

Exploración de materiales plegables inspirados en el origami para aplicaciones de robótica

Jose D. Yanez, Wbeimar Vega

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electrónico.

Director

Diego Fernando Becerra Ramirez

Magister en educación

Codirectora

Mónica Andrea Botero Londoño

Doctora en Ciencias - Física, Energía Solar Fotovoltaica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

E3T

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2025

Tabla de contenido

Introducción.....	10
1. Objetivo general.....	13
1.1 Objetivo general.....	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
2. Justificación.....	13
3. Marco teórico.....	16
3.1 Robótica flexible.....	16
3.2 Principio del origami.....	17
3.2.2 Conceptos básicos.....	17
3.3 Técnicas de generación de movimiento.....	18
3.3.1 Calentamiento por inducción electromagnética.....	18
3.3.2 Actuadores neumáticos o hidráulicos.....	18
3.3.3 Actuadores controlados por cables.....	18
3.4 Estudio de mercado.....	19
3.4.1. Materiales que responden a estímulos magnéticos o eléctricos.....	19
3.4.2. Materiales termosensibles y maleables.....	20
4. Desarrollo de la solución.....	21
4.1 Comparativa de técnicas que permitan inducir movimiento.....	21
4.2 Comparativa de materiales.....	23

4.3 Selección de materiales.....	23
4.3.1 Material conductor.....	23
4.3.2 Material Flexible.....	26
4.4 Pruebas de laboratorio.....	28
4.4.1 Estructura del dispositivo robótico de origami.....	28
4.4.2 Selección de sistema de calentamiento por inducción.....	29
4.4.3 Movimiento del dispositivo robótico de origami.....	33
4.4.3.1 Pruebas sin carga.....	34
4.4.3.2 Pruebas con carga.....	35
5. Metodología.....	48
5.1 Diseño del estudio.....	48
5.2 Selección de materiales para la construcción del dispositivo se consideran dos tipos de materiales principales:.....	49
5.2.1 Materiales conductores.....	49
5.2.2 Materiales flexibles.....	49
5.2.3 Adhesivos térmicos.....	49
5.3 Construcción del prototipo.....	49
5.3.1 Diseño estructural.....	50
5.3.2 Integración de los materiales conductores.....	50
5.3.3 Implementación del sistema de calentamiento.....	50
5.4 Procedimiento experimental.....	50

5.4.1 Caracterización de materiales.....	50
5.4.2 Pruebas de calentamiento.....	50
5.4.3 Evaluación del plegado.....	50
5.4.4 Uso de materiales con memoria de forma.....	51
Conclusiones.....	51
Aspectos a mejorar.....	52
Referencias.....	54

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Forma deseada del dispositivo robótico de origami.....	29
Figura 2. Sistema de calentamiento por inducción ZVS.....	31
Figura 3. Esquema del Circuito ZVS.....	32
Figura 4. Estructura del dispositivo robótico compuesto por polipropileno y cinta de cobre...	35
Figura 5. Estructura del dispositivo robótico compuesto por polipropileno y níquel.....	36
Figura 6. Proceso de medición de temperaturas en los materiales usando la pinza amperimétrica.....	39
Figura 7. Evolución de la temperatura en el cobre y mediciones de la bisagra del dispositivo robótico de cobre y polipropileno.....	40
Figura 8. Evolución de la temperatura en el cobre y mediciones de la bisagra del dispositivo robótico de níquel y polipropileno.....	40
Figura 9 . Estructura del dispositivo robótico compuesto por polipropileno y níquel con recubrimiento de cobre.....	42
Figura 10. Evolución de la temperatura en el níquel y cobre.....	43
Figura 11. Estructura del dispositivo robótico compuesto por material 4d y níquel con recubrimiento de cobre.....	44
Figura 12. Material 4d impreso.....	45
Figura 13. Estructura del dispositivo robótico compuesto por material 4d y níquel con recubrimiento de cobre.....	46
Figura 14. Ciclo de plegado del dispositivo compuesto por material 4d y níquel con recubrimiento de cobre como material conductor.....	47
Figura 15. Ciclo de plegado del dispositivo compuesto por material 4d y níquel con recubrimiento de cobre como material conductor.....	47

Lista de tablas

	Pág
Tabla 1. Comparativa entre métodos de calentamiento.....	21
Tabla 2. Propiedades de materiales conductores.....	25
Tabla 3. Propiedades de materiales flexibles.....	26
Tabla 4. Comportamiento del sistema ZVS para diferentes casos.....	38

Lista de Apéndices

(Los apéndices pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS)

Apéndice A. Datos de las gráficas de temperatura.

Apéndice B. Proceso de calentamiento y deformación del dispositivo.

Apéndice C. Pliegue del dispositivo con material 4D.

Apéndice D. Despliegue del dispositivo con material 4D.

Apéndice E. Toma de datos de temperatura en el cobre.

Apéndice F. Toma de datos de temperatura en la bisagra cobre.

Apéndice G. Toma de datos de temperatura en el níquel.

Apéndice H. Toma de datos de temperatura en la bisagra níquel.

Apéndice I. Toma de datos de temperatura en el cobre-níquel.

Apéndice J. Toma de datos de temperatura en la bisagra de cobre-níquel.

Resumen

Título: Exploración de materiales plegables inspirados en el origami para aplicaciones de robótica *

Autor: Jose David Yanez Silva y Wbeimar Vega Barajas **

Palabras clave: origami, materiales plegables, robótica flexible, calentamiento por inducción, memoria de forma.

Este estudio desarrolla una metodología para el plegado autónomo de materiales, considerando su selección, caracterización y respuesta a estímulos térmicos y magnéticos. Se empleó el calentamiento por inducción electromagnética para evaluar la interacción de materiales como cobre, níquel y polímeros flexibles. La combinación de níquel como generador de calor y cobre como conductor térmico optimizó el plegado del material flexible. Los resultados evidencian la viabilidad del método propuesto, en cuanto a la autonomía de dispositivos basados en origami. Además, sienta las bases para futuras investigaciones sobre estructuras programables con capacidad de auto-ensamblaje y reconfiguración.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Ingeniería Electrónica. Director: Diego Fernando Becerra Ramírez. Magister en Educación. Codirector: Mónica Andrea Botero Londoño Doctora en Ciencias - Física, Energía Solar Fotovoltaica.

Abstract**Title:** Exploration of Origami-Inspired Foldable Materials for Robotics Applications***Author:** Jose David Yanez Silva and Wbeimar Vega Barajas****Keywords:** origami, foldable materials, flexible robotics, induction heating, shape memory.

This study develops a methodology for the autonomous folding of materials, considering their selection, characterization, and response to thermal and magnetic stimuli. Electromagnetic induction heating was employed to evaluate the interaction of materials such as copper, nickel, and flexible polymers. The combination of nickel as a heat generator and copper as a thermal conductor optimized the folding of the flexible material. The results demonstrate the viability of the proposed method for the autonomy of origami-based devices. Furthermore, this work lays the foundation for future research on programmable structures with self-assembly and reconfiguration capabilities.

* Degree Work

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering. Electronic Engineering. Director: Diego Fernando Becerra Ramirez. Master of Education. Co-director: Mónica Andrea Botero Londoño. Doctor of Science - Physics, Photovoltaic Solar Energy.

Introducción

A lo largo de la historia, el arte del origami ha encantado a la humanidad con su gracia y simplicidad. Sin embargo, su influencia trasciende la mera expresión artística; ha desencadenado una revolución discreta pero impactante en el ámbito de la ingeniería. En particular, ha inspirado el diseño de dispositivos y robots que se pliegan automáticamente, desafiando nuestras concepciones tradicionales de la tecnología (Qué son los robots origami y cómo un nuevo y extraordinario material los hace flexibles - BBC News Mundo, 2019). En este contexto, el término 'plegado autónomo' se refiere a que el material se pliega por sí solo sin necesidad de actuadores mecánicos, motores o sistemas de control externo.

Imagina un mundo donde los dispositivos electrónicos ya no son estáticos y rígidos, sino flexibles y adaptables. Un teléfono móvil que se dobla según tus necesidades cambiantes, o una computadora portátil que se transforma en una elegante pulsera cuando ya no la necesitas. Estas no son meras fantasías de la ciencia ficción, sino visiones palpables del futuro que podrían revolucionar nuestra interacción con la tecnología en la vida cotidiana. En este emocionante panorama, la investigación liderada por el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) emerge como un faro de innovación. Explora el vasto potencial de los materiales flexibles y adaptables, abriendo un horizonte de posibilidades que desafían los límites de lo que consideramos posible en la tecnología moderna.

Actualmente, la búsqueda de materiales innovadores que puedan ofrecer flexibilidad y capacidad de plegado controlado, ha cobrado una relevancia significativa. En este sentido, el arte del origami, con sus principios geométricos y estructurales, ha despertado un interés creciente en la comunidad científica como fuente de inspiración para el diseño de materiales (Onal et al., 2015). La exploración de materiales plegables inspirados en el origami está ganando relevancia

en el mundo de la ingeniería, ya que "estos permiten la creación de estructuras robóticas o dispositivos que pueden plegarse y desplegarse de manera controlada" (Rus & Tolley, 2018), además de ofrecer una plataforma versátil para integrar componentes electrónicos y sensores en diversas aplicaciones.

De manera global, se ha generado la necesidad de investigar materiales innovadores que permitan el diseño de dispositivos más versátiles y con un mejor rendimiento en diversas aplicaciones. Este problema se deriva de una serie de causas interrelacionadas que influyen en el diseño y la funcionalidad de los robots en el ámbito de la robótica flexible y adaptable. Una de las causas fundamentales es la limitación de los materiales convencionales en términos de flexibilidad y compatibilidad. Como menciona Yan et al. (2023), "existen pocos materiales que pueden ser adecuados para aplicaciones robóticas que requieren movimientos complejos y adaptativos, lo que limita su potencial en entornos dinámicos y cambiantes" (p. 2). Además, el problema incluye la necesidad de desarrollar dispositivos que puedan plegarse y desplegarse de manera controlada y realizar una variedad de tareas con eficiencia y precisión.

