

Oídos artificiales

Se han elaborado modelos matemáticos que simulan la actividad del nervio auditivo humano y que prometen conseguir prótesis auditivas más “fisiológicas” y, sobre todo, más eficaces

Enrique A. López-Poveda
y Ray Meddis

¿Ha intentado alguna vez identificar cada uno de los instrumentos que intervienen en su pieza musical favorita? ¿O localizar y concentrarse en las voces de sus amigos en una fiesta concurrida? La habilidad innata que poseemos para realizar estas tareas y que utilizamos inconscientemente en nuestra vida diaria exige un complicado proceso de codificación de la información sonora en forma de pulsos eléctricos, o potenciales de acción, que se transmiten al cerebro a través del nervio auditivo.

Este proceso de codificación se denomina “transducción acústico-neuronal”. Aunque queda todavía por desentrañar algunos de sus detalles, se conocen sus propiedades más importantes. Nosotros nos hemos centrado en la elaboración de algoritmos matemáticos que simulan dicho proceso de transducción. La realización de estos algoritmos en forma de programas informáticos y su materialización en forma de chips electrónicos han permitido crear “oídos artificiales”.

¿Qué es un oído artificial? El concepto de oído artificial no es de uso generalizado. Lo acuñamos aquí para dar nombre a un sistema informático o electrónico capaz de simular el funcionamiento del sistema receptor auditivo y de reproducir la respuesta del nervio auditivo frente a cualquier estímulo acústico. Debe quedar claro que el oído artificial no interpreta los sonidos, ni toma decisiones sobre ellos; no cumple, por tanto, el papel del cerebro. Su función es “codificar” los sonidos en patrones de

pulsos eléctricos, sirviéndose del mismo código que emplea un oído real.

¿Cómo surge la necesidad de crear los oídos artificiales? El desarrollo de algoritmos matemáticos capaces de reproducir la respuesta del nervio auditivo obedece a un propósito inicial de aportar teorías que ayuden a comprender el proceso de transducción acústico-neuronal. Sin embargo, el rápido avance de la informática —que permite evaluar dichos algoritmos en tiempo real— y la electrónica —que facilita su plasmación en hardware—, así como la existencia de materiales biocompatibles, están impulsando el desarrollo de oídos artificiales con un fin distinto: el de desarrollar implantes auditivos (cocleares o cerebrales) más eficaces, capaces de restaurar la audición de las personas sordas.

La transducción acústico-neuronal

El mecanismo de transducción acústico-neuronal comienza en el oído externo, que modifica las frecuencias contenidas en los sonidos (es decir, el espectro de éstos) antes de que estimulen la membrana timpánica. El movimiento del tímpano induce el movimiento del estribo (oído medio), que produce, a su vez, variaciones de presión en el fluido del interior de la cóclea (oído interno). Estas variaciones de presión generan la oscilación del órgano de Corti, que se encuentra rodeado de dicho fluido.

Al oscilar el órgano de Corti, oscilan los cilios de las células ciliadas internas. Este movimiento provoca la apertura y el cierre de los canales iónicos situados en los cilios y, por tanto, variaciones del potencial eléctrico del interior de las células ciliadas. Los incrementos del potencial intracelular aumentan la pro-

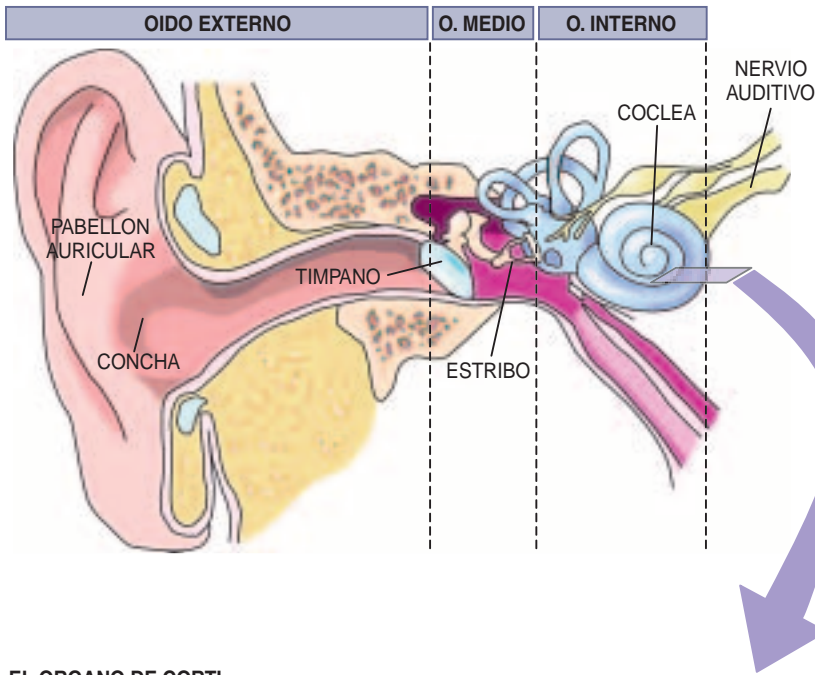
bilidad de que se liberen vesículas de material neurotransmisor desde la célula hacia la sinapsis con la fibra nerviosa y, en consecuencia, de que se genere un potencial de acción en la fibra.

Simular el mecanismo de transducción constituye una tarea ardua. Para simplificarla, resulta conveniente dividir dicho mecanismo en una serie de etapas en cascada. Cada una de ellas puede considerarse un subproceso independiente, que recibe una señal de entrada variable en el tiempo (el estímulo de la etapa) y, tras operar sobre ella, produce una o múltiples señales de salida, también variables en el tiempo.

Mediante un algoritmo matemático, cada etapa simula la función de un proceso fisiológico diferente. El algoritmo incorpora un conjunto de parámetros que pueden ajustarse hasta conseguir que la señal de salida de la etapa para un estímulo dado se aproxime a la observada experimentalmente.

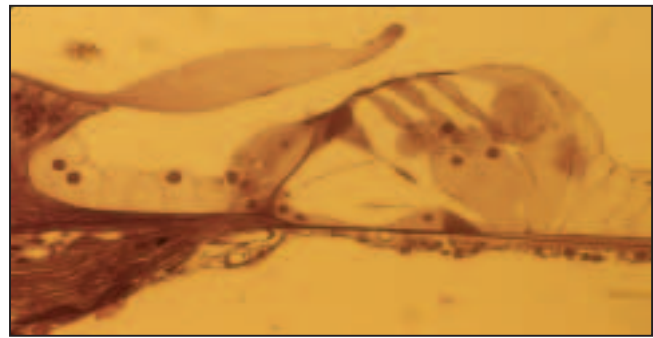
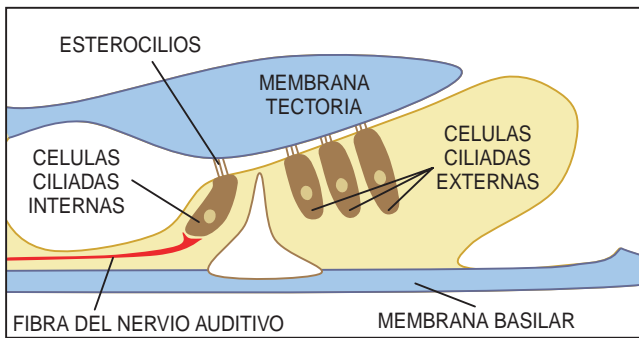
Siguiendo este planteamiento, nuestro oído artificial procede a través de etapas que reproducen la función de los principales subprocesos fisiológicos del mecanismo de transducción. La naturaleza del algoritmo depende de la etapa de que se trate. Así, el que simula el efecto del oído externo se basa en la función acústica de transferencia del pabellón auricular. El que simula el potencial eléctrico en el interior de la célula ciliada interna se funda, sin embargo, en el circuito eléctrico equivalente de la membrana de esta célula.

