

Diseño y prototipado de una máquina controlada modular cuyos movimientos siguen
patrones de plegado

Carlos José Álvarez Cachay y Jonathan David Gil Norato

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electrónico

Director

Diego Fernando Becerra Ramírez

Magister en Educación

Codirector

Carlos Rodrigo Correa Cely

Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

E3T

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

Con el corazón lleno de gratitud, se expresa un sincero agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander, no solo por brindar el espacio académico para la realización de este proyecto, sino por ser el lugar donde crecieron ideas, sueños y aprendizajes que marcarán para siempre la vida profesional y personal del autor.

Un especial reconocimiento al director y al codirector, cuya guía paciente, consejos oportunos y confianza fueron un faro en los momentos de duda. A los docentes, quienes con sus enseñanzas dejaron huellas que trascendieron más allá del aula, inspirando a creer en la ciencia, en la creatividad y en la perseverancia.

Con profundo cariño se agradece a la familia, por el apoyo incondicional, por cada palabra de aliento y por la fuerza brindada en los días difíciles. También a los amigos, que con su compañía, entusiasmo y manos dispuestas hicieron de este recorrido una experiencia más ligera y enriquecedora.

Este logro también reconoce el valor del trabajo colaborativo y la importancia del acceso al conocimiento, por lo que se agradece a la comunidad de software libre, cuyos recursos y herramientas fueron pilares indispensables para dar forma al proyecto. Finalmente, queda un sentimiento especial al mirar el fruto de este esfuerzo: el robot en origami denominado DPGami, que no solo representa un avance académico, sino también la unión de voluntades, aprendizajes compartidos y sueños hechos realidad.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos.....	11
1.1 Objetivo General.....	11
1.2 Objetivos Específicos.....	11
2. Justificación	12
3. Marco teórico	13
3.1 Robótica Flexible.....	13
3.2 Principio del origami.....	13
3.2.2 <i>Conceptos Básicos</i>	14
3.3 Generación del movimiento	14
3.3.1 <i>Principios del Origami para la generación del movimiento</i>	15
3.3.2 <i>Inducción del movimiento</i>	16
3.3.2.1 Volumen de la figura.....	16
3.3.2.2 Plegado de la figura	17
3.4 Instrumentación y estudio de mercado.....	18
3.4.1 <i>Actuadores</i>	18
3.4.2 <i>Sensores</i>	18
3.4.3 <i>Impresión 3D</i>	19
3.4.4 <i>Microcontrolador</i>	20
4.Desarrollo.....	21
4.1 Indicador de movimiento	21
4.2 Comparativa de materiales e implementos	21
4.2.1 <i>Comparación de sensores</i>	21
4.2.2 <i>Comparación de actuadores</i>	22
4.2.3 <i>Comparación de materiales para impresión 3D</i>	23
4.2.4 <i>Comparación de Microcontroladores</i>	24
4.3 Selección de los implementos y el material de impresión.....	24
4.4 Circuito	26
4.5 Evolución del Prototipo	26
4.5.1 <i>Modelo propuesto</i>	26
4.5.2 <i>Prototipos posteriores al modelo base</i>	27

4.5.2.1 Segundo prototipo	27
4.5.2.2 Tercer prototipo	27
4.5.2.3 Cuarto prototipo	28
4.5.2.4 Prototipo impreso en 3D.	29
4.5.5 Integración general para el funcionamiento del prototipo	30
4.5.5.1 Diseño en 3D del modelo propuesto.	30
4.5.5.2 Programación	31
4.5.5.3 Desarrollo de la PCB	33
4.5.5.4 Sistema de control.....	33
4.6 Pruebas realizadas.....	34
4.6.1 Material de impresión.....	34
4.6.2 Prueba de motores	35
4.6.3 Autonomía del DPGAMI.....	36
4.6.4 Validación del prototipo en general.	37
5. Conclusiones	40
6. Recomendaciones	42
Referencias Bibliográficas.....	43

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Comparativa de sensores	21
Tabla 2. Comparativa de actuadores	22
Tabla 3. Comparativa de materiales para impresión 3D.....	23
Tabla 4. Comparativa de microcontroladores para sistemas electrónicos controlados	24

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Modelo propuesto por el profesional en técnicas de origami.....	26
Figura 2. Segundo prototipo	27
Figura 3. Tercer prototipo	28
Figura 4. Cuarto prototipo.....	29
Figura 5. Prototipo impreso en 3D.....	29
Figura 6. Interfaz de la app desarrollada en app inventor.....	32
Figura 7. Diagrama del control ON/OFF del sistema.....	34
Figura 8. Prueba del material de impresión	35
Figura 9. Prueba de los motores.....	36
Figura 10. Prueba de autonomía	37
Figura 11. Prototipo final con sensores y tracción.....	38

Lista de Apéndices

(Los apéndices están disponibles en el repositorio institucional)

Apéndice A. Diagrama esquemático del circuito del DPGAMI.

Apéndice B. Codificación del programa en la ESP32.

Apéndice C. Desarrollo de la estructura de bloques en MIT App Inventor.

Apéndice D. Desarrollo de la interfaz de la aplicación.

Apéndice E. Evolución del prototipo por fase.

Apéndice F. Registro fotográfico de prototipos.

Apéndice G. Diseño 3D del DPGAMI.

Apéndice H. Toma de datos de las propiedades de las piezas de PETG.

