

Prototipo de prótesis de pabellón auricular por impresión 3D en material piezoeléctrico polimérico con capacidad sensorial táctil (presión y temperatura)

G. Rodríguez-Roldán, E. Suaste-Gómez

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección de Bioelectrónica
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, CINVESTAV-IPN

Av. Instituto Politécnico Nacional 2508, Gustavo A. Madero, San Pedro Zacatenco, 07360 Ciudad de México, D.F.

Resumen— El diseño y la implementación de prótesis han avanzado mucho en los últimos años combinando diferentes técnicas. En el caso de los pacientes que padecen microtía o que carecen del pabellón auricular debido a algún traumatismo, se recurre a la reconstrucción con prótesis de silicona, el cual es un sistema que se ha implementado desde hace varios años. Gracias a la integración de campos como la electrónica, la medicina y la ingeniería de materiales, las prótesis han sido mejoradas, el desafío ahora es recuperar la capacidad sensorial táctil.

En este artículo se presentan las etapas de diseño, construcción y caracterización de una prótesis de pabellón auricular fabricada por medio de la aplicación de las nuevas tecnologías para fabricación de las mismas, la impresión 3D y el uso de un material polimérico con propiedades piezoeléctricas y piroeléctricas (Polifluoruro de vinilideno, PVDF) para la generación de una respuesta eléctrica en función de estímulos externos como presión y temperatura.

Con esto, los pacientes en un futuro, no sólo habrán recuperado la funcionalidad de un miembro, sino también una retroalimentación sensorial en una forma semejante al sentido del tacto natural.

Palabras clave—Impresión 3D, microtía, piezoeléctrico, prótesis

I. INTRODUCCIÓN

Los avances en el campo de las prótesis han superado han avanzado mucho en los últimos años combinando diferentes técnicas tanto a nivel estético como funcional y han permitido que las personas que tienen alguna discapacidad física causada ya sea por un accidente o una deformidad genética, puedan llevar una vida casi normal.

Las prótesis auriculares (que en el lenguaje común se denominan “orejas artificiales”) son un ejemplo del avance en esta área.

La ausencia del pabellón auricular es una afección más frecuente de lo que puede suponerse. Uno de cada ocho mil niños nace con Microtía, una malformación congénita caracterizada por el escaso desarrollo de una oreja o las dos. Además del efecto psicológico que puede causar una oreja malformada, el niño o el adulto con Microtía tiene una pérdida auditiva debido a que presenta:

- Ausencia o malformación del oído externo.
- Ausencia (o estrechez) del canal auditivo y del tímpano
- Un oído medio pequeño en el que los huesecillos están fusionados.
- Una Trompa de Eustaquio abierta (es una estructura anatómica, en forma de tubo, habitualmente cerrado. Su función es regular las presiones dentro del oído medio, para proteger sus estructuras ante cambios bruscos y equilibrar las presiones a ambos lados del tímpano. Si las presiones no están equilibradas, el tímpano no puede transmitir las ondas sonoras de manera eficiente a través de la cadena de huesecillos hasta el nervio acústico).

Es por esto que estos niños tienen una pérdida casi total de conducción auditiva.

Otros casos de ausencia de oreja son resultado de su amputación a causa de traumatismos.

En ambas situaciones (microtía o amputación), las prótesis auriculares son la alternativa más recomendable, ya que permiten de manera práctica y sencilla recuperar la funcionalidad y el aspecto de una oreja natural, sin que se perciba en lo más mínimo su condición protésica.

Debido al detalle con el actualmente los técnicos construyen de forma artesanal estas prótesis y al precio de los materiales utilizados, las empresas fabricantes ofertan sus productos con costos elevados.

Es por eso que en este trabajo se diseña y construye una prótesis con características semejantes a las del pabellón auricular humano, teniendo en cuenta la antropometría en el diseño y utilizando la impresión 3D como método de automatización del proceso [1], así como la incorporación de materiales inteligentes como el Fluoruro de Polivinilideno (PVDF), el cual es un fluoropolímero termoplástico que se utiliza generalmente en aplicaciones que requieren la más alta pureza, fuerza y resistencia a los solventes, ácidos, bases, generación de calor y baja emisión de humos durante un evento de fuego [2,3,4].