Por esa misma razón, varía también la naturaleza de los parámetros empleados en cada etapa. Unos son magnitudes físicas (coeficientes de reflexión acústica, conductancias o capacitancias);



1. PROCESO DE TRANSDUCCION ACUSTICO-NEURONAL. El sonido accede al tímpano a través del pabellón auricular. La oscilación del tímpano se transmite al fluido del interior de la cóclea a través de la cadena de huesecillos del oído medio. Las oscilaciones del fluido provocan variaciones de presión que inducen el movimiento del órgano de Corti (*esquema inferior*). Para cuantificar la amplitud de este movimiento suele medirse el desplazamiento de la membrana basilar, cuya oscilación provoca la de los cilios de las células ciliadas internas, lo que induce variaciones del potencial eléctrico del interior de la célula, origen, a su vez, de potenciales de acción en el nervio auditivo.

EL ORGANODE CORTI



otros, en cambio, pertenecen a los sistemas de procesamiento de señales (filtros o ganancias). En todos los casos, sin embargo, el resultado es que cada etapa de nuestro oído artificial reproduce los aspectos fundamentales de su correspondiente etapa fisiológica que determinan la percepción auditiva.

El oído externo

¿Para qué sirve el oído externo? ¿Por qué tiene esa forma? Aunque algunos limitan su función a evitar la entrada de cuerpos extraños en el canal auditivo, lo cierto es que genera información sobre la posición de los sonidos en el espacio. Se requiere esta información para determinar si la fuente emisora de un sonido se encuentra encima, debajo, delante o detrás de nosotros. Es crucial, además, para que el sonido se perciba en tres dimensiones, y no “lateralizado”, que es lo que ocurre con los sistemas estereofónicos clásicos.

El oído externo opera como un ecualizador acústico, o filtro; amplifica ciertas

frecuencias del sonido y atenúa otras, generando así “picos” y “valles” en su espectro. Las frecuencias de los picos, producidos en virtud de la resonancia acústica de las cavidades de la oreja, apenas guardan relación con el lugar de procedencia del sonido. Sin embargo, las frecuencias de los valles sí dependen de la posición de la fuente del sonido con respecto a la del pabellón auricular. Dependen, sobre todo, del ángulo vertical entre ambos.

Desde hace tiempo se sabe que el cerebro está capacitado para detectar el rango de frecuencias atenuadas y relacionarlas con la posición vertical de la fuente sonora. Por ello, nuestro oído artificial incluye en su primera etapa una función matemática que reproduce los valles espectrales generados por el oído externo. Esencialmente, su algoritmo expresa que la atenuación de algunas frecuencias es el resultado de interferencias destructivas a la entrada del conducto auditivo entre el sonido directo procedente de la fuente sonora y el que se refleja en las

paredes de la concha (la cavidad más prominente de la oreja).

Nuestro modelo demuestra que la razón por la que el rango de frecuencias atenuadas depende de la posición vertical de la fuente del sonido estriba en la forma de la concha: si se asemejase con una espiral, la entrada del canal auditivo se hallaría en su centro. Esto determina que, cuando la fuente sonora se halla por encima de nosotros, el desfase entre el sonido directo y el reflejado sea menor que cuando está por debajo. De ahí que las frecuencias atenuadas sean más altas cuando la fuente emisora se encuentra por encima de nosotros.

El modelo también explica por qué las frecuencias de los valles apenas dependen de la posición horizontal del sonido en relación con la del pabellón auricular. La razón es la siguiente: el sonido se difracta al incidir sobre la concha; es decir, se propaga en todas direcciones en el interior de dicha cavidad. Gracias a ello, el mecanismo de reflexión e interferencia explicado antes opera indepen-

dientemente del ángulo horizontal en el que se encuentre la fuente sonora.

El oído medio

El oído medio traslada las vibraciones de la membrana timpánica a la cóclea a través de la cadena de huesecillos. Su eficacia en esta tarea depende de la frecuencia de dichas vibraciones: transmite óptimamente las vibraciones de frecuencias medias (de 1 a 4 kilohertz), pero opone resistencia a las oscilaciones de otras frecuencias. Ese fenómeno determina, en buena medida, la característica forma en U de un audiograma normal; es decir, que la sensibilidad auditiva sea mayor para las frecuencias medias.

En nuestro oído artificial, la función del oído medio se simula con un sencillo filtro lineal de paso de banda. El filtro reproduce la velocidad de oscilación del estribo en función de la presión sonora instantánea ejercida en el tímpano.

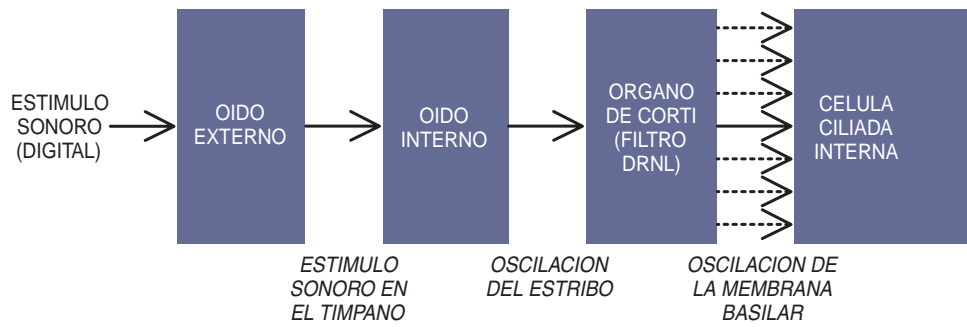
El órgano de Corti

El sistema auditivo posee dos características sorprendentes y únicas entre los órganos sensoriales. En primer lugar, su

2. TONOTOPIA COCLEAR.

La membrana basilar se encuentra en el interior de la cóclea. Se extiende desde la base de la cóclea (la región más próxima al estribo) hasta su ápice (el extremo opuesto). Los sonidos producen la oscilación de la membrana de una forma tonotópica; es decir, ordenada espacialmente por frecuencias.

Las regiones de la membrana próximas a la base de la cóclea son más sensibles a los sonidos de frecuencias altas, mientras que las regiones próximas al ápice son más sensibles a los de frecuencias bajas.



extenso rango dinámico. Cualquier persona con audición normal percibe sonidos entre 0 y 120 decibelios. Semejante rango de niveles sonoros, en apariencia pequeño, equivale a variaciones de presión que oscilan entre 20 micropascal (el umbral absoluto de audición) y 20 pascal (el umbral del daño auditivo). Por increíble que parezca, el extremo superior del rango es un millón de veces mayor que su extremo inferior.

