

CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES EN ELECTRÓNICA IMPRESA DE BAJO COSTO

COMPONENT CHARACTERIZATION FOR LOW-COST PRINTED ELECTRONICS

Daniel Alberto Crepaldo

Universidad Nacional de Rosario, Laboratorio de Microelectrónica, Argentina
crepaldo@fceia.unr.edu.ar

Hugo Luis Meneghetti

Universidad Nacional de Rosario, Laboratorio de Microelectrónica, Argentina
hugoluism@fceia.unr.edu.ar

Eduardo Bailón

Universidad Nacional de Rosario, Laboratorio de Microelectrónica, Argentina
ebailon@fceia.unr.edu.ar

Raúl Lisandro Martín

Universidad Nacional de Rosario, Laboratorio de Microelectrónica, Argentina
rlmartin@fceia.unr.edu.ar

Federico Pacher

Universidad Nacional de Rosario, Laboratorio de Microelectrónica, Argentina
fpacher@fceia.unr.edu.ar

Javier Ghorghor

Universidad Nacional de Rosario, Laboratorio de Microelectrónica, Argentina
javghor@fceia.unr.edu.ar

Carlos Varela

Universidad Nacional de Rosario, Laboratorio de Microelectrónica, Argentina
charlyv@fceia.unr.edu.ar

Recepción: 24/noviembre/2023

Aceptación: 26/abril/2024

Resumen

La electrónica impresa usa tintas especiales para crear dispositivos electrónicos en sustratos diversos. Es una opción tecnológica económica e inmediata, cuya investigación está en constante desarrollo, lo que abre puertas para aplicaciones en sectores existentes y emergentes.

En este trabajo se exploran las posibilidades de desarrollo de componentes básicos (resistencias y capacitores) impresos basados en impresión 3D así como las

metodologías para el diseño y posterior verificación de los mismos. En la sección resultados se exploran las diferentes topologías de los componentes impresos pudiéndose observar los parámetros más relevantes y sus variaciones respecto a sus dimensiones.

Las conclusiones confirmaron que la resistividad del material varía antes y después de la extrusión. Los condensadores impresos fusionados en una impresora 3D permitieron calcular la permitividad relativa del dieléctrico y extrapolar valores para otros tamaños de condensadores. La impresión 3D de circuitos se ve como una alternativa viable para prototipos económicos en resistencias y capacitores.

Palabras Clave: Acido Poliláctico, Bajo costo, Componentes impresos, Electrónica impresa, Impresión 3D.

Abstract

Printed electronics use special inks to create electronic devices on various substrates. It is an economical and immediate technological option, whose research is constantly evolving, opening doors for applications in existing and emerging sectors.

This work explores the development possibilities of basic components (resistors and capacitors) printed based on 3D printing, as well as the methodologies for their design and subsequent verification. The results section explores the different topologies of printed components and their most relevant values, allowing for the observation of the most significant parameters and their variations with respect to their dimensions.

The conclusions confirmed that the resistivity of the material varies before and after extrusion. Printed capacitors fused in a 3D printer allowed for the calculation of the relative permittivity of the dielectric and extrapolation of values for other capacitor sizes. 3D printing of circuits is seen as a viable alternative for cost-effective prototypes in resistors and capacitors.

Keywords: 3D printing, Low cost, Polylactic acid (PLA), Printed components, Printed electronics.