Los materiales con memoria de forma, como algunos polímeros, poseen la capacidad de deformarse con ayuda de algún estímulo externo como campos eléctricos o magnéticos, luego de un tiempo cuando el estímulo externo desaparece, pueden volver a su forma original. Debido a esto se destacan algunas aplicaciones para este tipo de materiales inteligentes, tales como lo son músculos artificiales, paneles solares o armazones desplegable (Dayyoub et al., 2022, pp. 1-3). Además, se están explorando otras aplicaciones prometedoras en áreas como la medicina y la robótica, aprovechando la capacidad de estos materiales para cambiar de forma de manera controlada y reversible. Por otra parte, estudios previos sobre robots de origami han demostrado el potencial de combinar el plegado con materiales inteligentes para crear dispositivos

avanzados. Como señalan Rus y Tolley (2018), "Ingenieros del MIT han comenzado a explorar el plegado de origami en combinación con actuadores de materiales inteligentes para permitir la actuación intrínseca" (p. 1), lo que simplifica el diseño y la fabricación de robots complejos. Se destaca el potencial de los robots origami para mejorar la eficiencia y flexibilidad de la fabricación, así como su capacidad para personalizar dispositivos robóticos. En este contexto, El Grupo GISEL se posiciona como un actor fundamental en la investigación y desarrollo de materiales para la electrónica y la ingeniería eléctrica. Sin embargo, avanzar en esta área requiere más que conocimientos y experiencia; es necesario contar con una metodología para caracterizar estos materiales innovadores. En este sentido, el grupo GISEL se enfrenta al desafío de desarrollar una metodología efectiva que permita comprender y evaluar las propiedades de los materiales plegables inspirados en el origami, con aplicaciones prácticas en el ámbito eléctrico y electrónico.

Este enfoque sienta las bases para futuras investigaciones y aplicaciones en el campo de la tecnología adaptativa. A medida que esta investigación avance, se espera que su impacto vaya más allá de la ciencia y la tecnología, cambiando la forma en que se construye nuestro mundo. Para los agentes interesados en materiales flexibles y plegables, esta propuesta es una oportunidad emocionante para invertir y colaborar en nuevas ideas. Desde dispositivos electrónicos más adaptables hasta robots más versátiles, los materiales plegables inspirados en el origami jugarán un papel importante en la próxima generación de tecnología. Con los resultados de este proyecto, el grupo GISEL está listo para liderar un nuevo enfoque en la ingeniería y la electrónica, donde la flexibilidad y la adaptabilidad sean fundamentales.

1. Objetivo general

1.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología para el plegado autónomo de materiales, mediante la selección, adquisición y caracterización electrónica de un material comercialmente disponible.

1.2 Objetivos específicos

Investigar técnicas que permitan inducir el movimiento mediante campos magnéticos o eléctricos de los materiales de manera controlada y eficiente.

Identificar diferentes tipos de materiales comerciales que posean propiedades tales como plegado autónomo, flexibilidad o memoria de forma.

Seleccionar el material comercial ideal que combine propiedades de plegado, utilizando técnicas de movimiento controlado, teniendo en cuenta su asequibilidad.

Realizar pruebas de laboratorio que permitan caracterizar el material elegido y su capacidad para generar movimiento.

Desarrollar una metodología para el plegado del material basada en los resultados anteriores, teniendo en cuenta patrones de origami.

2. Justificación

El Grupo GISEL está inmerso en una búsqueda innovadora en el ámbito de la ingeniería eléctrica y electrónica. Como parte de su compromiso con la investigación de materiales, se ha reconocido la necesidad de una metodología para caracterizar materiales que se pliegan por sí solos. La relevancia de esta investigación no se limita únicamente a los intereses de GISEL, sino que se extiende a toda la industria global de la tecnología electrónica. La capacidad de crear dispositivos electrónicos que se plieguen de manera autónoma tiene el potencial de revolucionar el panorama tecnológico, permitiendo la creación de dispositivos más adaptables y versátiles.

El uso de materiales flexibles en el área de la tecnología presenta limitaciones en términos de durabilidad, conductividad, compatibilidad con procesos de fabricación, costos y compatibilidad con otros componentes. A pesar de estas limitaciones, varios campos de la ingeniería, como la electrónica portátil, los dispositivos médicos y los sistemas de energía flexible, se benefician significativamente de su uso debido a su capacidad para adaptarse a formas y superficies curvas. Sin embargo, el estudio y desarrollo de estos materiales pueden enfrentar desafíos económicos debido a los costos de producción más altos en comparación con los materiales conductores rígidos tradicionales, lo que puede influir en su adopción en ciertas aplicaciones. Según los datos analizados, se identificaron patrones relacionados con la demanda de dispositivos más ligeros y flexibles, así como necesidades de mejorar la durabilidad y estabilidad de los materiales. Se encontraron oportunidades en aplicaciones médicas y sistemas de energía flexible, pero también desafíos en la fabricación y la mejora de la conductividad. Por parte del grupo GISEL, se observa que abordar este tema de interés permite abrir una puerta a nuevas investigaciones relacionadas a dispositivos flexibles, los cuales posean capacidades de plegado autónomo.

La exploración de la problemática se llevó a cabo a través de una revisión exhaustiva de la literatura como artículos relacionados con la investigación de materiales con memoria de forma y autoplegables, consultas con expertos en el campo y el análisis de los desafíos actuales en la industria. Se investigaron las limitaciones de los materiales existentes para aplicaciones autoplegables, así como los métodos de inducción de movimiento en materiales. Se identificaron varias causas subyacentes, como la falta de flexibilidad y durabilidad en los materiales actuales, la dificultad para controlar el movimiento de los dispositivos autoplegables, y los altos costos de producción. Con esta información, el proyecto propone un enfoque para seleccionar y

caracterizar un material comercialmente disponible que pueda abordar estas limitaciones, permitiendo avanzar hacia la solución del problema y contribuir al desarrollo de dispositivos autoplegables más eficientes y funcionales.

La investigación sobre materiales flexibles y autoplegables ha revelado una variedad de opciones prometedoras para el desarrollo de dispositivos inspirados en el origami y sistemas robóticos avanzados. Entre los materiales más destacados se encuentran los metamateriales, que se pueden diseñar para responder de manera específica a estímulos externos (Castellanos et al., 2016, p. 399); Los materiales inteligentes, como los polímeros de memoria de forma y electroactivos, y el nitinol, que "recupera su forma... cuando se le aplica calor" (Duerig, Pelton & Stoeckel, 1999, p. 5), pueden cambiar de forma en respuesta a estímulos y luego recuperar su estado original. Esta capacidad los hace ideales para aplicaciones médicas, como los stents autoexpandibles, que se despliegan al alcanzar la temperatura corporal, mejorando así la eficacia y seguridad de los procedimientos médicos.

Además de la variedad de materiales flexibles, se han identificado diversas técnicas de inducción de movimiento en los materiales. Entre estas técnicas se encuentran el uso de campos eléctricos y magnéticos, las cuales permiten gestionar los cambios de forma y el plegado autónomo de los materiales, lo que facilita su integración en aplicaciones de robótica móvil, manipulación y exploración. Las técnicas de control precisas abren nuevas posibilidades para el diseño de dispositivos autoplegables que pueden operar en entornos cambiantes y realizar tareas con eficiencia.

El estudio de estos materiales abarca un amplio espectro de aplicaciones innovadoras, desde la creación de dispositivos controlados por microcontroladores para gestionar su movimiento, hasta la utilización de materiales sensibles a cambios ambientales que se pliegan

siguiendo patrones de origami predefinidos. También se considera la adquisición de materiales con movimientos básicos, pero capaces de resistir condiciones extremas, para su implementación en equipos de rescate. Además, se destaca la prometedora área de la impresión 3D, explorando materiales flexibles y conductores que podrían integrarse con técnicas de autoplegado para un desarrollo más eficiente. Estas propuestas reflejan un enfoque visionario hacia la integración de la tecnología en diversas áreas, desde la robótica hasta la ingeniería de materiales.

Al momento de escoger la mejor solución, se tuvo en cuenta diferentes factores como la asequibilidad del material, ya que es de suma importancia poder adquirirlo para así hacer la caracterización pertinente; el método para generar movimiento en el material, destacando así que este se debe dar por medio de campos magnéticos o eléctricos y finalmente la viabilidad para poder desarrollar los diferentes objetivos en un tiempo pertinente.

3. Marco teórico

3.1 Robótica flexible

La robótica flexible se centra en el diseño y desarrollo de dispositivos capaces de cambiar de forma mediante materiales y estructuras flexibles. Esta flexibilidad les permite adaptarse a entornos complejos e impredecibles, realizar tareas delicadas o acceder a lugares difíciles de alcanzar para los sistemas rígidos tradicionales. A diferencia de los mecanismos convencionales con articulaciones y motores, estos dispositivos aprovechan las propiedades físicas de los materiales para generar movimiento sin necesidad de actuadores mecánicos. El desarrollo de esta robótica flexible está impulsado por los avances en materiales inteligentes, actuadores flexibles y técnicas de fabricación, y tiene aplicaciones potenciales en una variedad de campos, incluyendo la medicina, la industria, la exploración espacial y la asistencia en desastres. (Miyashita et al., 2017, p. 1).

3.2 Principio del origami

El origami es una técnica tradicional japonesa de plegado de papel que ha evolucionado más allá de una simple forma de arte, siendo aplicada actualmente en áreas como la ingeniería, medicina y educación, debido a su capacidad para generar formas geométricas complejas a partir de simples pliegues (Becerra Ramírez, 2021, pp. 15).

3.2.2 Conceptos básicos

Los tipos básicos de pliegues en origami son el pliegue de montaña y el pliegue de valle. El pliegue en valle dobla el papel hacia arriba, formando una "V", mientras que el pliegue en montaña dobla el papel hacia abajo (Becerra Ramírez, 2021, pp. 33).

Cada doblez, ya sea valle o montaña, queda plasmado en un patrón de doblado (CP) que sirve como mapa para el plegado final. No obstante, no todos los CPs son viables; la doblabilidad se rige por tres condiciones: la colorabilidad (dos colores sin que áreas adyacentes compartan el mismo), el teorema de Kawasaki (la suma de ángulos impares en un vértice debe ser 180°) y el teorema de Maekawa (el número de pliegues valle y montaña en un vértice difiere en ± 2 si la suma alternada de los ángulos es 0) (Becerra Ramírez, 2021, pp. 15-16).

La comprensión de los conceptos básicos en el origami, es esencial para diseñar estructuras con capacidad de movimiento controlado. Estos conceptos permiten la creación de patrones geométricos que, cuando se integran en dispositivos robóticos, ofrecen una base sólida para el movimiento autónomo y adaptable. Por lo tanto, es crucial trasladar esta flexibilidad y precisión del origami a sistemas mecánicos, utilizando materiales que puedan replicar estos movimientos mediante estímulos externos.