La segunda característica concierne a su capacidad para discriminar entre sonidos compuestos por frecuencias muy parecidas. Esta propiedad nos permite, por ejemplo, distinguir los sonidos correspondientes a una misma nota musical tocada con dos instrumentos diferentes o a la misma vocal pronunciada por dos personas distintas, ya que la frecuencia fundamental de dicha nota o dicha vocal es idéntica en ambos casos; los sonidos

3. ETAPAS DEL OIDO ARTIFICIAL.

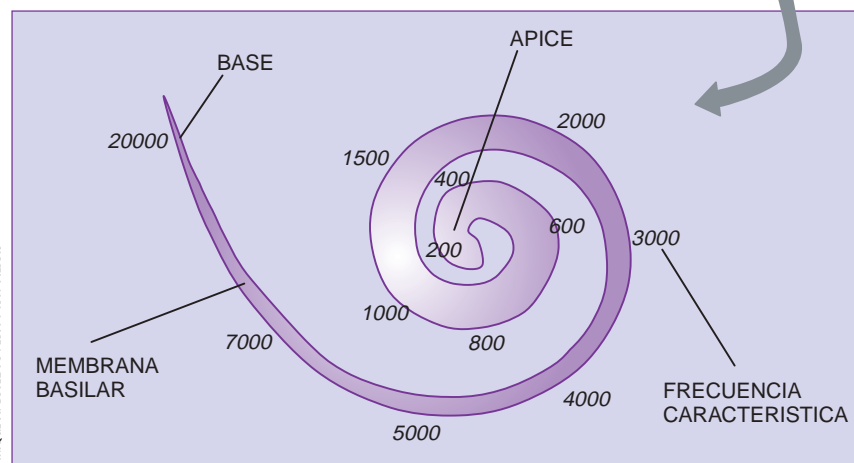
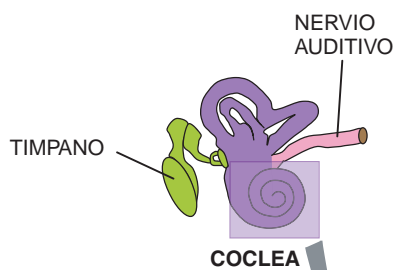
El oído artificial consta de una serie de etapas en cascada. Cada una de ellas reproduce un proceso fisiológico diferente del mecanismo de transducción. El oído artificial simula la respuesta de una o múltiples fibras nerviosas, a conveniencia del usuario. El estímulo sonoro se proporciona en formato digital.

difieren únicamente en su contenido armónico.

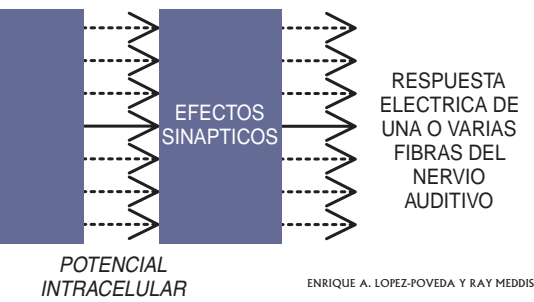
Dimanan, esas dos características, de la forma en la que el órgano de Corti se mueve en respuesta a los cambios de presión del fluido circundante, producidos por la vibración del estribo. Georg von Békésy, que recibió el premio Nobel de medicina y fisiología en 1961, demostró que cada uno de los segmentos en los que puede dividirse longitudinalmente el órgano de Corti responde a un rango más o menos amplio de frecuencias de estimulación, aunque sólo una de ellas, denominada frecuencia característica, produce oscilaciones de máxima amplitud.

Desde un punto de vista funcional, por tanto, cada segmento del órgano de Corti se comporta como un filtro de paso de banda; el órgano de Corti, en su totalidad, como un banco de filtros dispuestos en paralelo con frecuencias características diferentes que comprenden el rango de frecuencias audibles. Este banco de filtros opera a la manera de un analizador del espectro del estímulo sonoro, lo que explica nuestra capacidad para discriminar entre sonidos similares, aunque dotados de diferente contenido espectral.

Al igual que otros muchos procesadores de señales acústicas, nuestro oído artificial incluye un banco de filtros para acometer la descomposición espectral del sonido. ¿En qué reside la peculiaridad de nuestro sistema? En que cada uno de sus filtros, que denominamos DRNL (*Dual-Resonance NonLinear*), repro-



ENRIQUE A. LOPEZ-ROVEDA Y RAY MEDDIS



duce la respuesta fisiológica de su correspondiente región del órgano de Corti. Esta propiedad del filtro DRNL reviste suma importancia, pues los filtros cocleares *no* son lineales.

William Rhode, de la Universidad de Wisconsin, demostró que un aumento de la presión sonora no produce un aumento proporcional en la amplitud (o en la velocidad) de oscilación de la membrana basilar del órgano de Corti. En realidad, un aumento de la presión sonora de un millón de veces produce un aumento de la velocidad de oscilación de la membrana basilar de sólo 20 veces. En este mecanismo se funda el extenso rango dinámico del sistema auditivo, ya que permite acomodar un amplio intervalo

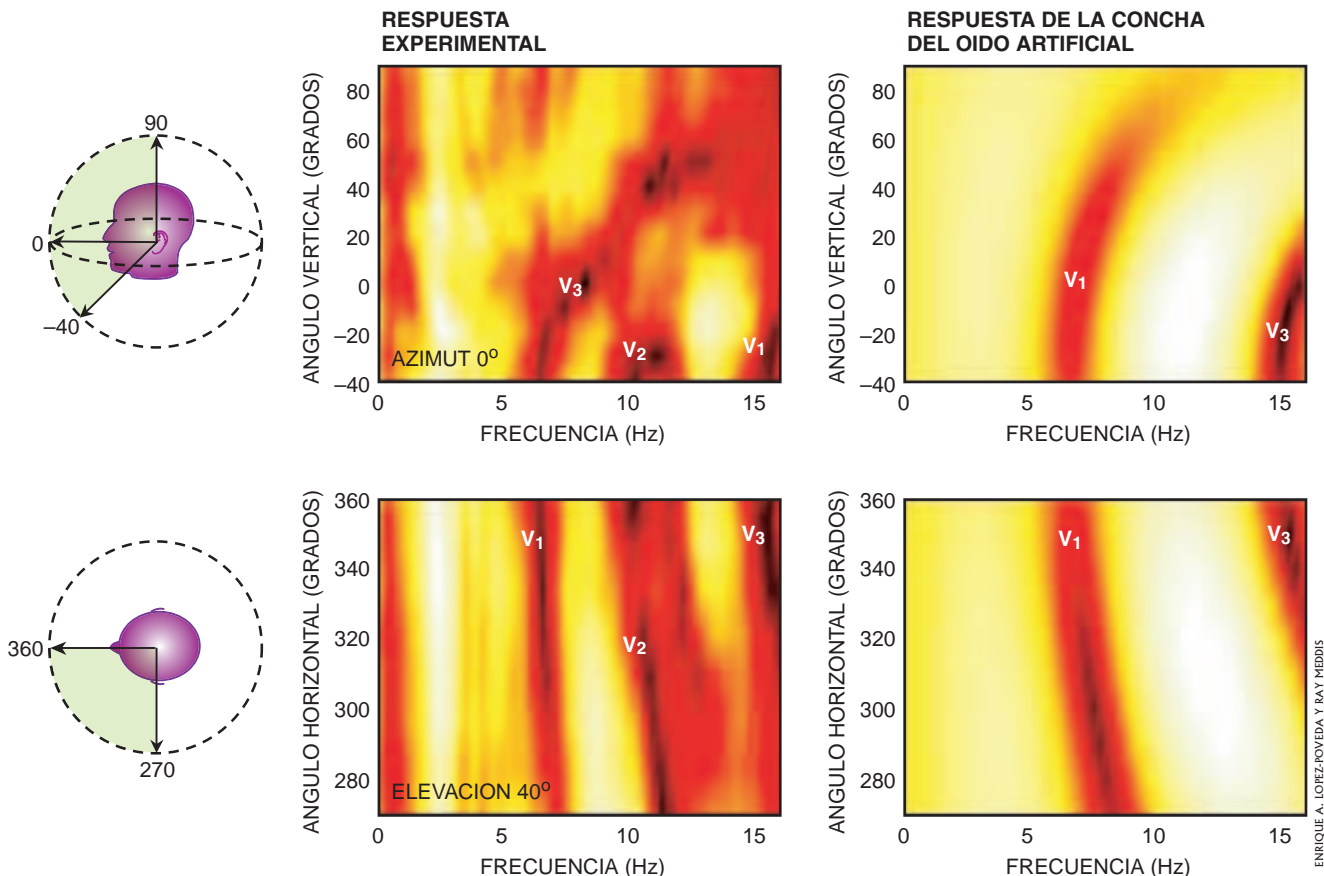
de presiones sonoras en una gama estrecha de amplitudes de oscilación, que el cerebro puede detectar e interpretar adecuadamente.

