad reducida, asistentes robóticos dotados de autoaprendizaje para ancianos o inválidos, etc. Si alguna vez soñamos que esto fuera posible, hoy lo es, y la Ingeniería Biomédica se ve inmensamente enriquecida.

1. Introducción

El sistema encargado de la actividad cognitiva en el ser humano está basado en un tipo especializado de células llamadas neuronas. Se estima que existen más de 10^{11} neuronas en el cerebro humano interconectadas entre sí formando una red de módulos neurales. A su vez cada uno de estos módulos es una red neuronal con habilidades específicas, por ejemplo una determinada red neural podría colaborar en la ejecución de una actividad cognitiva relacionada con la lectura. Cada neurona implicada en esta red de módulos reacciona ante un conjunto de condiciones y factores extremadamente complejos, en donde participan proteínas responsables de millones de interacciones,

miles de genes que al expresarse permiten la síntesis de dichas proteínas, canales iónicos que controlan el procesamiento de la información, y un mecanismo complejo que controla la memoria almacenada.

Resulta directo inferir que en caso de ser posible, sería sumamente difícil simular el comportamiento del cerebro humano mediante un sistema de cómputo. Relacionado con el tema encontramos el macroproyecto internacional Blue Brain –con sede en la Escuela Politécnica Federal de Lausanne, en Suiza– que pretende aclarar problemas de función y disfunción cerebral, simulándolos en un macrocerebro artificial. Se trata de usar la ingeniería inversa para entender la interacción mente-cerebro, si bien todavía le es imposible –por razones de envergadura– contemplar los miles de factores genéticos y moleculares. Definitivamente no es fácil pasar por alto los millones de años que le ha tomado a la evolución lograr un sistema nervioso tal como lo es hoy en día.

Para nuestra suerte, se pueden lograr avances y aportes sorprendentes a la Ingeniería Biomédica sin resolver semejante empresa. El objetivo de este trabajo es mostrar las grandes innovaciones que han salido a la luz en los últimos años, y proponer nuevas ideas para el futuro, que se basen en los conocimientos brindados por la ciencia cognitiva.

2. Desarrollo

En forma apresurada se podría intentar comparar –a nivel de sistema– el cerebro humano con una computadora, pero la realidad es que existen al menos tres aspectos en los que difiere: consume muy poca energía (voltajes del orden de los milivoltios), funciona correctamente aún existiendo componentes que fallen, y hasta donde se conoce no requiere de ningún software para su funcionamiento. A pesar de estas diferencias, en lo que refiere a lo funcional, los mecanismos básicos que ocurren en el cerebro y se relacionan con pensar, recordar, aprender y solucionar problemas pueden ser concebidos como procesos de transmisión de información. Es por este motivo que en la actualidad se ve a las ciencias de la computación tan hermanadas con la neurología, al punto de haber nacido un área de estudio sumamente interesante: La Neurociencia Computacional.

La Neurociencia Computacional es una disciplina consolidada, con más de 20 años de desarrollo, que emplea técnicas muy diversas para entender cómo procesa la información el cerebro humano. El principio paradigmático que sostiene es que cualquier proceso cognitivo (función) que tiene lugar en el cerebro tiene un determinado circuito físico que lo procesa (estructura). Al considerar situaciones normales en el ser humano, como prestar atención a alguien que nos habla, planificar nuestro futuro, tomar decisiones o adaptarnos a diferentes entornos, la Neurociencia Computacional se preocupa por entender qué circuitos están implicados en cada proceso y cómo realizan su procesamiento de información respectivamente. Veamos cómo se podría proceder para llevar a cabo estas investigaciones. Supongamos que se quiere determinar qué área del cerebro está asociada con tal o cual actividad mental, la manera de proceder sería someter al individuo a dicha actividad mental y paralelamente registrar las actividades eléctricas del cerebro. Al notar que ciertas áreas se activan en consecuencia de dicha labor mental, estaríamos seguros que al menos estas áreas se corresponden con esa función cognitiva. He aquí una manera de poder comprender la correspondencia entre los módulos de estructura y función.

