

Jornadas de Automática

Sistema resistivo impreso en 3D multi-material para comandar sistemas robóticos

Minguella-Canela, J.^{a,*}, Ballón, B.^a, Frigola, M.^b; Casals, A.^b

^a Grup de Recerca en Tecnologies de Fabricació (TECNOFAB), Departament D'Enginyeria Mecànica (DEM), Escola Tècnica Superior D'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Campus Sud, Edif. PF, Av. Diagonal 647, 08028 Barcelona, España.

^b Centre de Recerca en Enginyeria Biomèdica (CREB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), C/ Jordi Girona, n°1-3, 08034, Barcelona, España.

To cite this article: Minguella-Canela, J., Ballón, B., Frigola, M., Casals, A. 2024. **Resistive-based multi-material 3D printed device to command robotic systems.** Jornadas de Automática, 45.
<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10849>

Resumen

El uso de técnicas de impresión 3D hace posible la incorporación de sensores en dispositivos personalizados a un coste relativamente bajo. Dichos sistemas pueden tener aplicaciones relevantes para controlar sistemas robóticos de varios grados de libertad. Sin embargo, muchas de las soluciones analizadas en la literatura no abordan geometrías en las que el circuito sensor tenga verdaderamente un recorrido de 3 dimensiones en el espacio. En este contexto, el presente trabajo se centra en el estudio y análisis de prestaciones de una propuesta de sensor de 2 grados de libertad fabricada mediante impresión 3D multi-material de deposición de hilo fundido (FDM). Dicho sistema, que basa su principio de funcionamiento en la medida de resistencias en componentes verdaderamente tridimensionales, y que puede tomar distintos valores según la configuración física de sus coordenadas generalizadas, es analizado en cuanto a precisión, repetibilidad y funcionamiento en uso continuado. Los resultados obtenidos demuestran que es viable implementar dichos sistemas para comandar sistemas robóticos.

Palabras clave: Mecatrónica para sistemas de movilidad, Sensores, Robótica embebida, Robots móviles, Control de movimiento, Sistemas de fabricación flexibles y reconfigurables.

Resistive-based multi-material 3D printed device to command robotic systems

Abstract

The use of 3D printing technologies enhances the possibility of incorporating sensor in customized devices at a relatively low cost. Such systems may have relevant applications to control robotic systems with multiple degrees of freedom. However, many of the solutions discussed in the literature do not address geometries in which the sensor circuit truly has a 3-dimensional path in space. In this context, the present work focuses on the study and analysis of the performance of a proposed 2 degrees of freedom sensor manufactured by fused wire deposition multi-material (FDM) 3D printing. This system, which bases its functioning principle on the measure of resistances in truly three-dimensional devices, and that can take different values depending on the physical configuration of its general coordinates, is analysed concerning accuracy, repeatability, and continuous functioning. The results obtained demonstrate that it is feasible to implement such systems to command robotic systems.

Keywords: Mechatronics for Mobility Systems, Sensing, Embedded robotics, Mobile robots, Motion control, Flexible and reconfigurable manufacturing systems.

1. Introducción

Uno de los grandes desafíos en la fabricación de componentes con electrónica embebida, como es el caso de los dispositivos de comando de sistemas robóticos, es la incorporación de circuitos realmente tridimensionales mediante soluciones de bajo coste.

Eso hace que la libertad geométrica en el diseño de dichos sensores esté muy coartada, ya que los elementos sensores no pueden adoptar geometrías realmente tridimensionales, sino que más bien terminan consistiendo en una composición de sustratos de geometrías planas apiladas. Por otro lado, la fabricación de sensores mediante procesos de impresión en 3D presenta muchos aspectos que deber ser estudiados y mejorados. En concreto, será importante alcanzar soluciones que puedan proporcionar suficiente precisión, repetibilidad y baja degradación durante su vida útil.