Nuestro filtro DRNL imita este comportamiento. Reproduce, además, otros fenómenos relacionados con el carácter no lineal de la respuesta coclear, que pueden observarse por vía experimental; por ejemplo, remeda el hecho de que la frecuencia central y la anchura de los filtros cocleares varíen en función de la intensidad del sonido. El filtro reproduce también la distorsión armónica y los efectos de supresión característicos del movimiento de la membrana basilar. Todas estas propiedades de la respuesta

coclear determinan la forma en que los sonidos se codifican en el nervio auditivo sano y, por tanto, nuestra percepción auditiva.

El filtro DRNL permite, además, simular la respuesta del órgano de Corti dañado. La amplitud con la que oscila la membrana basilar depende del estado fisiológico de las células ciliadas externas. Ante una lesión de las mismas, por un exceso de estimulación acústica o por la administración de fármacos ototóxicos, se reduce la sensibilidad auditiva y la respuesta coclear se torna más lineal. Este comportamiento puede reproducirse con el filtro DRNL, ajustando sus parámetros.

4. FUNCION DE LA OREJA. Los cuatro paneles ilustran la diferencia entre el espectro de un sonido medido en el tímpano y el espectro original del sonido. Las zonas más oscuras corresponden a frecuencias atenuadas por la acción del oído externo. El cerebro detecta estas frecuencias y determina si la fuente emisora se halla por encima o por debajo de nosotros, ya que el rango de frecuencias atenuadas depende sobre todo del ángulo vertical del sonido. El oído artificial sólo reproduce la función de la concha, la cavidad más prominente de la oreja. A pesar de que la geometría considerada en el modelo es mucho más sencilla que la de una concha normal, el modelo remeda la forma en la que las frecuencias atenuadas V_1 y V_3 dependen de la posición de la fuente. Sin embargo, no reproduce la atenuación V_2 , lo que sugiere que no debe estar causada por la concha.



La célula ciliada interna

La célula ciliada interna es el verdadero transductor del oído. Transforma el movimiento mecánico de sus cilios en una señal eléctrica. La oscilación de los cilios, producida por el movimiento del órgano de Corti, provoca la apertura y el cierre de los canales iónicos situados en la membrana ciliar. La apertura de dichos canales promueve, a su vez, la entrada de potasio al interior de la célula; posibilita así que el potencial eléctrico del interior celular varíe con respecto al medido en ausencia de estímulo sonoro. De esa forma, las oscilaciones de los cilios generan oscilaciones de la misma frecuencia en el potencial intracelular de la célula ciliada interna.

Este mecanismo posee características importantes que determinan la respuesta del nervio auditivo; deben, pues, ser reproducidas por el oído artificial. Entre tales propiedades destaca la naturaleza no lineal del mecanismo; con otras palabras, un aumento en la amplitud de osci-

lación ciliar no produce un aumento proporcional del potencial intracelular. Debido a ello, la forma de onda del potencial es una versión aproximadamente rectificadora de la descrita por la amplitud de oscilación de los cilios; de donde se desprende que el potencial intracelular consta de una componente continua y una componente alterna.

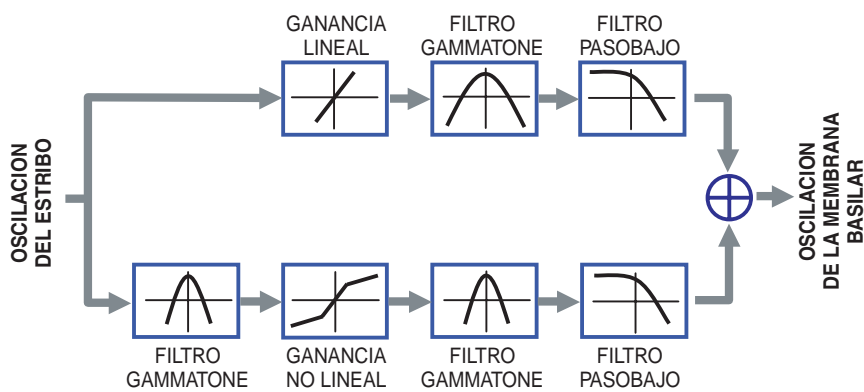
Otra característica reseñable se refiere a la amplitud de la componente alterna, que se reduce en grado sumo para frecuencias sonoras superiores a 4 kilohertz. Por ello, se dice que la célula opera como un rectificador de semionda y un filtro de paso bajo.

Estas propiedades determinan que las descargas del nervio auditivo se produzcan en sincronía con el aumento del potencial intracelular. Como la amplitud de la componente alterna se reduce para frecuencias altas, las descargas sincrónicas ocurren sólo para frecuencias inferiores a 4 kilohertz. Para otras frecuencias, la descarga ocurre de forma aleatoria en el tiempo.

En un oído artificial, podríamos remediar la función de la célula ciliada interna mediante una etapa de rectificación acompañada de un filtro lineal de paso bajo. Sin embargo, nosotros hemos optado por un algoritmo más fisiológico, basado en el circuito equivalente de la membrana de la célula diseñado por Shihab Shamma de la Universidad estadounidense de Maryland.

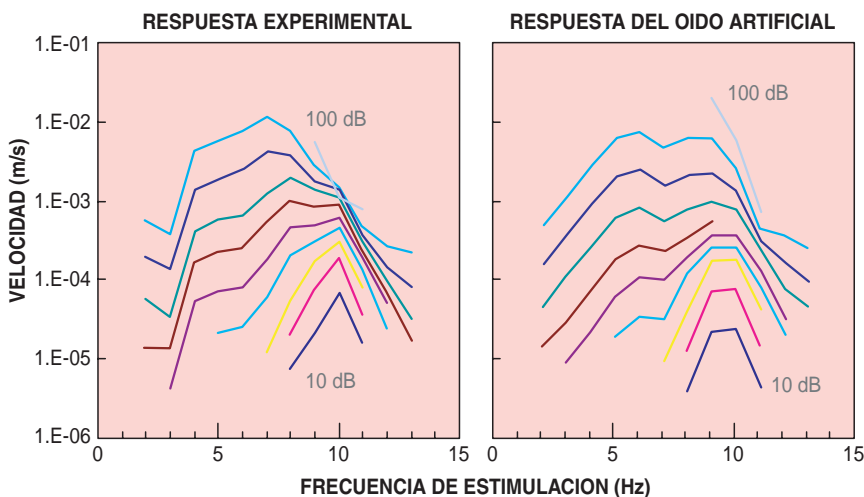
El circuito comprende diversos elementos eléctricos (conductancias, condensadores y pilas), que describen las propiedades de la membrana celular de las porciones apical (próxima a los cilios) y basal (próxima a las sinapsis con las fibras nerviosas) de la célula. La señal de entrada a esta etapa viene indicada por la amplitud de oscilación de los cilios, que determina el valor de la conductancia apical de la célula; por señal de salida se emplea el valor del potencial intracelular.