Apéndice I. Toma de datos del torque en motores con caja reductora

Apéndice J. Toma de datos de la autonomía del sistema general

Resumen

Título: Diseño y prototipado de una máquina controlada modular cuyos movimientos siguen patrones de plegado *

Autor: Carlos José Álvarez Cachay y Jonathan David Gil Norato **

Palabras Clave: plegado, origami, motor, sensor, ESP32, programación, electrónica.

Descripción: Este proyecto tiene como objetivo el diseño y desarrollo de un robot móvil con capacidad de transformación estructural, basado en principios de plegado tipo origami. El sistema está orientado a operar en entornos de geometría variable, donde un robot de forma fija encontraría limitaciones para desplazarse. Para ello, el robot emplea motores con caja reductora que permiten ejecutar movimientos mecánicos secuenciales que modifican su forma de acuerdo con el entorno.

El sistema de control está basado en una unidad de procesamiento ESP32, la cual gestiona la lectura de sensores (como sensores de distancia ultrasónicos) encargados de detectar obstáculos en el entorno. La información recolectada se interpreta mediante algoritmos programados en la ESP32, los cuales definen las acciones que debe realizar el robot para modificar su configuración física y así adaptarse al terreno.

Este diseño se fundamenta en una arquitectura mecánica modular, que permite la reconfiguración dinámica de sus componentes móviles mediante plegado. Dicha capacidad de transformación le permite superar obstáculos y continuar su desplazamiento de manera autónoma, aumentando su versatilidad en aplicaciones como exploración, reconocimiento de terreno y misiones en espacios confinados.

* 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: Carlos Rodrigo Correa Cely - profesión

Abstract

Title: Design and prototyping of a modular controlled machine whose movements follow bending patterns*

Author: Carlos José Álvarez Cachay and Jonathan David Gil Norato **

Key Words: folding, origami, motor, sensor, ESP32, programming, electronics.

Description: The objective of this project is the design and development of a mobile robot with structural transformation capabilities, based on origami-like folding principles. The system is oriented to operate in variable geometry environments, where a fixed robot would find limitations to move. For this purpose, the robot uses motors with gearboxes to execute sequential mechanical movements that modify its shape according to the environment.

The control system is based on an ESP32 processing unit, which manages the reading of sensors (such as ultrasonic distance sensors) in charge of detecting obstacles in the environment. The information collected is interpreted by algorithms programmed in the ESP32, which define the actions to be performed by the robot to modify its physical configuration and thus adapt to the terrain.

This design is based on a modular mechanical architecture, which allows the dynamic reconfiguration of its mobile components by folding. This transformation capacity allows it to overcome obstacles and continue its movement autonomously, increasing its versatility in applications such as exploration, terrain reconnaissance and missions in confined spaces.

* 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

En la actualidad, el desarrollo de robots con capacidades adaptativas representa un desafío fundamental para la ingeniería, especialmente cuando se trata de operar en entornos complejos o de difícil acceso. Los robots convencionales, diseñados para desplazarse sobre superficies planas y homogéneas, presentan serias limitaciones cuando deben enfrentarse a terrenos irregulares, colapsados o con acceso restringido. Esta situación cobra especial relevancia en escenarios como desastres naturales, conflictos bélicos o misiones de exploración geológica, donde se requiere de soluciones tecnológicas que no solo permitan la movilidad autónoma, sino también la transformación estructural del robot frente a obstáculos del entorno.

El arte tradicional japonés del origami, basado en técnicas de plegado, ha demostrado su utilidad en diversas áreas de la ingeniería gracias a su capacidad para transformar estructuras simples en formas complejas y funcionales. Este principio ha sido trasladado a la robótica en lo que se conoce como robótica inspirada en origami, permitiendo el desarrollo de estructuras plegables, modulares y reconfigurables. En este sentido, la investigación se fundamenta en la creación de un robot móvil capaz de modificar su forma mediante técnicas de plegado estructural, haciendo uso de motores con caja reductora, sensores de proximidad y un sistema de control basado en una unidad ESP32. El propósito del proyecto es implementar un prototipo funcional que permita validar esta aproximación y evaluar su efectividad en ambientes no estructurados.

La hipótesis que orienta este estudio plantea que el uso de técnicas de origami, integradas a través de soluciones electrónicas y mecánicas, permite desarrollar robots reconfigurables capaces de adaptarse a terrenos complejos sin comprometer su operatividad. El enfoque adoptado es de

tipo práctico y aplicado, centrado en el diseño e implementación de un sistema mecatrónico que combina control embebido, automatización y estructuras plegables.

Esta investigación se justifica tanto en el ámbito académico como en el social. Desde el punto de vista científico, representa un aporte al conocimiento en robótica adaptable, permitiendo explorar nuevas configuraciones estructurales y control en sistemas móviles. A nivel social, la implementación de robots capaces de operar en espacios confinados y ambientes hostiles puede tener un impacto significativo en labores de búsqueda y rescate, exploración y seguridad, reduciendo riesgos humanos y aumentando la eficiencia de las operaciones. En consecuencia, el proyecto no solo promueve la innovación tecnológica en Colombia y en la Universidad Industrial de Santander, sino que también abre un camino hacia el diseño de soluciones estratégicas que integren el arte, la ingeniería y la tecnología en beneficio de la sociedad.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar un prototipo de robot modular capaz de desplazarse en superficies controladas mediante la transformación del mismo, usando la geometría de los pliegues, implementando sistemas de control y el análisis de instrumentación electrónica.