En este contexto, la presente contribución tiene como objetivo realizar una prueba de concepto sobre un dispositivo para comandar sistemas robóticos. El principio de funcionamiento se basará en la gestión de dos resistencias variables con el objetivo de tener dos señales que puedan comandar dos grados de libertad independientes. El modo de fabricación será la materialización mediante impresión 3D multi-material (incorporando material conductor y material estructural), de modo que se pueda conseguir una geometría conductora realmente tridimensional. El estudio abarca las fases de diseño, fabricación y análisis de resultados.

1.1 Impresión 3D multi-material de sensores

Muchas de las tecnologías de impresión 3D pueden utilizarse para la obtención de sensores con una gran libertad de diseño, si bien no todas pueden ofrecer soluciones multi-material de forma directa. Eso explica porque en muchos casos se combinan varias tecnologías de impresión 3D para fabricar distintas partes de un mismo sensor (por ejemplo: circuitos y sustrato) (Christina, 2018, Bao, 2021).

A nivel individual, las tecnologías basadas en polvo (L-PBF, SLM) pueden producir piezas (o partes de piezas) muy resistentes y con alta dureza. Sin embargo, son procesos relativamente lentos, con tiempos de impresión largos, y que requieren ciclos de calentamiento y enfriamiento prolongados (Stoll, 2021). Además, su coste de utilización es elevado y sería muy complejo poder llegar a gestionar a fabricación de piezas multi-material.

Por otro lado, las tecnologías basadas en resinas líquidas (SLA, DLP) permiten crear volúmenes más densos y con mejor definición que mediante la utilización de las tecnologías anteriores. Sin embargo, son tecnologías con costes asociados elevados, y que solo permiten utilizar algunos materiales que puedan ser sometidos a proceso de curado (Gooding, 2017). Además, requieren ciertas tareas de postproceso para conseguir que puedan responder correctamente a su proceso de envejecimiento. Además, no son especialmente recomendadas para realizar piezas multi-material.

Finalmente se tienen las tecnologías basadas en la extrusión de material (FDM, DIW, InkJet), las cuales destacan por su facilidad de uso y su amplia penetración en muchos centros de diseño. En este caso, los retos provienen

del hecho que las piezas fabricadas mediante dichas tecnologías pueden aducir de baja calidad, falta de integridad estructural y baja resolución para materializar los detalles (Minguella-Canela, 2023b). En cualquier caso, la opción FDM se considera la opción a utilizar para realizar las pruebas de concepto previstas en la presente prueba de concepto dado sus costes bajos y la posibilidad de realizar piezas multi-material de forma casi directa.

1.2 Control de sistemas mediante sensores impresos en 3D

Algunos sensores impresos en 3D son utilizados para comandar sistemas ligados a ámbitos médicos o sanitarios. En (Roland, 2019) se consiguió gobernar una prótesis de mano mediante un sensor flexible basado en el principio de funcionamiento por electromiografía. En este caso, dado que la medida se toma realizando la medida de capacidades, las señales generadas son muy pequeñas y deben ser obtenidas con electrónica de precisión.

Por otro lado, existen numerosas aplicaciones que basan su modo de funcionamiento en el fenómeno de la piezoelectricidad. Destacan campos como los *wearables* (Hassan, 2021) o incluso como sensores de presión embebidos en neumáticos (Emon, 2017). En estos casos, es necesario garantizar que los elementos conductores sean flexibles y se mantengan adecuadamente con el uso continuado, lo cual compromete su durabilidad.

Finalmente, cabe destacar la existencia de elementos de funcionamiento resistivo que se han utilizado con éxito en ámbitos vinculados a la robótica (Bas, 2024). Este principio de funcionamiento permite obtener soluciones de bajo coste que pueden alcanzar velocidades elevadas en sus articulaciones entre elementos móviles. También destacan por su durabilidad y facilidad de implementación, motivos por los cuáles la solución resistiva ha sido la elegida para realizar la presente prueba de concepto.

2. Materiales y métodos

La presente contribución abarca el diseño, la fabricación y la experimentación de un sensor multi-material de geometría tridimensional, que basa su funcionamiento en la utilización de dos resistencias variables para emitir dos señales distintas en una configuración tipo cardan.