3.3 Técnicas de generación de movimiento

3.3.1 Calentamiento por inducción electromagnética

El calentamiento por inducción electromagnética es una técnica ampliamente utilizada para generar movimiento en dispositivos autoplegables. En este método, dos placas metálicas se calientan al someterse a un campo electromagnético, transfiriendo el calor a un material termosensible que cambia de forma según patrones de origami preprogramados. Este enfoque fue presentado en el artículo "Origami Robot Self-folding by Magnetic Induction" (Liu et al., 2022, pp. 2519-2521), donde se destaca su capacidad para lograr autoplegado de forma inalámbrica y sin la necesidad de componentes electrónicos embebidos. Esto permite su funcionamiento en entornos confinados, lo que lo hace ideal para aplicaciones en áreas de difícil acceso (Liu et al., 2022, p. 2522).

3.3.2 Actuadores neumáticos o hidráulicos

Estos métodos utilizan fluidos presurizados para inflar o desinflar cámaras flexibles, lo que genera movimiento en la estructura del robot. Aunque son capaces de generar grandes desplazamientos, requieren sistemas de bombeo y tuberías externas, lo que limita su autonomía y miniaturización (Shepherd et al., 2011, pp. 3).

3.3.3 Actuadores controlados por cables

Una técnica ampliamente utilizada en robots basados en origami es el uso de actuadores de cables para plegar y extender las estructuras robóticas. Esta técnica permite un control preciso del movimiento y es energéticamente eficiente. Por ejemplo, en el artículo "Quadrupedal robot with tendon-driven origami legs", se discuten las ventajas de esta técnica en términos de durabilidad y rapidez en los ciclos de movimiento (Kim et al., 2024, p. 3).

3.4 Estudio de mercado

3.4.1. Materiales que respondan a estímulos magnéticos o eléctricos

El cobre es uno de los mejores conductores eléctricos y térmicos, lo que lo convierte en una opción ideal para la inducción magnética. Su maleabilidad y disponibilidad lo hacen ampliamente utilizado en aplicaciones industriales y robóticas (Biesuz et al., 2021, pp. 242-243).

El aluminio aunque tiene una conductividad ligeramente inferior al cobre, es significativamente más ligero, lo que lo hace adecuado en aplicaciones donde el peso es un factor crítico (Biesuz et al., 2021, p. 243).

El latón es una aleación de cobre y zinc, la cual combina una buena conductividad con resistencia a la corrosión, lo que la hace útil en ambientes húmedos o con presencia de agentes corrosivos (Biesuz et al., 2021, p. 243).

El acero inoxidable, aunque tiene una menor conductividad, su durabilidad y resistencia a la corrosión lo convierten en una opción atractiva para aplicaciones que requieren robustez y resistencia al desgaste (Biesuz et al., 2021, pp. 243-244).

El níquel puro tiene una buena permeabilidad magnética, lo que significa que se magnetiza fácilmente en presencia de un campo magnético. Esto lo hace adecuado para el calentamiento por inducción, ya que permite una buena transferencia de energía desde la bobina al material. Además, el níquel tiene una excelente resistencia a la corrosión y oxidación, incluso a altas temperaturas (Rudnev et al., 2017, p. 140).

3.4.2. Materiales termosensibles y maleables

El uso de materiales termosensibles es fundamental para lograr el movimiento en dispositivos que requieren cambios de forma controlada. Algunos de los materiales más comunes incluyen lo siguiente:

Polímeros con memoria de forma (SMP): Entre ellos destacan los poliuretanos termoplásticos (TPU), que son biocompatibles, flexibles y tienen un amplio rango de temperaturas de transición. Estos materiales se pueden programar para contraerse o expandirse cuando se calientan, lo que los convierte en ideales para aplicaciones en robótica flexible (Rus & Tolley, 2018, p. 105).

PVC termo-responsivo: Este material se utiliza comúnmente en sistemas robóticos inspirados en origami debido a su capacidad para contraerse cuando se calienta. Sin embargo, su capacidad de recuperación a la forma original no siempre es clara (Liu et al., 2022, p. 2).

Aleaciones con memoria de forma (SMA): Materiales como el Nitinol son ampliamente utilizados debido a su alta fuerza de recuperación y resistencia a la fatiga. Aunque son más costosos, son muy efectivos en aplicaciones que requieren movimientos precisos y repetitivos (Rus & Tolley, 2018, p. 105).

Polímeros electroactivos (EAP) : Materiales como los polímeros piezoeléctricos, pueden deformarse en respuesta a un campo eléctrico. Aunque ofrecen una respuesta rápida y precisa, requieren altos voltajes para su activación, y la deformación que generan tiende a ser limitada (Bar-Cohen, 2001, p. 14).

4. Desarrollo de la solución

4.1 Comparativa de técnicas que permitan inducir movimiento.

El movimiento es la esencia de la robótica. La capacidad de un dispositivo robótico depende de la eficiencia y precisión de sus mecanismos de inducción de movimiento. Existen diversas técnicas para lograr este objetivo, cada una con sus propios principios y aplicaciones. En este contexto, se analizan tres técnicas que permiten inducir movimiento en robots: Calentamiento por inducción electromagnética, Actuadores neumáticos o hidráulicos y Actuadores controlados por cables.

Tabla 1.

Comparativa entre métodos de calentamiento.

Método	Ventajas	Desventajas
Calentamiento por inducción	<ul style="list-style-type: none"> ● Permite lograr el autoplegado de manera inalámbrica, evitando el uso de actuadores mecánicos. ● Ideal para aplicaciones en áreas de difícil acceso donde el espacio es limitado. ● Permite generar movimientos precisos siguiendo patrones preprogramados de origami. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Requiere un equipo especializado para generar estos campos. ● Aunque inalámbrico, el sistema puede requerir bobinas externas grandes. ● Requiere el uso de materiales específicos que respondan al calor de forma predecible.

Actuadores neumáticos o hidráulicos	<ul style="list-style-type: none"> ● Pueden producir movimientos amplios en estructuras robóticas. ● Es ideal para tareas que requieren alta capacidad de carga o deformación significativa. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Requieren bombas y tuberías externas, lo que limita su autonomía. ● La necesidad de sistemas de fluido aumenta la complejidad del diseño. ● No es ideal para aplicaciones donde el espacio o el peso son críticos.
<hr/>		
Actuadores controlados por cables	<ul style="list-style-type: none"> ● Permiten un control exacto en el plegado y extensión de las estructuras. ● Requieren menos energía en comparación con métodos neumáticos o hidráulicos. ● Son ideales para ciclos rápidos de plegado y despliegue. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Se necesita un montaje bien diseñado para evitar errores. ● Los cables deben ser lo suficientemente resistentes para soportar las tensiones sin deformarse. ● No son ideales para materiales poco robustos.

Para lograr un movimiento autónomo en robots origami, considerando factores como la facilidad de implementación, el tamaño, el tiempo de desarrollo y la adaptabilidad a patrones de origami, el calentamiento por inducción electromagnética se presenta como la opción ideal.

Esta técnica, al inducir el plegado mediante campos electromagnéticos, elimina la necesidad de actuadores mecánicos voluminosos y permite un diseño más compacto y ligero, al no requerir un equipo complejo es ideal para laboratorios pequeños, optimizando espacio y facilitando su implementación. Además, su capacidad de autoplegado inalámbrico facilita la implementación de patrones de origami complejos, promoviendo la autonomía del robot y la adaptabilidad a diversas tareas.

Si bien existen desafíos en cuanto al control preciso de la temperatura y la eficiencia energética, las ventajas en términos de miniaturización, autonomía y versatilidad hacen del calentamiento por inducción electromagnética una solución prometedora para el desarrollo de robots origami autónomos.

4.2 Comparativa de materiales.

Con la elección del calentamiento por inducción electromagnética como método para generar movimiento, y tomando como base el estudio presentado en "*Origami Robot Self-folding by Magnetic Induction*", es necesario contar con dos tipos de materiales que posean características específicas.

Primeramente, un material conductor que genere calor eficientemente al ser expuesto a un campo electromagnético, asegurando así la transmisión de energía para la activación del movimiento. En segundo lugar, un material flexible, que se deforme de manera controlada con el calor transmitido por el material conductor, permitiendo así el plegado del robot.

La correcta selección de ambos materiales, considerando su compatibilidad e idoneidad para la aplicación específica, será fundamental para el desarrollo de un robot origami autónomo, preciso y eficiente.

4.3 Selección de materiales

4.3.1 Material conductor

El calentamiento por inducción electromagnética utiliza las leyes de Ampere, Faraday y el efecto Joule para modelar el proceso. Este método requiere la generación de un campo magnético intenso y variable en el tiempo, que induce corrientes de Foucault en el material

conductor. Estas corrientes generan la disipación de potencia necesaria para incrementar la temperatura de la pieza sometida al campo magnético (Acevedo Picón et al., 2007, p. 70).

Las corrientes de Foucault son corrientes eléctricas inducidas dentro de un material conductor cuando este se expone a un campo magnético variable. Este fenómeno, predicho por las leyes de Faraday y Lenz, ocurre porque el campo magnético cambiante provoca una fuerza electromotriz en el material conductor, lo que impulsa a los electrones a moverse en circuitos cerrados. Estas corrientes circulan dentro del volumen del material, a diferencia de las corrientes que fluyen a través de cables. (Zinn, S. et al., 1988, p.2-13).

El calentamiento por inducción se basa en las propiedades físicas del material conductor colocado dentro del solenoide. La resistividad eléctrica (ρ), la permeabilidad magnética (μ) y la conductividad eléctrica son factores clave que determinan la generación de calor, ya que estas propiedades influyen directamente en las corrientes de Foucault, responsables de la disipación de potencia y el incremento de temperatura en la pieza (Acevedo Picón et al., 2007, p. 70).

Además, la profundidad de penetración (δ) de las corrientes inducidas está directamente relacionada con ρ , μ y la frecuencia del campo aplicado (f), según la expresión:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (1)$$

donde $\omega=2\pi f$. A frecuencias más altas, el calentamiento se concentra en las capas superficiales del material, maximizando la eficiencia del efecto piel. Este fenómeno resalta la importancia de ajustar correctamente la frecuencia y las propiedades del material para optimizar el proceso (Rudnev et al., 2017, p. 62).

En el marco de este proyecto y considerando los principios del calentamiento por inducción electromagnética descritos previamente, se proponen diferentes materiales como opciones para utilizarse como medio de calentamiento, los cuales se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2.

Propiedades de materiales conductores.

