



**CEU**

*Universidad  
San Pablo*

Apertura Curso Académico 2016-2017

## **Cuando la realidad alcanza a la ciencia- ficción: La Ingeniería Biomédica**

---

Abraham Otero Quintana

Profesor Titular de Ciencia de la Computación  
e Inteligencia Artificial

Universidad CEU San Pablo



**CEU** | Ediciones

# **Cuando la realidad alcanza a la ciencia- ficción: La Ingeniería Biomédica**

---

Abraham Otero Quintana  
Profesor Titular de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial  
Universidad CEU San Pablo

**Universidad CEU San Pablo**

### **Cuando la realidad alcanza a la ciencia-ficción: La Ingeniería Biomédica**

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, [www.cedro.org](http://www.cedro.org)) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

© 2016, Abraham Otero Quintana  
© 2016, Fundación Universitaria San Pablo CEU

CEU Ediciones  
Julián Romea 18, 28003 Madrid  
Teléfono: 91 514 05 73, fax: 91 514 04 30  
Correo electrónico: [ceuediciones@ceu.es](mailto:ceuediciones@ceu.es)  
[www.ceuediciones.es](http://www.ceuediciones.es)

Maquetación: Luzmar Estrada Seidel (CEU Ediciones)

Depósito legal: M-33116-2016

Cuando a un profesor universitario se le ofrece la oportunidad de impartir una lección magistral de apertura de un curso académico esto suele hacerse a modo de reconocimiento por sus méritos de investigación y/o docentes. Soy perfectamente consciente de que en mi caso esto es una excepción; no he hecho nada que me haga merecedor de este honor. Cuando David Santos, director de la Escuela Politécnica Superior, me ofreció esta oportunidad sé que su intención era otra: permitir que esta lección magistral sirviese para dar a conocer entre nuestra comunidad universitaria una de las últimas incorporaciones al catálogo de títulos de nuestra Universidad: el grado en Ingeniería Biomédica.

En España la Ingeniería Biomédica a nivel académico es una titulación de reciente aparición. La primera universidad española en impartir un título de grado en Ingeniería Biomédica lo hizo en el curso 2009-2010. Previamente no existía en nuestro país ninguna Licenciatura, Diplomatura o Ingeniería de estas características. Por tanto, hace poco más de un lustro que existe en España una titulación oficial de esta naturaleza. Desde ese curso académico todos los años nuevas universidades españolas han comenzado a impartir este grado; nuestra Universidad lo hizo en el curso 2013-2014. En la actualidad hay 12 universidades españolas que imparten el título de Grado en Ingeniería Biomédica, existiendo además 11 títulos de Máster en Ingeniería Biomédica, que pronto se convertirán en 12 ya que en el curso 2017-2018 nuestra Universidad comenzará a ofrecer este título.

Dada su reciente aparición en el panorama académico español, no es de extrañar que exista un gran desconocimiento sobre esta titulación y, por extensión, sobre la profesión asociada. Cuando hace cinco años desde el Departamento de Ingeniería de esta Escuela se propuso la creación de esta titulación en nuestra Universidad la recepción fue cautelosa; ¿Qué era esta titulación tan extraña que dos jóvenes profesores querían crear? ¿Sería algún invento raro o algún tipo de moda pasajera por la que una institución que valora el impacto de sus obras a

lo largo de décadas, o incluso siglos, no debería apostar? Incluso ahora, cuatro años después de haberse implantado la titulación, existe tanto dentro como fuera de nuestra Universidad un desconocimiento sobre en qué consiste esta titulación y a qué se dedica profesionalmente un Ingeniero Biomédico. Este desconocimiento afecta incluso al nombre del título, que todavía no ha calado ni siquiera en el mundo de la academia española: “Ingeniería Médica”, “Ingeniería Clínica”, “Biomedicina” o “Ingeniería de la Salud” son algunos de los apodosos que frecuentemente escucho, tanto dentro como fuera de nuestra Universidad, para referirse a la Ingeniería Biomédica.

Es por ello que, aunque el núcleo de esta lección magistral se va a centrar en describir los últimos avances en el campo de la Ingeniería Biomédica, me parecía conveniente comenzar con una breve perspectiva histórica sobre la Ingeniería Biomédica que permita comprender el contexto internacional, tanto de la titulación como de la profesión, en el cual se enmarca nuestro país.

En Estados Unidos la primera conferencia científica relacionada con el campo de la Ingeniería Biomédica *Conference of Engineering in Medicine & Biology* se celebró en 1948. En 1952 se fundó la Sociedad de Ingeniería Biomédica de IEEE, que podría considerarse la primera sociedad científica sobre la Ingeniería Biomédica. En la década de los 50 aparecieron los primeros títulos de master y doctorado en Ingeniería Biomédica en este país, concebidos inicialmente como una especialización para graduados en otras ramas de la ingeniería o en titulaciones técnicas afines. Hace 50 años, en 1966, la Universidad de Boston comenzó a ofrecer el primer título de grado (*Bachelor*) en Ingeniería Biomédica; ésta fue la primera universidad que apostó por la Ingeniería Biomédica como una titulación con entidad propia y no como una mera especialización. En 1968 se funda la Biomedical Engineering Society (BMES), la primera asociación profesional de ingenieros biomédicos del mundo. El crecimiento académico y profesional de la Ingeniería Biomédica en Estados Unidos desde entonces no ha parado de acelerarse. En la actualidad en Estados Unidos existen 136 universidades que ofrecen algún título relacionado con la Ingeniería Biomédica, sumando un total de 103 títulos de Bachelor in Biomedical Engineering, 110 títulos de Master in Biomedical Engineering y 96 títulos de Doctorate in Biomedical Engineering.

Según las estadísticas del Bureau of Labor Statistics del gobierno estadounidense en el periodo 2014-2024, última década para la cual existen datos, el número de puestos de trabajo en Ingeniería Biomédica en el país va a crecer un 23%, mientras que en promedio el número de puestos de trabajo en todo el país va a

crecer un 7%; es decir, en palabras del propio Bureau of Labor Statistics, el crecimiento de los puestos de trabajo en este campo va a ser “Mucho más rápido que el promedio”. En los últimos años varias veces esta profesión ha liderado diversos rankings de las titulaciones con más futuro y perspectivas de crecimiento en Estados Unidos, inclusive un ranking publicado por el prestigioso periódico New York Times. Dado lo reciente de esta titulación en nuestro país, no existe todavía ningún colegio oficial de Ingenieros Biomédicos, ni ningún otro organismo que recopile estadísticas relativas a la profesión. Es por ello que no puedo dar ningún tipo de dato similar respecto al estado de la profesión en nuestro país. Sí puedo comentar, a modo anecdótico, que el encontrar profesores para el Grado en Ingeniería Biomédica de nuestra Universidad no ha sido fácil, y a menudo ha requerido el convencerlos para que dejaran sus actuales trabajos y se uniesen a nuestro proyecto.

Como podemos ver, aunque en nuestro país la Ingeniería Biomédica apenas hace 6 años que ha llegado al mundo académico, en Estados Unidos hace más de 60 años que se produjo esa llegada. De un modo similar, en Reino Unido y en países del norte de Europa hace varias décadas que esta titulación está establecida en sus sistemas universitarios. Incluso en nuestro país, en lo relativo a investigación científica la historia de la Ingeniería Biomédica tiene una trayectoria más dilatada. El próximo mes de noviembre la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica va a celebrar la edición XXIV de su congreso anual. Eso quiere decir que hace 24 años en nuestro país ya había suficiente masa crítica de científicos que trabajaban en este campo para que creasen una conferencia específica. Como podemos ver, la Ingeniería Biomédica no es “una moda pasajera” ni una “titulación extraña”, al menos no fuera de nuestro país.

Soy consciente de que todavía no he proporcionado una definición de qué es la Ingeniería Biomédica. Según el Imperial College, la Ingeniería Biomédica es *“una disciplina que avanza conocimiento en ingeniería, biología y medicina y mejora la salud humana a través de actividades multidisciplinares que integran la ingeniería con las ciencias biomédicas y la práctica clínica”*. Se trata de una disciplina que combina los criterios de diseño de la ingeniería y las herramientas de análisis provenientes de las matemáticas, la física y la química a la resolución de problemas en medicina, biología, biotecnología, farmacia, etcétera. La Ingeniería Biomédica ha ido gestándose en un terreno interdisciplinario entre campos más establecidos como lo es la propia ingeniería, la física o las matemáticas, aunque actualmente se la reconoce como un área en sí misma y de ahí el creciente interés académico, científico y profesional.