A pesar de su relativa sencillez, el modelo reproduce las principales características fisiológicas del potencial intracelular en respuesta a estímulos sono-



5. FILTRO DRNL (arriba). Consta de dos procesos de filtrado dispuestos en paralelo; uno de ellos (*el superior en la figura*) es lineal, pero el otro no.

El estímulo es la velocidad con la que oscila el estribo. La señal de salida es la velocidad con la que oscila la membrana basilar en un determinado punto a lo largo de la misma. Ésta se calcula mediante la suma de las señales procedentes de ambos procesos. Para estímulos sonoros de baja intensidad, el proceso no lineal domina en la suma; para estímulos de alta intensidad, predomina el proceso lineal. En la imagen inferior se representa cuán razonablemente bien el oído artificial reproduce la velocidad de oscilación de la membrana basilar ante estímulos de diferentes frecuencias e intensidades. El panel izquierdo ilustra las observaciones experimentales; el derecho, la respuesta del modelo. Cada curva corresponde a un estímulo de diferente intensidad sonora, desde 10 hasta 100 decibelios. El filtro DRNL reproduce con bastante aproximación las características no lineales de los filtros cocleares. La respuesta experimental fue medida en la membrana basilar de una chinchilla por Mario Ruggero y colaboradores, de la Universidad estadounidense del Noroeste.



ENRIQUE A. LOPEZ-POVEDA Y RAY MIDDIS

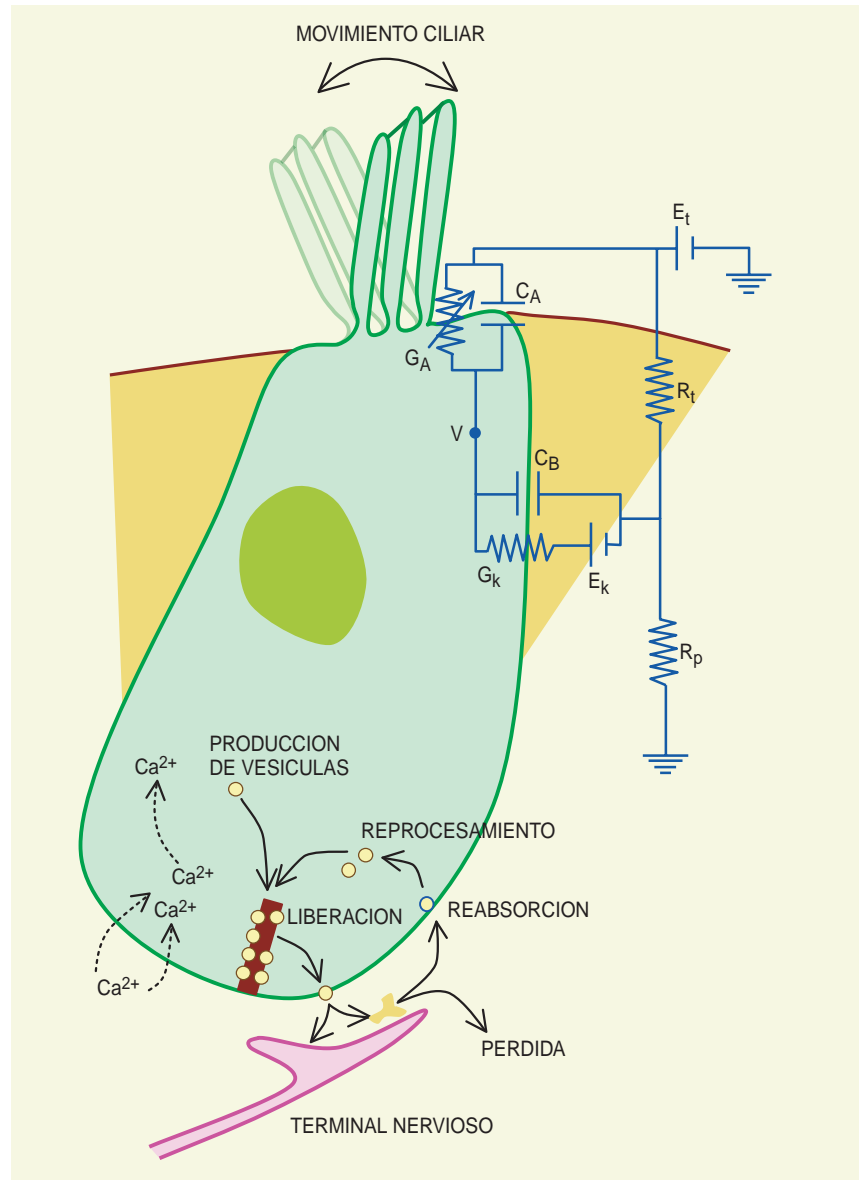
6. CELULA CILIADA INTERNA Y LOS EFECTOS SINAPTICOS. En el oído artificial, la célula ciliada interna se simula mediante un circuito eléctrico equivalente (representado en color azul). El movimiento de sus cilios controla el valor de la conductancia eléctrica de la membrana celular en los cilios (G_A), que, a su vez, determina el potencial eléctrico dentro de la célula (V). Cuanto mayor sea el potencial, mayor resultará la probabilidad de que se libere una vesícula de neurotransmisor al espacio entre la célula y la terminal nerviosa. El algoritmo que simula los efectos sinápticos refleja la degradación parcial del neurotransmisor liberado; la otra parte se reabsorbe y se reprocesa en forma de vesículas disponibles para ser liberadas. El algoritmo supone que basta con que se libere una sola vesícula de neurotransmisor para que se produzca un potencial de acción en la fibra nerviosa. Por último, el algoritmo también tiene en cuenta que la probabilidad de que se libere una vesícula depende de la cantidad de calcio (Ca^{2+}) en las proximidades de la sinapsis.

ros. Además, permite explorar y formular predicciones sobre las consecuencias funcionales de algunos tipos de daño auditivo.

Se sabe, por ejemplo, que el exceso de estimulación acústica destruye los cilios de las células internas. Probablemente, esa agresión dificulte la entrada de potasio al interior de la célula. En nuestro modelo, podría simularse el daño reduciendo el parámetro que controla el flujo de potasio; con ello se podría, incluso, investigar las consecuencias del trauma acústico sobre el potencial eléctrico de la célula.