Cuando tiene polaridad, el PVDF es un polímero ferroeléctrico que exhibe eficientes propiedades

piezoeléctricas y piroeléctricas [5]. Estas características lo hacen especialmente útil en aplicaciones como sensor [6], de esta manera, la prótesis impresa en PVDF es capaz de responder a estímulos externos de presión y temperatura [7,8,9] como lo haría un miembro normal y así lograr la integridad del miembro amputado o ausente [10].

II. METODOLOGÍA

1) *Modelado del pabellón auricular:* Se diseñó la prótesis de pabellón auricular en 3D en un software especializado de diseño asistido por computadora (CAD) siguiendo la antropometría. El resultado es mostrado en la Fig 1.

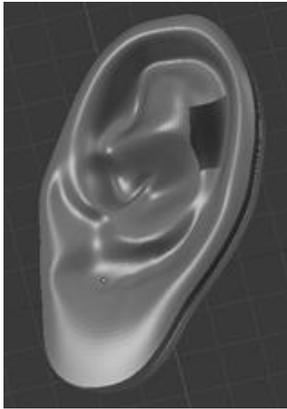


Fig 1. Pabellón auricular diseñado en software CAD

2) *Manufactura en 3D:* La prótesis fue fabricada utilizando una de las nuevas tecnologías de manufactura, la impresión 3D por el método de modelado por deposición fundida (FDM). Se utilizó PVDF el cual es un fluoropolímero termoplástico altamente inerte químicamente y considerado como material inteligente debido a que exhibe los efectos piezoeléctrico y piroeléctrico, de esta forma la prótesis actúa como sensor de presión y temperatura. El pabellón auricular impreso en PVDF es mostrado en la Fig. 2.



Fig 2. Pabellón auricular manufacturado en PVDF por impresión 3D.

3) *Caracterización de la prótesis:* Se colocaron dos contactos con pintura de plata y cinta de cobre. Se observaron cambios en la capacitancia de la prótesis de PVDF de acuerdo a variaciones de presión y temperatura.

El circuito mostrado en la Fig. 3 genera una señal de reloj donde la frecuencia de oscilación depende de dos resistencias (RA y RB) y un capacitor (C) como se observa en (1)

En lugar del capacitor, la prótesis del pabellón fue colocada y se observó la respuesta en frecuencia.

$$F = \frac{1}{(0.693)(RA + 2RB)(C)} \quad (1)$$

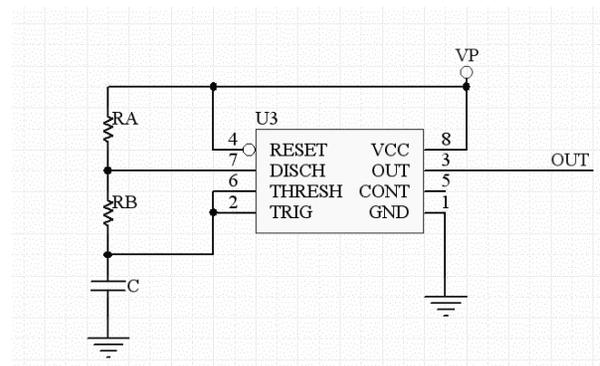


Fig 3. Multivibrador astable

La caracterización de la prótesis como sensor de temperatura fue realizada en un horno desde 25 °C hasta 100 °C y desde 3.5 °C hasta 20 °C utilizando un baño de hielo.

Así mismo, la prótesis fue caracterizada como sensor de presión. Se le aplicaron cargas entre 0 y 13.62 kPa utilizando un marco patrón de pesas certificadas.

Estos experimentos fueron realizados por triplicado y se observó que la frecuencia varía linealmente con los cambios de presión y temperatura.

III. RESULTADOS

A. Prótesis de oído hecha en PVDF como sensor de temperatura

La fig. 4 muestra la respuesta de la prótesis de PVDF como sensor de temperatura.