En 1989, algunos de los científicos del Brain Sciences Center¹ (Universidad de Minnesota) probaron en el mono que existe una relación causal entre la actividad eléctrica de las neuronas de la corteza motora y la dirección del movimiento de los brazos. Este trabajo inició toda una línea de investigación dentro de la Neurociencia Computacional que ha sido llamada Neuro-ingeniería, la cual estudia cómo desarrollar sistemas de comunicación entre una máquina y alguna parte del sistema nervioso. Vinculado con esto en la Universidad del Estado de Nueva York se realizó una investigación que muestra cómo la estimulación con descargas precisas en la corteza somato-sensorial de la rata puede inducir respuestas idénticas que si se estimula alguno de sus bigotes. De esta manera el ser humano se ha ido aproximando a entender cómo se relacionan los movimientos de cuerpo animal con

¹ Uno de los institutos más prestigiosos del mundo, donde se realizan estudios muy variados que abarcan desde la esquizofrenia, Alzheimer o alcoholismo, hasta el análisis musical de las señales provenientes del cerebro

sus estímulos nerviosos correspondientes. Un experimento de carácter similar ha logrado que se interpreten los registros eléctricos del movimiento de muñeca de un mono cuando mueve un joystick mientras juega a un videojuego muy simple. Recogiendo los frutos de este tipo de experimentos, las instrucciones motoras correspondientes a los registros se podrían enviar a un brazo artificial para que ejecutase los mismos movimientos.

El principio de funcionamiento de todos los sistemas cerebro-máquina se basa en la implantación de electrodos en alguna región del cerebro y una máquina que sea capaz de interpretar (decodificar) los registros eléctricos, y por supuesto ejecutar lo que indican las señales neuronales. Así es que se puede ejecutar con una máquina lo que la mente del animal tiene deseo de hacer. Luego de estos ejemplos, se puede observar que el panorama para el futuro parece venir muy iluminado de nuevas técnicas, que por fuera del equipamiento, solo requerirían de las señales neuronales. Si bien esto promete grandes aportes a la Ingeniería Biomédica –ya que se podrían realizar implantes en personas con trastornos neuromusculares, apraxia o distrofia muscular, proporcionar miembros artificiales que puedan responder a las instrucciones neuronales de un individuo que le falte algún miembro, o incluso disponer de asistentes robóticos que puedan leer el pensamiento de un anciano o inválido colaborando así en su desempeño– hoy en día el correcto funcionamiento de este tipo de sistemas de comunicación plantea muchos problemas. El principal de ellos es que la implantación de los electrodos implica una cirugía, la cual en la mayoría de los casos termina dando consecuencias severas. Es por ello que la ciencia se vio obligada a encontrar nuevas fronteras tecnológicas.

Hace ya unos años se ha comenzado a utilizar técnicas no invasivas como el Electroencefalograma (EEG) o la Resonancia Magnética funcional (fMRI). Sin embargo, estos métodos plantean algunos problemas en el uso práctico. Los EEG por más que tengan muy buena resolución temporal –permite registrar cambios en la actividad eléctrica cerebral de unos pocos milisegundos– dan información espacial muy ambigua al recoger la actividad promedio de varios miles de neuronas. En cambio la fMRI presenta una precisión milimétrica para la representación espacial pero posee una complicación extra –además de la interpretación en sí y el alto costo de los equipos–, no mide directamente la actividad eléctrica. Esta se infiere a partir del flujo sanguíneo, en particular de la cantidad de oxígeno que consumió el área específica del cerebro. Por lo tanto, para poder aprovechar los beneficios que cada una de estas técnicas aporta es necesario combinarlas, recurso que se utiliza en la actualidad. De esta manera se termina utilizando la resolución temporal de los EEG y la resolución espacial de la fMRI. Cabe aclarar que esto ha sido posible gracias al invento de los electrodos de carbono, que permiten ser introducidos en el interior del resonador sin generar ningún tipo de problema (sería impensable introducir electrodos de metal debido al potente campo magnético que este genera).

Otro tipo de técnicas, basada en este caso en las propiedades ópticas de la hemoglobina se utiliza hoy en día. Se trata la espectroscopía por luz cercana al infrarrojo, en la cual se le coloca al sujeto un casco elástico en la cabeza, conteniendo una serie de emisores y detectores de luz (de longitud de onda cercana al infrarrojo). Las zonas más activas del cerebro responden a la luz de manera diferente que aquellas menos activas, pudiéndose así distinguir cuál área resulta relevante para la actividad cognitiva. Si bien la resolución espacial de esta técnica no es muy buena, en la práctica sirve utilizarla debido a su portabilidad y facilidad de uso (en comparación con la fMRI).

Por último podríamos mencionar una técnica que promete muchísimo para nuestro tiempo, la magnetoencefalografía (MEG), la cual se basa en las propiedades magnéticas de los impulsos nerviosos durante la comunicación entre las neuronas. Esta novedosa tecnología llega a lograr una excelente resolución temporal y espacial. Así pues, hemos visto otros medios por los cuales se puede estudiar la relación entre los módulos de estructura y función correspondientes a determinada actividad cognitiva.