El campo de trabajo de un ingeniero biomédico es muy amplio. No sería una exageración muy grande decir que cualquier dispositivo que funcione con corriente eléctrica y se emplee para diagnosticar, monitorizar, tratar, analizar o estudiar seres vivos o muestras extraídas de vivos, sean éstos bacterias, plantas, animales o personas, ha sido diseñado por un ingeniero biomédico: dispositivos de imagen médica como máquinas de resonancia magnética nuclear, dispositivos de monitorización de pacientes, aceleradores lineales, marcapasos, espectrómetros de masas, prótesis, o secuenciadores de ADN son sólo algunos ejemplos.

La Ingeniería Biomédica surgió del campo de la instrumentación médica. Inicialmente, ingenieros electrónicos, industriales, de telecomunicación e informáticos eran quienes diseñaban y daban soporte a esta instrumentación. De ahí que en EE.UU. dos décadas antes de surgir el primer Grado en Ingeniería Biomédica ya hubiese programas de máster y doctorado. Estos profesionales habían sido formados durante su etapa universitaria en distintas vertientes de la ingeniería, pero en su trabajo profesional aplicaban estos conocimientos a un mundo que les resultaba ajeno: el mundo de la medicina y de la biología. Con el tiempo se hizo patente el interés en formar un ingeniero que desde un principio contase con una base sólida en todas las áreas de conocimiento que van a estar involucradas en su ejercicio profesional: conocimientos de electrónica, de procesado de señal, de computación y de ciencias de la vida. En el caso de Estados Unidos esta realización se materializó en nuevos títulos universitarios durante los años 60 y 70. En nuestro país, apenas acabamos de comenzar este proceso. Todos los profesores que actualmente impartimos docencia en España en algún Grado en Ingeniería Biomédica o bien no hemos estudiado esta titulación (la inmensa mayoría, donde yo mismo me incluyo) o bien la han estudiado en el extranjero. En nuestro país, especialmente en el terreno profesional, todavía nos encontramos en la etapa de ingenieros reciclados al campo de la Ingeniería Biomédica, y no de ingenieros que desde un inicio su formación se ha orientado al campo de la Ingeniería Biomédica. Estamos todavía comenzando la misma transición que en EE.UU. se inició en la década de los 60.

A nivel profesional, la instrumentación médica es el nicho de trabajo de la Ingeniería Biomédica que resulta más fácil de comprender a los ajenos al campo. Todos estamos familiarizados con el hecho de que en un hospital hay una gran cantidad de dispositivos electrónicos que se emplean para monitorizar, diagnosticar y tratar al paciente: rayos X, resonancia magnética nuclear, tomografía de emisión de positrones, ecógrafos, electrocardiógrafo, encefalógrafo, aceleradores lineales, máquinas de diálisis, marcapasos... son algunos ejemplos. Es un

campo en el que, por ser relativamente bien conocido, no voy a hacer demasiado énfasis en esta lección magistral. No obstante voy a mencionar algunos de los avances más recientes que, a mi juicio, resultan más relevantes.

El marcapasos de Medtronic Micra recibió en 2015 aprobación por la Unión Europea, y este mismo año, 2016, por la Federal Drug Administration de Estados Unidos, para su implantación en pacientes. Se trata del marcapasos más pequeño del mundo, con un tamaño 10 veces inferior al de los marcapasos tradicionales. Debido a su reducido tamaño no es necesario hacer cirugía para su introducción, sino que puede introducirse mediante un catéter vía la vena femoral. Dicha introducción se lleva a cabo con el apoyo de imagen médica que en tiempo real permite al cardiólogo ver el movimiento del marcapasos dentro del cuerpo del paciente. El no requerir cirugía ni la creación de un “bolsillo” para alojar el marcapasos en el pecho del paciente elimina gran cantidad de las complicaciones derivadas de la operación requerida para la implantación de un marcapasos tradicional. Una vez implantado, el marcapasos tiene una autonomía de aproximadamente 10 años hasta agotar su batería.

Distintos equipos de investigación, entre ellos la división de ingeniería biomédica de Google, están trabajando en la creación de lentillas capaces de monitorizar la concentración de glucosa en sangre a partir de la lágrima del ojo. Estas lentillas están formadas por un biosensor cuyos datos son procesados por un microcontrolador situado en la propia lentilla, y por una pequeña antena de radiofrecuencia para la comunicación inalámbrica. No incluye una batería ya que obtiene la alimentación eléctrica que necesita para funcionar a través de inducción electromagnética. Estas lentillas están pensadas para los pacientes diabéticos que varias veces a lo largo del día deben manualmente medir su concentración de glucosa en sangre a través de un pequeño pinchazo en un dedo, y en base a dicha medición tomar posibles acciones terapéuticas correctivas. Para estos pacientes un descuido en la gestión de su enfermedad puede tener graves consecuencias. Estas lentillas pueden de un modo automático supervisar la concentración de glucosa en sangre y alertar de un modo inalámbrico, con el apoyo de un dispositivo como un teléfono móvil, al paciente cuando deba tomar alguna acción terapéutica correctiva. En un proyecto diferente al de Google un grupo de investigadores de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Corea del Sur ha construido una lentilla con un propósito similar que además incorpora vesículas con pequeñas dosis de insulina, cuya ubicación se indica en la transparencia mediante la flecha roja. La insulina de las vesículas es liberada automáticamente

cuando el paciente lo necesita. Actualmente ya se han realizado ensayos clínicos en pacientes diabéticos con este prototipo de lentilla.

La imagen que vemos ahora en la presentación parece una pequeña calcomanía modernista que podría haber venido en una chocolatina de las que se comen nuestros hijos. De hecho, este dispositivo, que pesa 0.09 gramos, se aplica de un modo similar a como se aplican dichas calcomanías. Pero esta “calcomanía” desarrollada por la Universidad de Northwestern, en Estados Unidos, tiene un sensor de electrocardiograma, un sensor de electromiograma, un sensor de temperatura corporal, un sensor que permite medir la tensión de la piel, un sensor de intensidad lumínica, y una antena de comunicación inalámbrica que le permite enviar datos de un modo inalámbrico a un PC o terminal móvil. Esta parte de la “calcomanía” es la espiga de inducción electromagnética que proporciona la corriente para alimentar al dispositivo, y la circuitería de acondicionamiento de dicha corriente.

En la imagen estamos viendo otro dispositivo similar al anterior, pero destinado a implantarse dentro del cuerpo de un ser vivo. El dispositivo se ha construido con seda cristalizada y magnesio. Ambos son materiales biocompatibles que el cuerpo humano es capaz de absorber. Dependiendo de cómo se haya llevado a cabo el proceso de cristalización de la seda, ésta protegerá al magnesio durante semanas, o incluso meses, antes de que el cuerpo lo absorba. Durante ese tiempo la circuitería de magnesio puede estar midiendo parámetros fisiológicos del paciente, transmitiéndolos de modo inalámbrico e incluso suministrando fármacos para tratar alguna dolencia. Las imágenes que vemos a la derecha se corresponden con un test llevado a cabo en ratas. A las ratas se les indujo una sepsis y se diseñó un chip capaz de monitorizar la severidad de la infección y de proporcionar un fármaco para tratarla. Para implantar los chips en los animales, como se puede ver en la imagen, fue necesario realizar una pequeña cirugía. Pero los chips no se extrajeron, sino que una vez terminaron su vida útil fueron absorbidos por el cuerpo de las ratas sin ningún tipo de efecto secundario.

Este mismo año un grupo de investigadores de la Universidad de Illinois ha creado un dispositivo similar basado en tecnología microelectromecánica (MEMS) a partir de un polímero biodegradable que es capaz de medir durante varios días la presión intracraneal de un paciente. Típicamente después de un trauma que afecta al cerebro se monitoriza la presión intracraneal durante varios días. El objetivo de este dispositivo es permitir una monitorización mínimamente invasiva de este parámetro. Como se puede observar en la imagen, el sensor tiene un tamaño suficientemente pequeño para permitir su implantación de un modo

sencillo mediante una aguja. Durante varios días el polímero con el que está construido no es biodegradado y el sensor permite monitorizar la presión intracraneal. Después de unos pocos días, el dispositivo comienza a ser degradado por el cuerpo hasta que es completamente absorbido sin necesidad de cirugía para retirarlo. En el futuro los investigadores que han desarrollado este dispositivo esperan poder incorporarle sensores capaces de medir otros parámetros como por ejemplo el pH o el movimiento de fluidos.

