

IMPLANTES COCLEARES: ¿ES POSIBLE QUE LOS SORDOS OIGAN?

Nacho Martínez

La privación total de cualquiera de los sentidos constituye un gravísimo problema para el ser humano; todos aquellos que sufren una minusvalía de este tipo están obligados a seguir un entrenamiento especial que les ayude a desenvolverse con la mayor habilidad posible en un mundo concebido para personas sin ningún tipo de incapacidad sensorial. Hasta hace apenas dos décadas, la única ayuda que podían recibir los minusválidos sensoriales se fundamentaba en un hiperdesarrollo de otro, u otros, de los sentidos no lesionados. Así, los ciegos compensan su incapacidad mediante una agudización extrema de los sentidos táctil y auditivo, mientras que los sordos desarrollan en mayor medida el sentido de la vista (lectura labial, etc). Hoy en día, gracias a los implantes cocleares es posible la inserción de buena parte de los sordos profundos en la sociedad, mediante la recuperación parcial del sentido de que están privados: la audición. Este artículo, además de exponer los fundamentos de los implantes cocleares, pretende servir como introducción preliminar al estudio de la audición, y más concretamente de la discapacidad auditiva. Para ello es

JUAN IGNACIO MARTÍNEZ es estudiante de quinto de Ingeniería de Telecomunicación (UPC).

importante primero dar un breve repaso a la fisiología auditiva.

UN POCO DE FISIOLÓGIA AUDITIVA

La finalidad principal del sistema auditivo es la de convertir una onda de presión sonora en una señal bioeléctrica que será interpretada como sonido a nivel cerebral. Para que la señal acústica llegue al cerebro, ésta debe pasar antes por varias etapas, cada una de las cuales tiene una función específica. Dichas etapas pueden seguirse a través de la figura 1, que muestra la anatomía del aparato auditivo, y a partir de la explicación que a continuación exponemos:

Oído externo: Tiene la función de amplificar y canalizar la onda de presión hasta el tímpano. Se compone del *pabellón auditivo, conducto auditivo externo y tímpano*. El pabellón actúa como amplificador acústico y también como elemento direccional, ya que responde con más amplificación a aquellos sonidos que provienen de

una dirección determinada del espacio. El sonido captado a nivel de pabellón es conducido hasta el tímpano a través del conducto auditivo externo, en cuyo extremo se halla el tímpano, que no es más que un tejido orgánico capaz de vibrar a modo de membrana. El tímpano actúa también de barrera física entre el oído externo y el resto del aparato auditivo.

La concepción del implante coclear surge de la idea de emular, en la medida de lo posible, la función de una cóclea sana

Oído medio: Comprende desde la cara interna del tímpano hasta la *ventana oval*. Unida a la cara interna del tímpano se halla la cadena osicular, que está compuesta de 3

huesecillos unidos solidariamente -*martillo, yunque y estribo*-, y se sujeta en su otro extremo a la ventana oval.

Oído interno: El oído interno está formado básicamente por la *cóclea*, también llamada caracol por su forma en espiral. La cóclea es una cavidad cilíndrica, rellena de un líquido llamado *líquido laberíntico*, cuya superficie interna está formada por células que presentan unas prolongaciones capilares llamadas cilios. Además están inervadas, es decir, tienen conexión con las terminaciones nerviosas que provienen del córtex cerebral.

¿Cómo funciona todo este sistema cuando se le excita acústicamente? En primer lugar, el pabellón auditivo recoge y amplifica levemente el sonido que posteriormente será conducido hasta el tímpano por el conducto auditivo externo. El tímpano vibra de manera análoga a la onda de presión sonora y así lo hacen también los huesecillos de la cadena osicular, que se están sujetos a la cara interna del mismo. La vibración de los huesecillos se transmite hasta la ventana oval, que actúa a modo de émbolo, ejerciendo una presión sobre el líquido laberíntico existente en el interior

de la cóclea. Para que efectivamente puedan moverse el líquido laberíntico por el interior de ésta, es necesaria una vía de escape para el mismo - sabemos que los líquidos son incompresibles-. Dicha vía es la ventana redonda. Por lo tanto, a través del sistema de transmisión detallado hasta ahora, el líquido laberíntico se mueve debido a las vibraciones de la onda de presión sonora. Al moverse el líquido laberíntico, se mueven también los cilios de las células ciliadas. El movimiento de dichos cilios provoca una polarización de las células, de signo e intensidad proporcional a su movimiento. Así, las variaciones de polaridad de las células ciliadas son transmitidas vía nerviosa hasta el córtex cerebral. El cerebro identificará dichas variaciones como sonido.