Desde un ángulo completamente diferente, pero dirigiéndose hacia el mismo objetivo, otro tipo de sistemas de interacción máquina-neuronas ha empezado a ser muy popular, se trata del registro en cultivos neuronales. Esto consiste en la extracción de algunas neuronas de un tejido nervioso (normalmente de la médula espinal o el hipocampo) y su posterior cultivo en un medio adecuado, produciéndose más neuronas, que interaccionan entre sí dentro de una población. El sistema es

básicamente el mismo que el que se utiliza en cualquier otro tipo de cultivo celular. Una vez que se dispone de la cantidad de neuronas deseada, se procede a comunicarlas con algún sistema que pueda comprender sus estímulos y responder adecuadamente con los movimientos correspondientes. Vinculado con esto, investigadores en la Universidad de Reading en Reino Unido conectaron los movimientos de un robot a un cultivo de neuronas de rata, y luego a partir de puro ensayo y error las neuronas aprendieron a evitar obstáculos, mejorando así el sistema de navegación del robot². Esta es una de las aplicaciones que permite integrar la ciencia cognitiva con la Inteligencia Artificial y la Robótica; si bien parece ser un adelanto únicamente de carácter tecnológico, más adelante veremos algunos de los beneficios de utilizar robots con capacidad de autoaprendizaje basados en redes neuronales para la Ingeniería Biomédica.

Hemos dicho que en tiempos venideros se podrá contar con sistemas que asistan a personas con movilidad reducida. Tal es el caso de un proyecto que se está llevando cabo actualmente, en el que participa como investigador experimental el Dr. Yijun Wang, ingeniero biomédico de la Universidad de California en San Diego³. El proyecto consiste en el diseño de un sistema que permite a un individuo marcar su teléfono celular utilizando tan sólo el pensamiento. Para esto cuentan con un dispositivo –capaz de registrar EEG– que consiste de 4 electrodos conectados a un aparato que amplifica la señal y la envía a través de bluetooth a un celular, luego éste decodifica la señal y produce la respuesta esperada (marcar el número correspondiente). El principio científico en el que se basa dicho sistema es el siguiente. Cuando un individuo focaliza su atención en una imagen que parpadea a una determinada frecuencia, al cabo de unos cientos de milisegundos su cerebro se sincroniza con dicho parpadeo –según se observa en electrodos occipitales, que son los más cercanos a la zona visual–, de manera que podemos apreciar en el EEG ondas sinusoidales de intensidad máxima cercana a la frecuencia de la imagen. De esta manera si se configura cada número del teclado con diferente frecuencia de parpadeo, un individuo con movilidad reducida podría ir seleccionando los números de acuerdo a su interés, y así el sistema iría reconociendo cada uno hasta lograr marcar la secuencia completa, y permitir a la persona comunicarse a través de su celular. Sin duda es un avance increíblemente grande para nuestros tiempos, y su campo de aplicación sobrepasa el de este experimento, en tanto que muchas otras aplicaciones podrían surgir en el futuro. Por ejemplo en el área de la “cognición aumentada” sería de utilidad diseñar equipos que brindasen asistencia cognitiva al momento de estar conduciendo, de manera de poder corregir errores o detener una acción inapropiada. Un estudio interesante sería investigar cómo varía la actividad eléctrica del cerebro –y en qué áreas– al momento de entrar en el estado hipnagógico (cuando nos estamos quedando dormidos), ya que si pudiéramos detectar este momento a la hora de conducir podríamos realizar algún estímulo o disparar alguna alerta para evitar el desastre, siempre y cuando no sea demasiado tarde, por supuesto. Quizás un experimento como éste, termine por reducir el alto porcentaje de accidentes provocados por conducir en estado de excesivo cansancio.