El campo de la cirugía es otra área médica donde la Ingeniería Biomédica ha hecho aportaciones significativas. Cada vez es más habitual el uso de robots cirujanos en la clínica. El que tiene una base de instalación más amplia es el robot da Vinci, del cual actualmente hay cerca de 4000 unidades instaladas en hospitales de todo el mundo. Este robot permite realizar cirugías mínimamente invasivas dentro del cuerpo del paciente. Gracias al uso de videocámaras flexibles de alta resolución y gracias al pequeño tamaño de las pinzas encargadas de cortar y suturar, el cirujano puede, por ejemplo, operar dentro del abdomen de un paciente simplemente haciendo unas pequeñas incisiones en el abdomen. Al tratarse de una cirugía mínimamente invasiva el posoperatorio y las complicaciones derivadas de la cirugía se reducen considerablemente. En el video podemos ver cómo se está empleando uno de estos robots para coser de vuelta un fragmento de piel previamente extraído de una uva. En el caso de este sistema, todas las acciones del robot son siempre controladas directamente por el cirujano; el robot es una extensión de los brazos y dedos del cirujano y cualquier movimiento del robot es siempre desencadenado por una acción del operador humano.

Actualmente se están desarrollando robots cirujanos que trabajen de un modo autónomo o semiautónomo, como es el caso del sistema desarrollado por la Universidad de Johns Hopkins que podemos ver en este video. Este robot semiautomático ha demostrado ser capaz de suturar tejidos blandos con una mayor precisión que los cirujanos, o que los cirujanos empleando el sistema robótico da Vinci.

Otro campo que está presentando un gran crecimiento dentro de la Ingeniería Biomédica es la telemedicina, cuyo propósito es emplear las tecnologías de la información y las comunicaciones para proporcionar servicios médicos. La telemedicina permite que de un modo remoto el personal sanitario pueda monitorizar, diagnosticar y recomendar acciones terapéuticas al paciente. Parte de su atractivo es la comodidad para el paciente: si el médico puede realizar el diagnóstico sin que yo vaya al hospital ¿Para qué me voy a molestar en desplazarme

hasta allí?. Pero su utilidad es más obvia en zonas remotas donde no hay acceso a personal médico. En países en vías de desarrollo el visitar a un médico, sobre todo a un especialista, puede suponer desplazarse decenas o incluso más de un centenar de kilómetros, desplazamiento que puede resultar extremadamente caro y consumir una gran cantidad de tiempo de una persona que probablemente tiene muy pocos recursos económicos. Por ello a menudo optan por no realizar dicho desplazamiento, lo que puede suponer que una patología que tratada de un modo correcto desde su inicio pudiese resolverse sin mayores complicaciones, se agrave hasta el extremo de poder llegar a producir daños irreparables o incluso la muerte del paciente.

La proliferación de terminales móviles inteligentes ha sido agua de mayo para el campo de la telemedicina. Ejemplo de este tipo de iniciativas es Peek (Portable Eye Examination Kit): una App para apoyar a los oculistas en los países del tercer mundo. En el mundo hay unas 39 millones de personas ciegas. En el 80% de los casos, la ceguera puede evitarse. Pero la mayor parte de estos pacientes viven en países del tercer mundo donde no hay recursos económicos para tratarlos. Una buena parte del problema es que a menudo esta población vive de un modo bastante disperso, y tiene que desplazarse grandes distancias para llegar a un hospital donde haya instrumental médico que permita diagnosticar y tratar la causa de su pérdida de visión.

Peek permite evaluar la visión de un paciente con el típico test que todos hemos hecho alguna vez en el oculista leyendo letras de tamaño decreciente en una pantalla. Además, añadiendo un pequeño dispositivo a la cámara del teléfono móvil, que puede construirse con una impresora 3D, la aplicación permite examinar el fondo de retina del paciente. Los tests pueden ser llevados a cabo por, por ejemplo, un asistente de enfermería, y todas las imágenes y datos registrados pueden transmitirse remotamente o almacenarse en el teléfono móvil para posteriormente ser analizadas por un oculista que pueda diagnosticar al paciente y proponer una terapia. Este dispositivo ya ha sido testeado durante dos años en varios países africanos y de América del Sur.

Existen muchas otras iniciativas similares: Cellscope Oto es una solución que permite convertir un teléfono móvil en un otoscopio para la examinación del oído del paciente. En la Universidad de Columbia han desarrollado un gadget electrónico de bajo costo que se acopla a un teléfono móvil y que permite diagnosticar el SIDA y la sífilis en tan sólo 15 minutos. Este dispositivo ha sido validado con más de un centenar de pacientes en Ruanda. En nuestro país cabe destacar la aplicación “Contigo”, destinada a dar soporte psicológico a mujeres

que padecen cáncer de mama, aplicación que ha ganado varios premios internacionales. En la actualidad existen decenas, sino centenares, de soluciones de telemedicina similares a las aquí presentadas, y cada vez su uso será más habitual tanto para proporcionar asistencia médica a poblaciones remotas, como para evitar las incomodidades derivadas de realizar un desplazamiento al hospital cuando éste puede evitarse.

La telemedicina combinada con sensores no invasivos mínimamente intrusivos, como los que hemos visto al principio de esta presentación, serán clave para movernos del modelo actual de medicina, fundamentalmente reactivo, hacia uno proactivo. En la actualidad a menudo en las etapas más tempranas de la aparición de una patología ésta es asintomática o los síntomas no resultan suficientemente molestos para persuadir al paciente a visitar al médico. Sólo cuando estos síntomas han perdurado en el tiempo y/o han incrementado su severidad, el paciente finalmente decide visitar al médico. Dependiendo de la patología concreta, esto puede suponer un retraso de días, semanas, meses o incluso años desde el momento de aparición de la patología hasta el momento en el que comienza el tratamiento. En el futuro dispositivos de monitorización mínimamente intrusivos que puedan emplearse durante nuestra vida cotidiana con el apoyo de sistemas de telemedicina enviarán alertas tempranas a los servicios de salud notificando de la aparición de una patología incluso antes de que ésta sea sintomática. El comenzar el tratamiento de la patología en una etapa más temprana no sólo redundará en un incremento de la calidad de vida del paciente, sino que además acarreará un abaratamiento en los costes del tratamiento por evitarse llegar a la fase aguda de la enfermedad.

Este modelo proactivo de salud jugará un papel fundamental en la gestión de una población cada vez más envejecida, algo a lo que estamos abocados en los países desarrollados. En este gráfico vemos la evolución histórica y la predicción hasta 2050 del porcentaje de la población mundial con una edad menor de 5 años y con una edad superior a 65 años. La tendencia es clara. El sector anciano de la población, por padecer abundantes patologías crónicas que en muchos casos no se van a resolver sino que tendrán que vivir el resto de su vida con ellas, es el que hace un mayor uso de los servicios de salud. Según este sector vaya creciendo, algo inevitable por el incremento en la esperanza de vida y por la estructura de la pirámide poblacional de la mayor parte de los países desarrollados, incrementará la presión sobre los recursos de los servicios de salud.

En la diapositiva vemos la estructura de la pirámide poblacional en Europa en el año 2011 y la previsión para el año 2060. Podemos ver que hay una disminución

en la cantidad de ciudadanos para todos los rangos de edades menores de 65 años, disminución que es especialmente marcada en el intervalo de edad de 20 a 50 años, intervalo contenido en la edad laboral de un ciudadano. A partir de los 65 años hay un incremento en todos los intervalos de edad, incremento que es más marcado cuanto más avanzada es la edad. En nuestro país el envejecimiento de la población es más severo que en la media de la unión europea. En España en la actualidad hay aproximadamente dos ciudadanos con edad laboral por cada ciudadano que, o bien por ser muy joven o mayor de 65 años, no tiene edad laboral. En 2050 en nuestro país habrá una única persona con edad laboral por cada ciudadano que no tenga edad laboral. Esto hará que el actual modelo de sistema sanitario y de Estado de bienestar no sean sostenibles. El desarrollo de tecnologías de teleasistencia que permitan que los ancianos vivan de modo independiente el mayor tiempo posible tiene el potencial de decrementar la presión que este sector de la población ejerce sobre los recursos de la sociedad, sin por ello decrementar su calidad de vida. La telemedicina será una tecnología clave para afrontar esta nueva realidad social a la que estamos abocados a mediados de este siglo, y los ingenieros biomédicos jugarán un papel central en su desarrollo.

La medicina personalizada es otro campo que presentará un gran crecimiento en el futuro cercano. El premio Nobel español Ramón y Cajal afirmó que “No existen enfermedades sino enfermos”. Esta frase pretende recoger que la casuística en medicina es prácticamente tan amplia como el número de pacientes y lo que ha funcionado para un paciente no tiene por qué funcionar para otro. En la actualidad la medicina emplea la evidencia para intentar proporcionar el mejor tratamiento posible al paciente; esto es, el tratamiento por el cual suele optar el clínico es el que funciona mejor la mayor parte de las veces. Sin embargo, esto no quiere decir que dicho tratamiento sea el mejor para este paciente concreto.