1. Introducción

En la actualidad, mientras los dispositivos electrónicos basados en silicio evolucionan en el orden de los nanómetros, la electrónica impresa emerge a paso firme como una alternativa de menor costo. Es una tecnología que fusiona la implementación de componentes y circuitos electrónicos con técnicas de impresión gráfica [Duarte-Ferreira, 2016], [Tirado-Garcia, 2021]. Con esta combinación, se pueden producir productos electrónicos flexibles, delgados y livianos de diferentes tamaños. Esta tecnología tiene su origen en la década de 1950, cuando se empezaron a buscar alternativas para los circuitos cableados. Como primer paso se empezó a fabricar circuitos impresos. Hoy en día, los avances en la impresión se han extendido a una amplia variedad de campos como el automóvil, los implantes médicos, la electrónica, el aeroespacial y la robótica [Leigh, 2012], [Deshmukh, 2020]. Así mismo, los avances realizados en nanotecnología en el área de materiales (nanomateriales) permiten la expansión y diversificación del campo. En sus inicios, esta técnica se utilizaba para la impresión de dispositivos electrónicos y fotónicos utilizando técnicas propias de las artes gráficas, por ejemplo, huecograbado, flexografía, serigrafía e inyección de tinta. Los procesos tecnológicos se diferencian entre aditivos y sustractivos, de contacto o sin contacto, analógicos y digitales.

- Los procesos aditivos se realizan mediante la deposición de material utilizado como tinta, mientras que los procesos sustractivos implican la eliminación de material para generar un elemento. La resolución de un proceso aditivo, por ejemplo, la impresión por chorro de tinta está limitada por el diámetro de la boquilla y la dispersión en el sustrato. Por otro lado, en un proceso sustractivo con rayo láser, es posible evaporar solventes para el curado de tintas con nanopartículas. Los sustractivos producen un mejor rendimiento en términos de movilidad de portadores, mayor resolución y baja varianza. Requieren pasos de procesamiento complejos y que consumen mucho tiempo, así como una infraestructura sofisticada. Además, utilizan productos químicos de alta temperatura.

- En la impresión por contacto, existe un contacto físico entre los patrones entintados y el sustrato. En un proceso sin contacto, la tinta se distribuye a través de boquillas evitando la posible contaminación del sustrato.
- El proceso analógico utiliza máscaras para los patrones de capa, como la flexografía o el huecograbado, mientras que el digital (inyección, spray o aerosol) no las necesita, ya que posiciona una gota de líquido o sólido de pequeño volumen según la información de un archivo digital.

En general, estos procesos se realizan a temperaturas que no superan demasiado la temperatura ambiente.

Las tintas con características eléctricas se depositan sobre sustratos flexibles o transparentes para crear dispositivos electrónicos activos o pasivos. Las tintas pueden ser conductoras, semiconductoras o aislantes, y están hechas de diferentes materiales, como conductores metálicos, nanopartículas de plata o cobre, nanotubos de plata o carbono, grafeno, semiconductores orgánicos, etc.

En los últimos años se ha intensificado la investigación en el campo de las tintas conductoras. Entre ellas, las fabricadas en plata están cobrando importancia en aplicaciones electrónicas, especialmente las basadas en nanopartículas de plata. Se presentan como una buena alternativa de coste más accesible a otros materiales caros como el oro, el platino, etc., que inicialmente se exploraron. También se presentan como una alternativa que reduce el costo de fabricación en el campo de las placas de circuito impreso, un área en la que las técnicas de fabricación han ido aumentando en complejidad y costo.

Si bien es posible usar diferentes sustratos, la impresión de componentes todavía está restringida a dimensiones del orden de micrómetros. Es posible imprimir componentes como resistencias, capacitores, bobinas y transistores, sobre sustratos muy diversos, como telas o plásticos [Pacher, 2018]. La electrónica impresa abre nuevas funcionalidades, así como propiedades diferenciales en muchos productos que ya están en el mercado. Sus características incluyen flexibilidad, facilidad de integración, capacidad de adaptarse a diferentes entornos y costo accesible. Aprovechar su potencial requiere el aporte de nuevas ideas, que

se inserten en la tecnología con la mayor creatividad. En el presente trabajo se desarrolla una de estas ideas: la posibilidad de realizar electrónica impresa utilizando impresoras 3D de bajo costo.