En el contexto educativo se podría monitorear el estado cognitivo de los alumnos en una escuela, ya sea para realizar un seguimiento de sus capacidades y niveles de atención, o quizás para advertir casos de enfermedades como lo es el trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH). Datos convergentes de varias fuentes –como la neuroimagen, genética, estudios neuroquímicos y neuropsicológicos– sostienen que esta enfermedad tiene sus bases en la alteración de algunos circuitos cerebrales. Estos circuitos estarían relacionados con tres redes neuronales que tienen un papel fundamental en la actividad atencional del niño⁴. Una de estas es la llamada Red de Focalización Externa (RFE), la cual se activa cuando la atención del individuo se orienta a responder ante un determinado estímulo externo, con determinado fin. La segunda es la Red de Focalización Interna (RFI), la cual se activa cuando nos centramos en nosotros mismos; evidentemente estas dos redes

² El experimento se puede ver en el siguiente enlace: <http://www.youtube.com/watch?v=1-0eZytv6Qk>

³ Artículo donde se entrevista al Dr. Wang: <http://medina-psicologia.ugr.es/~cienciacognitiva/files/2010-28.pdf>

⁴ Basado en el artículo “Trastorno por Déficit de Atención e Hiperactividad (TDAH): Relación con las redes atencionales” accesible por el enlace: <http://medina-psicologia.ugr.es/~cienciacognitiva/files/2010-22.pdf>

tienen una tarea de supresión mutua, ya que cuando una esta activada la otra no, y viceversa. Existe una tercera red que actúa como “interruptor”, rompiendo el equilibrio y replanteando las prioridades (estímulos relevantes para el comportamiento adecuado) en un momento dado, con el fin de lograr la mejor adaptación del individuo al entorno; esta es la llamada Red de Reorientación (RR). Recientemente se ha vinculado los casos de inatención de esta enfermedad (TDAH) con un “desequilibrio” en la RFE, al no poder ésta suprimir la RFI cuando se debe responder al ambiente, provocando así que el niño se encuentre ensimismado y no pueda dirigir la atención debida hacia el exterior. Por otro lado, los casos de hiperactividad podrían ser explicados por una anomalía en la RR, presentando estos individuos umbrales de activación más bajos en dicha red, de manera que reaccionarían frente a estímulos de menor intensidad. Como consecuencia estos niños se encuentran constantemente respondiendo a estos estímulos exteriores, lo que impide que logren una adecuada adaptación al ambiente. Una posible mejora de estas enfermedades se podría dar, en los niños inatentos, realizando un entrenamiento en la inhibición de la RFI (ya que ese es su problema, no poder suprimirla lo suficiente); y en los hiperactivos entrenando la RR de manera que se intente aumentar el umbral de activación, o por lo menos lograr el efecto que de esto se desprendería. Ahora bien, ¿cómo se podría conseguir este tipo de entrenamiento? Hoy en día se encuentran juegos de entrenamiento neuronal basados en aplicaciones de software⁵, la tecnología ha ido avanzando también en este sentido y los resultados de la ciencia cognitiva han servido de base para el desarrollo de estas aplicaciones. No nos debería extrañar que este tipo de entretenimiento sirva para mejorar la situación de los que padecen esta enfermedad. Además recordemos que los problemas de TDAH comienzan y tienen su mayor impacto de niño –ya sea por el fracaso escolar o problemas de inadaptación social en la infancia– por lo que cabe preguntarnos: ¿Qué mejor manera de restaurar la zona cerebral afectada que mediante el entretenimiento? Es sin duda otro gran desafío para la actualidad, fruto de las investigaciones de la ciencia cognitiva, y que si bien tiene un carácter distinto al resto de las innovaciones que hemos estado mostrando, no deberíamos descuidar cada nueva oportunidad que aflora al servicio de la salud humana.

Finalmente volvamos a mencionar la aplicabilidad del uso de la Robótica y la Inteligencia Artificial en la Ingeniería Biomédica. En este contexto, se podrían desarrollar sistemas computacionales capaces de brindar servicios de asistencia cognitiva personalizada en numerosas circunstancias. Hemos mencionado dos de los casos típicos, que son la minusvalía y la ancianidad, veamos ahora alguna de las especificaciones que podría cumplir un sistema de estas características para funcionar correctamente:

- Mantener un universo o contexto de acuerdo a las necesidades y objetivos de la persona asistida
- Poder aprender este universo mediante la interacción directa con la persona asistida, y conservar la capacidad de aprendizaje durante todo su ciclo de vida
- Utilizar sensores para obtener y manejar información del contexto
- Dominar el lenguaje natural para facilitar la comunicación con la persona asistida

Un sistema con estas características podría mejorar enormemente la vida de estas personas. Otro caso de aplicación se da en personas sordas, donde el sistema cognitivo sería capaz de recibir e interpretar el mensaje en lenguaje natural, y traducirlo a símbolos tal como lo manejan los sordomudos. Vinculado a esto, ha sido desarrollado un sistema de estas características hace más de dos años en la CNSE (Confederación Estatal de Personas Sordas), en España⁶. De la misma manera se podría asistir a ciegos con sistemas de navegación electrónica e interpretación de documentos digitales (si es que todavía no los hay en nivel de aceptación elevado). A este respecto, cabe mencionar que tratar con la traducción del lenguaje natural en computación siempre ha sido un problema de mucha

