

Medición Diaria de las Impedancias de los Electrodo Intracocleares desde la Cirugía hasta la Activación Inicial en Adultos y Niños Implantados Cocleares

Daily Measurement of Impedances of Intracochlear Electrodes from Surgery to Initial Activation in Adults and Children with Cochlear Implants

Medida Diária das Impedâncias de Eletrodos Intracocleares da Cirurgia à Ativação Inicial em Adultos e Crianças com Implantes Cocleares

Mgter. Norma Pallares⁽¹⁾, Prof. Dr. Vicente Diamante⁽¹⁾, Fga. Marina Vuljanic⁽¹⁾, Ing. Kanth Koka⁽²⁾

Resumen

Introducción: Los cambios en la Impedancia de los electrodos en el Implante Coclear son estudiados en la cirugía, luego en la activación del implante y más tarde en cada control de calibración del Implante Coclear. A esos cambios estudiados se ha sumado la medición de impedancias en intervalos diarios controlados desde la cirugía hasta la activación del implante, que son datos poco conocidos.

El objetivo de este estudio es examinar los cambios que se producen en las Impedancias de los electrodos desde la cirugía a la activación inicial del implante en niños y adultos, a lo largo del array de electrodos del Implante Coclear a través del tiempo

Material y Método: Se testeó a un total de 11 pacientes, los cuales fueron evaluados diariamente durante el mes entre la cirugía y la activación del implante, con 2 tomas diarias de impedancias.

Resultados: Las impedancias mostraron una tendencia a subir desde el día de la cirugía, llegando alrededor del sexto/séptimo día a una estabilización de las impedancias que se mantuvo hasta la activación del implante.

Conclusión: Este estudio de impedancias en adultos y niños demostró que las impedancias de los electrodos implantados no aumentan de forma permanente desde la cirugía hasta la activación inicial. Se observa un rápido aumento de las impedancias inmediatamente después de la cirugía y luego se estabilizan hasta la activación del implante, tanto en niños como en adultos.

Palabras clave: Implante Coclear, Impedancia, Electrodo, Respuesta Neural.

Abstract

Introduction: Changes in the impedance of the electrodes in the Cochlear Implant occur and are studied in surgery, then in the activation of the implant and later in each programming control. To these studied changes, the measurement of impedances has been added in controlled daily intervals from surgery to implant tune up, which are little known data.

The objective is to examine the changes that occur in the impedances of the electrodes along the electrode array of the Cochlear Implant through time.

Material and Method: A total of 11 patients were evaluated on a daily basis, twice a day, during the month between surgery and implant tune up.

Results: Impedances showed a tendency to rise from the day of surgery, reaching around the sixth / seventh day a stabilization of the impedances that was maintained until the activation of the implant.

Conclusion: This study of impedances in adults and children demonstrated that the impedances of the implanted electrodes do not increase permanently from surgery until initial activation. A rapid increase in impedances is observed immediately after surgery and then stabilizes until activation of the implant, in both children and adults.

Keywords: Cochlear Implant, Impedance, Electrode, Neural Response.

⁽¹⁾ Centro de Implantes Cocleares "Profesor Diamante". Instituto Superior de Otorrinolaringología. CABA. Argentina.

⁽²⁾ Advanced Bionics LLC. Valencia. USA

Mail de contacto: npallares@fibertel.com.ar

Fecha de envío: 29 de Septiembre de 2020- Fecha aceptación 29 de octubre de 2020

Resumo

Introdução: Alterações na impedância dos eletrodos no implante coclear são estudadas, desde a cirurgia, a ativação do implante e depois em cada control durante a programação do implante. A essas mudanças estudadas, adicionaram-se medições em intervalos diários controlados, da cirurgia à ativação do implante, que são dados pouco conhecidos.

O objetivo é examinar as alterações nas impedâncias do eletrodo em toda a matriz de eletrodos do implante coclear em todo o tempo do estudo.

Material e Método: Foram avaliados um grupo de 11 pacientes diariamente durante o mês entre a cirurgia e a início da ativação do implante.