Gran parte de la casuística responsable de que no haya enfermedades, sino enfermos, reside en el genoma de cada persona. La primera vez que se secuenció el genoma completo de un ser humano en 2003 se tardó 13 años y tuvo un coste de \$2,700,000,000. Actualmente se tarda unas 24 horas y el coste es de unos \$1000. Por tanto, en un horizonte cercano no resulta descabellado el secuenciar el genoma de un paciente para valorar esta información en su tratamiento. El genoma de una persona está compuesto por 3000 millones de pares de bases, es decir, tiene 10 veces más letras que la enciclopedia británica al completo. El uso de la información genética en el diagnóstico y tratamiento de los pacientes será clave para la medicina personalizada. El conocer que una determinada

mutación en un gen está asociada a responder positivamente o no a un determinado tratamiento permitirá al médico darle al paciente el tratamiento que va a funcionar mejor para él, y no el que funciona mejor la mayor parte de las veces.

Sin embargo se escapa del alcance del cerebro humano el ser capaz de leer esos 3000 millones de pares de bases, identificar las mutaciones presentes en un genoma que son relevantes para una determinada patología, y mantenerse al día con los cientos de piezas de evidencia que se publican todos los días en la literatura médica. Para que pueda aplicarse la medicina personalizada se hace imperativo el desarrollo de herramientas computacionales que proporcionen soporte al clínico a la hora de gestionar el enorme volumen de información disponible del paciente, especialmente la información genética, y la gran cantidad de evidencia disponible en la literatura científica.

Probablemente muchos de ustedes hayan oído hablar del superordenador Watson de IBM. Este ordenador participó en el concurso de televisión norteamericano Jeopardy!, donde demostró ser capaz de responder preguntas en lenguaje natural mejor que los campeones de dicho concurso. Con esta aparición en Jeopardy! IBM pretendía demostrar su tecnología y obtener publicidad. Pero desde entonces la compañía ha estado trabajando en conseguir que Watson aprenda a diagnosticar cáncer. Watson ha usado su capacidad para comprender lenguaje natural para procesar más de 2 millones de artículos científicos, es capaz de manipular 600,000 piezas de evidencia clínica diferentes y es capaz de consultar información histórica sobre 1.5 millones de pacientes para ayudar al clínico a tomar decisiones. La capacidad de este superordenador para asimilar y procesar información es varios órdenes de magnitud superior a la capacidad de un ser humano, lo que hace imposible para los médicos competir con él en lo relativo a la cantidad de conocimiento y evidencia que emplea para realizar un diagnóstico. No estamos hablando todavía, ni mucho menos, de que un ordenador sustituya al clínico. La intuición, el trato con el paciente, la capacidad para identificar matices indescriptibles y no cuantificables en el paciente y la capacidad para razonar en un contexto holístico, frente al razonamiento en un contexto específico en el que actualmente se basan los ordenadores, hacen al clínico insustituible. Dicho esto, el apoyo del ordenador para la manipulación de los crecientes volúmenes de información disponible del paciente será en un futuro cercano imprescindible. Y en el caso de Watson, ya ha demostrado ser capaz de diagnosticar algunos tipos de cáncer con más fiabilidad que los médicos. Por ejemplo, en una serie de tests conducidos con la compañía de sanidad Wellpoint, Watson ha demostrado ser capaz de diagnosticar correctamente el

90% de los cánceres de pulmón, mientras que los médicos sólo son capaces de diagnosticar correctamente el 50%.

Este esfuerzo de IBM no es en esta ocasión otro intento para capturar titulares de prensa, como lo fue en el caso del concurso televisivo Jeopardy!. IBM ya ha firmado un acuerdo con Wellpoint para vender los servicios de Watson en el diagnóstico de cáncer (inicialmente cáncer de pulmón, próstata y pecho) a hospitales que estén interesados en contratar este servicio. Además de realizar un diagnóstico y proponer terapia, Watson también propone el mecanismo de tratamiento de cáncer más económico para ayudar a reducir los costes.

Otro campo excitante para el futuro de la Ingeniería Biomédica es la programación de organismos vivos. En informática se entiende por programación la escritura de los comandos que le indican al ordenador qué operaciones debe realizar como respuesta a las interacciones con el usuario. A través de la programación es cómo se construyen aplicaciones como Microsoft Word, Internet Explorer, o las Apps que nos bajamos para nuestro teléfono móvil. Los comandos que escribe el programador están en un lenguaje relativamente cercano al lenguaje natural, y son traducidos mediante una herramienta denominada compilador al lenguaje que realmente entienden los ordenadores: 1s y 0s. Estos 1s y 0s son las instrucciones que ejecutará el ordenador en respuesta a las interacciones del usuario.

Este año un grupo de investigadores del MIT han desarrollado un lenguaje de programación llamado “Cello” que, empleando primitivas de alto nivel bastante parecidas a las de un lenguaje de programación informático, permite definir el código genético de una bacteria (E. coli en la versión actual). Una vez el programador ha terminado su programa con Cello, el compilador genera las As, Cs, Gs y Ts del código genético, la cadena de ADN de la bacteria en cuestión. Dicha cadena puede sintetizarse e introducirse en una bacteria E. coli que hará lo que el programa le ordene a través del ADN. Empleando este lenguaje ya se han programado 60 bacterias diferentes haciendo que llevaran a cabo tareas como medir la concentración de oxígeno del medio, medir la concentración de glucosa o reconocer distintas señales en el entorno y responder a ellas en un orden de prioridad.

El equipo de investigadores que está tras Cello ahora mismo está trabajando en soportar otras bacterias además de E. coli en este lenguaje de programación, como por ejemplo levaduras responsables de distintos procesos de fermentación. El fin último de este lenguaje de programación es permitir programar

bacterias que, por ejemplo, puedan detectar y curar enfermedades dentro del cuerpo de una persona o ayudar a una persona a sintetizar algún producto (como la insulina) que su cuerpo no es capaz de sintetizar en cantidades suficientes.

Una herramienta comercial similar a ésta es la construida por la empresa israelí “The Genoma Compiler”, la cual trabaja a un menor nivel de abstracción (directamente sobre las bases del ADN). Esta herramienta permite al usuario editar una cadena de ADN aplicando mutaciones sobre ella o insertando o eliminando genes. Empleando esta herramienta en 2013 tres estudiantes de doctorado construyeron una planta que brilla oscuridad. La bioluminiscencia es un fenómeno que sucede de modo natural en algunos animales (como las luciérnagas) y en algunas bacterias. Pero no existe ningún vegetal que de modo natural sea bioluminiscente. Empleando esta herramienta estos tres estudiantes añadieron media docena de genes, responsables de sintetizar una proteína luminiscente, al genoma de una planta ya secuenciado previamente. Para poder sintetizar la cadena de ADN necesitaban \$65,000. A través de una campaña de Crowdfunding en Internet lograron recaudar cerca de medio millón de dólares, que han empleado para crear una empresa que comercializará la planta que han diseñado. El objetivo a largo plazo de esta empresa es diseñar árboles que brillen en la oscuridad para sustituir las farolas que empleamos actualmente para iluminar nuestras ciudades de noche. Puede parecer un sueño imposible de realizar. A mí hace 10 años también me hubiese parecido un sueño imposible de realizar el que tres jóvenes creasen una planta que brilla en oscuridad y montasen una empresa para comercializarla.

Un campo donde la Ingeniería Biomédica está abocada a realizar una notable contribución a la sociedad en el futuro cercano es el de la discapacidad. Según el Instituto Nacional de Estadística en nuestro país hay 3.85 millones de personas con algún grado de discapacidad. Tan sólo el 24.3% de estas personas se encuentran insertadas laboralmente comparado con el 57.1% de la población en general. El empleo es fundamental para permitir la normalización de las personas con discapacidad; por un lado alcanzar la integración laboral supone la superación de otros tipos de barreras de accesibilidad, formación, y discriminación. Por otro, a través de la inserción laboral la persona con discapacidad asume un nuevo rol en la sociedad: pasa a ser un sujeto activo, aporta valor a la economía y puede alcanzar su normalización.