Material	Resistividad a temperatura ambiente $\Omega \text{ m}$	Conductividad eléctrica S/m	Permeabilidad magnética H/m	Disponibilidad	Precio
Acero inoxidable	7.2×10^{-7}	3×10^6	1.38×10^{-6}	Lámina delgada	A disposición del fabricante
Níquel	7.8×10^{-7}	1.4×10^7	0.0175 - 0.1625	Lámina delgada	
Cobre	1.68×10^{-8}	59.6×10^6	1.256×10^{-5}	Cinta delgada	
Latón	5×10^{-8}	1.58×10^7	1	Lámina delgada	
Grafito	3.5×10^{-5}	1×10^6	0.9996	Lámina delgada	

A partir de estos datos, se seleccionaron el níquel y el cobre como materiales conductores para la generación de calor. Esta elección se fundamenta en las propiedades físicas de ambos metales, las cuales influyen directamente en la eficiencia del proceso de calentamiento.

El níquel, al ser un material ferromagnético, presenta una alta permeabilidad magnética (μ) y resistividad (ρ), lo que favorece la interacción con el campo magnético y la generación de corrientes de Foucault. Por otro lado, el cobre, aunque con una menor permeabilidad magnética,

se destaca por su alta conductividad eléctrica, que facilita el flujo de las corrientes inducidas y la disipación de potencia en forma de calor.

Si bien el cobre tiene una resistividad (ρ) menor en comparación con otros metales, su alta conductividad y la posibilidad de generar láminas delgadas con gran superficie permiten compensar esta característica, maximizando la generación de calor superficial.

Además, la elección de estos materiales se ve influenciada por su disponibilidad comercial, precio y su facilidad de manipulación.

4.3.2 *Material Flexible*

La selección del material flexible es un aspecto crítico para el diseño del dispositivo robótico de origami, ya que debe permitir el plegado sin comprometer su integridad estructural. Para ello, se consideraron factores como su respuesta térmica y su compatibilidad con el calentamiento por inducción. Asimismo, se evaluó su disponibilidad comercial y facilidad de fabricación, asegurando que el material seleccionado sea viable para su implementación. En la Tabla 3, se presentan las opciones analizadas en función de estos criterios.

Tabla 3.

Propiedades de materiales flexibles.

Material	Temperatura de deformación °C	Disponibilidad	Precio
Polipropileno	+80	Hoja delgada	A disposición del fabricante.
PVC	+80	Hoja delgada	
PETG	+80	Filamento/Hoja delgada	
TPU	+60	Filamento	
SMP	+60	Filamento	

Nitinol	A disposición del fabricante.	Hoja delgada
---------	-------------------------------	--------------

Entre los materiales analizados, aquellos disponibles en hoja delgada resultan especialmente atractivos, ya que esta presentación facilita su manipulación y adaptación a estructuras de origami sin necesidad de procesos adicionales de fabricación.

El polipropileno presenta una temperatura de fusión similar a la de los demás materiales disponibles en formato de hoja delgada, lo que lo hace adecuado para el proceso de deformación térmica. Sin embargo, su amplia disponibilidad en diversas presentaciones y su bajo costo le otorgaron una ventaja sobre las demás opciones, facilitando su adquisición y procesamiento. Además, su ligereza y flexibilidad lo convierten en una opción versátil para aplicaciones en estructuras plegables.

Por otro lado, el filamento TPU SMP para impresión 3D, el cual brinda una flexibilidad de diseño interesante y aporta la fascinante capacidad de "recordar" su forma original después de ser deformado. Esta propiedad, conocida como memoria de forma, se debe a su estructura molecular única que le permite transitar entre dos fases: la austenita, una fase estable a alta temperatura con una estructura cristalina ordenada, y la martensita, una fase estable a baja temperatura con una estructura cristalina menos ordenada (Lin et al., 2024, p. 2).

Al calentar el TPU SMP por encima de su temperatura de transición vítrea (T_g) (entre 50°C y 80°C), este se transforma en la fase de austenita, volviéndose flexible y permitiendo su deformación. Al enfriarse por debajo de la T_g , el material se transforma en la fase de martensita, "fijando" la nueva forma. Sin embargo, al volver a calentar el material por encima de la T_g , la estructura cristalina "recuerda" la fase de austenita original y el material recupera su forma

inicial. Para este caso en concreto, la forma inicial es equivalente a la forma que se le da al material cuando se imprime utilizando impresora 3D. (SMP4D BASIC 4D PRINTING FILAMENT, s.f.)

La temperatura de activación del TPU SMP seleccionado se ajusta al rango de temperaturas que pueden alcanzar los materiales conductores durante el proceso de inducción, asegurando una respuesta eficiente al estímulo térmico.

4.4 Pruebas de laboratorio

4.4.1 Estructura del dispositivo robótico de origami

Para abordar el diseño del dispositivo de origami, el cual se compone por un material flexible configurado en un patrón de origami específico y un material calentador adherido a éste. La integración de estos dos materiales en una estructura única es crucial para el plegado del dispositivo.

El material flexible se dobla siguiendo un patrón de origami que optimice la funcionalidad requerida, la elección de este patrón depende de la aplicación específica que se quiera abordar.

El material calentador se adhiere al material flexible, de manera que el calor generado induce la deformación del material flexible y el plegado del dispositivo. La adhesión se realiza con un adhesivo que garantice una buena transferencia de calor y resistencia mecánica, asegurando la durabilidad del dispositivo.

Liu et al. (2022) explican que las bisagras de los robots de origami se diseñan estratégicamente sin material conductor en la línea de pliegue, permitiendo que el material termo-responsivo se contraiga libremente al calentarse. Este diseño genera el torque necesario

para plegar las bisagras, ya que las áreas circundantes cubiertas con material conductor actúan como fuentes de calor al exponerse al campo magnético.

Figura 1

Forma deseada del dispositivo robótico de origami. Elaboración propia.



En el diseño del dispositivo robótico de origami, se ha adoptado una estructura en forma de "V", inspirada en el pliegue en valle, uno de los movimientos básicos del origami. Esta configuración, ilustrada en la figura 1, permite un movimiento de flexión eficiente, similar al de una bisagra.

El material flexible, inicialmente plano, se pliega a lo largo de la línea central de la "V" mediante la aplicación de calor. Esta elección estructural destaca por su simplicidad en fabricación y ensamblaje, eficiencia en la flexión y adaptabilidad a distintas aplicaciones mediante ajustes en sus dimensiones, facilitando el estudio de los principios del movimiento en robots de origami.

4.4.2 Selección de sistema de calentamiento por inducción

El sistema de calentamiento por inducción es un componente crucial para el funcionamiento del dispositivo de origami. Este sistema debe ser capaz de generar un campo

electromagnético que induzca corrientes de Foucault en el material calentador, generando el calor necesario para la deformación del material flexible y, por ende, el movimiento del dispositivo.

En este proyecto, se ha seleccionado un sistema de calentamiento por inducción ZVS (Zero Voltage Switching) adquirido comercialmente. Esta decisión se basa en la eficiencia, la practicidad y el adecuado funcionamiento del sistema ZVS, características que se adaptan perfectamente a las necesidades del proyecto.

La elección del sistema ZVS también se alinea con las limitaciones de los laboratorios de la universidad, donde no se dispone de equipos que generen una corriente alterna de gran magnitud, necesaria para la generación de campos electromagnéticos intensos. Además, el diseño de otros circuitos que permitan generar estas corrientes implicaría un aumento considerable en los costos, el tiempo de desarrollo del proyecto y se alejaría del alcance del proyecto.

El sistema ZVS utiliza una red resonante LC, que consiste en una bobina de inducción (L) y un condensador (C). El fenómeno de las oscilaciones LC ocurre en un circuito compuesto por un inductor y un condensador, donde la energía se transfiere constantemente entre ambos componentes. Este ciclo continuo de carga y descarga forma oscilaciones que, en un circuito ideal, persistirían indefinidamente. Sin embargo, en la realidad, la resistencia presente en el circuito provoca la disipación de energía en forma de calor, lo que atenúa las oscilaciones con el tiempo. Los circuitos LC se utilizan ampliamente en aplicaciones electrónicas, como radios, televisores y filtros de frecuencia (Lesics Española, 2020).

Cuando se aplica una tensión continua a la red resonante, la corriente comienza a oscilar entre la bobina y el condensador. El circuito posee transistores que controlan el flujo de corriente

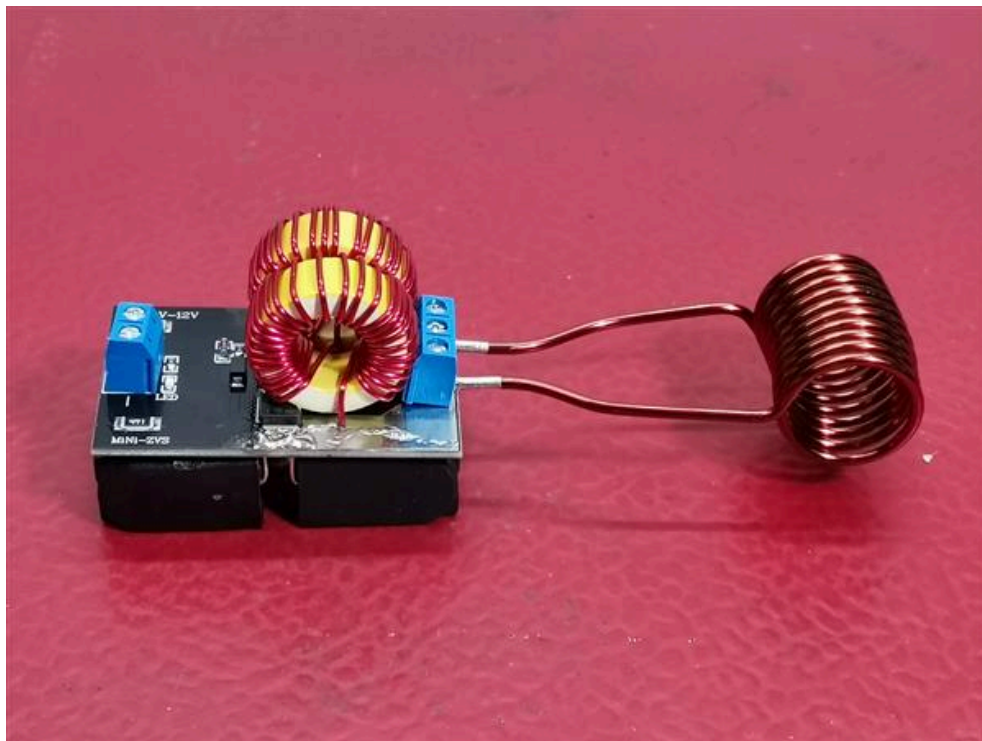
a través de la bobina, creando un campo magnético oscilante. Este campo magnético induce corrientes de Foucault en el material conductor del dispositivo, generando calor por efecto Joule.

Los sistemas ZVS son conocidos por su alta eficiencia energética, ya que minimizan las pérdidas de energía durante la conmutación de los componentes electrónicos. Esto se traduce en un menor consumo de energía y una mayor vida útil de los componentes.