Resultados: As impedâncias apresentam tendência de aumento a partir do dia da cirurgia, atingindo por volta do sexto / sétimo dia uma estabilização das impedâncias que se mantém até a ativação do implante.

Conclusão: Este estudo em adultos e crianças mostrou que as impedâncias dos eletrodos implantados não aumentam permanentemente desde a cirurgia até a ativação inicial. Um rápido aumento das impedâncias é observado imediatamente após a cirurgia e, a seguir, estabiliza até a ativação do implante, tanto em crianças quanto em adultos.

Palavras chave: Implante coclear, impedâncias, eletrodos, resposta neural.

Introducción

La impedancia de los electrodos describe la manera como fluye la corriente eléctrica a través de los electrodos implantados. Cada sistema de implante coclear determina un pulso de corriente particular que fluye a través de los electrodos de platino del implante hacia el ambiente iónico del tejido coclear. Este pulso debe liberar suficiente carga para estimular sin dañar el tejido. Un electrodo puede tener impedancias consideradas dentro de la normalidad o presentar muy altas o bajas impedancias fuera de la normalidad.

La impedancia se determina mediante la entrega de un pulso de corriente de bajo nivel a través de los electrodos y midiendo el voltaje resultante a través de los electrodos asociados. Esta medición conocida como telemetría de impedancias se puede realizar con rapidez en la clínica utilizando el software de programación.

La telemetría de impedancias se utiliza de rutina como prueba para determinar el correcto funcionamiento de los electrodos. Las fallas de circuito

abierto o cortocircuito (impedancias muy altas o muy bajas) se pueden diagnosticar fácilmente, lo que permite al audiólogo utilizar en el mapa de programación sólo los electrodos con correcto funcionamiento.

Esta medición también puede proporcionar más información sobre la situación alrededor del implante. Un factor importante es que la medición de la impedancia sirve para determinar el volumen y la composición del tejido que rodea los electrodos implantados. ⁽¹⁾ Clark (2003) ⁽²⁾ recomienda que los niveles de impedancia debieran controlarse rutinariamente como un indicador de cambios en el tejido coclear, como la fibrosis. En la práctica clínica se realiza previa a la programación del procesador del habla para evaluar el estado de los electrodos.

La impedancia de los electrodos es determinada por la resistencia que ofrece el fluido y tejido presentes alrededor del electrodo al pasaje de la corriente eléctrica. ^(3,4)

La impedancia de los electrodos no confirma la colocación del electrodo, el funcionamiento del sistema implantado, ni reemplaza las imágenes post-quirúrgicas. ⁽⁵⁾

Las impedancias de los electrodos durante la cirugía son importantes para determinar el funcionamiento de los electrodos, el entorno del electrodo, cercanía a las estructuras neurales y la influencia en la utilización de drogas. (Figura 1)

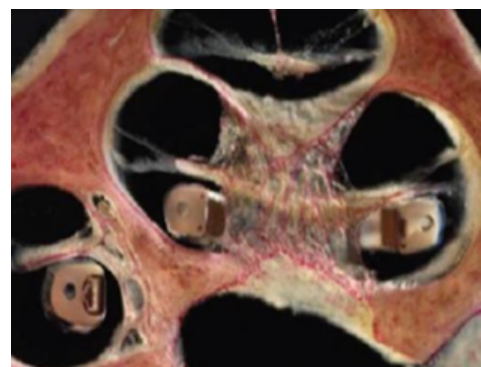


Figura 1. Foto del electrodo Mid Scala donde se observan las estructuras alrededor del electrodo insertado en la coclea.