La sinapsis

Una misma célula ciliada interna puede establecer sinapsis con varias fibras del nervio auditivo. Algunas fibras presentan actividad espontánea —se producen descargas en ausencia de estímulo sonoro—, pero otras no. Ante un estímulo sonoro, la actividad de todas las fibras aumenta por encima de la actividad espontánea. Sin embargo, aunque la intensidad del sonido permanezca constante, el aumento producido en el inicio del estímulo es considerablemente mayor que transcurridos unos milisegundos. Esto significa que el inicio de los sonidos se encuentra acentuado en la res-



ENRIQUE A. LOPEZ-POVEDA Y RAY MEDDIS

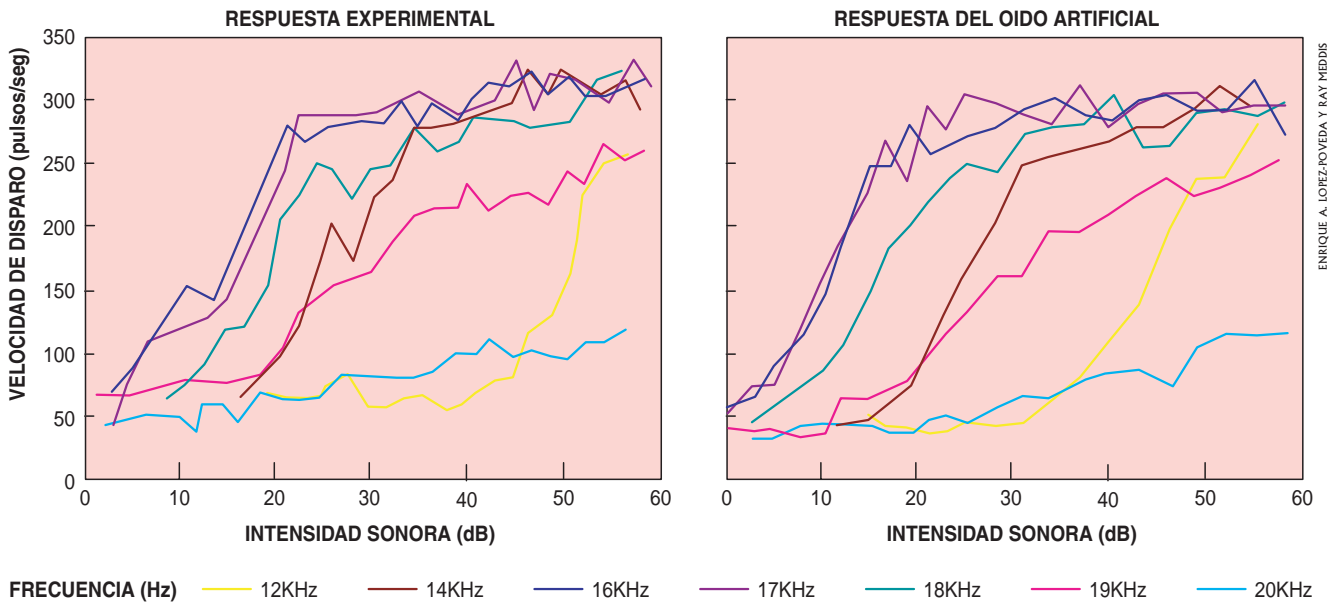
puesta del nervio auditivo. Tal característica reviste especial alcance; entre otros efectos, facilita la percepción de algunos sonidos consonánticos (como el de la 't' o la 'k'), a pesar de su brevedad.

Tras el cese de un estímulo sonoro, se reduce durante varias decenas de milisegundos la actividad espontánea del nervio auditivo. Es como si durante este tiempo las fibras nerviosas estuvieran fatigadas, lo que dificulta la percepción de los sonidos breves que sigan a un sonido prolongado. Por supuesto, este efecto también determina nuestra percepción auditiva.

Ambos fenómenos de adaptación se atribuyen al mecanismo de la sinapsis entre la célula ciliada interna y las fibras nerviosas. Dado que determinan nuestra percepción auditiva, conviene que el oído artificial los reproduzca.

De nuevo se nos ofrecen varias opciones para simular los fenómenos de adaptación de la sinapsis. Nos hemos decidido por un modelo fisiológico. A grandes rasgos, el algoritmo supone que en el nervio auditivo se genera un potencial de acción, siempre que la célula ciliada vierta el contenido de una vesícula, por lo menos, de material neurotransmisor en la hendidura sináptica (el espacio físico entre la célula ciliada y la neurona). Admite también que la probabilidad de tal liberación sea mayor cuanto mayor sean el potencial eléctrico en el interior de la célula ciliada y el número de vesículas disponibles.

Sabemos ya que el potencial intracelular depende de la intensidad del estímulo sonoro. Para calcular el número de vesículas disponibles, aplicamos un conjunto de ecuaciones diferenciales que



ENRIQUE A. LOPEZ-NOVEDA Y RAY REDDIS

7. RESPUESTA DEL NERVI0 AUDITIVO. El oído artificial se acercará más a nuestro órgano de la audición cuanto más se parezca su respuesta a la respuesta fisiológica. Se compara aquí la respuesta experimental de una fibra del nervio auditivo (*izquierda*) con la respuesta del oído artificial (*derecha*) para estímulos acústicos de la misma intensidad y frecuencia. La respuesta experimental fue medida en el nervio auditivo de un cobaya por Graeme Yates y su equipo, de la Universidad del Oeste de Australia. Corresponde a una fibra con una actividad espontánea alta. Cabe destacar el gran parecido de la respuesta del oído artificial con la experimental.

tienen en cuenta la velocidad de formación de nuevas vesículas en la célula, la velocidad de degradación del neurotransmisor liberado y la velocidad con que la parte del mismo que reingresa en la célula se reprocesa en nuevas vesículas.

El algoritmo refleja, además, que la liberación de vesículas neurotransmisoras y, por tanto, la producción de potenciales de acción, dependen de la concentración de calcio en las proximidades de la sinapsis.

Este modelo remeda los fenómenos de adaptación de la sinapsis. Además, reproduce el siguiente fenómeno: el rango dinámico de las fibras nerviosas que muestran una actividad espontánea escasa (o nula) es mayor que el de las que muestran una notable actividad espontánea. En el modelo, los potenciales de acción se generan de manera estocástica. Se repite, pues, la observación experimental de que una fibra nerviosa no responde de un modo idéntico dos veces ante el mismo estímulo sonoro. Por último, el modelo establece una predicción aún por confirmar; a saber: los tipos de fibras (con descarga espontánea alta, media o baja) difieren en las características de la dinámica del calcio en las proximidades de sus respectivas sinapsis.

El conjunto

El resultado de esta cascada de complejos algoritmos es un sistema que reproduce de manera estocástica los potenciales de acción producidos por el nervio auditivo ante cualquier estímulo sonoro. El modelo puede reproducir la actividad de una sola fibra nerviosa o la de un haz de ellas. El número y las características de las fibras son parámetros configurables por el usuario.

Fisiología “in silico”

El oído artificial permite observar la respuesta individual de cada una de las principales etapas del mecanismo de transducción ante cualquier estímulo sonoro. Constituye, por tanto, una herramienta útil para acometer ensayos *in silico* sobre la fisiología del receptor auditivo. Sirve para someter a prueba hipótesis formuladas a partir de datos experimentales físicos, fisiológicos o cognitivos.