Además, los sistemas ZVS son relativamente fáciles de operar y controlar, lo que facilita su integración en el diseño del dispositivo robótico de origami. Su tamaño compacto y su bajo peso también son ventajas significativas, ya que permiten un diseño más ligero y flexible del dispositivo.

Figura 2

Sistema de calentamiento por inducción ZVS. PCBWay.



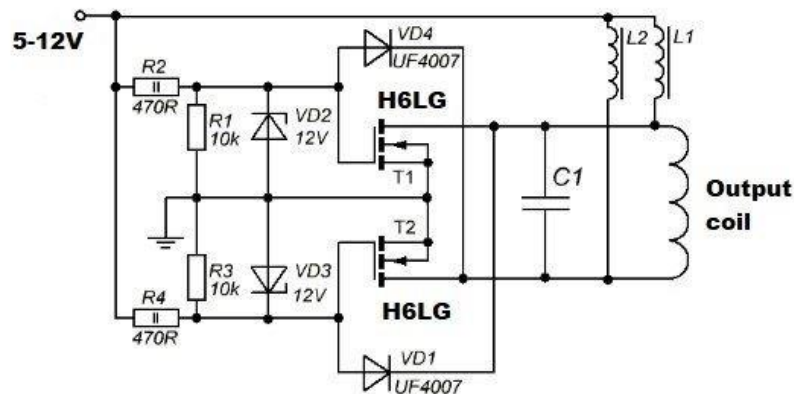
El calentador ZVS cuenta con una entrada de 5V - 12V y corriente de hasta 10A. La bobina de salida del ZVS tiene un diámetro interno de 1.8cm y una longitud de 2.8cm, un número de 10 espiras y una resistencia de 0.1 Ω . La inductancia de esta bobina se calcula utilizando la fórmula de Wheeler para bobinas de núcleo de aire la cual está dada por:

$$L = \frac{N^2 * r^2}{9r + 10l} \quad (2)$$

donde L es la inductancia en microhenrios (μH), N es el número de espiras, r es el radio de la bobina y l su longitud. Aplicando la ecuación 2 con los valores de la bobina se obtiene un valor de inductancia de de 2.24 μH . Este valor es adecuado para generar un campo electromagnético eficiente, permitiendo la inducción de corrientes de Foucault en el material calentador del dispositivo robótico de origami.

Figura 3

Muestra del Circuito ZVS. PCBWay.



El funcionamiento se basa en la conmutación de dos transistores MOSFET a alta frecuencia, lo que genera una corriente alterna en la bobina de salida. Esta corriente alterna

produce un campo magnético oscilante que induce corrientes de Foucault en la carga, generando calor por efecto Joule.

Las dos bobinas en la salida del circuito (L1 y L2) no trabajan simultáneamente, sino que se alternan. Cuando un MOSFET está encendido, la corriente fluye a través de la bobina correspondiente, generando un campo magnético. Al conmutar el otro MOSFET, la corriente fluye en la dirección opuesta a través de la otra bobina, invirtiendo el campo magnético.

El capacitor (C1) juega un papel crucial en este proceso al almacenar y liberar energía, lo que permite la oscilación de la corriente y el cambio de su dirección. Cuando el capacitor se carga, la corriente fluye en una dirección; cuando se descarga, la corriente se invierte. Esta inversión de la corriente es la que genera la corriente alterna en la bobina de salida, necesaria para el calentamiento por inducción.

Para efectos prácticos de este proyecto, no se analizará la frecuencia de operación del circuito a partir de los componentes individuales L1, L2 y C1, sino que se considerará la frecuencia general de la señal de salida del ZVS, la cual es el resultado de la interacción de todos los componentes del circuito. Esta simplificación permite enfocar el análisis en el comportamiento global del sistema y su eficiencia en el calentamiento por inducción

4.4.3 Movimiento del dispositivo robótico de origami

El dispositivo robótico de origami está compuesto por un material flexible termoactivo cubierto con un material conductor, dejando una bisagra de 2 mm a 3 mm sin recubrimiento. Esta bisagra define la zona en la que se producirá el plegado del dispositivo, generando un patrón de doblado controlado. Para garantizar la compatibilidad con el sistema de inducción ZVS, se ha establecido un tamaño estándar para el dispositivo de origami, lo que también permite una comparación eficiente entre distintos materiales. Dicha medida se ha determinado en función del

tamaño de la bobina de inducción y del área efectiva de calentamiento, resultando en dimensiones de 3 cm de largo y 1 cm de ancho.

Durante las pruebas de movimiento, se han registrado las temperaturas alcanzadas y los tiempos de respuesta. Estos datos permiten evaluar el rendimiento del dispositivo y extraer conclusiones para optimizar su diseño. El calentamiento por inducción se basa en la generación de calor a partir de las corrientes de Foucault, cuya intensidad depende de propiedades como la resistividad eléctrica del material, la geometría de la pieza y la frecuencia de operación. Estos factores influyen directamente en la eficiencia del proceso de calentamiento y en la energía requerida para activar el plegado del origami (Zinn & Semiatin, 1988, pp. 2-9).

4.4.3.1 Pruebas sin carga

Antes de analizar el comportamiento del sistema ZVS con carga, se realizaron pruebas en vacío, es decir, sin un material conductor presente en la bobina de salida. En esta primera etapa, el sistema se alimentó con una fuente DC genérica de 12.1 V, obteniendo un consumo de corriente constante de 2.2 A. Para la medición de los valores en la salida, se utilizó un osciloscopio GDS-2062, conectando sus puntas directamente a los extremos de la bobina, registrando una señal AC con una frecuencia de 186.476 ± 0.2 kHz y un valor pico de 35.6 ± 0.2 V. Este equipo posee una tolerancia de $\pm(2\% + 5$ dígitos) así como funciones de autoajuste, lo que permite asumir que sus mediciones se encuentran dentro de las especificaciones del fabricante, incluso sin una recalibración reciente.

En cuanto a las mediciones en DC, se emplearon dos multímetros: un UT204, con un error de $\pm(2\% + 5$ dígitos) en corriente DC, y un UT58A, cuyo error en medición de voltaje es de $\pm(0.8\% + 2$ dígitos). Durante las pruebas, la corriente de entrada se mantuvo estable en 2.2 A, sin variaciones significativas a pesar de que la bobina de salida alcanzó una temperatura máxima de

40°C. Sin embargo, el circuito ZVS mostró un calentamiento rápido, por lo que el tiempo máximo de funcionamiento en cada prueba se limitó a 1 minuto y 30 segundos, permitiendo que el sistema se enfríe hasta 30°C antes de reactivarlo.

Dado que el propósito principal de este trabajo es evaluar la capacidad del sistema para generar temperaturas adecuadas para la activación del material, los errores asociados a las mediciones de consumo de corriente o voltaje son asumibles. La precisión absoluta en términos de potencia o factor de calidad no es el foco del análisis, ya que lo relevante es garantizar que el sistema pueda operar de manera estable dentro del rango de temperaturas requerido. Además, la inclusión de la incertidumbre en las mediciones permite contextualizar los resultados y validar las conclusiones dentro de un margen aceptable..

4.4.3.2 Pruebas con carga

Tras analizar el comportamiento del sistema ZVS en vacío, la siguiente etapa de pruebas se centra en evaluar su desempeño bajo carga. Para ello, se introduce un dispositivo robótico flexible, constituido por polipropileno como material de soporte, rodeado de un material conductor. En las Figuras 4 y 5, se muestra la estructura del dispositivo empleado en las pruebas. De esta forma, se determina cómo el sistema ZVS se comporta al inducir calor en el dispositivo y la influencia sobre la señal de salida.

Figura 4

Estructura del dispositivo robótico compuesto por polipropileno y cinta de cobre.



Nota: Cinta de cobre con un espesor de 0.05 mm, la cual se adhirió al polipropileno, de 0.3 mm de espesor. La cinta de cobre se adhiere directamente al polipropileno, dejando una bisagra de 0.2. Elaboración propia.

Figura 5

Estructura del dispositivo robótico compuesto por polipropileno y níquel.



Nota: Hoja de cobre con un espesor de 0.5 mm, la cual se adhirió al polipropileno de 0.3 mm de espesor por medio de silicona líquida de alta temperatura, dejando una bisagra de 0.2. Elaboración propia.

Cuando un material conductor se introduce dentro de una bobina, la inductancia del sistema se modifica debido al cambio en la permeabilidad efectiva del medio.

De acuerdo con Jordan y Balmain (1968), la inductancia de una bobina de aire se calcula considerando la permeabilidad del vacío (μ_0), pero si un material con una permeabilidad diferente (μ_r) ocupa parte del volumen de la bobina, la inductancia resultante puede estimarse mediante una relación ponderada entre la permeabilidad del vacío y la del material introducido.

Para una bobina cilíndrica con un material parcialmente insertado, la inductancia corregida L' se obtiene como:

$$L' = L * \mu_{eff} * \mu_0 \quad (3)$$

donde L' es la inductancia total en la salida del sistema, L es la inductancia de la bobina en vacío, μ_{eff} es la permeabilidad efectiva del sistema, μ_0 es la permeabilidad del vacío.

Para el cálculo de la permeabilidad efectiva del sistema se tiene:

$$\mu_{eff} = \mu_0 \left(1 - \frac{V_m}{V_t}\right) + \mu_m \left(\frac{V_m}{V_t}\right) \quad (4)$$

donde μ_m es la permeabilidad del material dentro de la bobina, V_m es el volumen del material y V_t es el volumen interno de la bobina.

El polipropileno, al ser un material dieléctrico con una permeabilidad magnética relativa muy cercana a la del vacío, no altera significativamente el comportamiento electromagnético de una bobina, ya que no contribuye de manera relevante a la modificación de su inductancia. (Jordan & Balmain, 1968, p. 105).

Con base en la metodología utilizada para la toma de datos en la bobina sin carga, se realizaron mediciones en las bobinas con carga siguiendo el mismo enfoque. Además, se determinó la inductancia en la salida del sistema para cada dispositivo a calentar mediante la ecuación 3 y la profundidad de penetración de la corriente inducida en los materiales utilizando la ecuación 1, obteniendo así los valores de la tabla 4.

Tabla 4.

Comportamiento del sistema ZVS para diferentes casos.