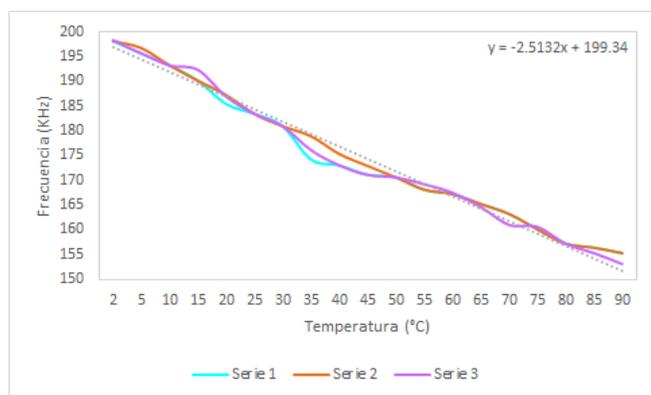


Fig 4. Respuesta térmica de la prótesis de PVDF desde 2 °C hasta 90 °C.

Se ajustaron estos datos por el método de regresión de mínimos cuadrados y la ecuación de la recta obtenida se muestra en (2), presentando una desviación estándar promedio de ± 13.94 .

$$y = -2.5132x + 199.34 \quad (2)$$

B. Prótesis de oído hecha en PVDF como sensor de presión

La fig. 5 muestra la respuesta de la prótesis de PVDF como sensor de presión.

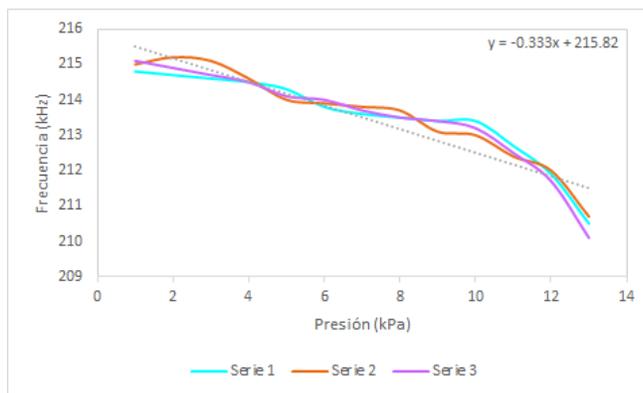


Fig 5. Respuesta de la prótesis de PVDF como sensor de presión desde 0 hasta 13.62 kPa.

Se ajustaron estos datos por el método de regresión de mínimos cuadrados y la ecuación de la recta obtenida se muestra en (3), presentando una desviación estándar promedio de ± 1.32 .

$$y = -0.333x + 215.82 \quad (3)$$

IV. DISCUSIÓN

Este trabajo que tuvo como objetivo la creación de prótesis de pabellón auricular con capacidad sensorial en los tratamientos de microtia y traumatismo exhibe los resultados experimentales que demuestran la potencialidad del uso del PVDF como material protésico táctil.

La respuesta en frecuencia a los estímulos de presión y temperatura que se observa en las gráficas muestra un comportamiento casi lineal e inversamente proporcional.

La repetitividad de los resultados permite evaluar al PVDF como un material confiable, ya que cada estímulo aplicado (presión y temperatura) fue probado por triplicado obteniendo resultados con ligeras variaciones pero con la misma tendencia.

En el caso de la prótesis como sensor de temperatura se observó que el rango de respuesta de ésta es entre 2 °C y 90 °C y que la respuesta deja de tener variaciones después de los 100 °C. Esta última consideración no tiene impacto en la utilización de la prótesis normalmente, ya que la temperatura ambiental no excede de esos rangos y la aplicación directa de una temperatura mayor podría provocar la deformación de la misma.

Por otra parte, la prótesis como sensor de presión mostró una efectividad en el rango de 0 a 13 kPa, valores que también entran en el rango de presión aplicada que podría aguantar un oído sin dañar al mismo.

Debido a la automatización del proceso con la utilización de la impresora 3D, el tiempo y el costo se ven reducidos para la realización de estas prótesis por encima de

la manufactura convencional.

V. CONCLUSIÓN

En este trabajo se diseñó, construyó y caracterizó de manera satisfactoria una prótesis de pabellón auricular hecha en un material inteligente (PVDF),

Al utilizar la tecnología de impresión 3D, se creó una prótesis personalizada de pabellón auricular, permitiendo que no exista diferencia con una natural.