1.2 Objetivos Específicos

- Diseñar el modelo del robot modular denominado (DPGAMI), basado en la técnica de origami estableciendo las especificaciones necesarias para su operación.
- Seleccionar los materiales y tecnologías adecuadas para el desarrollo del DPGAMI, aprovechando las propiedades de los materiales utilizados en la generación de distintos pliegues y su implementación en entornos controlados.

- Implementar un sistema de control basado en sensores de proximidad y motores con caja reductora que permitan el pliegue y despliegue del DPGAMI evidenciando la operación y capacidad de adaptación en tiempo real.
- Validar la funcionalidad del prototipo en entornos controlados para evaluar su capacidad de modificación de forma y su autonomía.

2. Justificación

El desarrollo de tecnologías que integren conceptos innovadores provenientes de distintas disciplinas representa un avance necesario frente a los retos contemporáneos de la ingeniería. El proyecto titulado *“Diseño y prototipado de una máquina controlada modular cuyos movimientos siguen patrones de plegado”* surge como una propuesta de solución ante la creciente demanda de robots capaces de adaptarse a entornos hostiles y de difícil acceso, como zonas de desastre natural, conflictos bélicos o espacios confinados. La técnica del origami, tradicionalmente artística, ha demostrado su potencial en aplicaciones de ingeniería gracias a su capacidad para generar estructuras flexibles, compactas y reconfigurables.

Este proyecto propone el desarrollo y prototipado de un robot basado en técnicas de plegado denominado (DPGAMI), inspirado en principios del origami, pueda modificar su geometría estructural en tiempo real mediante un sistema de control electrónico basado en sensores de proximidad y motores con caja reductora. A su vez, la implementación de esta solución implica una integración multidisciplinaria entre electrónica, automatización, diseño mecánico y modelado geométrico, aportando valor no solo tecnológico, sino también académico.

Además, el impacto del DPGAMI trasciende el ámbito técnico, ya que su funcionalidad puede ser aplicada en sectores donde la intervención humana directa representa un alto riesgo, mejorando

así la seguridad, la eficiencia y la cobertura en operaciones críticas. También se considera su valor como herramienta educativa y de investigación, al fomentar nuevas líneas de exploración en robótica flexible y estructuras reconfigurables dentro del contexto universitario nacional. En este sentido, el proyecto no solo responde a una necesidad puntual de innovación en movilidad robótica, sino que también contribuye a posicionar a la Universidad Industrial de Santander como referente en el desarrollo de soluciones tecnológicas basadas en técnicas no convencionales como el origami.

3. Marco teórico

3.1 Robótica Flexible

Las capacidades de transformación de forma son cruciales para permitir la multifuncionalidad tanto en sistemas biológicos como artificiales. Se han propuesto diversas estrategias de transformación de forma para aplicaciones en metamateriales y robótica. Sin embargo, pocos de estos enfoques han logrado la capacidad de transformarse sin problemas en una multitud de formas volumétricas después de la fabricación utilizando un mecanismo de accionamiento y control relativamente sencillo (Li et al., 2024).

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).

Dominar los fundamentos del origami resulta indispensable al momento de desarrollar estructuras capaces de transformarse de forma controlada. A través del uso de patrones geométricos precisos, esta técnica brinda la posibilidad de diseñar mecanismos robóticos con movimientos autónomos y adaptables. En este contexto, resulta fundamental trasladar las propiedades de flexibilidad y exactitud que caracterizan al origami hacia sistemas mecánicos, empleando materiales que puedan adaptarse a los esfuerzos mecánicos ejercidos para poder cambiar su forma y adaptarse a las condiciones que se le presenten.

3.3 Generación del movimiento

Cuando la inspiración proviene de la naturaleza o de un mecanismo funcional ya existente, el primer paso consiste en adoptar una actitud de observación meticulosa. Si, por ejemplo, se desea desarrollar un modelo de origami inspirada en un ave capaz de batir sus alas, es fundamental estudiar con detalle cómo se produce ese movimiento en un pájaro real: dónde se encuentran sus

puntos de articulación como hombros, codos y muñecas, cómo se pliegan y despliegan las plumas, y en qué secuencia ocurre el aleteo. Para ello, resulta útil recurrir a recursos como videos en cámara lenta, esquemas anatómicos o simulaciones tridimensionales que permitan analizar cada fase del movimiento con precisión (Lang, s.f.).

En el caso de una referencia más ligada al ámbito de la ingeniería, como un brazo robótico o un sistema de engranajes, es necesario comprender los principios mecánicos que rigen su funcionamiento: cómo se transmiten las fuerzas, la ubicación de los ejes de giro y qué tipos de conexiones permiten el movimiento. Este tipo de análisis detallado resulta esencial para traducir la complejidad de los sistemas reales en un diseño plegable que funcione con materiales simples como el papel (Lang, s.f.).

3.3.1 Principios del Origami para la generación del movimiento

Una vez definida la idea base, el diseño de origami cinemático requiere comprender cómo hacer que una figura se mueva de forma controlada. En este tipo de origami, cada pliegue actúa como una bisagra o punto de giro. Son esos pliegues ya sean de valle o montaña los que permiten que una parte del prototipo se mueva con respecto a otra, como si fuera un pequeño mecanismo. Además, es fundamental entender cómo las distintas partes de la pieza están conectadas. A veces, al mover una sección, otra reacciona automáticamente gracias a cómo están organizados los pliegues. Esa conexión entre partes es lo que da vida al movimiento, sin necesidad de usar motores ni piezas externas (Lang, s.f.).