Aunque la electrónica impresa generalmente se considera una alternativa de bajo costo a la electrónica de semiconductores cristalinos tradicional, aún conserva algunos de los inconvenientes de esta última. Los procesos más similares a la impresión tradicional (huecograbado, flexografía, serigrafía), dado el coste de desarrollo de las matrices, son más rentables para grandes volúmenes de producción. La impresión por chorro de tinta, en cambio, permite la realización de prototipos unitarios pero el coste, tanto del equipamiento como de las tintas utilizadas, sigue siendo elevado. Los resultados que se han obtenido hasta la fecha utilizando estas tecnologías aún no han alcanzado el nivel de reproducibilidad y fiabilidad de la electrónica tradicional, debido principalmente a las características de las tintas utilizadas. Esto lleva a explorar otros sistemas de impresión con menor precisión, pero con materiales estables y menor costo.

Características de la impresión 3D

Estas impresoras trabajan con un proceso tecnológico aditivo, es decir, realizando la deposición del material utilizado sobre un sustrato. A diferencia de las impresoras de tinta, el material se deposita capa tras capa, lo que permite controlar el espesor del producto depositado. De esta forma, se añade una variable más sobre la que operar para obtener las características finales de los elementos impresos. Estos materiales suelen ser polímeros [Serna, 2003], que pueden ser aislantes o tratados de tal manera que sean conductores, aunque con valores de resistividad más altos que el metal. Se pasan por boquillas que se encuentran a temperatura controlada para llevar el producto a su punto de fusión y así depositarlo en los lugares requeridos. Aunque es mínimo, hay contacto entre la boquilla de la impresora y el artículo impreso.

Todos estos polímeros sensibles comparten la capacidad de responder mecánicamente a un estímulo externo adaptando su forma o propiedades mecánicas (es decir, rigidez del material).

Los polímeros conductores se han clasificado como candidatos prometedores en diferentes aplicaciones como la electrónica flexible [Hohimer, 2020], [Loo, 2017], el almacenamiento de energía [Penumakala, 2020], la bioelectrónica [Jayanth, 2019], [Silva, 2020] o la ingeniería de tejidos [Alam, 2020], [Gao, 2016].

Un sistema digital que incluye motores paso a paso es el encargado de controlar los movimientos de la boquilla en los ejes X, Y y Z, en base a la información almacenada en un archivo, por lo que se trata de una impresión digital. Este sistema y el tamaño de la boquilla definen la resolución mínima que puede alcanzar la impresión.

En la tabla 1 se muestra una comparación entre las características de los dos sistemas de impresión: la impresión de chorro de tinta y la impresión 3D.

Tabla 1 Comparación de procesos de impresión.

Característica	Chorro de tinta	3D
Resolución	3 μm	50 μm
Costo del equipamiento	Alto (> U\$S10000)	Bajo (\approx U\$S400)
Costo de los suministros	Depende de la tinta. Aproximadamente U\$S45 cada cartucho de 1.5 ml	Filamentos de ácido poliláctico: Conductor: U\$S215 por bobina de 500 g Aislante: U\$S140 por bobina de 500 g
Características de los suministros	Tintas con base acuosa, tintas al solvente y tintas biológicas, con o sin agregado de nanopartículas	Filamentos de ácido poliláctico aislantes o conductores (aditivados con carbono)
Posibilidades de impresión	Actualmente: Resistencias, capacitores, inductancias y conexiones. En desarrollo: Transistores y otros dispositivos semiconductores	Actualmente: Resistencias, capacitores, inductancias y conexiones.
Características del sustrato	Rígido o flexible	Rígido o flexible
Características de la impresión	Requiere un proceso de sinterizado post impresión. Los elementos impresos no pueden ser separados del sustrato	No requiere post procesamiento. Los elementos impresos pueden ser separados del sustrato

Fuente: elaboración propia.