2.1. Diseño del sensor

La cinemática del mecanismo diseñado consiste en la utilización de dos pares de revolución dispuestos a noventa grados en el plano horizontal (X-Y), de modo que la palanca de comando -que adopta la dirección normal a dicho plano en la situación de reposo-, pueda realizar movimientos angulares según las coordenadas ' θ ' y ' φ ' (Figura 1(a)).

Cada uno de estos pares cinemáticos manobra un contacto que cierra un circuito eléctrico en un punto que puede variar en función de los ángulos ' θ ' y ' φ ' respectivamente. Por ejemplo, tomando la entrada por el lado izquierdo, en la Figura 1 (b) el circuito en la parte correspondiente a la circunferencia se desarrollaría en una longitud correspondiente a un cuarto de arco entre los puntos de entrada ($\theta=-90^\circ$) y salida ($\theta=0^\circ$). Así mismo, girando el

elemento hasta $\theta=45^\circ$ la longitud de conducción se reduciría a un octavo del arco de circunferencia entre el mismo punto de entrada y el nuevo punto de salida (ver Figura 1(c)).

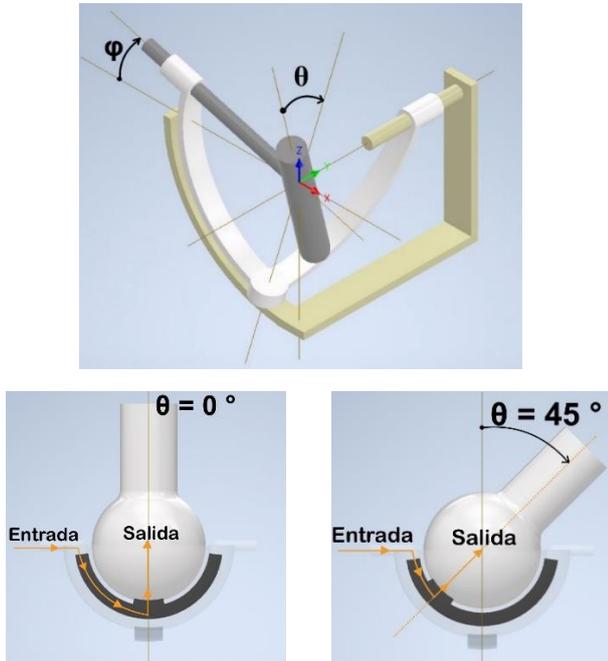


Figura 1: Principio de funcionamiento del sistema sensor analizado en el presente estudio. (a) Esquema del mecanismo conteniendo 2 grados de libertad de rotación independientes. (b) Detalle de la rotación respecto a un grado de libertad. (c) Valores medidos en distintas configuraciones de uno de dichos grados de libertad de rotación.

Para poder implementar el sistema de funcionamiento de las resistencias variables se ha realizado un diseño basado en dos materiales: uno estructural y otro conductor. Se trata de un diseño verdaderamente tridimensional, en el que la parte conductora no desarrolla un circuito plano sino contenido en las tres dimensiones.

El conjunto de la unidad (Figura 2(d)) se compone de tres partes básicas, a saber: un elemento para albergar el arco conductor de la base inferior que es el elemento fijo del mecanismo (Figura 2(a)), otro elemento para albergar el arco conductor intermedio (Figura 2(b)), y finalmente la palanca de mando (Figura 2(c)). Estos tres elementos pueden imprimirse en 3D por separado y ser montados para formar un sistema de mando para dos grados de libertad independientes.

2.2. Fabricación del sensor

La fabricación del sistema fue realizada mediante impresión 3D multi-material por deposición de Hilo Fundido (*Fused Deposition Modeling*, FDM).

La impresora utilizada fue una BCN3D modelo Sigma R18 (BCN Three Dimensional Printers, Barcelona, España), que utiliza tecnología de extrusión dual independiente (Independent Dual Extruding technology, IDEX), en los laboratorios de la UPC-ETSEIB en Barcelona. La Tabla 1 resume los principales parámetros de impresión utilizados durante la fase de prototipado.