Los cambios en la Impedancia de los electrodos son estudiados en general, durante el acto quirúrgico, durante la activación del implante y luego por el uso cotidiano, en los controles postquirúrgicos. Los cambios medidos en intervalos diarios controlados desde la cirugía a la activación son pocos conocidos. ^(1,6-8)

En Pallares et al. (2018) ⁽⁹⁾, utilizando el implante coclear HiRes 90K Advantage con electrodo HiFocus Mid Scala de Advanced Bionics, se pudo obser-

var el comportamiento de los valores de Impedancias en 13 niños desde la cirugía, en la activación del implante hasta 6 meses posteriores a la cirugía, donde se obtuvo un promedio de impedancias de 3 KOhm (+/- 1,2) al momento de la cirugía, subiendo a un valor promedio de 7,9 KOhm (+/- 1) en la activación del Implante Coclear para luego descender y obtener una impedancia promedio de 6,49 KOhm (=/- 1,3) a los 6 meses de la intervención. Se observa que cuando el Implante Coclear es activado las impedancias disminuyen (sin efecto en electrodos no activados) y se estabilizan en los primeros meses de uso por efecto de la estimulación. El tejido fibroso que rodea al electrodo se vuelve menos denso.⁽¹⁰⁾

La disminución de la impedancia luego de la activación del Implante Coclear puede deberse al desprendimiento de sales de la superficie de los electrodos y a la movilización de las burbujas de aire por la estimulación eléctrica que alteraría la superficie del electrodo más que el tejido y fluido en la cóclea.⁽¹¹⁾

La impedancia puede ser dividida en resistencia de acceso (Ra) e impedancia de polarización (Zp).⁽⁶⁾

La resistencia o impedancia de acceso representa la resistencia entre el electrodo y los electrolitos que lo rodean. La impedancia de polarización representa la impedancia a nivel de la interfase del electrodo.

La suma de la resistencia de acceso (Ra) y la impedancia de polarización (Zp) nos da la impedancia

total (Zt), son estos valores de impedancia total los que se utilizan para el control de las impedancias de los electrodos del implante coclear.

A mayor impedancia, mayor requerimiento de voltaje para proveer la corriente requerida para activar las neuronas y a más baja impedancia se requiere menos voltaje.

Con la excepción de algunos estudios como el de Newblod et al. (2014)⁽¹¹⁾ y el de Di Lella et al. (2018)⁽¹²⁾, los investigadores han recogido información sobre los cambios de impedancias sólo en las visitas regulares del paciente a la clínica; no han sido estudiadas de una manera diaria controlada antes de la activación donde se da el mayor crecimiento de las impedancias.

Objetivo

El objetivo del presente estudio es examinar en forma diaria los cambios que se producen en las Impedancias de los electrodos a lo largo del array de electrodos del Implante Coclear y a través del tiempo, desde la cirugía hasta la activación inicial, en adultos y niños implantados.

Material y Método

Se evaluaron para este estudio 11 oídos, divididos en 2 grupos etarios, para medir con tomas diarias las impedancias desde la cirugía hasta el día de la activación inicial del implante. (Figura 2)

Datos Demográficos

Sujeto	Edad al Implante	Etiología	Fecha de cirugía	Oído	Generación IC (modelo/tipo)	AT oído a ser implantado				
						250Hz Z	500Hz Z	1KHz	2KHz	4KHz
S03	4	Desconocida	17/1/2017	OD	HiRes 90K con Mid Scala	90		105	-120	-120
S04	4	Desconocida	17/1/2017	OI	HiRes 90K con Mid Scala	105		120	-120	-120
S06	7	Neuropatía Auditiva	14/11/2017	OD	HiRes 90K con Mid Scala	40	45	50	60	55
S11	1	Toxoplasmosis	18/12/2017	OD	HiRes 90K con Mid Scala	95	105	115	120	-120
S12	1	Toxoplasmosis	18/12/2017	OI	HiRes 90K con Mid Scala	90	105	120	-120	-120

Sujeto	Edad al Implante	Etiología	Fecha de cirugía	Oído	Generación IC (modelo/tipo)	AT oído a ser implantado				
						250Hz Z	500Hz Z	1KHz	2KHz	4KHz
S01	21	Súbita	10/03/17	OD	HiRes 90K con Mid Scala	85	90	110	110	115
S02	58	Desconocida	10/10/17	OD	HiRes 90K con Mid Scala	60	60	60	75	100
S05	74	Súbita	11/07/17	OI	HiRes 90K con Mid Scala	100	100	95	80	80
S08	74	Súbita	12/12/17	OD	HiRes 90K con Mid Scala	60	60	65	65	75
S09	46	Sufrimiento fetal	12/12/17	OI	HiRes 90K con Mid Scala	90	90	110	115	-120
S10	61	Congenita progresiva	11/07/17	OD	HiRes 90K con Mid Scala	40	50	60	75	85

Figura 2. Cuadro que muestra los datos demográficos de la población estudiada

Grupo 1 Pediátrico: Se evaluaron 5 oídos pediátricos, las edades de los sujetos fueron de 1 año hasta 7 años, con un promedio de 3,4 años.