La cual fue probada como sensor de presión y temperatura, como se muestra en la fig. 4 y la fig. 5, la respuesta típica de la prótesis de PVDF sensores de presión y temperatura PVDF responde de manera lineal. Se observó también que el PVDF tiene una alta sensibilidad a las variaciones de presión en el rango de 0-16 kPa.

En general, se concluye que el uso de materiales piezoeléctricos poliméricos en el área protésica tiene grandes potencialidades en el campo de la ingeniería biomédica debido a su capacidad para generar un potencial eléctrico en respuesta a las variaciones de presión y temperatura así como a su flexibilidad.

De este modo, el desarrollo de ésta prótesis inteligente extiende el propósito de una prótesis al área de la sensorización, permitiendo a las personas detectar presión y temperatura del mismo modo que lo realizarían de manera natural.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento al presente trabajo a través del proyecto 151894.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. D. Symes, P. J. Kitson, J. Yan, C. J. Richmond, G. J. Cooper, R. W. Bowman, T. Vilbrandt, L. Cronin. "Integrated 3DPrinted Reactionware for Chemical Synthesis and Analysis." *Nature Chemistry*, vol. 4, pp. 349-354, 2012.
- [2] C. O. González-Morán, G. A. Zamora Pérez, E. Suaste-Gómez, "System for Controlling the Moisture of the Soil Using Humidity Sensors from a Polyvinylidene fluoride Fiber Mats" *Adv. Sci. Lett.* 19, pp. 858-861, 2013.
- [3] C. O. Gonzalez-Morán, E. Campos-Elizondo, S. Guerrero-Peralta, M. R. Luege-Marván, E. Lucio de Esesarte, A. Hernández-Pérez, A. Romero-Toledo, E. Suaste-Gómez. "Fabrication of Piezoelectric Polyvinylidene fluoride (PVDF) Fiber Mats by Electrospinning for Generation of Keratinocytes from the Rattus Norvegicus". VI International Conference on Surfaces, Materials and Vacuum. Merida, Yucatan, 2013.
- [4] C. O. González Morán, R. González Ballesteros, M. D. A. Rodríguez Guzmán, E. Suaste Gómez. "Polyvinilidene Fluoride Polymer Applied in an Intraocular Pressure Sensor", *Japanese Journal Applied Physics*, Vol. 44, No. 27, pp. L885-L887, 2005.
- [5] E. Suaste, C.O. González. "Materiales inteligentes Piezocerámicos y Piezopolímeros", Innovación Editorial Lagares de México. Naucalpan Estado de México, ISBN:978-607-410-285-7, 2013.
- [6] J. S. Lee, K. Shin, O. J. Cheong, J. H. Kim, J. Jang, "Highly Sensitive and Multifunctional Tactile Sensor Using Free-standing ZnO/PVDF Thin Film with Graphene Electrodes for Pressure and Temperature Monitoring", *Scientific Reports*, 2015.
- [7] Y. F. Jia, Q. S. Ni, X. J. Chen, C. Ju, K. L. Xing, T. H. Jin, "Simulation and Experiment of PVDF Temperature Sensor", *Applied Mechanics and Materials*, pp. 109-113, 2013.
- [8] B. P. Mahale, D. Bodas, and S.A. Gangal, "Development of PVDF Based Pressure Sensor for Low Pressure Application", en *Proceedings of the 2011 6th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, Kaohsiung, Taiwan, 2011, pp. 658 – 661.
- [9] C.O. González –Morán, R. González-Ballesteros, E. Suaste-Gómez, "Polivinylidene Difluoride (PVDF) pressure sensor for biomedical applications", First International Conference on Electrical and Electronics Engineering and X Conference on Electrical Engineering ICEEE / CIE, Acapulco Guerrero, México, 2004.
- [10] G. Rodríguez-Roldán, E. Suaste-Gómez, "Design, construction and characterization of bionic prostheses made with a 3D printer using smart materials (piezoelectric, pyroelectric and shape memory polymers)" en *International Conference: Material Science in the Age of Sustainability*, La Habana, Cuba, 2015, pp.16.