Figura 2: Diseño de los distintos elementos del sistema sensor. (a) Base inferior fija, (b) Elemento intermedio que rotará según el valor de la coordenada independiente ' ϕ ' sobre la base fija, (c) Palanca que rotará según el valor de la coordenada independiente ' θ ' sobre el elemento intermedio y (d) Conjunto ensamblado.

Tabla 1: Principales parámetros de impresión 3D utilizados

| Parámetro de procesado | Material conductor | Material estructural |
|-------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Temperatura de extrusión [°C] | 245 | 210 |
| Temperatura de la cama [°C] | 60 | 60 |
| Velocidad de impresión [mm/s] | 20 | 50 |
| Velocidad de retracción [mm/s] | 6 | 6 |
| Altura de capa [mm] | 0,2 | 0,2 |
| Número de paredes exteriores [núm.] | 2 | 2 |
| Densidad de relleno [%] | 100 | 20 |

Los materiales utilizados fueron filamentos de Ácido Poliláctico (PLA, 3DCPI Products and Solutions Global Company, Terrassa, España), en color blanco, para los cuerpos estructurales, y Poliuretano Técnico conductor (compuesto con base TPU, Filaflex, Recreus, Elda, España), en color negro, para los cuerpos conductores. Para conseguir el efecto de conductividad, el material con base TPU incorpora partículas de negro de carbón (*Carbon black filler*), composición que ha sido utilizada con éxito en impresión 3D multi-material de piezas electrónicas (Leigh, 2012), consiguiendo niveles relativamente altos de conductividad en los elementos impresos.

La Tabla 2 resume los principales parámetros de dichos materiales según consta en las fichas técnicas emitidas por la empresa fabricante.

Tabla 2: Principales parámetros físicos de los materiales utilizados

| Parámetro característico | Material conductor | Material estructural |
|--|--------------------|----------------------|
| Densidad del material [g/cm ³] | 1,35 | 1,24 |
| Elongación máxima [%] | N/A | 145 |
| Dureza [Shore A] | 92 | N/A |

Con estas condiciones, la Figura 3 muestra el proceso de fabricación del componente palanca, y la Figura 4 el conjunto real impreso una vez ensamblado.

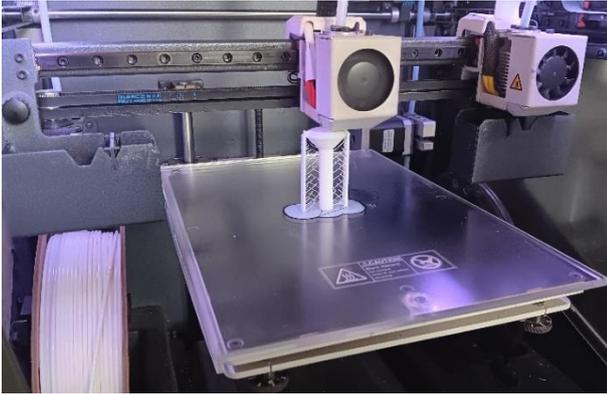


Figura 3: Fabricación del componente palanca mediante impresión 3D multi-material FDM.

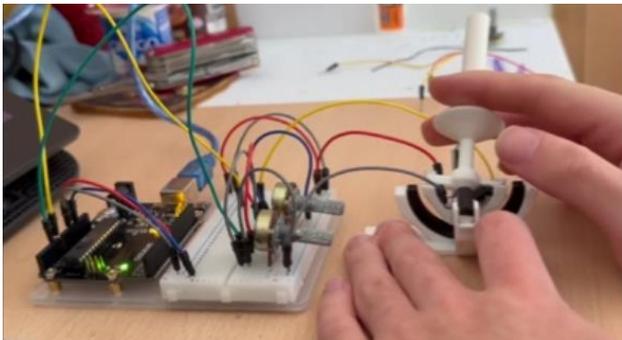


Figura 4: Conjunto real impreso en 3D. (a) Conjunto ensamblado, (b) conjunto conectado a un sistema de adquisición de datos.