Este proceso puede entenderse como una cadena de transmisores y transductores. El oído externo actúa de transmisor mecánico por medio aéreo a través del canal auditivo. El papel del oído medio será el de adaptador de impedancias: cuando una onda de presión sonora llega a un medio líquido -en nuestro caso el líquido laberíntico del interior de la cóclea- sólo se aprovecha el 1 % de la energía, el 99% restante queda reflejado. Es por eso que la cadena de huesecillos que se encuentra en el

interior del oído medio actúa como transformador de la presión acústica en un movimiento de pistón de la ventana oval. En cambio, el conjunto oído medio -cóclea- es un transductor *mecánico-bioeléctrico*, esto es, convierte el movimiento de los cilios provocado por el flujo del líquido laberíntico, en una señal bioeléctrica.

Se produce una pérdida auditiva cuando se deteriora uno de los eslabones de la cadena, y en función de cuál sea, el tipo y gravedad de la misma variará. Así, una disfunción

severa, esto es, los restos de audición son muy bajos o nulos, la amplificación que pueda proporcionar un audífono no reportará ningún beneficio. Para esas pérdidas cocleares severas o profundas, un implante coclear puede ser la solución.

IMPLANTES COCLEARES, ¿UNA SOLUCIÓN PARA LAS SORDERAS PROFUNDAS?

Existen muchos factores que pueden originar una pérdida total de la funcionalidad de la cóclea. La cau-

sa más habitual es la ingestión de sustancias ototóxicas a través de productos farmacéuticos, que son prescritos como tratamiento a otro tipo de enfermedad. Cuando esto es así, aunque el oído externo y medio se hallen intactos, ninguna estimulación acústica puede llegar al cerebro, ya que la cóclea es precisamente el órgano que proporciona las señales bioeléctricas necesarias para estimular el córtex cerebral, que se encarga de codificar e identificar los estímulos auditivos. Podríamos tomar como ejemplo un aparato de

radio con auricular: Por muy bien que funcione el receptor, el sintonizador y el amplificador del mismo, si el auricular está averiado no vamos a poder escuchar nada.

La concepción del implante coclear surge de la idea de emular, en la medida de lo posible, el funcionamiento de una cóclea sana. Si se introducen uno o más electrodos en el interior de la cóclea de un paciente sordo, y se entrega señal eléctrica a los mismos, de manera que la corriente que fluya entre ellos sea capaz de polarizar y despolarizar las células que componen las terminaciones nerviosas del aparato auditivo, que se encuentran dispuestas a lo largo de la cóclea, el cerebro captará dicha estimulación como una sensación auditiva. O sea, se substituye la cóclea,

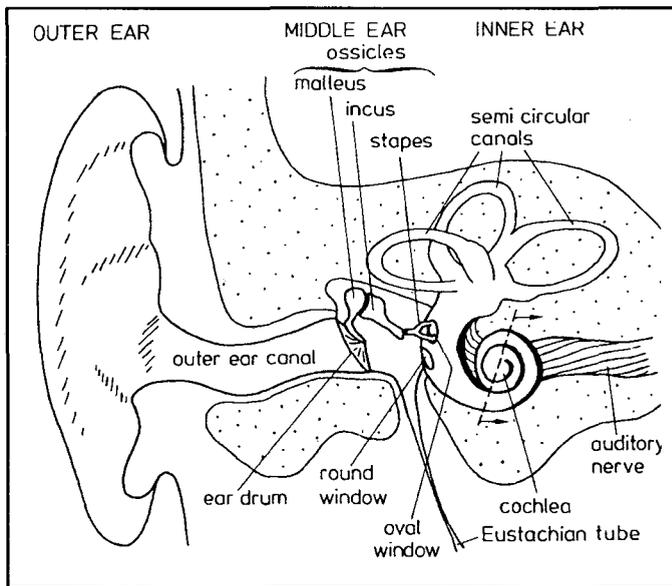


Figura 1.- Dibujo esquemático del oído externo, medio e interno. Nótese que la estructura en espiral es la cóclea.