⁵ A modo de ejemplo, una de las aplicaciones más populares en esta área es Lumosity

⁶ Se pueden ver las demos y más información en el siguiente sitio: <http://www.traduccionvozlse.es>

dificultad, incluso hoy en día es difícil encontrar traductores automatizados de nivel profesional (sin la ayuda de seres humano en el proceso de la traducción). He aquí una mejora importante que se le podría dar a los sistemas cognitivos con algoritmos de aprendizaje basados en de redes neuronales, donde la capacidad de interpretación se podría aproximar –cada vez más, en el futuro– a la del cerebro humano.

Quizás podremos soñar con casos tan desafiantes para la Neurociencia Computacional como implantar en un individuo con trastornos neuromusculares un sistema capaz de comunicarse con su sistema nervioso, de tal manera que pueda realizar los movimientos con tan sólo su deseo de hacerlo. De la misma manera podremos dejar volar la imaginación y cuestionarnos si se podrá dotar de vista u oído a personas cuya vida haya marcado con esa ausencia desde temprana edad. ¿Quién conoce cuáles son las fronteras que separan lo posible de lo imposible? ¿Existe realmente lo imposible, o es tan sólo una limitación que hemos encontrado al no comprender nuestra evolución como seres humanos? El hombre y la ciencia seguirán avanzando, y quizás mañana estas interrogantes sean fecundadas con una nueva perspectiva, donde nuevamente la Ingeniería Biomédica se verá inmensamente enriquecida.

3. Conclusiones

En los últimos años neurocientíficos e ingenieros se han unido para desarrollar dispositivos capaces de interaccionar y manipular directamente la información procesada por nuestro cerebro.

A lo largo de este trabajo hemos visto una gran variedad de aplicaciones y estudios que refieren a la Neurociencia Computacional, así como los aportes que brindan a la Ingeniería Biomédica. Seguramente no hayamos podido abarcar siquiera la mitad de los tantos ejemplos que surgen de la combinación de cada una de las disciplinas involucradas, pero el intento de querer comprender la misión de la Neurociencia Computacional nos ha dejado algunas certezas. Si el hombre es capaz de modelar el cerebro humano mediante un sistema computacional, se podría comprobar la eficacia de determinados fármacos para la cura de enfermedades del sistema nervioso, incluyendo Parkinson o Alzheimer. Por el mismo logro, se evitaría el daño en animales como es usual –y entendible hasta cierto punto– hoy en día, ya que dispondríamos de sistemas que simulan el comportamiento del cerebro humano para realizar los experimentos. Podemos estar más cerca de lo que creemos en comprender el funcionamiento de la mente y su relación con el cerebro, quizás logremos este objetivo antes de que un sistema de cómputo pueda simular al detalle de la perfección el cerebro humano.

Hace unos años no pensábamos poder comunicarnos mentalmente, ni conectar nuestra mente con algún dispositivo de manera de realizar acciones a partir de nuestros pensamientos; sin embargo, hoy es posible, y no tenemos razón para creer que es arte de magia, sino que es fruto de la larga dedicación de profesionales, fruto de seres que se entregan sin escatimar a la ciencia, y en su más grandiosa expresión fruto del hombre y sus capacidades en constante evolución.

4. Bibliografía

- [1] <http://www.cienciacognitiva.org/> 16 de junio de 2011 Revista electrónica de divulgación “Ciencia Cognitiva”
- [2] <http://bluebrain.epfl.ch/> 18 de junio de 2011 The Blue Brain Project
- [3] Mizraji E. 2011 *La investigación de la biología del pensamiento, los modelos neurales y las tecnologías del siglo XXI*
- [4] Armentano R, Arzuaga J, Arzuaga P, Brum F, Brum G, Bussi J, Cibils D, Engler H, Fauquex J, Gadola L, Gómez A, González S, Geido D, Hurtado J, Lobo J, Martínez B, Mizraji E, Musé P, Pessana F, Podestá J, Randall G, Reyes W, Sanz O, Simini F, Suárez H, Svirsky M, Trampal C and Venturino H 2007 Ingeniería Biomédica, perspectivas desde el Uruguay **301-20**