3.3.2 Inducción del movimiento.

Entre las técnicas más comunes está la tracción o empuje, que utiliza solapas o pestañas que, al ser manipuladas, activan pliegues internos. Este sistema puede integrarse fácilmente con pequeños motores, los cuales reemplazan la acción manual y permiten controlar el movimiento de forma precisa mediante señales digitales.

Otra técnica es el uso de pliegues mecánicos coordinados, donde una parte del papel empuja o tira de otra a través de un diseño inteligente. Este tipo de movimiento puede ser activado electrónicamente usando motores, actuadores lineales o mecanismos de leva impulsados por microcontroladores.

Por último, los pliegues elásticos o escondidos permiten almacenar energía que se libera con un movimiento brusco. Estos pueden potenciarse con componentes como bandas elásticas tensadas por motores o con materiales inteligentes, como polímeros con memoria de forma, que reaccionan al calor o a impulsos eléctricos. En conjunto, estas técnicas de plegado, combinadas con sistemas electrónicos simples, abren un campo de posibilidades para crear estructuras de origami interactivas, autónomas y programables (Shafer, s.f.).

3.3.2.1 Volumen de la figura. Cuando pasamos del origami tradicional al diseño de estructuras reales con materiales rígidos o semirrígidos, surge la necesidad de trabajar con paneles que tienen espesor. En ese momento, la figura deja de ser una simple superficie plegada y se convierte en un objeto tridimensional con volumen real.

Este volumen no es un detalle menor, afecta directamente cómo se comporta al plegarse. Si simplemente se le añade grosor a cada cara sin considerar el movimiento, las piezas terminan chocando o bloqueándose entre sí. Por eso, es fundamental diseñar los paneles con un criterio

geométrico que permita anticipar esos problemas. Esto incluye definir límites de plegado, respetar los ángulos entre caras adyacentes y controlar el espacio que ocupa cada panel en el momento del movimiento.

El objetivo es lograr un equilibrio entre funcionalidad y volumen: que la figura tenga suficiente cuerpo para ser estructuralmente útil, por ejemplo, para soportar peso o resistir tensiones, pero sin perder la capacidad de plegarse de forma fluida. Este tipo de análisis es clave en aplicaciones como mobiliario plegable, arquitectura transformable o dispositivos mecánicos compactos (Tachi, 2009).

3.3.2.2 Plegado de la figura. El plegado en origami con volumen es mucho más que una simple acción mecánica: es una transformación compleja que involucra geometría, materiales y cinemática. A diferencia del origami hecho en papel, donde los pliegues pueden cerrarse completamente sin mayores restricciones, en estructuras con espesor hay un límite físico que impide un cierre total. Eso obliga a repensar todo el sistema de pliegues para que sigan funcionando correctamente.

Este tipo de diseño técnico no solo busca que la figura se vea bien, sino que funcione de forma confiable y repetible. El plegado debe ser suave, controlado y estructuralmente seguro. Esta lógica de diseño es fundamental cuando se aplican principios del origami en campos como la robótica, la ingeniería estructural, el diseño de productos plegables o la creación de mecanismos cinemáticos en espacios reducidos (Tachi, 2009).

3.4 Instrumentación y estudio de mercado

3.4.1 Actuadores

En el diseño de sistemas de origami cinemático, los actuadores juegan un papel fundamental al ser los encargados de generar el movimiento físico en respuesta a una señal de control. Entre los más utilizados se encuentran los motores con caja reductora, los cuales proporcionan una ventaja clave: permiten convertir la alta velocidad del motor en un movimiento más lento, pero con mayor torque. Esta característica resulta especialmente útil cuando se requiere mover estructuras con peso o cuando se busca un desplazamiento controlado y continuo, como en el despliegue de superficies plegables.

Por otro lado, los servomotores son ideales cuando se necesita precisión en el ángulo de giro. Estos dispositivos integran motor, caja reductora y un sistema de control que permite definir la posición exacta a la que debe llegar el eje. Esto facilita la ejecución de movimientos repetibles y estables, fundamentales que requieren posicionamientos específicos para funcionar correctamente.

3.4.2 Sensores

Para dotar de interactividad y respuesta al sistema, se integran sensores que permiten detectar la presencia, distancia o movimiento de objetos cercanos. Uno de los más comunes es el sensor infrarrojo, que funciona emitiendo un haz de luz invisible y midiendo su reflexión. Este tipo de sensor es útil para detectar obstáculos o manos en cercanía, lo cual puede activar mecanismos de plegado o despliegue sin necesidad de contacto físico.

También se utiliza el sensor ultrasónico, que mide distancias mediante pulsos de sonido de alta frecuencia. Al calcular el tiempo que tarda el eco en regresar, permite estimar la posición de un

objeto frente a otro. Es especialmente útil para generar movimientos automáticos cuando una persona u objeto entra en un rango determinado.

Otra opción versátil es el sensor de proximidad, que detecta cambios en campos eléctricos o magnéticos provocados por la cercanía de un cuerpo. Estos sensores permiten activar respuestas suaves o progresivas según la distancia del usuario, lo cual es ideal para que el origami se transforme de manera gradual o sensible al entorno.

3.4.3 Impresión 3D

Dentro de los materiales termosensibles utilizados en sistemas plegables, el TPU con memoria de forma, como el PETG, destaca por sus sobresalientes propiedades mecánicas. Posee una alta flexibilidad, que le permite soportar deformaciones repetidas sin romperse, junto con una dureza estructural que lo hace resistente al desgaste y a tensiones mecánicas, incluso en zonas articuladas. Esta combinación resulta ideal para mecanismos de movimiento continuo, donde se requiere tanto elasticidad como estabilidad dimensional.