Impresión de resistencias

El material utilizado en la implementación de circuitos electrónicos impresos, mediante una impresora 3D, es un filamento termoplástico cuyo ingrediente principal es el almidón y es conocido como ácido poliláctico o PLA, con el agregado de carbono para disminuir su resistividad. La misma es un dato del fabricante y resulta sencilla de medir. Sin embargo, al realizarse la impresión, el filamento pasa por una boquilla que alcanza temperaturas de 240 °C. Esto produce la fusión del mismo

mientras se va realizando la deposición en los lugares asignados, donde recupera el estado sólido. Lo cual modifica la estructura y las propiedades del material, entre ellas la resistividad. Resulta de importancia conocer la resistividad del material ya depositado, para poder predecir el comportamiento de los circuitos construidos mediante esta tecnología.

Impresión de capacitores de placas paralelas

La capacitancia de un capacitor de placas paralelas (Figura 1) se define mediante la ecuación 1. Como se puede observar en la ecuación 1 y suponiendo que la permeabilidad relativa del material dieléctrico sea homogénea, la capacidad depende exclusivamente de las dimensiones físicas de las placas conductoras.

$$C = \frac{k \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d} \quad (1)$$

Donde:

k : Permitividad relativa dieléctrica del material,

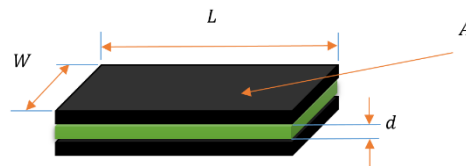
ϵ_0 : Permitividad del aire en el vacío,

A : Área de las placas conductoras

d : Distancia entre placas conductoras o altura del material dieléctrico.

L : Largo de las placas conductoras

W : Ancho de las placas conductoras



Fuente: elaboración propia.

Figura 1 Modelo del condensador de placas paralelas.

2. Métodos

Las muestras se imprimieron utilizando una impresora 3D Prusa modelo I3 cuya boquilla extrusora tiene un diámetro de 0.4 mm.

Para la impresión de las resistencias y las placas de los capacitores se utilizó un filamento conductor de PLA marca Proto-Pasta Modelo CDP11705 de 1.75 mm de

diámetro. Las características eléctricas de dicho material se resumen en la tabla 2 [ProtoPasta, 2017] y una imagen de este se muestra en la figura 2a. Para la impresión del dieléctrico de los capacitores se utilizó un filamento de PLA no conductor marca Grilon3 modelo M10IVM175CJ de 1.75 mm de diámetro, mostrado en la figura 2b.

Tabla 2 Propiedades eléctricas del filamento sin extruir.

Largo [cm]	R [ohm]	Temp. [°C]	r_o [ohm·cm]	r_o fabricante [ohm·cm]	Δr_o	e%
10	3185	20	123	115	-8	-6.59%
13	3900	20	115	115	0	-0.39%
15	4625	20	119	115	-4	-3.18%
20	5670	20	109	115	6	5.13%

Fuente: elaboración propia.



a) Modelo Proto-Pasta CDP11705.

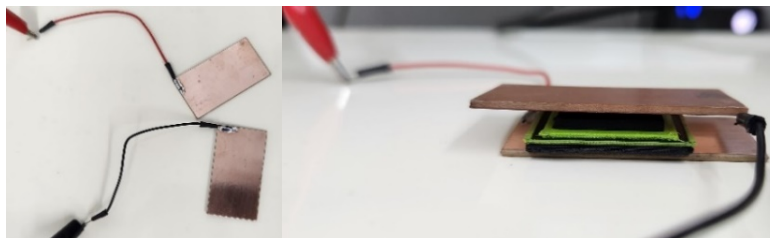


b) Grilon3 Modelo M10IVM175CJ

Fuente: elaboración propia.

Figura 2 Filamento PLA, 1.75 mm de diámetro.

Las pruebas se realizaron mediante un medidor HP LCR modelo 4263B. Se utilizaron placas de cobre planas con un bloque de 1.5 kg que ejercía una fuerza sobre la placa de cobre superior para garantizar un contacto y una conductividad regular entre los diferentes modelos de condensadores y el instrumento, figura 3.