del oído medio resulta en una pérdida conductiva, que suele ser médicamente tratable -a menudo quirúrgicamente- o pasajera -causada por un resfriado, congestión nasal,...-. Las pérdidas más difíciles de corregir, y desafortunadamente las más habituales, son las causadas por el deterioro o malformación del oído interno. Dichas pérdidas se denominan sensoriales, ya que son consecuencia de una disfunción del aparato sensitivo por excelencia: la cóclea. Si la lesión es posterior, o sea, de las vías nerviosas, se dice que la pérdida es retrococlear. Las pérdidas sensoriales no tienen solución quirúrgica posible, pero muchas de ellas pueden corregirse mediante una prótesis auditiva -audífono-, que entrega la señal acústica amplificada al canal auditivo externo. Pero, si la pérdida es muy

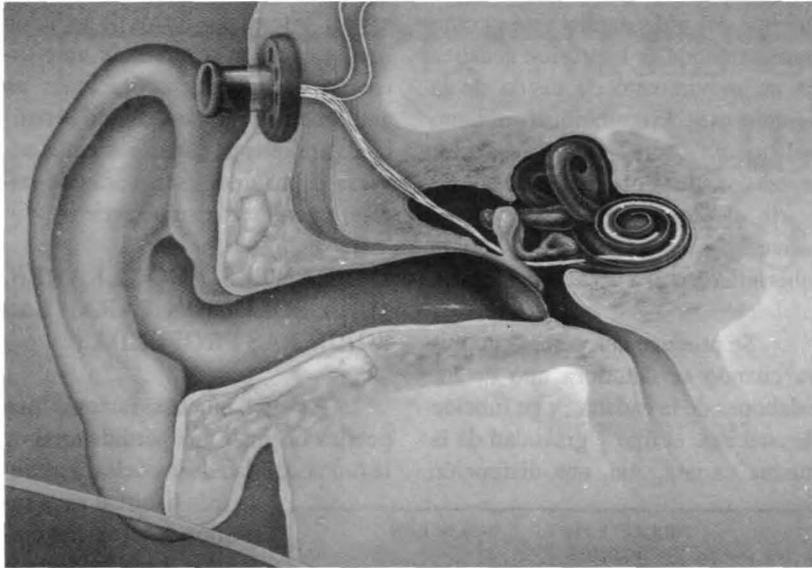


Figura 2.- Dibujo esquemático del aparato auditivo después de ser implantado el haz de electrodos en la cóclea. Nótese que dicho sistema corresponde a un implante percutáneo, ya que la comunicación entre electrodos y el exterior se establece por contacto eléctrico directo, a través del enchufe atornillado al hueso mastoideo, que sobresale fuera de la piel.

inservible en este tipo de pacientes, por un procesador electrónico artificial que entrega una réplica aproximada de la señal que generaría una cóclea sana. La figura 2 muestra un esquema del aparato auditivo con el haz de electrodos introducido ya en la cóclea.

¿Por qué se utilizan varios electrodos? Aunque todavía existen muchos interrogantes en torno al funcionamiento de la cóclea, y sobretodo acerca de la integración e identificación de la señal acústica a nivel cerebral, existe hoy en día una teoría de amplia aceptación en todo el mundo: *la teoría tonotópica*. Se ha demostrado mediante experimentos que la cóclea, además de ser el órgano sensitivo, también cumple la función de la discriminación frecuencial. La teoría tonotópica dice que cada una de las partes de la cóclea es sensible a una cierta frecuencia, de manera que las zonas de la espiral más cercanas a la ventana oval responden a las altas frecuencias, y a medida que nos alejamos de dicho punto y nos dirigimos a las zonas más apicales, la cóclea se hace más sensible a las bajas frecuencias. Por lo tanto, si estimulamos las zonas cercanas a la ventana oval con una señal eléctrica, la sensación sonora recogida a nivel cerebral será

aguda, mientras que si lo hacemos en una zona más alejada de la misma, el sonido percibido será más grave. De ahí surge la necesidad de estimular con diversos electrodos repartidos uniformemente a lo largo de la totalidad de la cóclea, de manera que cada uno de ellos responda a señales de entrada de frecuencias distintas.