Por su parte, materiales como el PETG (Poliétileno Tereftalato Glicolizado) termo formable presentan una rigidez moderada que permite su deformación térmica, aunque con menor capacidad de recuperación y flexión prolongada. Las aleaciones con memoria de forma (SMA), como el Nitinol, ofrecen una fuerza de recuperación elevada, pero su dureza y fragilidad ante ciertas cargas limitan su versatilidad en estructuras blandas. En cambio, los polímeros electroactivos (EAP) tienen buena respuesta en precisión, pero su deformación suele ser mínima y dependen de condiciones eléctricas estrictas.

El comportamiento mecánico del TPU, especialmente en aplicaciones que exigen movimiento repetitivo, plegado eficiente y durabilidad, lo posiciona como una de las opciones más equilibradas para diseños cinemáticos basados en origami estructural.

3.4.4 Microcontrolador.

En el desarrollo de sistemas cinemáticos controlados electrónicamente, el uso de microcontroladores es fundamental para gestionar sensores, actuadores y lógicas de interacción. Entre los más utilizados se encuentra el ESP32, un microcontrolador de alto rendimiento que combina bajo consumo energético con conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada, lo cual lo hace ideal para proyectos que requieren comunicación inalámbrica o control remoto.

El Arduino Uno, por su parte, ofrece una plataforma robusta, ampliamente documentada y fácil de programar. Su arquitectura simple y estable lo convierte en una excelente opción para gestionar tareas de entrada/salida digital, controlar servomotores y trabajar con sensores de manera directa y efectiva.

Por otro lado, la Raspberry Pi destaca por ser una minicomputadora de propósito general. A diferencia de un microcontrolador tradicional, permite ejecutar sistemas operativos completos, lo que abre la posibilidad de realizar procesamiento de datos más avanzado, visión por computadora, o conectividad con interfaces gráficas.

4.Desarrollo

4.1 Indicador de movimiento

Indicador de movimiento visual y cuantitativo. Este indicador consistió en una serie de pruebas controladas en las cuales se activaban los motores con caja reductora mediante señales enviadas desde el microcontrolador ESP32, bajo distintas condiciones estructurales y de carga. El objetivo de este indicador fue determinar si el sistema era capaz de completar el ciclo de plegado dentro de un margen de tiempo definido y con un desplazamiento angular o lineal esperado. La respuesta del mecanismo fue registrada utilizando sensores de proximidad y observación directa, evaluando la secuencia, velocidad y consistencia del movimiento generado. La correcta activación de cada segmento estructural evidenció el éxito en la integración entre hardware y software, validando el diseño cinemático implementado.

4.2 Comparativa de materiales e implementos

Durante el desarrollo del proyecto se analizaron diferentes materiales, sensores, actuadores y microcontroladores con el fin de identificar aquellos que mejor se adaptaran a las necesidades del prototipo tal como se evidencian en las tablas 1 a 4. La selección final se basó en criterios como resistencia, flexibilidad, eficiencia y facilidad de integración, buscando siempre el equilibrio entre funcionalidad y viabilidad práctica junto al presupuesto.

4.2.1 Comparación de sensores

Tabla 1.

Comparativa de sensores

Sensor	Principio de funcionamiento	Aplicaciones Comunes
Infrarrojo (IR)	Emite luz infrarroja y mide su reflexión para detectar proximidad.	Detección de obstáculos, activación sin contacto.
Ultrasónico	Emite pulsos de sonido de alta frecuencia y mide el eco para calcular distancias.	Medición de distancia, movimientos automáticos.
Proximidad	Detecta cambios en campos eléctricos o magnéticos provocados por un objeto cercano.	Activación gradual, respuestas sensibles al entorno.

Nota: La tabla resume sensores ampliamente utilizados en proyectos de robótica y sistemas interactivos. La elección depende del tipo de interacción deseada, precisión requerida y condiciones del entorno.

4.2.2 Comparación de actuadores

Tabla 2.

Comparativa de actuadores

Actuador	Características principales	Aplicaciones Comunes
Motor con caja Reductora	Reduce la velocidad del motor y aumenta el torque, ideal para desplazamientos controlados.	Despliegue de estructuras, movimiento de partes pesadas.
Servomotor	Permite controlar con precisión el ángulo de giro mediante retroalimentación interna.	Posicionamiento exacto, movimientos repetibles.

Nota: Esta tabla compara actuadores clave en mecanismos plegables. La elección dependerá del tipo de movimiento requerido: continuo con fuerza o preciso con control angular.

4.2.3 Comparación de materiales para impresión 3D

Tabla 3.

Comparativa de materiales para impresión 3D

Materiales	Propiedades Mecánicas	Aplicaciones Comunes
PLA	Rígido, fácil de imprimir, biodegradable.	Prototipado rápido, piezas decorativas.
ABS	Resistente al impacto, duradero, emite vapores.	Carcasas, componentes funcionales.
PETG	Resistente, buena adhesión, ligero.	Botellas, envases, piezas técnicas.
TPU	Flexible, elástico, resistente al desgaste.	Fundas, juntas, partes móviles.
Nylon	Alta resistencia, baja fricción, absorbente de humedad.	Engranajes, bisagras, herramientas.