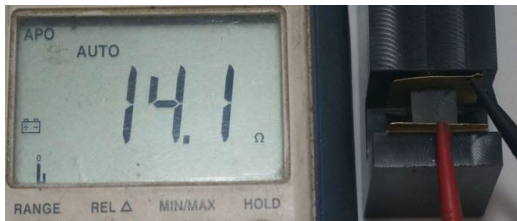


Fuente: elaboración propia.

Figura 3 Placas de contacto.

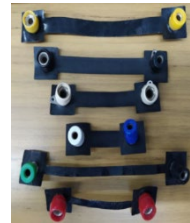
Mediciones de resistividad

Para determinar la resistividad del material ya extruido se midió la resistencia de distintos prototipos de dimensiones conocidas. En particular se ensayaron un cubo, cilindros y cintas de distintos tamaños y proporciones. Pueden verse algunos de estos prototipos en las figuras 4 y 5.



Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Ensayo del cubo.

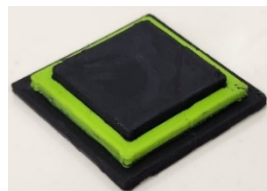


Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Prototipos de cintas ensayados.

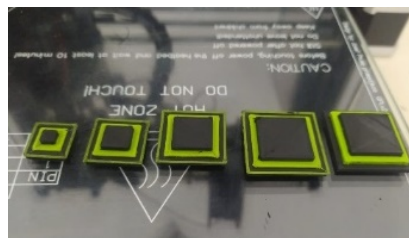
Mediciones de capacidad

Para determinar la capacitancia del material ya extruido se midió la capacidad de distintos prototipos de dimensiones conocidas. En la figura 6 se muestra en perspectiva la impresión del condensador modelo M2 y en la figura 7 se pueden ver los otros modelos impresos obtenidos para la prueba. En la tabla 3 se resumen las muestras impresas junto con sus características físicas.



Fuente: elaboración propia.

Figura 6 Condensador modelo M2, placas de 20 x 20 mm y dieléctrico de 2 mm.



Fuente: elaboración propia.

Figura 7 Modelos impresos obtenidos.

Tabla 3 Modelos de capacitores impresos.

Modelo	Placa				Dieléctrico		
	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
M1	20	20	2	400	20	20	1
M2	20	20	2	400	20	20	2
M3	15	15	2	225	15	15	1
M4	10	10	2	100	10	10	1
M5	5	5	2	25	5	5	1
M6	20	20	2	400	20	20	2
M7	20	20	0.5	400	20	20	0.5
M8	20	20	0.2	400	20	20	0.25
M9	25	25	2	625	25	25	1

Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

Los resultados obtenidos en las diferentes mediciones realizadas se pueden ver en las tablas 4 a 7.

Tabla 4 resultado de medición del cubo.

Ancho [cm]	Largo [cm]	Espesor [cm]	R [ohm]	Temp. [°C]	r_0 [ohm·cm]
1	1	1	30	27	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5 resultado de medición de los cilindros.

Largo [cm]	Radio [cm]	Resistencia [ohm]	r_0 [ohm·cm]
1	0.125	680	33
2	0.125	860	21
1	0.25	156	31
2	0.25	416	41
1	0.5	78	61
2	0.5	64	25

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6 Resultado de medición de las cintas.

Ancho [cm]	Largo [cm]	Espesor [cm]	R [ohm]	Temperatura [°C]	r_0 [ohm·cm]
0.5	5	0.03	8150	20	24
0.5	10	0.03	18700	20	28
1	5	0.03	4460	20	27
1	10	0.03	8700	20	26

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7 Resultados de las mediciones de los capacitores.