Hemos explicado ya que nuestro oído artificial pone de manifiesto la razón por la que las frecuencias de los valles espectrales generados por el oído externo dependen de la ubicación de la fuente sonora. Sirve, también, para formular nuevas hipótesis sobre el funcionamiento del sistema receptor auditivo. En ese

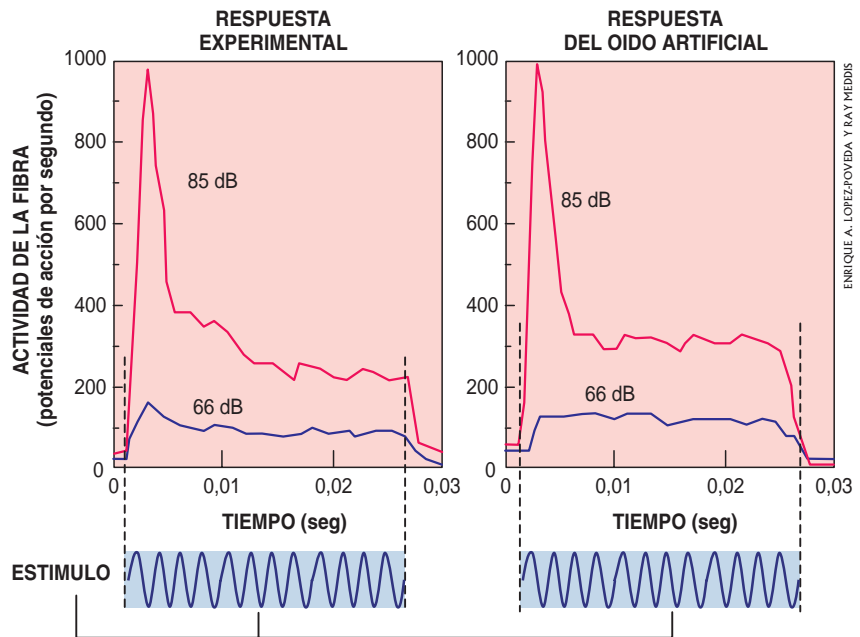
contexto, nuestro oído artificial sugiere que la actividad espontánea de las fibras del nervio auditivo depende de la dinámica del calcio en la vecindad de la sinapsis. Por último, puede aplicarse, en algunos casos, como método previo o incluso alternativo a la experimentación con humanos o con animales.

Desde hace unos años se registra una tendencia a utilizar los oídos artificiales como procesadores de sonido en sistemas automáticos inteligentes. Ocurre así en sistemas de reconocimiento de voz y en robots dotados de capacidad auditiva. No se trata de ninguna novedad. Siempre se ha sospechado que el cerebro realiza las funciones que se exige a estos dispositivos artificiales gracias, entre otras muchas cosas, a que recibe la información sonora preprocesada en el formato adecuado.

Sin embargo, hasta hace muy poco no existían oídos artificiales capaces de reproducir los rasgos centrales de la respuesta neuronal ante estímulos acústicos *arbitrarios*. Las versiones anteriores sólo remedaban ciertos aspectos de dicha respuesta. Más recientes incluso son las técnicas de la informática y la electrónica necesarias para ejecutar los oídos artificiales en tiempo “casi” real. Por eso, los mencionados sistemas artificiales “inteligentes” han venido empleando procesadores de sonido conceptualmente mucho más sencillos y que exigen menos tiempo de computación.

Nuestro oído artificial se concibió pensando en este tipo de aplicaciones. Todas sus etapas, excepto la que simula la función del oído externo, están diseñadas para procesar señales digitales variables

8. FENOMENOS DE ADAPTACION. La actividad de una fibra del nervio auditivo al inicio del estímulo es mayor que la actividad desarrollada transcurridos unos milisegundos. Esta característica depende de la intensidad del estímulo sonoro: es más evidente para un estímulo de 85 decibelios (*curva rosa*) que para otro de 66 dB (*curva azul*). Los datos experimentales (*izquierda*) fueron medidos en un cobaya por Donald Robertson y colaboradores, de la Universidad del Oeste de Australia. El panel de la derecha ilustra la respuesta del oído artificial ante un estímulo equivalente al empleado en el experimento. Según puede apreciarse, el oído artificial reproduce el comportamiento experimental.



en el tiempo. Podría decirse, por tanto, que el oído artificial actúa como un procesador digital de señales acústicas.

Implantes auditivos

Los oídos artificiales podrían hallar su aplicación principal en el diseño de procesadores de voz para implantes auditivos. Un implante auditivo es un sistema artificial capaz de restaurar la audición en personas con sordera profunda (congénita o no) para las que los audífonos resultan inservibles. El funcionamiento de un implante se basa en la estimulación eléctrica directa del nervio auditivo (en el caso de implantes cocleares) o del primer conjunto de neuronas cerebrales que recibe estimulación directa del nervio auditivo (en el caso de los implantes cerebrales).

El implante consta de un procesador de voz y de un conjunto de electrodos. Los electrodos constituyen la parte “implantable” de la prótesis; suministran las corrientes eléctricas de estimulación. El procesador de voz, por su parte, es un dispositivo externo cuya función consiste en traducir los sonidos en corrientes eléctricas adecuadas para la estimulación nerviosa.

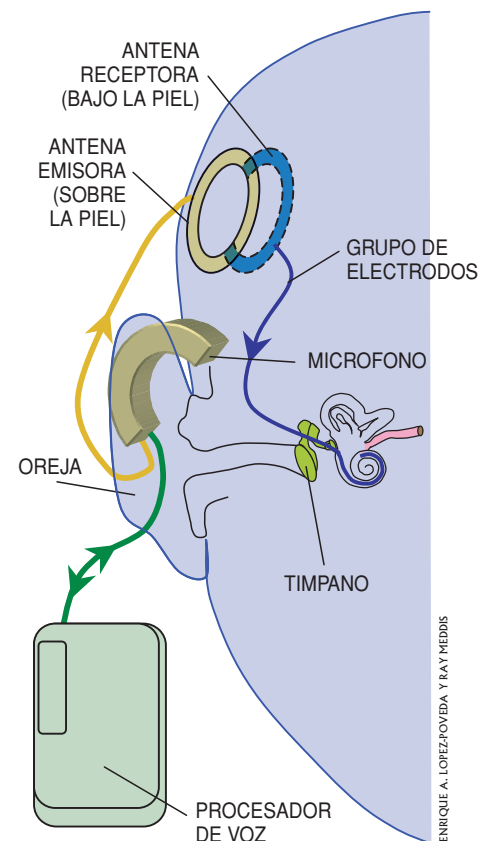
9. COMPONENTES DE UN IMPLANTE COCLEAR. En un implante coclear, el sonido es recogido por un micrófono que se sitúa próximo a la oreja. El sonido se envía al procesador de voz, cuya función consiste en reproducir electrónicamente el mecanismo fisiológico de transducción acústico-neuronal; transforma, pues, el sonido en un patrón de pulsos eléctricos adecuados para estimular el nervio auditivo. Estos pulsos se envían desde el procesador a los electrodos situados en el interior de la cóclea. La señal eléctrica llega a los electrodos gracias a una antena emisora, situada sobre la piel, y a una antena receptora hipodérmica.