Grupo 2 Adultos: Se evaluaron 6 oídos en sujetos adultos, con edades comprendidas desde los 21 a los 74 años, con un promedio de 55,6 años.

Todos los sujetos que participaron de este estudio fueron implantados en el "Centro de Implantes Cocleares Prof. Diamante", Buenos Aires, Argentina.

La totalidad de los pacientes fueron implantados por el Prof. Diamante, a través de cocleostomía por postis anterior y se utilizó la técnica de soft surgery que limita el trauma durante la cirugía y que minimiza el crecimiento de "tejido fibroso".

La población elegida debía cumplir ciertos criterios para ser incluidos dentro del estudio: no presentar osificación o malformación coclear, tener una inserción completa del electrodo, no haber presentado complicaciones intra- quirúrgicas o post- quirúrgicas. Ningún sujeto podía presentar procesos patológicos de oído medio durante todo el periodo de tiempo que durara el estudio, en cuyo caso era descartado.

El sistema de Implante Coclear que se utilizó en todos los sujetos es HiRes 90K Advantage (Figura 3) con electrodo HiFocus Mid Scala de la empresa Advanced Bionics (Figura 4). El implante utilizado tiene la característica de poseer una alta velocidad de estimulación de hasta 83.000 pps, con un vínculo de comunicación bidireccional para Telemetría tanto de Impedancia de los electrodos, como de Imagen de Respuesta Neural.



Figura 3. Foto del dispositivo de implante coclear utilizado para todos los pacientes de este estudio.

Se realizó un análisis descriptivo de los datos.

Mediciones diarias de Impedancias:

Orientaciones precisas a través de técnica directa de entrevista fueron suministradas a los padres,

pacientes y familia luego de la cirugía para iniciar el proceso de medición automática de las impedancias usando el procesador Harmony.

En el día de la cirugía antes del alta médica, durante la entrevista y en el acto de entrega del procesador Harmony se cumple el siguiente protocolo:

- a) Consentimiento, orientaciones.
- b) Activación del procesador Harmony (solamente con monitoreo de impedancias habilitado).
- c) Los pacientes llevan el procesador Harmony al hogar (sin posibilidad de estimulación, solo para monitoreo de impedancias.)

Para el periodo comprendido entre la cirugía y la activación del implante, las Impedancias fueron tomadas dos veces por día, a la mañana al levantarse y a la noche al acostarse, completando un total entre 45 y 60 mediciones. Dichas Impedancias fueron realizadas usando procesadores retroauriculares de investigación Harmony de Advanced Bionics, especialmente diseñados y modificados para este estudio. (Figura 5)



Figura 4. Detalle del electrodo pre-curvado utilizado, con sus 16 electrodos y sus 2 marcadores azules para guiar al cirujano durante la inserción del electrodo.



Figura 5. Procesador retroauricular Harmony de investigación, con capacidad de almacenar mediciones diarias de impedancias por largos periodos

Las mediciones diarias fueron grabadas automáticamente, en los procesadores Harmony y analizadas con el software también diseñado especialmente para la realización del presente estudio, con el objetivo de estudiar los cambios en impedancias a través del tiempo y a lo largo del array. (Figura 6)

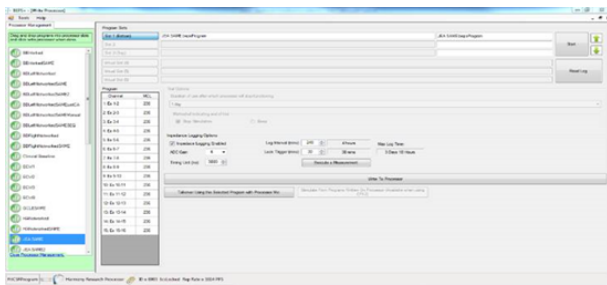


Figura 6. Pantalla del software utilizado para descargar, almacenar y analizar las impedancias tomadas con el procesador.