DESCRIPCIÓN DE UN IMPLANTE COCLEAR

Un implante coclear consta de: micrófono, procesador, interfase procesador-electrodos y un haz de electrodos. Las diferencias entre los distintos implantes cocleares existentes hoy en día pueden clasificarse de la siguiente manera:

Según el número de electrodos: Los sistemas existentes utilizan de 4 a 22 electrodos. En principio, cuantos más electrodos se implantan, más selectivo en frecuencia se hace el sistema, pero existe un efecto que reduce el máximo efectivo posible de electrodos: la estimulación proporcionada por un elec-

trodo tiene un área de influencia relativamente extensa, debida a la baja resistencia del medio en que se halla. La atenuación a una distancia dada del electrodo es, en el mejor de los casos, de aproximadamente 10 dB/mm -este parámetro varía en función del tamaño y geometría de los electrodos implantados-, de manera que las señales de dos electrodos adyacentes pueden interferirse sustancialmente si no se establece una distancia mínima entre ellos. De hecho, muchos implantes cocleares dotados de gran cantidad de electrodos -algunos llegan a tener 22 electrodos-, a efectos prácticos se comportan como si tuvieran muchos menos, debido a la influencia de unos sobre los otros. Otro problema derivado de la utilización de un alto número de electrodos es que si estuvieran activos la totalidad de ellos a la vez, la corriente total que atravesaría la cóclea sería la suma de las corrientes liberadas por cada electrodo. Por lo tanto la intensidad total podría llegar a niveles demasiado elevados. Para prevenir ese efecto se suelen emplear estrategias de multiplexación temporal, es decir, en cada instante de tiempo sólo hay unos pocos electrodos activos, de manera que la corriente total instantánea que atraviesa la cóclea nunca es mayor que la que entrega un número reducido de ellos. Este proceso se hace a una velocidad suficientemente alta para que el efecto de activación/desactivación de los electrodos sea imperceptible para el paciente.



Figura 3.- Haz de 16 electrodos. Pueden configurarse como 15 electrodos monopolares, actuando uno de ellos como referencia, o como 8 electrodos bipolares. Los cables que conectan a cada uno de los electrodos están recubiertos de un material aislante y biocompatible. Cada bolita constituye un electrodo, y éstos sobresalen de la funda aislante para establecer contacto con la cóclea.

Según el tipo de electrodo:

Existen dos tipos de electrodos distintos, según su terminal de referencia. La configuración *monopolar* consta de tantos electrodos como bandas frecuenciales tenga el sistema, más un electrodo adicional de referencia común a los anteriores. Otro tipo de configuración es la *bipolar*. Esta consta de dos electrodos por banda frecuencial, de manera que cada una de ellas tiene su propio terminal de referencia. La ventaja principal de éste último con respecto al primero es que, al estar tan próximos el electrodo emisor y el de referencia, la energía se concentra en mayor medida, por lo que los niveles de corriente necesarios para la estimulación son más bajos. De esta manera, los electrodos pueden ser más pequeños, lo que facilita su inserción en la cóclea, y a la vez reduce el efecto invasivo de los mismos al penetrar por el oído interno. Otra ventaja estriba en que al no concentrarse la corriente de retorno de todos los electrodos en un único punto, la densidad de corriente que atraviesa una porción dada de la cóclea es menor. En la figura 3 se muestra un haz de 16 electrodos, que pueden configurarse como 15 monopolares y uno de referencia, o como 8 electrodos bipolares.

Según el tipo de procesador:

El procesador realiza tres funciones fundamentales. La primera es regular el nivel de corriente que se proporciona a los electrodos. Hay que tener mucho

cuidado de no entregar niveles demasiado altos: en primer lugar porque ello podría causar sensaciones desagradables al paciente, e incluso lesiones si los niveles llegan a ser suficientemente altos, y en segundo lugar, porque un excesivo flujo de corriente podría provocar la electrolisis de algunas sustancias que se encuentran disueltas en el medio intercelular, dando como resultado productos tóxicos. Otra de las funciones importantes que realiza el procesador es la separación de la señal en tantas bandas frecuenciales como electrodos tenga el sistema. Así, cada electrodo es estimulado sólo cuando la señal de entrada contiene formantes frecuenciales correspondientes al rango de frecuencias que se le ha asignado en función de su posición dentro de la cóclea. La tercera función, que es básicamente la que diferencia a los diversos sistemas de implantes cocleares existentes hoy en día, es la estrategia de codificación de la señal empleada. Existen, a grandes rasgos, dos tipos de codificación: analógica, es decir, se entrega a cada electrodo la porción de señal analógica correspondiente a la banda que se le ha asignado, y digital o mediante pulsos, que entrega a cada electrodo un tren de pulsos de amplitud proporcional a la intensidad de la señal detectada en cada banda. Los defensores de la última estrategia de codificación argumentan que no es tan importante la forma de la señal con que se estimula, como la zona de la cóclea a la que se entrega señal. De esta manera, si estimulamos en un punto