Dado que el material conductor puede adoptar unas características de conductividad muy distintas en función de los parámetros de impresión seleccionados, se realizó una caracterización del material utilizado previa a la fase de experimentación.

Las pruebas consistieron en la medida de los valores de resistencia en probetas impresas con el mismo material y condiciones del estudio. La geometría de las probetas tuvo sección rectangular (6 mm x 4 mm), la cual coincide con la forma y área del diseño realizado en el dispositivo. Dicha área se extendió sobre un arco de circunferencia, y se realizaron cuatro diseños con longitudes principales de 1, 2, 3 y 4 cuartos de semicircunferencia (45°, 90°, 135° y 180°). Para cada una de ellas se midieron los valores de resistencia 10 veces analizando 2 réplicas en cada caso.

El resultado de dichas pruebas confirmó que la resistencia generada por el material presenta un comportamiento lineal dentro del rango de experimentación. Expresando el valor de la resistencia obtenida en función de la longitud del conductor, este se corresponde con los valores que arroja la recta de regresión (1):

$$R_{TPU} = 127,3 \cdot l_{COND} [\Omega]; \text{ con } R^2 = 94,7\% \quad (1)$$

Donde R_{TPU} es el valor de la resistencia medida en el conductor impreso en 3D y l_{COND} es la longitud de dicho conductor.

2.3. Fase de experimentación

Para llevar a cabo la fase de experimentación se construyó un banco de ensayo similar al realizado en (Minguella-Canela, 2023a), que en este caso consistió en un elemento palanca accionado mecánicamente mediante un motor eléctrico. Dicho motor fue capaz de realizar los movimientos alternativos simulando el giro de una de las articulaciones del mecanismo real (' θ ' o ' φ ') siendo comandado por un microcontrolador (Arduino UNO).

Por otro lado, el mismo dispositivo fue conectado para tomar las medidas realizando la conversión analógica a digital de la diferencia de potencial medida a una escala correspondiente a 10 bits (Figura 5).

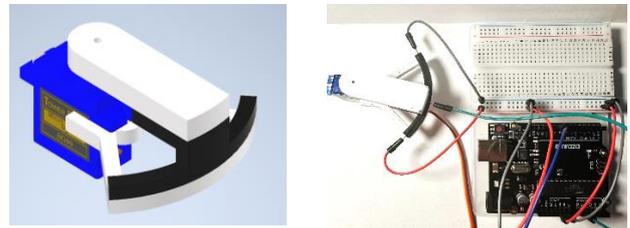


Figura 5: Dispositivo experimental. (a) Diseño del dispositivo, (b) Dispositivo real conectado a la toma de datos.

3. Experimentación y análisis de resultados

Los principales parámetros analizados en el presente estudio fueron la precisión y la repetibilidad de un prototipo de unidad sensora, así como su respuesta durante un uso

prolongado. Para todos ellos, la recogida de datos se realizó mediante el sistema presentado en el apartado 2.3.

En relación con la precisión del sistema, se analizó la variación de los valores de señal medida en función del ángulo de giro que fue tomando el sensor (θ). En relación con la repetibilidad, se analizó la dispersión de valores medidos para ciertos ángulos de giro del sensor (θ).

Finalmente, para evaluar el comportamiento en condiciones de uso continuado se analizó la evolución de los valores de señal medida a lo largo del tiempo a la vez que se monitorizaba la temperatura alcanzada por el sensor.

3.1. Precisión del sensor

Dado el dispositivo experimental se realizaron un total de 10 series de 5 repeticiones de un movimiento del ángulo girado θ correspondiente a 60° de amplitud. En este caso, y a diferencia de como se ha implementado en la palanca original, la posición equivalente a 0° corresponde la situación en que la longitud del circuito es mínima, y la posición de 60° corresponde a la situación en que la longitud del circuito conductor es máxima. Las señales obtenidas fueron condicionadas aplicando un filtro suavizado mediante media exponencial móvil (EMA).