En la inserción laboral, y en muchos otros aspectos de la vida de la persona con discapacidad, el uso de tecnologías de asistencia puede suponer la diferencia entre poder realizar una tarea de un modo autónomo o no poderla realizar. El

desarrollo de tecnologías de asistencia a la discapacidad ha sido, y especialmente será en el futuro, uno de los campos más activos y con mayor impacto social dentro de la Ingeniería Biomédica. Un ejemplo de estas tecnologías son las prótesis, como por ejemplo la prótesis comercial de miembro superior desarrollada por la compañía neoyorquina Prosthetics in Motion que podemos ver en el video. Se trata de una de las más avanzadas disponibles comercialmente en la actualidad, soportando 10 grados de libertad o, dicho en términos menos técnicos, permite al usuario realizar hasta 10 tipos diferentes de agarre. En comparación, un brazo humano posee 27 grados de libertad.

Desde un punto de vista conceptual, una prótesis activa como la del video y un ordenador son dispositivos muy similares. Un ordenador es un dispositivo que toma una serie de datos de entrada (por ejemplo la dirección de una página web que introducimos a través del teclado), realiza un procesamiento con esos datos (el ordenador determina dónde conseguir la información de esa página web y se la descarga) y una vez realizado este procesamiento presenta al usuario algún tipo de resultado (visualiza en el navegador la información de la página web que se ha descargado). Por tanto, podríamos definir un ordenador como una máquina que toma una información de entrada, realiza un procesamiento sobre ella, y presenta el resultado de haber realizado dicho procesamiento. Una prótesis electromiográfica como la del video funciona exactamente del mismo modo. En este caso los datos de entrada no son introducidos mediante un teclado o un ratón, sino que es actividad eléctrica muscular del paciente la que es empleada para controlar la prótesis. Cuando se realiza una contracción voluntaria de un músculo información nerviosa procedente de nuestro cerebro provoca la liberación de iones de calcio en los sarcómeros de nuestras fibras musculares, desencadenando así una serie de reacciones que concluyen con el acortamiento de los sarcómeros, y por tanto, en la contracción del músculo. Estas reacciones producen actividad eléctrica que puede medirse de un modo no invasivo empleando electrodos superficiales.

En este video, que muestra una prótesis de brazo completo desarrollada por la Universidad Johns Hopkins, podemos observar estos electrodos conectados a los músculos del pecho del paciente. El paciente en cuestión perdió ambos brazos en un accidente eléctrico 40 años antes de la grabación de este video. Está amputado en ambos casos a nivel del hombro. Empleando simulaciones computacionales, el paciente aprende a contraer en distintos patrones sus músculos. Estos patrones de contracción tienen asociados patrones de producción de actividad eléctrica que son sensados e interpretados por el ordenador como

distintos comandos para la prótesis. Habitualmente el primer paso de aprendizaje del uso de una prótesis suele realizarse mediante simulaciones computacionales ya que el uso directo de la prótesis sin haber aprendido su funcionamiento podría resultar en movimientos incontrolados que podrían dañar al paciente o a la propia prótesis. Una vez el paciente ha aprendido a controlar la prótesis empleando el simulador llega el momento de probarla.

El paciente para controlar los 30 grados de libertad que posee esta prótesis (3 más de los que realmente posee un brazo humano) deberá realizar ciertos patrones de contracción de sus músculos. La actividad eléctrica generada por estas contracciones (la entrada al sistema) es procesada por un pequeño ordenador instalado en la propia prótesis que los traduce a comandos del movimiento. Éste es el paso análogo al “procesamiento de la información” que realiza un ordenador tradicional, y desde un punto de vista computacional la forma de realizar este procesamiento en un ordenador o en una prótesis es muy similar: una arquitectura de control formada por una unidad de procesamiento con el apoyo de la memoria RAM ejecuta un software, una serie de comandos escritos por un programador para realizar el procesamiento de la información. Los comandos resultado de este procesamiento en vez de producir, por ejemplo, la presentación de algún resultado en la pantalla del ordenador, activan motores (los dispositivos de salida de la prótesis) para mover los dedos, la muñeca, el codo o el hombro de la prótesis. Como vemos en el video, se trata de un dispositivo bastante más avanzado que la anterior prótesis, que sólo permitía movimientos de los dedos de la mano. Eso sí, este dispositivo no está disponible comercialmente. Y a pesar de que posee 3 grados de libertad más que un brazo humano tiene una gran limitación: mientras que en un brazo humano nosotros podemos desencadenar de modo simultáneo distintos movimientos (por ejemplo, mover el codo, la muñeca y los dedos a la vez) en el caso de esta prótesis los movimientos tienen que irse realizando secuencialmente, como se puede apreciar en el video.

Actualmente todas las prótesis disponibles comercialmente, y la mayor parte de las que se están desarrollando en investigación, funcionan del modo que hemos descrito: emplean actividad eléctrica de la contracción de ciertos músculos como comandos para controlar los motores responsables del movimiento. Así no es cómo funcionan realmente los movimientos en el cuerpo humano: la actividad eléctrica que controla nuestros músculos es actividad eléctrica nerviosa procedente de nuestro cerebro y transmitida a los músculos a través de los nervios. El uso de una prótesis actualmente implica un proceso de aprendizaje, bastante largo en el caso de prótesis sofisticadas, para aprender una forma

diferente de controlar el movimiento del miembro artificial. Sería ideal no emplear la actividad eléctrica electromiográfica para el control de las prótesis, sino usar directamente la actividad eléctrica nerviosa. Así se eliminaría el proceso de aprendizaje; el paciente simplemente tendría que pensar el movimiento que quiere realizar, exactamente como cuando tenía su miembro.

En los últimos años ha comenzado a haber avances significativos en esta dirección. En 2015 por primera vez un tetrapléjico controló un brazo robótico no a través de una señal electromiográfica, sino directamente con su pensamiento. Se trata nuevamente de un logro realizado en la Universidad de Johns Hopkins. Para ello fue necesario implantar dos arrays de electrodos directamente en el córtex motor del paciente. No es posible actualmente para este tipo de aplicaciones el emplear la señal electro-encefalográfica no invasiva, como habitualmente se registra en la rutina clínica, ya que no posee suficiente resolución espacial para permitir una medición de la actividad eléctrica cerebral suficientemente precisa para interpretar correctamente la intención del paciente. Para conseguir el movimiento del brazo robótico esta información eléctrica cerebral era registrada por un ordenador, que la analizaba e interpretaba la intención del paciente, traducéndola a comandos de movimiento para el brazo robótico. De este modo, tras 13 años completamente paralizado de cuello hacia abajo, el paciente fue capaz de tomarse una cerveza él sólo. Para ello simplemente tuvo que imaginar el movimiento de tomarse la cerveza; no fue necesario en este caso un largo proceso de entrenamiento para aprender a controlar el brazo robótico, sino que el brazo robótico es capaz de, por así decirlo, comprender los pensamientos del paciente y los traduce a los movimientos correctos.

El paciente del video tiene una lesión medular que ha hecho que pierda completamente el control de todos los músculos situados por debajo de su cuello. Su cerebro es completamente funcional y es capaz de enviar los comandos de movimiento (estímulos eléctricos) a los músculos. Sus músculos también son completamente funcionales, y serían capaces de recibir esos estímulos eléctricos y responder a ellos contrayéndose adecuadamente. El problema reside en que el impulso eléctrico nervioso generado en el cerebro no puede llegar al músculo debido a una lesión en la médula espinal. Podríamos preguntarnos ¿si los brazos del paciente son perfectamente funcionales para qué usar un dispositivo robótico para ejecutar el movimiento si podemos usar sus propios brazos?

Este mismo año por primera vez un paciente cuadrapléjico ha podido recuperar función de uno de sus brazos gracias al trabajo de un grupo de investigadores del Feinstein Institute for Medical Research de Nueva York. De un modo similar

al caso expuesto anteriormente, a este paciente se le ha implantado un array de electrodos (90 electrodos) que 30000 veces por segundo miden la actividad eléctrica de la región de su córtex motor encargada del control de su brazo. Esto supone que se registran 2,700,000 datos cada segundo, datos que son empleados por un ordenador para interpretar los comandos motores que se están generando en esta parte del cerebro. Pero en esta ocasión en vez de emplear esta información para controlar un brazo robótico o una prótesis, se controla un array de 130 electrodos estimuladores capaces de inducir contracciones en los músculos del antebrazo. Esto ha permitido al paciente volver a jugar a uno de sus videojuegos favoritos: Guitar Hero. El propio paciente se mostraba sorprendido de que simplemente tenía que “pensar en tocar la guitarra”, exactamente como lo hacía antes del accidente que provocó su lesión medular, y su brazo respondía adecuadamente a dichos pensamientos.