Modelo	Capacidad (pF)	Frecuencia (kHz)	Amplitud (mV)	Área (mm ²)	Distancia (mm)	Temp. (°C)
M1	17.85	10	1000	400	1	26
M2	10.1	10	1000	400	2	26
M3	12.21	10	1000	225	1	26
M4	8.25	10	1000	100	1	26
M5	4.62	10	1000	25	1	26
M6	8.76	10	1000	400	2	26
M7	32.4	10	1000	400	0.5	26
M8	54.3	10	1000	400	0.25	26
M9	24.31	10	1000	625	1	26

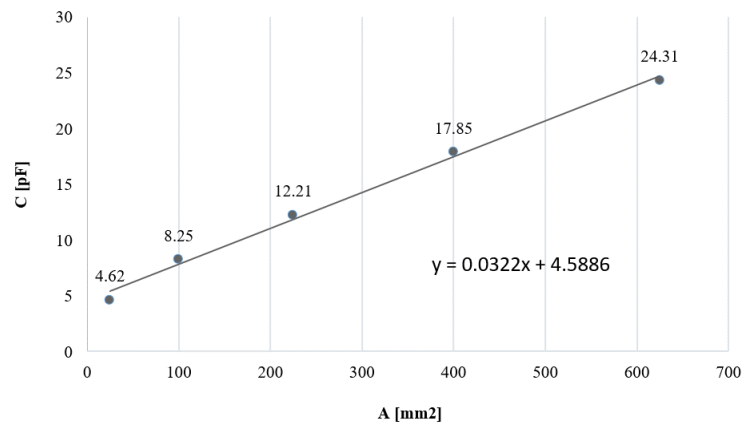
Fuente: elaboración propia.

4. Discusión

A partir de los resultados de estos ensayos se obtuvieron valores para la resistividad del material conductor (r_0) y la permitividad relativa del material dieléctrico (ϵ), lo que permite estimar a priori las características de los componentes impresos, resistencias y capacitores, a partir de estos datos y las dimensiones de estos.

En el caso de la resistividad, se obtuvo un valor de aproximadamente 27 ohms por centímetro con un entorno de error acotado, mientras que el filamento sin fundir tiene valores de r_0 de 115 ohms por centímetro.

En el caso de la medición de los capacitores, se construyó una gráfica que muestra la característica de capacitancia vs área para 4 capacitores de la tabla 3, todos ellos con el mismo espesor de dieléctrico. Esta gráfica se muestra en la figura 8.



Fuente: elaboración propia.

Figura 8 Característica de capacitancia vs. área.

Mediante una aproximación de mínimos cuadrados, se puede obtener una expresión lineal para la capacitancia en función del área de la placa y los parámetros de fabricación. Puede observarse en esta gráfica que la recta resulta una buena aproximación a la relación área-capacidad, con una baja dispersión de los valores alrededor de la misma.

Esta recta debería pasar por el origen de la gráfica, sin embargo, se advierte la presencia de un término independiente de valor 4.58 pF. Una posible explicación de la existencia de este término es a las capacitancias parásitas introducidas por el sistema de medida. Despreciando estas capacidades es posible obtener de la ecuación 1 la permitividad eléctrica relativa del material utilizado para el dieléctrico.

$$k = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0 \cdot A} = 3.63$$

Usando este valor en la ecuación 1 para el prototipo M8 se obtiene una capacitancia de 51.42 pF, que es muy similar al valor medido, lo que da la idea de que el valor obtenido para la permitividad relativa es útil para la estimación de los valores de los capacitores impresos mediante este método.

5. Conclusiones

Los ensayos confirman la variación de la resistividad del material antes y después de la extrusión, manteniéndose estos últimos en un entorno acotado del valor promedio que se ubica alrededor de los 27 ohms para este material. Si bien los valores de resistividad obtenidos no son altos, aún se requiere investigación aplicada a la mejora de los materiales para obtener valores de resistividad que se acerquen a los del metal.

Los diferentes modelos de condensadores fueron impresos mediante una impresora 3D completamente fusionados, es decir, realizando impresiones contiguas entre las dos placas conductoras y el dieléctrico, mediante un proceso de extrusión con una sola boquilla en la que se intercambiaron dos tipos de filamentos. Mediante expresiones de la literatura como en ecuación 1, se obtuvo un valor experimental para la permitividad relativa del material dieléctrico, y se pueden extrapolar valores para capacitores de otros tamaños.