Realizando dicha experimentación se pone de manifiesto que efectivamente la señal experimental medida realiza unas oscilaciones parecidas a una forma de diente de sierra que se va repitiendo a lo largo del tiempo, y que se corresponde con la variación del ángulo girado (Figura 6)

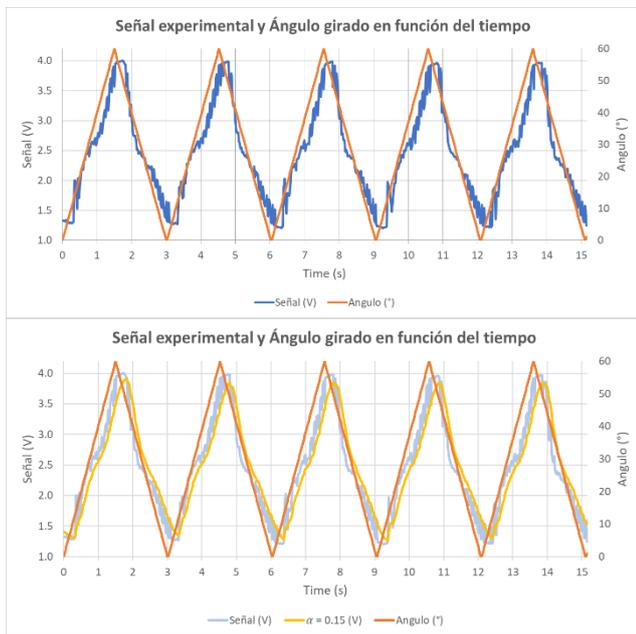


Figura 6: Señales medidas experimentalmente. (a) Señal de resistencia medida y ángulo girado en función del tiempo en una de las 10 series de repeticiones realizadas, (b) Misma señal condicionada con el filtro EMA.

La información presentada en la Tabla 3 se obtiene tomando los valores de resistencia medidos en las 10 series de 5 repeticiones para distintos ángulos girados tomados en intervalos de 5° y calculando un valor promedio en cada caso.

Realizando la regresión lineal de los valores de resistencia medidos (absolutos y en variación relativa) en función del

ángulo girado se pueden calcular las rectas de regresión que se muestran en la Figura 7 y que consiguen unos coeficientes de ajuste muy elevados ($R^2=98,1\%$ en ambos casos). Además, la variación de señal respecto al ángulo girado puede cuantificarse como $38,7 \text{ mV}/^\circ$ (pendiente de la recta azul).

Tabla 3: Principales resultados de precisión del sensor

| Ángulo girado [°] | Valor promedio de señal [mV] | Variación relativa [%] | Variación acumulada [%] |
|-------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0 | 1,324 | 0 | 0 |
| 5 | 1,329 | 0,36 | 0,36 |
| 10 | 1,413 | 6,39 | 6,75 |
| 15 | 1,637 | 16,92 | 23,67 |
| 20 | 1,749 | 8,46 | 32,13 |
| 25 | 2,059 | 23,39 | 55,52 |
| 30 | 2,229 | 12,86 | 68,38 |
| 35 | 2,374 | 10,92 | 79,30 |
| 40 | 2,588 | 16,21 | 95,51 |
| 45 | 2,920 | 25,09 | 120,60 |
| 50 | 3,176 | 19,30 | 139,90 |
| 55 | 3,355 | 13,54 | 153,44 |
| 60 | 3,358 | 0,22 | 153,66 |

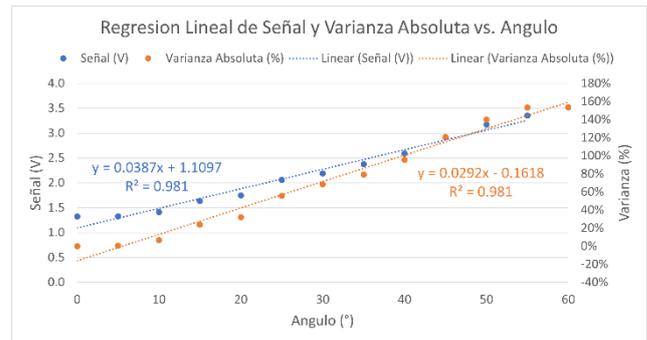


Figura 7: Valores promedio de señales medidas experimentalmente en función del ángulo girado (valores absolutos y relativos).