El desarrollo de prótesis no se limita sólo al miembro superior. También existen dispositivos similares para miembro inferior. En estas imágenes podemos ver a Hugh Herr, quien en 1992 perdió ambas piernas en un accidente de alpinismo. En vez de resignarse a una vida en una silla de ruedas, Hugh Herr de modo casi inmediato comenzó a desarrollar distintos órganos protésicos que le permitieran no sólo andar, sino también volver a realizar escalada. En la actualidad Hugh Herr es profesor del MIT y se le considera la eminencia mundial en el desarrollo de prótesis en miembro inferior. Este mismo año Hugh ha sido galardonado con el premio princesa de Asturias a la Investigación Científica y Técnica. Como se puede ver en el video, destaca lo natural del funcionamiento de sus prótesis. Si Hugh no llevase su pantalón alzado, no nos daríamos cuenta de que por debajo de la rodilla sus piernas son mecánicas.

Nuestras piernas nos permiten desplazarnos, y nuestros brazos manipular todo tipo de objetos. Pero la función motora no es la única función que nos prestan nuestras extremidades, también nos permiten percibir sensaciones como temperatura, humedad, presión y rugosidad. Esta percepción está fuertemente relacionada con su actividad motora: la manipulación de objetos frágiles con nuestras manos, como por ejemplo una uva, es posible porque nuestros dedos nos proporcionan realimentación sobre la presión que estamos ejerciendo sobre el objeto y cómo el objeto está respondiendo a dicha presión, lo que nos permite regular la fuerza que aplicamos sobre él para evitar, por ejemplo, aplastar la uva. Cuando la función motora es realizada por una mano protésica comercial, el paciente pierde esta realimentación y la manipulación de objetos frágiles se convierte en todo un reto.

En el departamento de Ingeniería Biomédica de Case Western Reserve University están trabajando en la creación de prótesis que proporcionen sensibilidad al usuario. Para ello dotan a las prótesis de sensores de presión e implantan de un modo permanente en el paciente electrodos que hacen de interfaz con su sistema nervioso, concretamente con los nervios responsables de la sensación de tacto en distintas partes de la mano. La información recibida por los sensores de presión es analizada por un ordenador, el cual decide qué patrones de estimulación eléctrica deben generar los electroestimuladores (que podemos ver en la parte superior izquierda de la diapositiva) conectados mediante cirugía a los nervios del paciente. Esto permite al cerebro volver a obtener información eléctrica del tacto como si la mano estuviese ahí. Para el cerebro esta situación es prácticamente indistinguible de realmente tener la mano original: una vez el paciente del video probó la prótesis afirma que “tenía sensación en sus dedos” y que cuando usaba los dedos pulgar, índice y medio para coger una uva “sentía” como su mano dedo a dedo iba haciendo contacto con la uva y la presión que sobre ella estaba ejerciendo cada dedo. En el video podemos ver cómo el paciente está manipulando uvas con su prótesis sin ningún problema. Sin el mecanismo que proporciona la información sobre tacto el 67% de las veces que el paciente cogía una uva la aplastaba. Con el mecanismo de tacto, sólo la aplasta en el 7% de los casos.

De un modo similar, en la actualidad hay investigadores trabajando en el desarrollo de prótesis de miembro superior que además de sensación de tacto proporcionen sensación térmica y de humedad, y en prótesis de miembro inferior que proporcionan información de tacto sobre la pisada, lo que permite un mayor control y firmeza a la hora de caminar. Uno de los retos que quedan por resolver en estos casos, y en general en cualquier escenario en el cual se realiza un implante permanente en el cuerpo del paciente para registrar actividad eléctrica cerebral y controlar una prótesis, o para hacer de interfaz con el sistema nervioso y enviar información al cerebro, es la degradación que estos dispositivos suelen presentar según el cuerpo poco a poco los va recubriendo de tejido, así como los efectos que a largo plazo podrían tener sobre el cuerpo del paciente dichos implantes. Todavía es necesaria mucha investigación en el campo de biomateriales y biocompatibilidad para resolver estos problemas.

Otro avance reciente en el campo de las prótesis son los dispositivos implantados de modo permanente en el paciente. Las prótesis que hemos visto hasta el momento son dispositivos “de quita y pon”. Esto tiene la desventaja de que no están fijadas fuertemente al cuerpo del paciente, lo que puede suponer un

problema para manipular objetos pesados. Por ejemplo, si un paciente coge una bolsa de la compra pesada con su prótesis de brazo, si no lo hace con cuidado puede que su brazo se desprenda. En 2014 por primera vez investigadores de Chalmers University of Technology de Suecia crearon una prótesis implantada de modo permanente a un paciente. La base de un brazo biónico fue fijada de modo permanente al húmero, lo que permite una sujeción firme del resto de la prótesis, así como una medición invasiva más precisa de la señal electromiográfica que se emplea para controlar la prótesis, redundando en un control más preciso del miembro. Desde entonces se han realizado varios procedimientos similares en otros pacientes.

Otra tecnología que podría en el futuro cercano cambiar la vida de cuadrapléjicos, parapléjicos y pacientes con parálisis cerebral son los exoesqueletos. Estos dispositivos están pensados para pacientes que no han perdido sus miembros, pero que no tienen control motor o tienen un control motor reducido sobre ellos. Los exoesqueletos permiten detectar intención de movimiento o bien monitorizando la actividad muscular del paciente o bien haciendo de interfaz con su sistema nervioso, y desencadenan el movimiento correspondiente. Las ventajas de estos dispositivos sobre las tradicionales sillas de ruedas son obvias: si los pacientes que no pueden controlar sus piernas en vez de ir sobre ruedas caminan con estos trajes mecánicos las barreras de accesibilidad desaparecerán. Unas escaleras, un bordillo de una acera o subir a un coche no supondrán ya un problema. En la actualidad este tipo de tecnología ya se está empleando para la rehabilitación de pacientes, como es el caso del exoesqueleto que podemos ver en el video, construido por la empresa española Marsi Bionics para apoyar en la rehabilitación de niños que tienen parálisis cerebral. Pero en el futuro estos dispositivos no se emplearán sólo con fines de rehabilitación, sino que serán sustitutos de las actuales sillas de ruedas.

Las prótesis que hemos cubierto hasta este punto en esta lección magistral son dispositivos altamente costosos, tanto las comerciales como las de investigación. Se trata de dispositivos que requieren una gran inversión en I+D, y cuya producción en masa siempre se ve entorpecida por la necesidad de adaptar la prótesis al paciente y a las características del muñón residual de su miembro. Con el tiempo estas tecnologías se abaratarán y se harán accesibles a todo el mundo, como siempre suele suceder con las tecnologías electrónicas. En los años 80 un ordenador era un dispositivo considerablemente caro y con una funcionalidad muy limitada. Hoy los ordenadores nos proporcionan una cantidad de funcionalidad órdenes de magnitud superior a una fracción del precio, lo que

los hace accesibles a prácticamente todo el mundo. Lo mismo sucederá con las prótesis. Sin embargo, el esperar 30 años a que se abaraten estos dispositivos no es una respuesta aceptable para quien los necesita hoy. Una prótesis electromiográfica sencilla con único grado de libertad (un único movimiento de agarre) en nuestro país ronda los 17,000. Una más avanzada como la Michelangelo de Ottobock, con 7 grados de libertad, ronda los 40,000. Y no se trata de dispositivos que duren toda la vida; como cualquier dispositivo mecánico sufren desgaste y requieren mantenimiento: cambios de batería, cambios de guante de plástico que la recubre, desgaste mecánico de las partes, roturas por accidentes, etcétera. El precio de estos dispositivos hace que no sean accesibles para todo el mundo. En nuestro país la seguridad social en ocasiones cubre el coste de los modelos más básicos, pero no así de los más avanzados. Y existen escenarios donde el paciente no cuenta con ningún tipo de cobertura. Curiosamente, en España si un niño llega al mundo con un defecto de nacimiento y, por ejemplo, carece de una de sus manos la seguridad social le pagará una prótesis electromiográfica básica. Sin embargo, si el niño nace sin ningún defecto y a los dos meses tiene un accidente que le hace perder una mano, no tendrá derecho a ningún tipo de cobertura por parte de la seguridad social.

En el campo de la Ingeniería Biomédica parte de la investigación que realizamos se orienta a construir sofisticados y avanzados dispositivos como los que hemos visto hasta ahora en esta presentación. Estos dispositivos, por ser el estado del arte del momento, necesariamente serán caros. Pero dentro de la Ingeniería Biomédica existe otra vertiente que se dedica al desarrollo de tecnologías de bajo coste, tanto para la asistencia a la discapacidad como para otros ámbitos. En el caso concreto de la asistencia a la discapacidad sin duda el reciente abaratamiento y amplia difusión de la impresión 3D ha constituido toda una revolución. Las impresoras 3D son herramientas que permiten la construcción física de un objeto diseñado en el ordenador. Para ello emplean un estrusor que va depositando pequeñas capas de plástico derretido la una sobre la otra para crear el objeto. Prácticamente cualquier cosa puede construirse con una impresora 3D, entre ellas prótesis.