Bobina de salida	Corriente DC consumida (A)	Tensión pico salida (V)	Frecuencia de salida (kHz)	Inductancia (μH)	Profundidad de penetración (μm)
Vacío	2.2 ± 0.2	35.6 ± 0.2	186.47	2.24	-
Dispositivo níquel.	7 ± 0.3	33.2 ± 0.2	177.66	2.05	3.738
Dispositivo cobre.	2.6 ± 0.2	35 ± 0.2	187.21	2.21	47.68

Al analizar el comportamiento del circuito ZVS con diferentes núcleos en su bobina de salida, demuestra variaciones significativas en su desempeño. Al introducir cobre (0.05mm), la corriente y la frecuencia aumentan y la tensión disminuye mínimamente, esto es debido a las pérdidas por corrientes parásitas y el efecto Joule minimizadas por la alta conductividad del cobre. En contraste, con níquel (0.3mm), la corriente de entrada se dispara, la frecuencia y la tensión caen, esto es consecuencia de la alta permeabilidad del níquel que incrementa la inductancia y las pérdidas por corrientes parásitas y efecto Joule, impactando directamente en la impedancia y la tensión de salida.

Estos cambios reflejan la influencia de la permeabilidad, resistividad y conductividad de los materiales en la inductancia, corrientes parásitas y efecto Joule, factores determinantes en el comportamiento del circuito.

Este comportamiento del circuito ZVS, tiene una consecuencia directa: la generación de calor. Las pérdidas energéticas, tanto por efecto Joule como por las corrientes de Foucault, se disipan en forma de calor dentro de los materiales. En el caso del cobre, las pérdidas son moderadas debido a su alta conductividad, resultando en un aumento de temperatura menor. Por

otro lado, el níquel, con su alta resistividad y permeabilidad, induce pérdidas significativas, manifestándose en un aumento sustancial de temperatura.

Este incremento térmico, producto de la interacción entre el campo magnético generado por la bobina y las propiedades intrínsecas de los materiales, es el mecanismo fundamental a través del cual se puede generar movimiento en un dispositivo robótico flexible. Este incremento térmico se evidencia también en la profundidad de penetración de cada material donde una menor penetración concentra el calor más cerca de la superficie en el níquel y esto resulta en un calentamiento más rápido. En contraste, una mayor penetración, como en el caso del cobre, dificulta el calentamiento rápido, pero permite una distribución más uniforme del calor.

Para evaluar estos cambios térmicos, se realizaron mediciones de temperatura utilizando un multímetro UT-204A. Se estableció como temperatura inicial la medida obtenida con el dispositivo apagado. Posteriormente, el sistema se activó durante aproximadamente 4 segundos, registrando el tiempo con un cronómetro. Durante este tiempo y de forma continua hasta completar un total de 30 segundos, se realizaron mediciones periódicas de temperatura tanto en los materiales conductores (cobre, níquel) como en las bisagras de los materiales termosensibles. Estas mediciones permitieron analizar la variación térmica en ambas regiones y evaluar los cambios en función del tiempo.

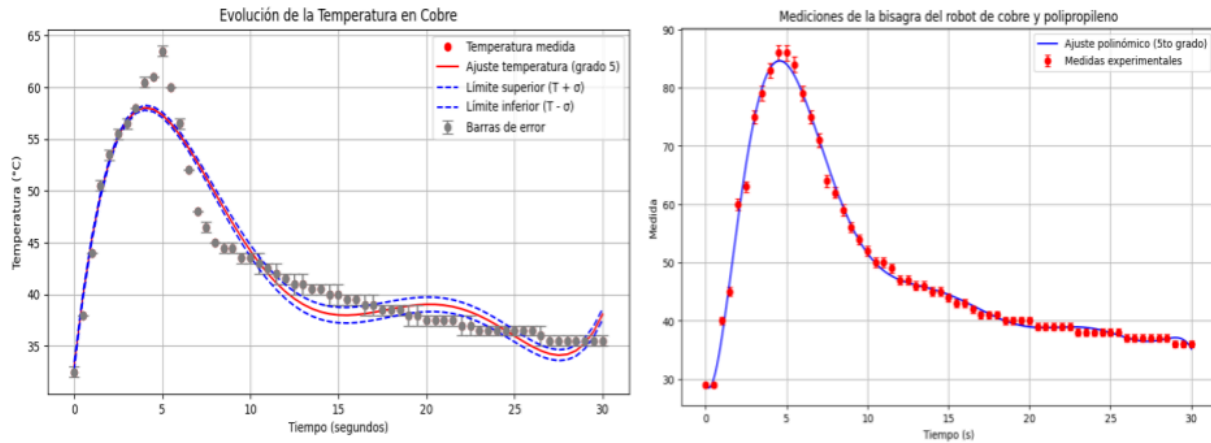
Figura 6

Proceso de medición de temperaturas en los materiales usando la pinza amperimétrica.



Figura 7

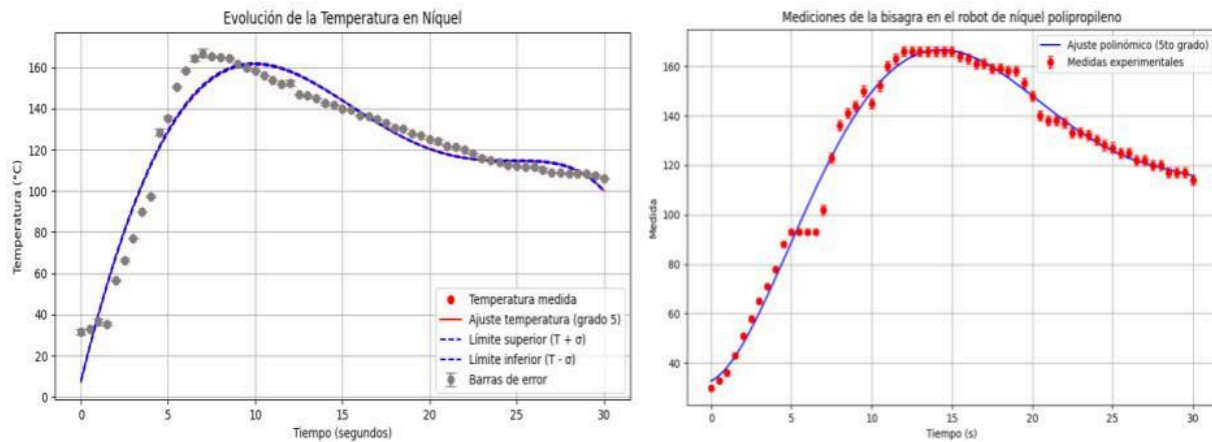
Evolución de la temperatura en el cobre y mediciones de la bisagra del dispositivo robótico de cobre y polipropileno.



Nota: La gráfica de la izquierda y la derecha muestran la evolución de la temperatura en la lámina de cobre y la bisagra del dispositivo robótico de cobre y polipropileno durante el proceso de calentamiento por inducción respectivamente. La línea azul representa el ajuste polinomial de quinto grado a los datos experimentales, que se muestran como puntos rojos. Elaboración propia.

Figura 8

Evolución de la temperatura en níquel y mediciones de la bisagra del dispositivo robótico de níquel y polipropileno.



Nota: La gráfica de la izquierda y la derecha muestran la evolución de la temperatura en la lámina de níquel y la bisagra del dispositivo robótico de níquel y polipropileno durante el proceso de calentamiento por inducción respectivamente. La línea azul representa el ajuste polinomial de quinto grado a los datos experimentales, que se muestran como puntos rojos. Elaboración propia.

Las pruebas de calentamiento con diferentes materiales conductores revelaron que el cobre, por sí solo, no alcanzaba la temperatura necesaria para deformar el polipropileno. Esto se debe a que, si bien el cobre posee una excelente conductividad eléctrica, su permeabilidad magnética es baja.

En el contexto del calentamiento por inducción, la permeabilidad magnética es crucial, ya que determina la eficiencia con la que un material absorbe la energía del campo magnético generado por la bobina. Por otro lado, el níquel, aunque alcanzaba altas temperaturas gracias a su alta permeabilidad magnética, presentaba un alto grosor en las láminas disponibles. Este grosor excesivo dificulta el movimiento del dispositivo robótico, ya que aumentaba la rigidez del conjunto y la fuerza necesaria para lograr la deformación del polipropileno. En consecuencia, se hacía difícil lograr el plegado controlador del dispositivo.

La desviación en las mediciones de temperatura se deben en gran parte por la variabilidad en el tiempo de calentamiento debido a la falta de un controlador automático, dado que el calentamiento fue realizado manualmente, es probable que en cada prueba haya habido una pequeña variación en el tiempo en que la fuente de tensión fue aplicada o retirada. Este desfase genera diferencias en la cantidad de energía térmica absorbida por el material en cada ensayo.

Ante los resultados obtenidos anteriormente, se optó por un diseño final que combinaba los diferentes materiales. Se utilizó un recubrimiento de cobre con níquel directamente adherido al polipropileno. De esta manera, el níquel, al generar mayor calor por su alta permeabilidad magnética, se complementa con el cobre, que distribuye el calor de manera más uniforme gracias a su alta conductividad térmica.

Figura 9

Estructura del dispositivo robótico compuesto por polipropileno y níquel con recubrimiento de cobre.

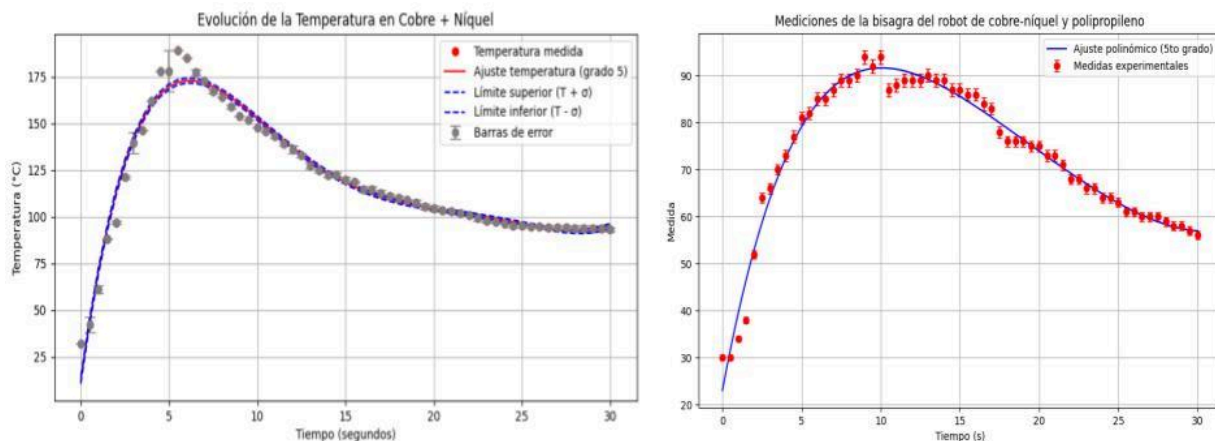


Nota: El dispositivo robótico está construido con una lámina de cobre de 0.05 mm de espesor que recubre una lámina de polipropileno de 0.3 mm de espesor; con dimensiones de 2 cm por 3 cm. Elaboración propia.