Nota: La tabla muestra una comparación básica entre materiales comunes en impresión 3D. La elección depende del uso final, facilidad de impresión y resistencia requerida.

4.2.4 Comparación de Microcontroladores

Tabla 4.

Comparativa de microcontroladores para sistemas electrónicos controlados

Microcontrolador	Características técnicas	Aplicaciones Comunes
ESP32	Alto rendimiento, conectividad Wi-Fi y Bluetooth, bajo consumo energético.	IoT, automatización, sistemas inalámbricos.
Arduino UNO	Fácil de programar, arquitectura simple, múltiples pines I/O.	Control de motores, sensores, prototipado educativo.
Raspberry Pi	Procesador de propósito general, sistema operativo completo, múltiples interfaces.	Visión por computadora, servidores locales, proyectos multimedia.

Nota: La tabla presenta una comparación básica entre microcontroladores utilizados en sistemas electrónicos. La selección dependerá del nivel de complejidad del proyecto, requerimientos de conectividad, procesamiento y facilidad de desarrollo.

4.3 Selección de los implementos y el material de impresión.

Para el diseño del DPGAMI se realizó una rigurosa selección de componentes evaluando distintas alternativas en cuanto a desempeño, compatibilidad e integración estructural. El microcontrolador ESP32 fue elegido frente a opciones como Arduino Uno o Raspberry Pi, debido a su doble núcleo de procesamiento, conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada y su capacidad de manejar múltiples tareas simultáneamente, lo cual es esencial para controlar motores, leer sensores y mantener comunicación remota desde una aplicación móvil. Aunque la Raspberry Pi ofrece

mayor procesamiento, su consumo energético, tamaño y complejidad la hacen innecesaria para un sistema embebido de control sencillo. Arduino Uno, aunque fácil de programar, no cuenta con conectividad inalámbrica nativa ni la velocidad de procesamiento requerida.

En cuanto a los actuadores, se seleccionaron motores con caja reductora frente a servomotores o motores DC convencionales. Los motores con caja reductora proporcionan un alto torque a bajas revoluciones, lo que los hace ideales para ejecutar plegados estructurales donde se requiere fuerza más que velocidad. Los servomotores, aunque precisos, tienen un rango de movimiento limitado y son más costosos, mientras que los motores DC simples carecen del torque necesario y necesitan un sistema de control más complejo para lograr posicionamiento.

Los sensores ultrasónicos fueron preferidos frente a sensores infrarrojos y de proximidad capacitiva, ya que ofrecen una mayor precisión en la medición de distancias en entornos variados, independientemente de la iluminación o del tipo de superficie del objeto detectado. A diferencia del infrarrojo, que puede fallar ante superficies oscuras o brillantes, y del capacitivo, cuya sensibilidad depende de la conductividad de los objetos cercanos, el ultrasónico permite una detección más estable y a mayores distancias, lo cual es fundamental para anticipar obstáculos y activar las secuencias de plegado.

Finalmente, en cuanto al material de impresión 3D, se optó por PETG en lugar de PLA, ABS, TPU o Nylon. El PETG combina buena resistencia mecánica, flexibilidad moderada, resistencia química y una excelente adherencia entre capas, lo que lo hace perfecto para soportar pliegues dinámicos sin fracturarse. El PLA, aunque fácil de imprimir, es frágil bajo esfuerzo repetitivo. El ABS presenta buena resistencia, pero es más difícil de imprimir y emite vapores tóxicos. El TPU, aunque muy flexible, resulta demasiado blando para mantener la rigidez estructural necesaria en el DPGAMI. Por su parte, el Nylon, aunque muy resistente, absorbe humedad y presenta alta

retracción al imprimirse. Así, el PETG se posicionó como la opción más equilibrada para un prototipo funcional, fiable y resistente.

4.4 Circuito

El diseño del circuito fue realizado en el software **Easy EDA**, permitiendo organizar de forma precisa la conexión entre los motores, sensores y el microcontrolador ESP32. El esquema facilitó la distribución lógica de los componentes y la planificación de la placa PCB, asegurando una integración eficiente y funcional del sistema electrónico del DPGAMI.

4.5 Evolución del Prototipo

4.5.1 Modelo propuesto

Durante el desarrollo del proyecto se construyeron diversos prototipos estructurales, basados en un modelo inicial elaborado en papel por un profesional con experiencia en técnicas de origami. Este modelo inicial mostrado en la figura 1 sirvió como referencia fundamental para referenciar los principios geométricos del plegado a la estructura del DPGAMI.

Figura 1.

Modelo propuesto por el profesional en técnicas de origami



Nota: Se muestra el modelo físico inicial desarrollado por un profesional en técnicas de origami. Esta estructura sirvió como base conceptual para el diseño geométrico del robot DPGAMI.

4.5.2 Prototipos posteriores al modelo base

4.5.2.1 Segundo prototipo. El prototipo mostrado en la figura 2 en cartón paja fue construido como un segundo prototipo físico del robot DPGAMI, con el objetivo de analizar el comportamiento de los pliegues estructurales. Esta etapa permitió identificar las zonas adecuadas para la futura integración de motores, asegurando que estos pudieran generar los movimientos necesarios para reproducir los plegados característicos de la estructura.

Figura 2.

Segundo prototipo



Nota: Este prototipo fue hecho en cartón paja con dimensiones de 10cm x 5cm para cada rectángulo, está construida con 24 piezas rectangulares.