La impresión de circuitos mediante técnicas de impresión 3D aparece como una posible alternativa a desarrollar para la creación de prototipos de bajo coste y tiempos de implementación cortos, aunque es necesaria una fuerte inversión en el desarrollo de elementos activos como los transistores.

En todo caso, es una alternativa que merece mayor investigación, y es necesario que las universidades formen recursos humanos capaces de afrontar soluciones en este campo.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Alam, F., Varadarajam, K., Kumar, S. 3D printed polylactic acid nanocomposite scaffolds for tissue engineering applications. *Polymer Testing journal*, Volume 81, January 2020.
- [2] Deshmukh, K., Houkan, M. T., AlMaadeed, M. A., Sadasivuni, K. K. Introduction to 3D and 4D printing technology: state of the art and recent trends. Capítulo del libro *3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials. Processes, Applications, and Challenges*, Elsevier; pp. 1–24, 2020.
- [3] Duarte-Ferreira, A., Nóvoa, P., Torres-Marques, A. Multifunctional Material Systems: A state-of-the-art review. *Composite Structures journal*, Volume 151, pp. 3-35, September 2016.
- [4] Gao, B., Yang, Q., Zhao, X., Jin, G., Ma, Y., Xu, F. 4D bioprinting for biomedical applications. *Trends in Biotechnology journal*, Volume 34, Issue 9, pp. 746-756, September 2016.
- [5] Hohimer, C., Petrossiana, G., Ameli, A., Mo, C., Pötschked, P. 3D printed conductive thermoplastic polyurethane/carbon nanotube composites for capacitive and piezoresistive sensing in soft pneumatic actuators. *Additive Manufacturing journal*, Volume 34, August 2020.
- [6] Jayanth, N., Senthil, P. Application of 3D printed ABS based conductive carbon black composite sensor in void fraction measurement. *Composites Part B: Engineering Journal*, Volume 159, pp. 224-230, February 2019.
- [7] Loo, A. H., Chua, C. K., Pumera, M. DNA biosensing with 3D printing technology. *Analyst journal*, pág. 279-283, 2017.

- [8] Leigh, S. J., Bradley, R. J., Purssell, C. P., Billson, D. R., Hutchins, D. A. A simple, low-cost conductive composite material for 3D printing of electronic sensors. *PLoS One*; ISSN: 1932-6203 (online), Noviembre 2012.
- [9] Pacher, F., Bailón, E., Crepaldo, D., Schiavon, M. I. Electrónica impresa, una alternativa tecnológica emergente, *Anales Congreso de Microelectrónica Aplicada UEA 2018*, Catamarca, Pcia. de Catamarca, Argentina, Octubre 2018.
- [10] Penumakala, P., Santo, J., Thomas, A. A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites. *Composites Part B: Engineering Journal*, Volume 201, 15 November 2020.
- [11] Proto-Pasta. Conductive PLA Technical Data Sheet Rev.1.
- [12] Serna, L., Rodríguez, A., Albán, F. Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. *Revista ingeniería y competitividad*, Vol.5, No. 1, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia, octubre 2003.
- [13] Silva, V., Fernandes-Junior, W., Rocha, D., Stefano, J., Muñoz, R., Bonacin, J., Janegitz, B. 3D-printed reduced graphene oxide/polylactic acid electrodes: a new prototyped platform for sensing and biosensing applications. *Biosensors and Bioelectronics journal*, Volume 170, 15 December 2020.
- [14] Tirado-Garcia, I., Garcia-Gonzalez, D., Garzon-Hernandez, S., Rusinek, A., Robles, G., Martinez-Tarifa, J. M., Arias, A. Conductive 3D printed PLA composites: On the interplay of mechanical, electrical and thermal behaviours. *Composite Structures journal*, Volume 265, 1 June 2021.