El monitoreo de Impedancias comienza a tomarse en forma automática al conectar el procesador y entrar en contacto la bobina con el Implante Cochlear. Esta toma tarda aproximadamente 6 segundos.

Hasta 180 mediciones pueden ser almacenadas en el procesador Harmony, antes de necesitar descargarlas en el software específico; por lo tanto, el sujeto no tiene que asistir al Centro de Implantes entre la cirugía y la activación inicial para tomar impedancias, ni llevarse ningún otro implemento, interfase o computadora a su hogar salvo el mencionado procesador retroauricular. De esta manera se simplifica la toma diaria de impedancias en el ámbito familiar.

El procesador Harmony NO es utilizado para uso diario, sólo está configurado para tomar impedancias automáticamente al conectarse vía antena con la parte interna del implante.

Resultados

Las impedancias promedio obtenidas en los 11 oídos evaluados fueron al momento de la cirugía de 2,25 (+/- 0,55) Ohms y el promedio de las impedancias al momento de la activación fue de 7,1 (+/- 1,3) KOhms.

Los resultados en los 2 grupos estudiados fueron los siguientes:

Grupo 1 Pediátrico

El hallazgo principal en este grupo etario fue la tendencia que se observó en el crecimiento de las impedancias desde la cirugía hasta el 6to día, cuando entraron en una meseta hasta el momento de la activación inicial del Implante Cochlear. (Figura 7)

El grupo estudiado alcanzó el punto en que 90% de los cambios de impedancias ocurre al 6to día. (Figura 8)

También se observó que los valores de impedancias fueron más elevados en electrodos basales (electrodos 14, 15 y 16) que en electrodos apicales. (Figura 9)

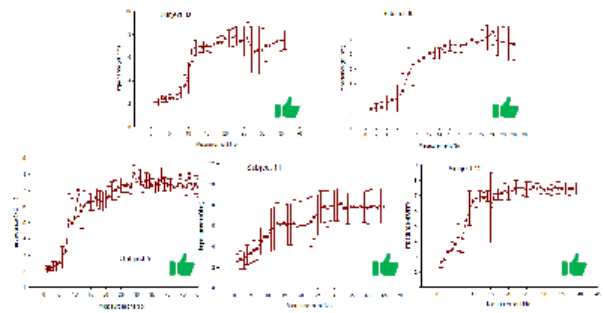


Fig. 7. Resultados individuales de los 5 oídos pediátricos estudiados, se observa similar tendencia de crecimiento en los primeros días para luego ir estabilizándose.

Resultados en Niños

El grupo estudiado alcanza el punto en que 90% de los cambios de Zs ocurre al 6to día.

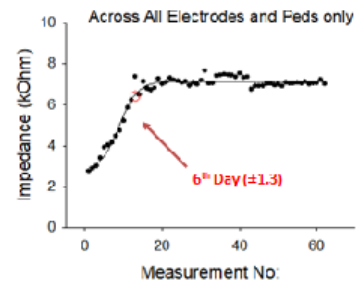


Fig 8. Resultados obtenidos en el grupo 1 de pacientes pediátricos, donde se observa el rápido crecimiento de las impedancias en los primeros días, llegando al 6to día con el 90% de los cambios obtenidos.

Resultados en niños:

- Mediciones de Zs por electrodo. (No hay diferencias significantes en variaciones de Zs según la ubicación del electrodo en el array)

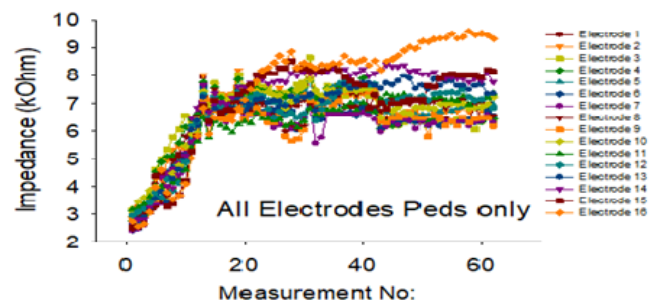


Fig. 9. Resultados en mediciones de Impedancias por electrodo en sujetos pediátricos, donde no se observan diferencias significativas por la ubicación del electrodo en la cóclea.