concreto de la cóclea, sensible a una banda frecuencial determinada, el cerebro percibirá dicha frecuencia independientemente de la forma de la señal con que estimulemos, siempre que su intensidad y duración, o sea su energía, sea suficiente. Es importante constatar que las células ciliadas actúan a modo de acumulador: hasta que no alcanzan cierto nivel de energía, no están preparadas para estimular las fibras nerviosas. Por el contrario, los que defienden el modelo analógico, argumentan que esa es una forma más natural de estimulación y en todo caso más coincidente con el modo de funcionamiento de una cóclea sana. Lo cierto es que no existe evidencia científica que dé la razón a unos u a otros, ya que todos los estudios al respecto se basan en datos experimentales extraídos del seguimiento clínico a pacientes implantados. De éstos se ha podido extraer la conclusión de que a largo plazo los dos sistemas conducen a los mismos resultados, si bien los implantados con sistemas analógicos llegan a resultados satisfactorios antes que los implantados con sistemas digitales. Llegado a este punto, podríamos pensar que los sistemas analógicos son más recomendables, ya que con ellos se alcanzan los mismos resultados que con los sistemas de codificación digital, pero más rápidamente. Es cierto, pero la verdad es que los sistemas digitales suponen una ventaja que quizás haga que merezca la pena invertir un poco más de tiempo en la rehabilitación del implantado, y es que éstos son mucho más

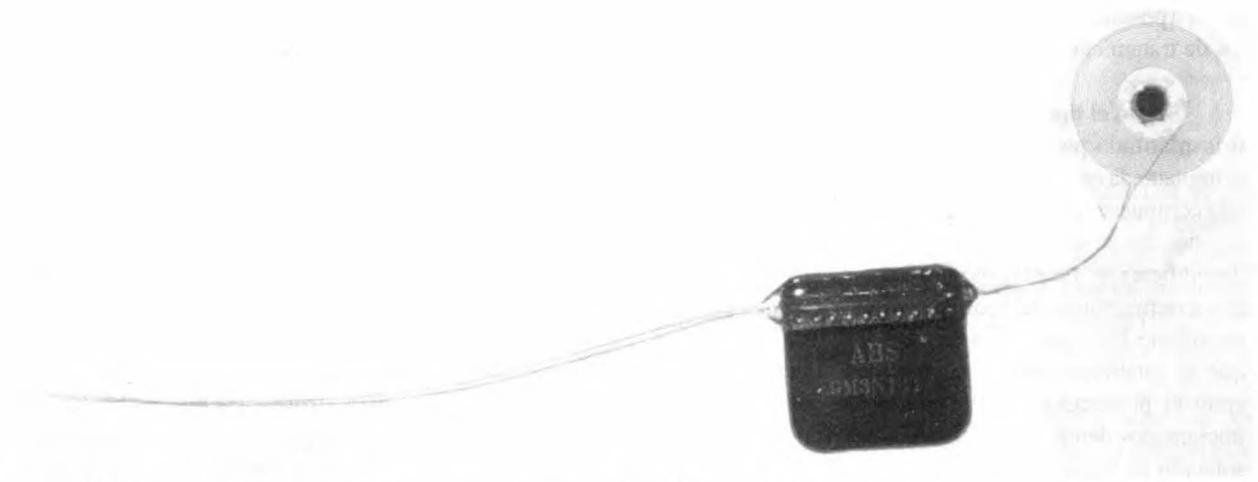


Figura 4.- Parte interna de un implante coclear transcutáneo. Consta de una bobina que actúa como antena receptora (al otro lado de la piel, en el exterior, se coloca otra de las mismas características que actúa de emisora), un circuito que genera un tren de pulsos correspondiente a la información codificada que recibe del procesador y el haz de electrodos que será insertado en la cóclea.