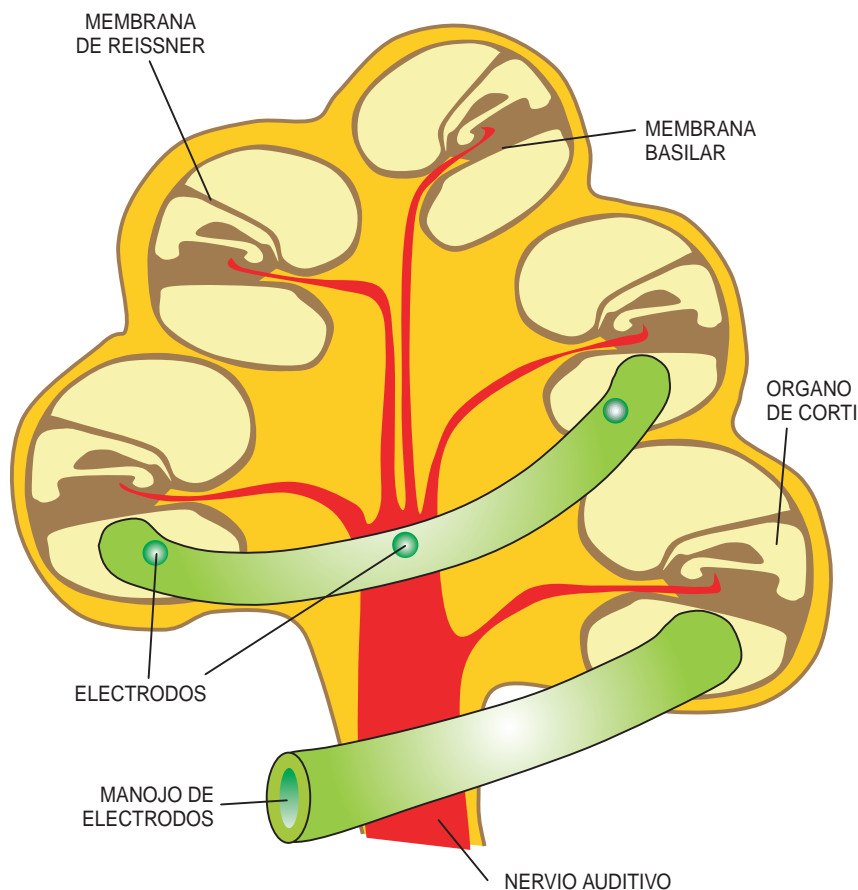
Los implantes cerebrales se hallan en fase experimental; no ha podido demostrarse todavía su eficacia en humanos. En cambio, los implantes cocleares ya se prescriben de manera rutinaria, aunque con resultados dispares. En general, siempre consiguen que la persona sorda perciba sonidos. Sin embargo, mientras que a algunas personas les permite conversar con normalidad, incluso por teléfono o en ambientes ruidosos, a otras sólo les proporciona ruidos desagradables e ininteligibles.

Se desconoce la causa de esa eficacia dispar. El éxito de esos dispositivos depende, en buena medida, de la plasticidad del cerebro para adaptarse a las características de la estimulación eléctrica generada por el implante, que difiere de la correspondiente a un nervio auditivo normal. Blake Wilson y su equipo, del Centro para el Desarrollo de Prótesis Auditivas del Instituto estadounidense de Investigación Triangle, sostienen que la eficacia de los implantes cocleares aumentaría si la estimulación del nervio auditivo fuese más “natural”. Es decir, si preservase las propiedades más impor-

tantes del mecanismo de transducción acústico-neuronal que determinan la percepción auditiva humana.

Nuestro oído artificial constituye una buena base para construir el procesador de voz necesario. Colaboramos con Wilson y su equipo en la búsqueda de





10. ELECTRODOS DE UN IMPLANTE COCLEAR. Los electrodos de un implante coclear se introducen en la cóclea a través de un orificio realizado en la ventana redonda del oído interno. El manojito de electrodos se empuja suavemente de suerte tal, que los electrodos se extiendan a lo largo del órgano de Corti. Se trata de que la corriente eléctrica que suministra cada electrodo estimule un grupo diferente de fibras nerviosas.

procesadores de voz más fisiológicos y eficaces. Los prototipos que estamos ensayando incorporan propiedades importantes del mecanismo de transducción acústico-neuronal, ignorados por los procesadores de voz tradicionales. Por botón de muestra, nuestros prototipos utilizan bancos de filtros DRNL cuyas propiedades son similares a las de los filtros cocleares. Los procesadores tradicionales, sin embargo, utilizan bancos de filtros lineales con características notablemente diferentes de las que adornan a los filtros fisiológicos.

Nuestros prototipos reflejan, además, los fenómenos de adaptación de la respuesta del nervio auditivo. Como ya hemos mencionado, estos fenómenos deben ayudar a detectar y discriminar los sonidos consonánticos en ambientes ruidosos y, por tanto, facilitar la inteligibilidad del lenguaje por las personas receptoras del implante. Aunque el pro-

yecto se halla en fase de desarrollo, los resultados obtenidos hasta la fecha con los nuevos prototipos de procesadores son prometedores.

¿Puede simularse la respuesta del nervio auditivo humano?

Conviene resolver una aparente paradoja de la que el lector se habrá percatado. El procedimiento para comprobar que el oído artificial funciona correctamente consiste en comparar su respuesta con la respuesta fisiológica correspondiente de todas y cada una de las etapas del mecanismo de transducción. Las respuestas fisiológicas necesarias para esta comparación se obtienen realizando experimentos en mamíferos inferiores; casi siempre, en roedores o gatos. Podría decirse, por tanto, que el oído artificial resultante reproduce la respuesta del nervio auditivo de estas especies animales.

Por otro lado, el oído artificial será útil para restaurar la audición normal en personas sordas sólo si remeda la respuesta del nervio auditivo humano. Desgraciadamente, se desconoce dicha respuesta; por razones éticas no es posible realizar experimentos de fisiología en personas. Mas, para nuestra fortuna, existen técnicas psicoacústicas que permiten inferir, con suficiente aproximación, aspectos relevantes de la respuesta del nervio auditivo. ¿Cómo? Mediante el estudio de nuestra percepción de los sonidos.

En la actualidad, en colaboración con Christopher J. Plack, de la Universidad de Essex, y con el grupo de Felipe Moreno, del Hospital Ramón y Cajal de Madrid, aplicamos estas técnicas para caracterizar la respuesta de la membrana basilar, tanto en personas con audición normal como en las que sufren presbiacusia, hipoacusia neurosensorial genética y otras patologías del receptor auditivo. Estas técnicas proporcionan datos de enorme valor para perfeccionar el oído artificial humano.

ENRIQUE A. LOPEZ-POVEDA dirige la Unidad de Computación auditiva y Psicoacústica del Laboratorio de Neurobiología de la Audición del Instituto de Neurociencias de Castilla y León, adscrito a la Universidad de Salamanca. RAY MEDDIS dirige el Laboratorio de Investigación de la Audición de la Universidad de Essex. Ambos colaboran estrechamente desde hace más de diez años en proyectos de investigación dirigidos y ejecutados por ambas instituciones.

Bibliografía complementaria

A PHYSICAL MODEL OF SOUND DIFFRACTION AND REFLECTIONS IN THE HUMAN CONCHA. E. A. López-Poveda y R. Meddis en *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 100, pág. 3248; 1996.

A COMPUTATIONAL ALGORITHM FOR COMPUTING NON-LINEAR AUDITORY FREQUENCY SELECTIVITY. R. Meddis et al. en *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 109, pág. 2852; 2001.

A HUMAN NONLINEAR COCHLEAR FILTERBANK. E. A. López-Poveda, y R. Meddis en *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 110, pág. 3107; 2001.

A REVISED MODEL OF THE INNER HAIR CELL AND AUDITORY NERVE COMPLEX. C. Sumner et al. en *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 111, pág. 2178; 2002.

COCHLEAR IMPLANTS: SOME LIKELY NEXT STEPS. B. S. Wilson et al. en *Annual Review of Biomedical Engineering*, vol. 5, pág. 207; 2003.