Grupo 2 Adultos

Los resultados con respecto al grupo de adultos fueron semejantes a los encontrados en el grupo pediátrico.

En este grupo etario se observó un marcado crecimiento de las impedancias desde la cirugía hasta el 7mo día, momento en que se desacelera el aumento de las impedancias y los valores de impedancias se mantienen en una meseta hasta el momento de la activación inicial del Implante Coclear. (Figura 10)

El grupo estudiado alcanzó el punto en que 90% de los cambios de impedancias ocurre al 7mo día. (Figura 11)

También se observaron, como en el grupo pediátrico, que los valores de impedancias fueron más elevados en electrodos basales (electrodos 14, 15 y 16) que en electrodos apicales. (Figura 12)

Los resultados que surgieron de la combinación de los 2 grupos etarios con respecto al aumento de las impedancias a través del tiempo, en relación con cada uno de los 16 electrodos del implante coclear, no mostraron diferencias importantes entre electrodos apicales y basales. (Figura 13)

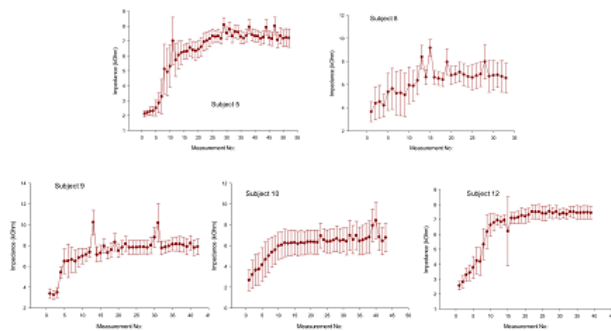


Fig. 10. Resultados individuales de oídos estudiados en adultos, se observa similar tendencia de crecimiento en los primeros días para luego ir estabilizándose.

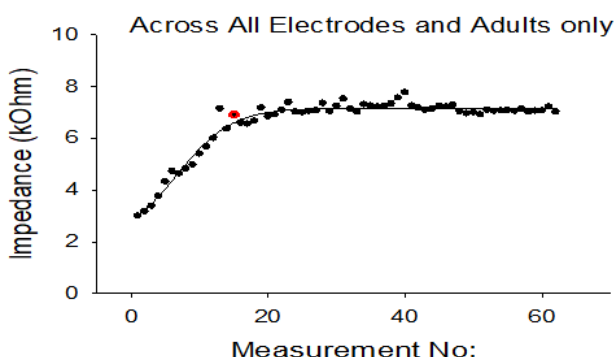


Fig. 11. Resultados obtenidos en el grupo 2 de pacientes adultos, donde se observa el rápido crecimiento de las impedancias en los primeros días, llegando al 7mo día a un 90% de los cambios obtenidos.

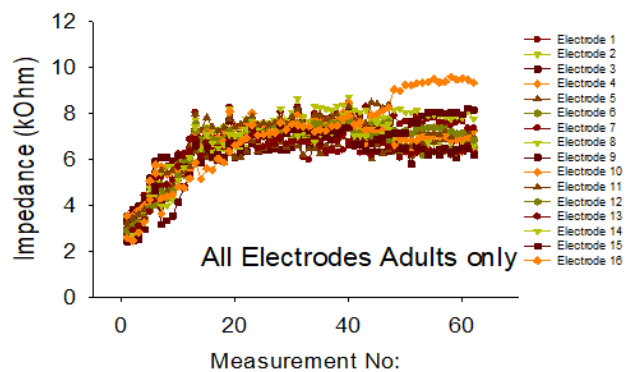


Fig. 12. Resultados en mediciones de Impedancias por electrodo en sujetos adultos, donde no se observan diferencias significativas por la ubicación del electrodo en la cóclea.