Esta combinación de materiales permitió alcanzar la temperatura necesaria para deformar el polipropileno y, al mismo tiempo, mantener un peso lo suficientemente bajo como para permitir el movimiento del dispositivo robótico.

Figura 10

Evolución de la temperatura en el níquel y cobre.



Nota: La gráfica de la izquierda y la derecha muestran la evolución de la temperatura en la lámina del dispositivo robótico de cobre y níquel y la bisagra del mismo durante el proceso de calentamiento por inducción respectivamente. La línea azul representa el ajuste polinomial de quinto grado a los datos experimentales, que se muestran como puntos rojos. Elaboración propia.

Los resultados experimentales demuestran que el calentamiento por inducción permitió alcanzar la temperatura necesaria para generar el plegado del dispositivo robótico de origami. Como se observa en las gráficas, la temperatura en la bisagra comenzó a aumentar

progresivamente después de un tiempo inicial, lo que indica una distribución eficiente del calor en el polipropileno. La combinación de níquel y cobre permitió optimizar este proceso, ya que el níquel facilitó la generación de calor por inducción magnética, mientras que el cobre ayudó a distribuirlo de manera uniforme.

Este comportamiento térmico permitió el plegado autónomo y controlado del dispositivo, asegurando temperaturas adecuadas para su deformación sin comprometer la integridad estructural del material. Lo anterior sugiere que el sistema de activación térmica es eficiente para generar el movimiento deseado, lo que facilita su aplicación en dispositivos de robótica flexible y estructuras adaptativas.

Figura 11

Ciclo de plegado del dispositivo compuesto por polipropileno y níquel con recubrimiento de cobre como material conductor. Elaboración propia.



Nota: La secuencia de imágenes muestra el instante en que se interrumpe el calentamiento por inducción y se observa el plegado progresivo del material debido a la energía térmica acumulada. El proceso de deformación ocurre en aproximadamente 2 segundos, evidenciando una respuesta rápida del material tras la activación térmica.

La secuencia de imágenes ilustra el proceso de activación térmica y la respuesta estructural del dispositivo. Se observa cómo la bisagra se pliega progresivamente, evidenciando la capacidad del material para modificar su geometría de forma autónoma. Este comportamiento

refuerza la viabilidad del diseño para futuras aplicaciones en sistemas de auto-ensamblaje y reconfiguración estructural, donde la transformación controlada del material es esencial.

Tras optimizar la generación y distribución del calor mediante la combinación de níquel y cobre, se exploró la integración de la memoria de forma para dotar de mayor autonomía al sistema. El dispositivo fue impreso en forma de "V", configuración que representa su fase original y que el material recuerda al activarse térmicamente. El uso de un filamento 4D con propiedades termosensibles permite que el dispositivo se pliegue o despliegue por efecto del calentamiento inducido, retornando siempre a su geometría programada.

Figura 12

Material 4d impreso. Elaboración propia.



Nota: El material utilizado en el dispositivo robótico flexible fue impreso en una configuración en forma de "V". Cada una de las dos secciones de la "V" tiene dimensiones de 3 cm de largo y 2 cm de ancho, con un espesor de 0.2 cm.

Una vez impreso el material 4D en su configuración programada, se procede a convertirlo en un dispositivo funcional mediante la integración de níquel y cobre. Antes de esta integración, el material se somete a un proceso de aplanado, sumergiéndolo en agua caliente para aprovechar

su maleabilidad térmica. Esto permite que el material adopte una forma plana, facilitando su manipulación y preparación para el experimento en el que se observará su retorno a la configuración original.

Figura 13

Estructura del dispositivo robótico compuesto por material 4d y níquel con recubrimiento de cobre. Elaboración propia.



Una vez que el material ha sido aplanado y preparado, se procede a evaluar su capacidad de recuperación de forma al ser sometido a calentamiento inducido. En esta etapa, el dispositivo es colocado en la bobina y expuesto al campo magnético generado, permitiendo que el níquel absorba la energía térmica y la transfiera al material 4D. Este proceso desencadena la activación del mecanismo de memoria de forma, iniciando el plegado del dispositivo de manera progresiva. A continuación, se presenta la secuencia de este proceso, evidenciando cómo el material recupera su configuración programada tras la aplicación de calor.

Figura 14

Ciclo de plegado del dispositivo compuesto por material 4d y níquel con recubrimiento de cobre como material conductor. Elaboración propia.



Nota: La secuencia de imágenes captura el momento en que se interrumpe el calentamiento por inducción y el material, previamente en estado extendido, comienza su plegado progresivo debido a la energía térmica acumulada. El proceso de deformación ocurre en aproximadamente 4 segundos.

Se aprecia cómo el material recupera progresivamente su forma original tras la aplicación de calor, evidenciando el efecto de memoria de forma inducido por el calentamiento. El plegado ocurre de manera continua hasta alcanzar la configuración programada inicialmente.

Luego de esto, se analiza el proceso inverso. Con la ayuda de agua caliente, el material es reconfigurado manualmente hasta adoptar una forma completamente plegada sobre sí mismo. Una vez enfriado y estabilizado en esta nueva configuración, se somete nuevamente a calentamiento en la bobina, observando ahora el efecto de despliegue, donde el material recupera su estado extendido mediante un movimiento opuesto al plegado anterior.

Figura 15

Ciclo de despliegado del dispositivo compuesto por material 4d y níquel con recubrimiento de cobre como material conductor. Elaboración propia.



Nota: En esta secuencia, el material parte de un estado doblado y por medio de inducción, recupera su configuración original plegada en forma de V. El proceso de recuperación ocurre en aproximadamente 5 segundos.

El material responde de manera autónoma a estímulos térmicos, lo que le permite conservar una geometría específica durante un tiempo antes de modificarse nuevamente. Este comportamiento habilita aplicaciones en las que el dispositivo debe adaptarse y recuperar su forma inicial, como en estructuras despleables, actuadores programables o mecanismos de agarre ajustables. Al recalentar el material por encima de su temperatura de transición vítrea (T_g), es capaz de volver a su forma original, lo que posibilita la repetición continua de este ciclo de adaptación.

Sin embargo, durante las pruebas se observó que la exposición a temperaturas excesivamente altas afectaba progresivamente las propiedades de memoria de forma del material, reduciendo su capacidad para regresar a su geometría original tras múltiples ciclos. Este fenómeno sugiere la necesidad de explorar estrategias para optimizar tanto la gestión térmica como la selección de materiales, con el propósito de mejorar la durabilidad y el rendimiento a largo plazo.

A pesar de estos desafíos, el comportamiento observado abre un abanico de posibilidades para aplicaciones futuras, donde la capacidad de adaptación térmica y la flexibilidad en la forma puedan ser aprovechadas en dispositivos autónomos y ajustables, que ofrezcan soluciones innovadoras y eficientes

5. Metodología

5.1 Diseño del estudio

Para evaluar el plegado autónomo de estructuras robóticas inspiradas en origami, se implementa un enfoque experimental basado en el calentamiento por inducción electromagnética. Se seleccionan materiales con propiedades térmicas y mecánicas adecuadas, y se diseña un sistema de prueba que permita analizar su respuesta al calor y su capacidad de deformación controlada.

5.2 Selección de materiales

Para la construcción del dispositivo se consideran dos tipos de materiales principales:

5.2.1 Materiales conductores

Deben ser capaces de generar calor mediante inducción electromagnética. Se recomienda seleccionar materiales con una adecuada permeabilidad magnética y/o alta conductividad térmica para optimizar la distribución del calor. Su grosor también influye en la eficiencia del calentamiento, por lo que debe elegirse en función de la aplicación.

5.2.2 Materiales flexibles

Se deben elegir materiales con una temperatura de deformación compatible con el calentamiento por inducción y que posean la flexibilidad suficiente para generar un plegado autónomo. En caso de requerir memoria de forma, se deben considerar polímeros con capacidad de recuperación térmica.

5.2.3 Adhesivos térmicos

La unión entre los materiales debe realizarse con adhesivos que permitan una buena transferencia de calor sin afectar la flexibilidad del sistema.

5.3 Construcción del prototipo

5.3.1 Diseño estructural

Se configura el material flexible en una estructura plegable inspirada en origami, asegurando que las zonas de deformación no estén cubiertas por el material conductor para facilitar el movimiento.

5.3.2 Integración de los materiales conductores

Se fijan los materiales conductores sobre la superficie del material flexible, considerando la distribución del calor y la eficiencia térmica del sistema.

5.3.3 Implementación del sistema de calentamiento

Se debe diseñar o seleccionar un sistema de calentamiento por inducción cuya frecuencia de operación sea compatible con las propiedades del material conductor. Este sistema debe generar suficiente temperatura para inducir el plegado sin degradar los materiales utilizados.

5.4 Procedimiento experimental

5.4.1 Caracterización de materiales

Se deben medir sus propiedades térmicas y eléctricas, asegurando que sean adecuados para el sistema de calentamiento seleccionado.

5.4.2 Pruebas de calentamiento

Se expone el prototipo al campo electromagnético y se registra la evolución de la temperatura en las zonas de plegado. Es importante monitorear el tiempo de respuesta térmica y el comportamiento del material flexible.

5.4.3 Evaluación del plegado

Se analiza el grado de deformación en función del tiempo y la temperatura aplicada, verificando si el diseño permite un plegado autónomo eficiente.

5.4.4 Uso de materiales con memoria de forma

En caso de incluir memoria de forma, se evalúa la capacidad del material para fijar y recuperar su configuración bajo estímulos térmicos controlados.

Conclusiones

- La correcta selección de los materiales es fundamental para lograr el plegado autónomo en dispositivos inspirados en origami. En este sentido, es crucial considerar cuidadosamente tanto la conductividad eléctrica como la permeabilidad magnética de los materiales conductores, así como las propiedades de los materiales flexibles, incluyendo su grosor. Estas consideraciones permiten optimizar el diseño de los dispositivos y alcanzar un plegado eficiente y la recuperación de la forma original.
- El diseño del dispositivo robótico juega un papel crucial en su funcionalidad y movimiento. La elección de patrones de origami adecuados y la correcta integración de los materiales permiten optimizar la eficiencia del movimiento y plegado. En este sentido, la investigación ha demostrado la viabilidad de utilizar una estructura en forma de "V" para generar un movimiento de flexión simple pero efectivo. Este movimiento básico en "V" sienta las bases para explorar configuraciones de origami más complejas, abriendo la posibilidad a diseños robóticos avanzados con capacidades de auto-ensamblaje y reconfiguración, que podrían ser utilizados en diversas aplicaciones.
- La implementación del calentamiento por inducción para el control del plegado en el dispositivo robótico de origami demostró ser efectiva, permitiendo generar movimiento sin necesidad de cables ni componentes electrónicos embebidos. Esto abre nuevas oportunidades para el desarrollo de sistemas robóticos autónomos y flexibles.