4.5.2.2 Tercer prototipo. Este prototipo mostrado en la figura 3 fue el primero en incorporar bisagras. Tomando como referencia el diseño anterior en cartón paja, esta versión

permitió evaluar el comportamiento mecánico de las bisagras durante los pliegues estructurales del robot DPGAMI. Además, sirvió para probar la funcionalidad de los motores, ya que en esta etapa del desarrollo ya se había definido la ubicación de los dos primeros actuadores; así mismo verificar el tamaño y pesos adecuados para la generación de los pliegues con los motores seleccionados.

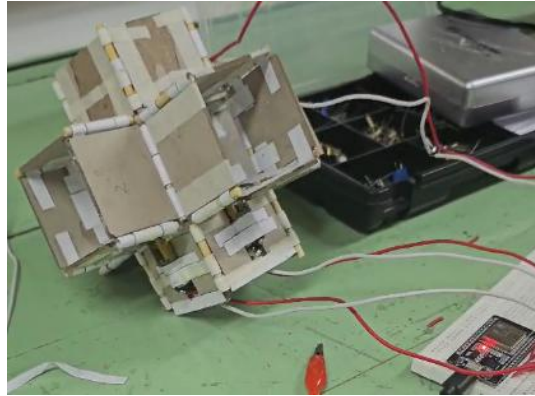
Figura 3.

Tercer prototipo



Nota: Este prototipo fue hecho en cartón piedra con las mismas dimensiones del tercer prototipo mostrado, aquí ya se introdujeron las bisagras para poder visualizar los pliegues respecto al movimiento de los actuadores.

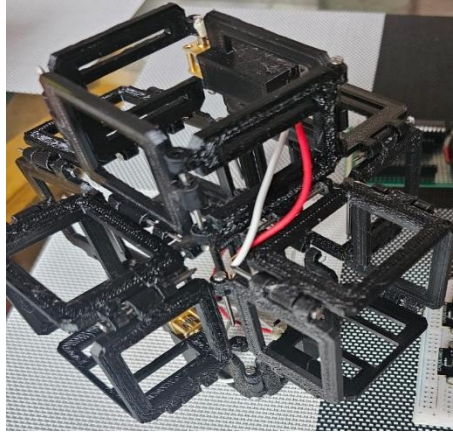
4.5.2.3 Cuarto prototipo. En este cuarto prototipo mostrado en la figura 4 incorpora el tercer actuador, lo que permitió realizar pruebas completas con los tres motores del DPGAMI. En esta fase se integró el circuito completo integrando la aplicación desarrollada en **MIT App Inventor**, con la cual se logró ejecutar los movimientos de plegado de forma remota, logrando replicar el plegado esperado del mecanismo a través de la app.

Figura 4.*Cuarto Prototipo*

Nota: Este prototipo está hecho en cartón piedra con dimensiones de 5cm x 4cm esto con el fin de reducir peso y darle mayor facilidad de movimiento a los actuadores.

4.5.2.4 Prototipo impreso en 3D. El prototipo mostrado en la figura 5 corresponde a la última versión del DPGAMI, fabricado mediante impresión 3D utilizando PETG como material base. Esta versión íntegra completamente la estructura plegable con los actuadores y el sistema electrónico, permitiendo validar la funcionalidad del diseño con un material que ofrece un balance adecuado entre resistencia mecánica y flexibilidad para soportar los pliegues dinámicos del mecanismo. También se incluye el montaje final de la estructura que cumple la funcionalidad de la tracción para el movimiento de toda la pieza

Figura 5.*Prototipo impreso en 3D*



Nota: Este prototipo al ser el final ya se dispuso a imprimirse en 3D usando el material PETG, sus dimensiones son de 5cm x 4cm.

4.5.5 Integración general para el funcionamiento del prototipo

En el desarrollo de la evolución del DPGAMI, la adecuación a los intereses de cada una de las partes del proyecto compromete la vitalidad y la validación para la solución de cada uno de los problemas que el avance del proyecto dejaba como resultante; por lo cual el avance paralelo de todas las partes para obtener el resultado final representa la solución a un problema ya fuese netamente estructural, únicamente de programación o la integración de las dos partes.

4.5.5.1 Diseño en 3D del modelo propuesto. El modelado en 3D de la propuesta se realizó a través del software **Blender**, ya que al representar una practicidad única en su interfaz para el fácil manejo de la herramienta, también represento un ahorro significativo en recursos computacionales ya que comparado con otras herramientas que podrían destinarse para el modelado de la pieza se obtuvo un resultado satisfactorio para lo planteado previamente en el diseño, sin la necesidad de abarcar mucho espacio y recursos de los computadores sino que también

es un software libre y de acceso abierto con el catálogo de herramientas suficientes para suplir las necesidades del prototipo.

Al juntar las soluciones de los prototipos y acoplarlas al modelo 3D se busca llegar a los resultados esperados que se obtenían en los modelos de papel. Se tiene en cuenta los siguientes aspectos para poder generar los pliegues incluyendo la electrónica tales como los marcos, las bisagras, soportes y recortes a cada una de las piezas ya que al modelar el diseño final se obtienen 17 piezas diferentes únicas de las cuales se repiten 7 para un total de 24 piezas.

Los marcos son el resultado de reducir consumos generales tanto económicos como electrónicos ya es una de las fuentes principales de peso del modelo y al dejar tanto material innecesario en el centro se sustenta la ausencia de potencia en los motores con caja de reductora de mover la figura. Las bisagras y recortes son especiales para muchas de las piezas ya que se concentró en secciones llegando a validar la teoría de pliegues, dicha solución se representó en la posición única de las bisagras según la dirección del pliegue de la figura permitiendo que el rango de giro se amplie.