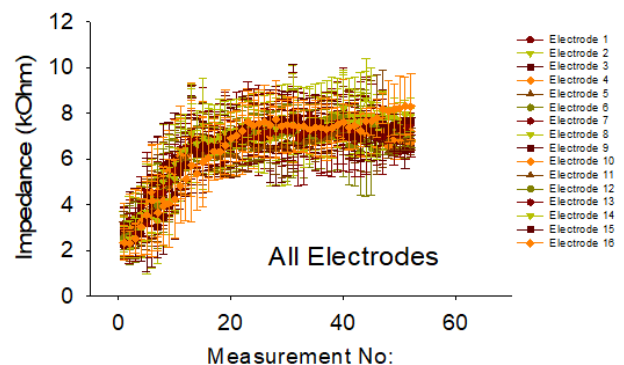


Fig. 13. Resultados en mediciones de Impedancias por electrodo en todos los sujetos estudiados, sumatoria del grupo 1 pediátrico y el grupo 2 de adultos, donde no se observan diferencias significativas por la ubicación del electrodo en la cóclea.

Discusión

En relación con la justificación de las variaciones en impedancias, se considera que los aumentos de las impedancias post- quirúrgicas pueden deberse a la formación de tejido fibroso encapsulado alrededor de los electrodos como resultado de la respuesta inmune del organismo a la presencia de un cuerpo extraño. (3, 11, 13) El aumento de Impedancias en el periodo post- quirúrgico se debe al crecimiento de tejido fibroso/inflamatorio alrededor de los electrodos, aunque para Neuburger y Lenarz, ese modelo no ofrece una explicación totalmente satisfactoria. Ellos incluso mencionan que aumentar el ancho de pulsos durante la programación parece ser una forma efectiva para bajar las impedancias aumentadas, especialmente en casos sin ninguna señal previa de inflamación. (14)

También la perilinfa es rica en proteínas y aumenta las impedancias. (15)

Cuando el Implante Coclear es activado, las impedancias disminuyen y se estabilizan en los primeros meses de uso por efecto de la estimulación. Otros

autores sugieren que el tejido fibroso que rodea al electrodo se vuelve menos denso.^(16,17)

En el estudio anterior de Pallares et al. (2018)⁽⁹⁾ se estudiaron las variaciones de impedancias, encontrándose bajas impedancias intraquirúrgicas y altas impedancias el día de la activación del implante. Dichos resultados se corresponden con el presente estudio utilizando el mismo sistema de Implante Coclear HiRes 90K Advantage con electrodo HiFocus Mid Scala. Sin embargo, este estudio no arroja datos sobre el comportamiento de las impedancias entre la cirugía y la activación inicial, pensándose que el aumento en dicho período era constante, punto que se rebatió en el presente estudio.

Los cambios observados en las impedancias aclaran la visión en relación con la presencia de factores como el crecimiento de tejido y la inflamación que suceden después de la cirugía a través de los electrodos.

Conclusión

Este estudio demostró que las impedancias de los electrodos implantados no aumentan en forma permanente desde la cirugía hasta la activación inicial.

De acuerdo con los resultados presentados en la población estudiada, implantados con el sistema de Implante Coclear de Advanced Bionic HiRes 90K Advantage con electrodo Mid Scala, se observa un rápido aumento de las Impedancias inmediatamente después de la cirugía para luego entrar en una meseta, tanto en niños como en adultos. No se observaron grandes diferencias a lo largo del array de electrodos en relación con la ubicación del electrodo y el crecimiento de impedancias a través del tiempo.

Investigaciones futuras incluirán el estudio de los cambios de impedancias aun después de la activación inicial en forma diaria y esto ayudará a comprender las variaciones relacionadas con el efecto de la estimulación eléctrica, el crecimiento del tejido y las diferencias entre electrodos apicales y basales en períodos prolongados de tiempo. También estos estudios incluirán el impacto en los niveles eléctricos, la calidad del sonido y realización auditiva en adultos y niños.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de la empresa Advanced Bionics por haber facilitado los procesadores Harmony de investigación y el software de análisis de datos.