- Se evidenció que la combinación de níquel y cobre mejora la eficiencia térmica del sistema, asegurando una distribución uniforme del calor sobre el material con memoria de forma. Esta combinación permitió un plegado eficiente y una recuperación precisa de la forma original.
- La integración de materiales con memoria de forma en estructuras de origami representa un enfoque prometedor para aplicaciones en robótica blanda, dispositivos biomédicos y estructuras reconfigurables. La posibilidad de diseñar mecanismos que se plieguen y desplieguen bajo estímulos térmicos específicos brinda versatilidad en múltiples escenarios.

Aspectos a mejorar

- Ajustar la distribución del calor en la bisagra del dispositivo según el material utilizado, complementando el diseño con estudios de transferencia térmica y posibles estrategias de disipación para mejorar la eficiencia del sistema.
- Adaptar el diseño para que sea escalable a distintos tamaños y escenarios de uso, incorporando mejoras en la automatización del proceso de activación del material con memoria de forma.
- Implementar un sistema de control para reducir la necesidad de intervención manual, desarrollando algoritmos que permitan un ajuste dinámico de temperatura y tiempos de activación según las características del material y las condiciones ambientales.
- Incluir estrategias de integración con tecnologías emergentes como inteligencia artificial y aprendizaje automático para optimizar la respuesta del material y su eficiencia energética, permitiendo su aplicación en entornos con requerimientos de precisión y adaptabilidad.

- Fomentar la colaboración con instituciones académicas y sectores industriales para potenciar el desarrollo del dispositivo en aplicaciones concretas como la medicina, la robótica flexible y la manufactura avanzada, facilitando su validación en entornos reales y su posible comercialización.

Referencias

- Onal, C. D., Tolley, M. T., Wood, R. J., & Rus, D. (2015). Origami-Inspired Printed Robots [Robots impresos inspirados en origami]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(5), 2214–2221.
<https://doi.org/10.1109/tmech.2014.2369854>
- Qué son los robots origami y cómo un nuevo y extraordinario material los hace flexibles - BBC News Mundo. (2019, 27 de noviembre). BBC News Mundo.
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-50561369>
- Yan, W., Li, S., Deguchi, M., Zheng, Z., Rus, D., & Mehta, A. (2023). Origami-based integration of robots that sense, decide, and respond [Integración basada en origami de robots que sienten, deciden y responden]. *Nature Communications*, 14(1).
<https://doi.org/10.1038/s41467-023-37158-9>
- Rus, D., & Tolley, M. T. (2018). Design, fabrication and control of origami robots [Diseño, fabricación y control de robots de origami]. *Nature Reviews Materials*, 3(6), 101–112.
<https://doi.org/10.1038/s41578-018-0009-8>
- Dayyoub, T., Maksimkin, A. V., Filippova, O. V., Tcherdyntsev, V. V., & Telyshev, D. V. (2022). Shape Memory Polymers as Smart Materials: A Review [Polímeros con memoria de forma como materiales inteligentes: Una revisión]. *Polymers*, 14(17), 3511.
<https://doi.org/10.3390/polym14173511>
- Castellanos, L. M., Lopez, F., & Reyes - Vera, E. (2016). Metamateriales: principales características y aplicaciones. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(156), 395.

<https://doi.org/10.18257/racefyn.345>

Bar-Cohen, Y. (2001). Electroactive polymers as artificial muscles: Reality and challenges [Polímeros electroactivos como músculos artificiales: Realidad y desafíos]. 19th AIAA Applied Aerodynamics Conference.

<https://doi.org/10.2514/6.2001-1492>

Biesuz, M., Saunders, T., Ke, D., Reece, M. J., Hu, C., & Grasso, S. (2021). A review of electromagnetic processing of materials (EPM): Heating, sintering, joining and forming [Revisión del procesamiento electromagnético de materiales (EPM): Calentamiento, sinterización, unión y formación]. *Journal of Materials Science & Technology*, 69, 239–272.

<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.06.049>

Mohd Jani, J., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities [Una revisión de la investigación, aplicaciones y oportunidades de aleaciones con memoria de forma]. *Materials & Design (1980-2015)*, 56, 1078–1113.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084>

Kim, J., Im, E., Lee, Y., & Cha, Y. (2024). Quadrupedal robot with tendon-driven origami legs [Robot cuadrúpedo con patas de origami impulsadas por tendones]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 115769.

<https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115769>

Liu, J., Chen, X., Lahondes, Q. M. P., Esendag, K., Damian, D., & Miyashita, S. (2022). Origami robot self-folding by magnetic induction [Robot de origami auto-plegable por inducción

- magnética]. 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).
<https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981604>
- Rus, D., & Tolley, M. T. (2018). Design, fabrication and control of origami robots [Diseño, fabricación y control de robots de origami]. *Nature Reviews Materials*, 3(6), 101–112.
<https://doi.org/10.1038/s41578-018-0009-8>
- Shepherd, R. F., Ilievski, F., Choi, W., Morin, S. A., Stokes, A. A., Mazzeo, A. D., Chen, X., Wang, M., & Whitesides, G. M. (2011). Multigait soft robot [Robot blando con múltiples modos de locomoción]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(51), 20400–20403.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1116564108>
- Yu, Y., Nakano, M., & Ikeda, T. (2003). Directed bending of a polymer film by light [Flexión dirigida de una película de polímero por luz]. *Nature*, 425(6954), 145.
<https://doi.org/10.1038/425145a>
- Becerra-Ramírez, D. (2021). *Origami como Herramienta Gamificadora en los Procesos de Aprendizaje de la Geometría en Estudiantes de Básica Secundaria*. Universidad de Santander.
- Rudnev, V., Loveless, D., & L. Cook, R. (2017). *Handbook of Induction Heating* [Manual de calentamiento por inducción](2ª ed.). CRC Press.
- Zhao, Y., & Ikeda, T. (Eds.). (2009). *Smart Light-Responsive Materials [Materiales Inteligentes Sensibles a la Luz]*. John Wiley & Sons, Inc.
<https://doi.org/10.1002/9780470439098>

- Miyashita, S., Guitron, S., Li, S., & Rus, D. (2017). Robotic metamorphosis by origami exoskeletons [Metamorfosis robótica mediante exoesqueletos de origami]. *Science Robotics*, 2(10), Artículo eaao4369.
<https://doi.org/10.1126/scirobotics.aao4369>
- Acevedo Picon, A., Barrero Pérez, J., & Gélvez Figueredo, J. A. (2007). Calentamiento por inducción electromagnética: diseño y construcción de un prototipo. *Revista UIS Ingenierías*, 6(1), 69–76.
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/1951>
- SMP4D BASIC 4D PRINTING FILAMENT. (s.f.). SMP4D.
<https://smp4d.net/products/smp4d-basic-4d-printing-filament>
- Lin, C., Xin, X., Tian, L., Zhang, D., Liu, L., Liu, Y., & Leng, J. (2024). Thermal-, magnetic-, and light-responsive 4D printed SMP composites with multiple shape memory effects and their promising applications. *Composites Part B: Engineering*, 111257.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111257>
- Loveless, D., Black, M., Cook, R. L., & Rudnev, V. I. (2002). *Handbook of Induction Heating*. Taylor & Francis Group.
- Lesics Española. (2020, 26 de septiembre). ¡La belleza de las Oscilaciones LC! [Video]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=4d-m9MsqEco>
- Zinn, S., & Semiatin, S. L. (1988). *Elements of induction heating: Design, control, and applications* [Elementos del calentamiento por inducción: Diseño, control y aplicaciones]. ASM International.
<https://doi.org/10.31399/asm.tb.eihdca.9781627083416>

- Wheeler, H. A. (1928). Simple inductance formulas for radio coils. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 16(10), 1398-1400.
<https://doi.org/10.1109/JRPROC.1928.226019>
- Jordan, E. C., & Balmain, K. G. (1968). *Electromagnetic Waves and Radiating Systems* (2nd ed.). Prentice-Hall.
- Prusa Research. (s.f.). Prusament PETG. Recuperado el 5 de abril de 2025, de
<https://prusament.com/es/materials/prusament-petg/>
- eSun. (s.f.). PETG 1.75 mm. Print3D Colombia. Recuperado el 5 de abril de 2025, de
<https://www.print3dcolombia.com/consumibles/1086-esun-filament-petg-175.html>
- Lubrizol. (s.f.). ESTANE® 3D TPU – Technical Overview. Recuperado el 5 de abril de 2025, de
<https://www.lubrizol.com/3D-Printing>
- ZWNiTi. (s.f.). Nitinol shape memory alloy – Product overview. Recuperado el 5 de abril de 2025, de <https://es.zwniti.com/nitinol/>
- MDC. (s.f.). Nitinol Specification Guidelines. Recuperado el 5 de abril de 2025, de
<https://www.medicaldevicecomponents.com/resource-library/principles-of-nitinol/nitinol-specification-guidelines/>
- SPACEMATDB. (s.f.). Nitinol – Material Data Sheet. Recuperado el 5 de abril de 2025, de
<https://www.spacematdb.com/spacemat/manudasheets/nitinol.pdf>
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2010). *Física para la ciencia y la tecnología* (6a ed.). Reverté. (Cap. 26)
- Röchling Industrial. (s.f.). Polipropileno – Hoja técnica. Recuperado el 5 de abril de 2025, de
<https://www.roechling.com/es/industrial/productos/plastico-de-engineering/polipropileno-pp>

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2010). Ciencia e ingeniería de materiales: Una introducción (8a ed.). Reverté. (Cap. 18)

MatWeb. (s.f.). Propiedades del Latón. Recuperado el 5 de abril de 2025, de <http://www.matweb.com/>

Graphite Sales Inc. (s.f.). Graphite Material Properties. Recuperado el 5 de abril de 2025, de <https://www.graphitesales.com/>

PCBWay. (s.f.). *Induction heater, HV source, and Wireless Energy transfer with chip mini ZVS Driver from Aliexpress - Share Project*. PCBWay.

https://www.pcbway.com/project/shareproject/Induction_heater_HV_source_and_Wireless_Energy_transfer_with_chip_mini_ZVS_Dri_c29e9cac.html