3.2. Repetibilidad del sensor

Para analizar la repetibilidad del sensor se decidió medir la dispersión de los 50 valores medidos en las posiciones de ángulos mínimo, central y extremo. El resultado de las medias y desviaciones estándar se presentan de forma numérica en la Tabla 4 y de forma gráfica en la Figura 8.

Tabla 4: Principales resultados de repetibilidad del sensor

| Ángulo [°] | Media [V] | Desviación estándar [V] |
|--------------|-----------|-------------------------|
| Mínimo (0) | 1,324 | 0,112 |
| Central (30) | 2,229 | 0,337 |
| Máximo (60) | 3,350 | 0,388 |

Por un lado, el análisis de la dispersión en cada caso muestra que se trata de valores suficientemente separados para no ser confundidos. Por otro lado, también se pone de manifiesto un aumento de la dispersión con la longitud del sistema medido (la desviación tipo se multiplica por más de 3 veces al pasar de la posición mínima de 0° hasta la posición más alejada correspondiente a 60°).

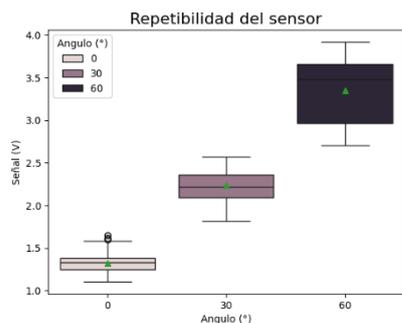


Figura 8: Repetibilidad de las medidas en tres ángulos de giro (mínimo, central y máximo).

3.3. Uso del sensor durante períodos continuados

El tercer parámetro analizado fue el comportamiento del sensor a lo largo de un período de uso ininterrumpido de 120 minutos. Dado que el funcionamiento del sensor está basado en una resistencia variable, el funcionamiento de éste se podría ver afectado si existieran variaciones de temperatura. Por tanto, además de tomar las medidas de la señal, a lo largo del tiempo de duración del ensayo también se monitorizaron los valores de temperatura añadiendo una sonda (UT123T, Uni-Trend Technology Co., Ltd., China) al dispositivo experimental. Se registraron medidas de señal del mismo modo que en los experimentos anteriores, y también mediciones de temperatura en intervalos de 10 minutos.

Respecto a las pruebas de variación de temperatura, no se detectó ninguna variación significativa a lo largo del tiempo de estudio (variación real inferior a 1 °C), y, por tanto, se descartó que este factor pueda tener un efecto importante en las medidas realizadas por el sensor incluso en períodos de tiempo superiores al del estudio.

Por otro lado, respecto a la evolución de la señal medida a lo largo del tiempo, se observó una ligera evolución ascendente en los valores máximos medidos en los puntos extremos en cada oscilación. Dicho cambio puede cuantificarse en un porcentaje del 5,26% entre los valores medidos en el instante cero y al final del ensayo, y se considera un cambio debido al desgaste de las superficies en contacto.

Por otra parte, la tasa de cambio se fue reduciendo a lo largo del tiempo de experimentación, siendo de un 2,63% en los primeros 30 minutos e inferior a un 1,32% en los últimos 60 minutos del estudio, por lo que se considera que la variación inicial se debió a una acomodación de superficies, y que después de completar el tiempo de estudio el sensor siguió siendo funcional.

4. Discusión y conclusiones

La prueba de concepto de diseño y fabricación del dispositivo pudo realizarse con éxito para una geometría verdaderamente tridimensional, lo cual confirma la factibilidad de poder implementar este tipo de dispositivos mediante impresión en 3D.