El uso de impresión 3D para la construcción de prótesis, especialmente prótesis infantiles, tiene una gran cantidad de ventajas. Una prótesis pasiva, esto es, no controlada mediante un motor sino dirigida por movimiento mecánico del muñón residual del paciente, tiene un precio aproximado de 12,000 en nuestro país. Por 50 puede crearse con impresión 3D un dispositivo con una funcionalidad similar al comercial. En el caso de las prótesis activas la construida

con impresión 3D puede rondar los 300, frente a los 17,000 de la comercial. Obviamente, cualquier padre va a sentirse mucho más cómodo cuando su hijo de 10 años está jugando con piedras en el parque si la prótesis que está usando para coger las piedras ha costado 50, y no 12,000. Es un escenario bastante diferente el necesitar 2000 para reparar el dedo roto de la prótesis comercial, además de tener que enviar la prótesis a soporte técnico y tener que esperar días o semanas por ella, que simplemente necesitar 7 para imprimir un dedo nuevo, algo que incluso podría hacer en su propia casa. Aun cuando es cierto que las prótesis creadas con impresión 3D suelen tener una funcionalidad inferior a las comerciales, si se considera el binomio funcionalidad-precio la ecuación cambia considerablemente.

Otra gran ventaja es el hecho de que el diseño se realiza completamente en el ordenador, lo permite a partir de fotografías o escáneres tridimensionales del muñón residual realizar un diseño computacional de una prótesis que se adapte adecuadamente al paciente. Esto es especialmente interesante en el caso de prótesis infantiles. Puede que en la zapatería podamos encontrar prácticamente cualquier talla de zapato para nuestro hijo. Pero, al menos en el presente, las compañías comerciales no tienen una variedad tan amplia de prótesis. Al margen del diseño estructural y funcional de la prótesis, al emplear diseño computacional también la estética puede manipularse de un modo sencillo. Esto permite adaptar la prótesis al gusto de los usuarios; si el niño quiere una mano que sea como el puño de capitán América o la niña quiere que sea rosa y tenga florecitas esto ni supone un problema, ni va a encarecer significativamente la prótesis.

Una tercera ventaja es que el diseño de estas prótesis es completamente digital. Toda la información necesaria para la construcción de la prótesis puede colgarse en Internet en forma de archivos digitales y descargarse desde un enlace. Esto hace que sea muy sencillo el compartir diseños, y que otras personas puedan mejorarlos. Esta faceta fue precisamente lo que permitió que en 2013 surgiera la ONG Enabling The Future, cuyo propósito es crear una red de voluntarios global dispuestos a imprimir prótesis para niños que las necesiten en su región del mundo. En España el primer miembro de dicha ONG fue el laboratorio de fabricación digital de nuestra Universidad, donde en 2014 por primera vez se imprimió una prótesis para un niño español. Por cierto, él quería que la prótesis fuese como el puño de Iron Man. Nuestro laboratorio de fabricación digital no sólo se ha limitado a imprimir estas prótesis para niños españoles, sino que ha realizado aportaciones mejorando el diseño de estos dispositivos, teniendo la categoría tanto de “maker” como de “designer” dentro de la ONG Enabling The Future.

Guiados por el fin de difundir conocimientos sobre la creación de prótesis con impresión 3D, el Fablab de la Universidad CEU San Pablo junto con el Departamento de Tecnologías de la Información han organizado dos ediciones del curso de verano “Tecnologías biónicas en medicina”, curso que tiene una parte de taller práctico en el cual los alumnos aprenden a construir prótesis activas con tecnología de impresión 3D.

Existen iniciativas similares a la de Enabling The Future orientadas a la construcción de prótesis de bajo coste para países en vías de desarrollo, especialmente en países como Sudán donde hay una gran cantidad de amputados ya que es una práctica habitual tras un conflicto bélico el amputar los brazos de los enemigos que han sido capturados. Esta iniciativa lleva a estos países soluciones tecnológicas que permiten a estas personas volverse a vestir o comer de modo independiente y a un coste accesible: unos \$75. El niño que vemos en el vídeo perdió ambos brazos cuando una bomba estalló cerca del rebaño de ovejas que estaba cuidando. Este vídeo le muestra comiendo de un modo independiente por primera vez en dos años.

El desarrollo de tecnologías de bajo costo no se limita, ni mucho menos, al campo de las prótesis. Otro campo bastante activo en la actualidad es el de la instrumentación médica. Según la Organización Mundial de la Salud el 70% del instrumental médico electrónico donado a hospitales del tercer mundo termina no usándose. Parte de este material nunca llega a ponerse en funcionamiento. Y el que se pone en funcionamiento cuando se avería a menudo no se dispone ni de recursos económicos ni de conocimiento para su reparación. Las averías en este tipo de material cuando es usado en un hospital del tercer mundo suelen ser bastante habituales, ya que este instrumental ha sido diseñado para operar en países del primer mundo donde, por ejemplo, los ingenieros que lo han diseñado probablemente han asumido que habría un suministro eléctrico fiable y que se realizaría un mantenimiento periódico del instrumental, algo que a menudo no se cumple en el tercer mundo.

Es por ello que actualmente dentro de la Ingeniería Biomédica es un campo de investigación muy activo el diseño y la construcción de instrumentación médica de bajo coste que además emplee tecnologías que lo hagan fácil de mantener y reparar en países del tercer mundo. Un claro ejemplo de esto es la incubadora neonatal desarrollada por Alejandro Escario, un ex alumno de la doble titulación de Ingeniería Informática e Ingeniería de Telecomunicación de esta Universidad que una vez terminó su carrera decidió hacer el curso de Fabricación Digital que imparte nuestro Fablab. Se trata de una incubadora construida con materiales

como madera o piezas viejas de ordenadores, materiales que se pueden conseguir fácilmente en países del tercer mundo. Esta incubadora permite controlar la humedad, la inclinación y la temperatura del habitáculo y puede construirse por un precio de \$350. Este proyecto ha ganado el prestigioso premio del MIT “Best Medical Project” de los Global FAB Awards 2015. Uno de los prototipos de esta incubadora está actualmente en la maternidad de Nikki en Benin, y este mismo mes de septiembre una segunda unidad será enviada a Sierra Leona. El proyecto continúa evolucionando, y en él están colaborando estudiantes del Grado en Ingeniería Biomédica de nuestra universidad, desarrollando un módulo para tratar la ictericia y un módulo de batería que permita el funcionamiento de la incubadora cuando falte el suministro eléctrico.

Como podemos ver, el Fablab de nuestra universidad es un centro pionero a nivel nacional e internacional en el desarrollo de tecnologías médicas de bajo costo, si bien esta no es, ni mucho menos, la única línea de trabajo de este a menudo infravalorado y desconocido laboratorio de nuestra universidad.

El uso de tecnologías de impresión 3D tiene otras aplicaciones en el campo médico. Aunque la impresión con plástico es la más común debido al bajo coste del material, y de la impresora, existen impresoras 3D que emplean otros materiales, como metales. Esto permite su uso para la impresión de implantes médicos. En la imagen podemos ver el resultado de una cirugía de reconstrucción facial. El paciente en cuestión padeció en 2012 un accidente de moto que provocó la fractura de varios huesos de la cabeza. Posteriormente empleando técnicas de imagen médica (tomografía computacional) se creó un modelo tridimensional de la estructura ósea deformada de la cara del paciente, y empleando diseño computacional se desarrollaron implantes que permitirían a los cirujanos reconstruir su cara original. Dichos implantes se crearon empleando una impresora de titanio. Esta misma técnica fue empleada el año pasado en un hospital de Salamanca. En este caso el paciente en cuestión sufría cáncer y fue necesario extirparle el esternón y varias costillas. Empleando tomografía computacional se creó un modelo tridimensional de la estructura ósea del paciente, y se imprimió en titanio el implante que podemos ver en la diapositiva.

Otro campo de aplicación de las impresoras 3D es la creación de fármacos a medida. La técnica de deposición de capas de material puede emplearse para la construcción de fármacos adaptados a las necesidades de cada paciente. Así por ejemplo, en 2015 la compañía Aprexia Pharmaceuticals recibió aprobación de la Federal Drug Administration de Estados Unidos para la comercialización de

pastillas creadas con impresión 3D para prevenir ataques epilépticos. El uso de esta técnica de fabricación permite a la compañía personalizar el fármaco para cada uno de sus clientes. Existen iniciativas similares para la creación rápida de fármacos para combatir epidemias que, por ser poco frecuentes, no tiene sentido desde un punto de vista comercial la fabricación en volumen por adelantado de los fármacos que se usan para tratar la patología y su almacenamiento hasta que sean necesarios.