No ha habido fuente de financiación externa.

Los procesadores de sonido y software de análisis que se utilizaron para el estudio fueron provistos por la empresa Advanced Bionics.

Bibliografía:

1. Tykocinski M, Duan Y, Tabor B, Cowan RS. Chronic electrical stimulation of the auditory nerve using high surface area (HiQ) platinum electrodes. *Hear Res.* 2001; 159:53-68.
2. Clark G. Cochlear Implants. *Fundamentals & Applications. Modern Acoustics and Signal Processing. Neurobiology.* 2003; 160-198.
3. Clark G, Shute S, Shepherd K, Cartes T. Cochlear implantation: Osteogenesis, electrode-tissue impedance and residual hearing. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology.* 1995; 166 (9): 40-2.
4. Swanson B, Seligman P, Carter P. Impedance measurements of the Nucleus 22-electrode array in patients. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology.* 1995; 104: 141-144.
5. Menolache O, Olariu R, Radulescu L, Cozma S. Electrical impedances variations values in patients with Cochlear Implant. *Romanian Journal of Oral rehabilitation.* 2012; Vol 4, N 2.
6. Tykocinski M, Cohen LT, Cowan RS. Measurement and analysis of Access resistance and polarization impedance in cochlear implant recipients. *Otol. Neurotol.* 2005; 26: 948-956.
7. Tan CT, Svirsky M, Anwar A, Kumar S, Caessens B, Carter P, et al. Real-time measurement of electrode impedance during intracochlear electrode insertion. *Laryngoscope.* 2013; 123: 1028-1032.
8. Pallares N, Diamante V, Fanelli K. Variaciones de la impedancia de los electrodos intracocleares en niños implantados con el sistema Nucleus 24. *Revista Fonoaudiológica.* 2004; tomo 50 n°2.
9. Pallares N, Diamante V, Rossi N, Cansler A. Measurements up to 6 months post surgery in electrode impedances and most comfortable levels in pediatric patients. *Abstract CI2018. Junio 27-30, 2018, Amberes, Belgica.*
10. Choi CH, Oghalai JS. Predicting the effect of post-implant cochlear fibrosis on residual hearing. *Hear Res.* 2005; 205:193-200.
11. Newbold C, Mergen S, Richardson R, Seligman P, Millard R, Cowan R, et al. Impedance changes in chronically implanted and stimulated cochlear implant electrodes. *Cochlear Implants Int.* 2014; 15:191-9.
12. Di Lella F, De Marco D, Fernandez F, Parreño M, Boccio C. In vivo real-time remote cochlear implant capacitive impedance measurements: A glimpse into the implanted inner ear. *Otol Neurotol.* 2019; 40: S18-S22.
13. Hughes M, Vander Werff K, Brown C, Abbas P, Kelsay D, Teagle H et al. A longitudinal study of electrode impedance, the electrically evoked compound action potential, and behavioral measures in nucleus 24 cochlear implant users. *Ear Hear.* 2001; 22 (6): 471-486.
14. Neuburger J, Lenarz T, Lesinski-Schiedat A, Buchner A. Spontaneous increase in impedance following cochlear implantation: Suspected causes and management. *International Journal of Audiology.* 2009; Vol 48: 233-239.
15. Newbold C, Richardson R, Millard R, Huang CH, Millojovic D, Shepherd R, et al. Changes in biphasic electrode impedance with protein adsorption and cell growth. *J Neural Eng.* 2010; 7: 056011.
16. Henkin Y, Kaplan-Neeman R, Muchnik C, Kronenberg J, Hildesheimer M. Changes over time in electrical stimulation levels and electrode impedance values in children using the Nucleus 24M cochlear implant. *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* 2003; 67: 873-880.
17. Chen JKC, Chuang A, Sprinzel G, Tung T, Li L. Impedance and Electrically Evoked Compound Action Potential (ECAP) Drop with 24 Hours after Cochlear Implantation. 2013; <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071929>