Respecto a la experimentación, las señales captadas logran seguir con éxito el movimiento del ángulo del mecanismo, especialmente después de ser filtradas con una EMA. En

cuanto a la repetibilidad, se pone de manifiesto una separación de valores suficiente como para no ser confundidos en tres posiciones (extremos y central). Sin embargo, se observa un aumento en la amplitud de la desviación tipo a medida que el circuito que debe ser recorrido es más largo. En cuanto a las prestaciones en uso continuado, la experimentación no muestra un cambio relevante en las medidas proporcionadas por el sensor ni tampoco un aumento destacado de la temperatura con el tiempo de uso.

La presente contribución acerca un poco más la posibilidad de diseñar y fabricar elementos resistivos impresos en 3D multi-material para comandar sistemas robóticos de forma efectiva.

Agradecimientos

Investigación parcialmente financiada por el proyecto PID2020-116091RB-I00 "Orthosis-Chair Hybrid Platform to make compatible Mobility, Functionality and Acceptability for application in domestic environments" (POSMOFYA) del Ministerio de Ciencia e Innovación. El autor Joaquim Minguella-Canela es profesor Lector Serra Húnter.

Referencias

- Bao, C.; Seol, S.K.; Kim, W.S. A 2021. 3D integrated neuromorphic chemical sensing system. *Sens. Actuators B Chem.* 332, 129527. DOI: 10.1016/j.snb.2021.129527
- Bas, J., Dutta, T., Llamas Garro, I., Velázquez-González, J.S., Dubey, R., Mishra, S.K., 2024. Embedded Sensors with 3D Printing Technology: Review. *Sensors*, 24(6), 1955; DOI: 10.3390/s24061955
- Christina, S.; Deepak, M.K., 2018. Stereolithography. In *3D Printing*; Dragan, C., Ed.; IntechOpen: Rijeka, Croatia, 1–22.
- Dijkshoorn, A.; Werkman, P.; Welleweerd, M.; Wolterink, G.; Eijking, B.; Delamare, J.; Sanders, R.; Krijnen, G.J., 2018. Embedded sensing: Integrating sensors in 3-D printed structures. *J. Sens. Sens. Syst.* 2018, 7, 169–181. DOI: 10.5194/jsss-7-169-2018
- Gooding, J.; Fields, T., 2017, 3d printed strain gauge geometry and orientation for embedded sensing. *Proc of 58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Struct Dynamics, and Mat Conf.*, Grapevine, TX, USA, 0350.
- Emon, M.O.F, Choi, J.-W. Flexible Piezoresistive Sensors Embedded in 3D Printed Tires, 2017, *Sensors*, 17, 656. DOI: 10.3390/s17030656
- Hassan, M.S., Chavez, L.A., Chou, C-C., Hall, S.E., Tseng, T.-L., Lin, Y., 2021. Mechanical response of shape-recovering metamaterial structures fabricated by additive manufacturing. *Mater. Res. Express* 8, 115801. DOI: 10.1088/2053-1591/ac343f
- Leigh, S.J., Bradley, R.J., Purcell, C.P., Billson D.R., Hutchins, A., 2012 A simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D printing of Electronic Sensors, *PLoS ONE* 7 (11) e49365. DOI: 10.1371/journal.pone.0049365
- Minguella-Canela, J., Rabassa Manzano, J., Buj Corral, I., 2023a. Development of a Test Bench for the Experimentation of the Electrical Performance of 3D Printed Multi-Material Parts. 10th MESIC, Seville, Spain. DOI: 10.4028/p-w0Vpah
- Minguella-Canela, J. Tegas, N., Amat, J., Casals, A., 2023b. Multi-material 3D printing, alternative for designing components in robotic systems. *A Jornadas de Rob. y Bioingeniería*, Zaragoza, España.
- Roland, T., Wimberger, K., Ammsuess, S., Russold, M.F., Baumgartner, W., 2019, An insulated flexible sensor for stable electromyography detection: Application to prosthesis control. *Sensors*, 19, 961, DOI:10.3390/s19040961
- Stoll, P.; Gasparin, E.; Spierings, A.; Wegener, K. 2021. Embedding eddy current sensors into LPBF components for structural health monitoring. *Prog. Addit. Manuf.*, 6, 445–453.