La discapacidad de una persona no tiene por qué surgir sólo de la pérdida de función motora. También puede surgir de la pérdida de sentidos como la vista o el oído. En este caso la función de estos órganos es traducir algún estímulo externo (la radiación electromagnética que compone la luz, o las ondas de presión que forman el sonido) en impulsos eléctricos que son transmitidos por el sistema nervioso al cerebro e interpretados, respectivamente, como visión o sonido.

Un implante coclear, algo que de un modo más coloquial podríamos llamar oído biónico, es un dispositivo pensado para pacientes con una pérdida muy severa o total de la audición. El implante está formado por uno o varios micrófonos externos que envían su información a un procesador de señal, que recibe el sonido y lo transforma en impulsos eléctricos que son enviados a un implante interno situado en el oído. Dicho implante está formado por un array de electrodos estimuladores que se encuentra dentro de la cóclea. Los impulsos de este array estimulan los nervios que se encuentran en la cóclea y llevan la información auditiva al cerebro. El sonido que se percibe en la actualidad con este tipo de dispositivos no tiene la calidad del sonido que percibe un oído sano. Pero en la mayor parte de los casos permite, por ejemplo, una comprensión perfecta del habla humana sin necesidad de que el paciente lea los labios del interlocutor. Y estos dispositivos tienen algunas ventajas que no poseen nuestros oídos; así por ejemplo algunos modelos permiten escuchar música directamente desde nuestro teléfono móvil a través de Bluetooth sin necesidad de emplear cascos. Y, por supuesto, si queremos dormir o no queremos que nos moleste el ruido de nuestros compañeros en el trabajo, siempre se pueden apagar. Si bien año tras año se continúa avanzando y mejorando la calidad de la audición que proporcionan, estos dispositivos no son en absoluto una tecnología reciente: el primer implante coclear exitoso se realizó en 1969, y en la actualidad se estima que más de 200,000 personas en todo el mundo llevan este tipo de dispositivos.

Los ojos biónico sí son una tecnología reciente. Aprobado por primera vez para su implantación en pacientes en 2013 por la Federal Drug Administration, año en

el que también se implantó por primera vez este dispositivo en Estados Unidos, el Argus II fue el primer ojo biónico comercial. Este dispositivo consta de una cámara de video montada sobre unas gafas que lleva el paciente. Esta cámara está conectada a una unidad de procesamiento de video; esto es, un pequeño ordenador portátil bastante parecido en su estética a los antiguos Walkman. Esta unidad recibe la señal de la videocámara, la procesa y en base a ella envía comandos de modo inalámbrico a una antena situada en torno al glóbulo ocular del paciente. Esta antena se conecta a un array electroestimulador situado sobre la retina que envía impulsos eléctricos al nervio óptico del paciente. En el video vemos a un paciente que hace 34 años perdió completamente la visión en ambos ojos. Al paciente se le ha implantado el Argus II y éste es el momento en el que se enciende por primera vez. Este ojo, ni mucho menos, proporciona una visión de una calidad equivalente a la de un ojo sano. Su visión es altamente píxelada (el array de electrodos que sustituye a la retina del paciente sólo tiene 60 electrodos) y la visión que se obtiene es en escala de grises, no en color. Pero puede hacer que un paciente con, por ejemplo, retinitis pigmentosa que no veía absolutamente nada recupere un nivel de visión que le permita distinguir dónde están los platos y los cubiertos en una mesa, ver el pomo de una puerta, distinguir el bordillo de la acera y, en algunos casos, incluso ver los precios de los productos en el supermercado.

En la actualidad se está gestando una segunda generación de ojos biónicos que llegará al mercado antes de que termine esta década y que proporcionarán un nivel de resolución bastante superior al de los modelos que ya están en el mercado. Según las afirmaciones de las empresas que los están desarrollando, estos ojos llegarán a permitir recuperar hasta un 10% de la visión de un ojo normal. Con este nivel de visión una persona puede realizar una vida bastante cercana a la normalidad y, con las ayudas adecuadas, puede por ejemplo volver a leer texto sin problemas. El video promocional que estamos viendo en estos momentos pertenece a la compañía Nano Retina, cuyo ojo biónico funciona en base a un pequeño chip que se implanta dentro de la retina y que hace la misma función que nuestros bastoncillos; el chip tiene una serie de fotorreceptores que son estimulados por la luz que entra dentro del ojo y que generan impulsos eléctricos que son transmitidos por el nervio óptico al cerebro del paciente. Aquí podemos ver una simulación de la calidad de visión que permitirá recuperar este ojo biónico.

Una de las limitaciones que actualmente tienen este tipo de dispositivos es que sólo pueden emplearse en pacientes que han poseído visión normal y la hayan

perdido debido a que su retina se ha dañado. Si un paciente ha nacido ciego y su córtex visual nunca ha aprendido a interpretar la información de la visión, aunque empleemos ojos biónico para enviarle estímulos eléctricos al cerebro éste no sabrá cómo interpretarlos.

Para evitar ser más pesado de lo que ya he sido, concluiré aquí esta lección, que dado lo amplio del campo de la Ingeniería Biomédica, inevitablemente ha proporcionado una visión parcial e incompleta. No obstante, espero que haya servido para transmitir a aquellos que la desconociesen una visión general de esta disciplina que, aunque de reciente implantación en nuestro país, posee una larga tradición fuera de él. Los avances que se están produciendo en este campo se han acelerado considerablemente. Actualmente podemos implantar marcapasos en el corazón de una persona sin cirugía, somos capaces de conseguir que un ciego vuelva a recuperar parcialmente su visión, que un sordo vuelva a oír, que un tetrapléjico pueda recuperar control de sus brazos, podemos construir prótesis que permitan al paciente sentir, podemos monitorizar parámetros fisiológicos de un paciente con una pequeña calcomanía, existen lentillas que monitorizan la concentración de glucosa en sangre e incluso suministran automáticamente insulina, podemos imprimir un esternón para implantárselo a un paciente, podemos programar una bacteria como si de un ordenador se tratase, y tres jóvenes han creado una empresa para vender una planta que brilla en la oscuridad que ellos mismos han diseñado. Todo esto son avances que han sucedido en los últimos 4 años. Si hace una década me hubiesen preguntado si en 2016 se habría alcanzado alguno de estos hitos, no hubiese creído posible alcanzar ninguno de ellos. Algo que he tenido que aprender en los últimos años como un profesional de este campo es a mantener una mente abierta sobre lo que es posible y lo que no, ya que a menudo en este campo la realidad supera a la ciencia-ficción.

El progreso en el campo de la Ingeniería Biomédica se está acelerando a un ritmo exponencial. Esta aceleración continuará a lo largo de las próximas décadas, durante las cuales la Ingeniería Biomédica tendrá un impacto a nivel social, económico y político de enorme magnitud. Tal creo que va a ser el alcance y la profundidad de dicho impacto que estoy convencido de que tras la revolución industrial, y la revolución de las tecnologías de la información y las comunicaciones, la próxima gran revolución que va a transformar a la humanidad va a surgir del campo de la Ingeniería Biomédica.

**Abraham Otero** nació en 1978 en Orense. Se licenció en Ciencias Físicas, especialidad de Electrónica y Computación, por la Universidad de Santiago de Compostela en el año 2000, obteniendo el Premio Extraordinario Fin de Carrera de la comunidad autónoma de Galicia. Tras terminar un Doctorado en Informática, área de conocimiento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial en la Universidad Santiago de Compostela, en el año 2005 se trasladó a la Universidad CEU San Pablo, donde ocupó los puestos de Profesor Colaborador Doctor, Profesor Adjunto, Profesor Agregado y, en la actualidad Profesor Titular.

Es Coordinador del Grado en Ingeniería Biomédica de la Universidad CEU San Pablo, Profesor Visitante de la Universidad del Turabo, Puerto Rico, donde imparte docencia en sus programas de doctorado e IP del grupo de investigación Laboratorio de Bioingeniería de la Universidad CEU San Pablo.

Sus intereses de investigación incluyen el procesado de señales biológicas, la aplicación de técnicas de minería de datos a problemas médicos, el razonamiento temporal difuso y la supervisión de pacientes. Es autor de más de 60 publicaciones científicas y 4 patentes en estos campos, posee dos sexenios de investigación y ha dirigido 23 Proyectos Fin de Carrera y Proyectos Fin de Máster.