Figura 5.- Fotografía que muestra cómo el técnico audiprotesista efectúa el ajuste del implante mediante ordenador. Se trata de un implante percutáneo. Observar cómo se sujeta la bobina en el cráneo del paciente. El ordenador programa los parámetros del procesador de señal que se halla encima de la mesa.

flexibles y permiten un altísimo grado de libertad, ya que su algoritmo de codificación se programa mediante un ordenador. Hay que pensar que la colocación de los electrodos es un acto invasivo que puede llegar a destruir la cóclea por completo, y aunque parezca que eso no tiene menor importancia al ser precisamente implantados aquellos pacientes cuya cóclea es totalmente inservible, no podemos augurar hacia dónde va a avanzar el desarrollo científico de los años venideros. Es por ello que cuanto más flexibilidad se proporcione a los sistemas implantables, más amplio es el horizonte de adaptación a nuevas tecnologías y algoritmos que puedan surgir en el futuro. Y es claro que los sistemas que pueden amoldarse mejor a posibles exigencias futuras son los de tratamiento digital de la señal.

Según el tipo de interfase parte implantada/parte externa: La parte implantada en el cuerpo del paciente está compuesta por los electrodos y, en algunos casos, un circuito sencillo de decodificación. La parte no implantada o externa, consta del procesador y el micrófono. Es evidente la necesidad de que se establezca una comunicación entre el procesador y los electrodos implantados dentro de la cóclea. Una solución es hacer que esa comunicación se establezca por contacto eléctrico directo. En ese caso debe haber una comunicación física entre el medio

interno y el exterior. Para conseguirlo, se atornilla un conector en el cráneo del paciente -hueso mastoideo-, de manera que los pins del conector estén en contacto eléctrico con los electrodos. Este tipo de implantes se denominan *percutáneos*, y presentan muchos inconvenientes, ya que el conector sale hacia el exterior del cráneo del paciente a través de la piel. En el esquema de la figura 2 se muestra el esquema de un implante percutáneo, donde puede observarse el enchufe que sobresale de la piel del paciente, atornillado al cráneo. Otro tipo de implantes son los llamados *transcutáneos*. Estos establecen la comunicación mediante ondas de radiofrecuencia, evitando el problema del contacto físico entre el medio interno del paciente y el exterior. Se suele situar una bobina como antena emisora pegada a la piel de la zona del mastoideo. Al otro lado, bajo la piel, se implanta otra bobina que actúa como antena receptora. Como la distancia entre las dos antenas es de unos milímetros, correspondientes al espesor de la piel, las energías radiadas pueden ser muy bajas. Existe un sistema muy avanzado que establece la comunicación mediante ondas moduladas en amplitud, que rectifica la señal portadora para utilizarla como alimentación de los circuitos internos de codificación. En la figura 4 puede observarse la parte interna de un implante transcutáneo.

CONSIDERACIONES GENERALES Y CONCLUSIONES

Es importante hacer notar que en ningún caso un implante coclear puede restituir la audición a un paciente en las mismas condiciones que la de un oído sano. El conocimiento que se tiene hoy en día sobre el funcionamiento del órgano auditivo humano es todavía mínimo, si atendemos al desconocimiento existente acerca de la integración de la señal bioeléctrica a nivel cerebral. Ni siquiera existen evidencias concluyentes que determinen qué tipo de señal se debe entregar a nivel nervioso para garantizar la mejor restauración de la audición perdida. No se conoce el tipo de sensación que perciben los pacientes implantados, ya que ésta es totalmente subjetiva, pero sí se sabe que no es igual, ni tan siquiera parecida a la percibida por una persona con audición normal. Por lo tanto, si la persona es postlocutiva, o sea, se ha quedado sorda después de haber adquirido el lenguaje, tendrá que aprender a codificar e identificar los estímulos sonoros de manera distinta a como lo hacía antes. Ello se consigue a base de rehabilitación logopédica.

Lo que sí es obvio y constatable es que el implante coclear es el mejor remedio de que se dispone hoy en día contra la sordera total, y que se ha llegado a resultados altamente satisfactorios realizando este tipo de implantes. También hay que mencionar que este campo de la bioingeniería se halla en una fase todavía experimental, y que por ello los implantes cocleares no se han divulgado a niveles extraprofesionales. Todas las aplicaciones de los mismos deben llevarse a cabo bajo riguroso control médico y evaluación psicológica previa al implante; no basta con que el paciente presente un cuadro médico favorable para la aplicación del mismo, sino que es igualmente importante que éste se encuentre en una predisposición mental adecuada para afrontar las nuevas sensaciones que va a experimentar, así como las nuevas connotaciones sociales que puede suponerle la transición del mundo de los sordos al de los normo-oyentes.