4.5.5.2 Programación. El proyecto contiene tres segmentos grandes de programación de los cuales se resaltan principalmente el código de la ESP32 que agrupa todo el funcionamiento de los actuadores como de los sensores, la programación de la app que es un software totalmente diferente donde se encuentra esa interfaz de control para manejar el prototipo y por último el protocolo de comunicación utilizado para relacionar ambas interfaces de programación.

El trabajo de la codificación de la ESP32 resulto ser simple ya que al poseer el mismo entorno que un Arduino UNO convencional que fue trabajado, codificar en si no represento un problema significativo; el tratar de desarrollar una lógica que posea la capacidad de permitir un buen funcionamiento total entre todos los integrantes represento el problema, programar en

bloques de funciones es vital para el desarrollo de cualquier código, teniendo bloques según se función como asignación de variables, banderas, pines etc. Un bloque de prevención de riesgos tanto visual como mecánico y un bloque separado en un case para la función de lógica booleana de cada uno de los movimientos implementados.

El **MIT app inventor** fue la herramienta informática seleccionada para el desarrollo de la app simplificando el aprendizaje de un nuevo lenguaje o un código fuente más fuerte y estructurado ya que se realiza a través de bloques y permite bajo la misma lógica de la ESP32 enlazar la comunicación, así como para trasladar la lógica implementada en el microcontrolador siendo segmentado de la misma forma cada uno de los bloques previamente mencionados pero desarrollados en la app inventor como se muestra en la figura 6, junto a la interfaz suministrada por el mismo software vista ya desde el teléfono.

Figura 6.

Interfaz de la app desarrollada en app inventor



Nota: En la interfaz se puede encontrar un botón para cada uno de los pliegues realizados vistos en la parte superior, junto a un botón de emergencia llamado STOP para evitar pliegues no deseados.

4.5.5.3 Desarrollo de la PCB. El diseño del circuito impreso se realizó en el software **Easy EDA**, el cual permitió organizar todas las partes en una placa única, al revisar las necesidades del proyecto fue necesario la implementación de tecnologías de PTH (Plated Through Hole), ya que al manejar tantísima conexión aun siendo tan simple el diagrama de conexiones para la comunicación entre placas sin la necesidad de un doble trabajo de soldadura o técnicas más rudimentarias a la hora de soldar que no eran objetivo esencial del proyecto; se implementó una baquelita universal con pasantes y con las mismas dimensiones que proporciona el software para no afectar el producto final y se conectó todo a través de cable con un solo hilo de cobre por su maleabilidad, mayor conductividad y resistencia general.

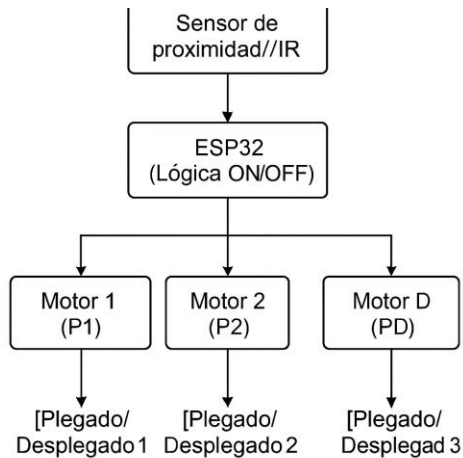
4.5.5.4 Sistema de control. El sistema de control del prototipo DPGAMI se basa en una lógica de activación ON/OFF gestionada por el microcontrolador ESP32. Este recibe la señal de entrada desde los sensores ultrasónicos, los cuales detectan obstáculos u objetos cercanos. Una vez superado un umbral predeterminado, el ESP32 activa (ON) el motor correspondiente al segmento estructural necesario mediante señales digitales.

Cada motor con caja reductora ejecuta un movimiento de plegado o desplegado de acuerdo con su configuración y posición en la estructura del DPGAMI. El sistema trabaja de forma secuencial, activando motores individualmente o en conjunto, según las condiciones del entorno. Esta lógica simple y robusta de control ON/OFF permite mantener una respuesta rápida y eficiente del

mecanismo sin requerir un sistema de control proporcional más complejo tal como se ve en la figura 7.

Figura 7.

Diagrama del control ON/OFF del sistema



Nota: Diagrama que describe un control ON/OFF donde la acción lógica del sensor es la que da el paso a la ejecución de los pliegues de cualquiera de los motores.

4.6 Pruebas realizadas.

4.6.1 Material de impresión

El PETG es un material utilizado para una amplia gama de usos, su alto rango de flexibilidad y dureza ante pruebas sencillas fueron evidencia que podría ser una opción rentable a la hora de construir el DPGAMI. Para la prueba de peso se seleccionaron unos pesos arbitrarios con el fin de corroborar en qué momento la pieza de marco completa evidenciada en la figura 8 se empieza a deformar y de esta forma escalar la misma pieza a un montaje de mayor tamaño.

Figura 8.*Prueba del material de impresión*

Nota: Prueba aplicada a una de las piezas impresas en PETG en el que se le aplicaron pesos de 1.25 progresivos hasta notar una deformación en la pieza para corroborar las propiedades físicas del material en la aplicación de los pliegues del prototipo.

4.6.2 Prueba de motores

Al momento de presentar problemas de torque al alimentar los motores se realizó la prueba del voltaje máximo al que son sometidos los motores y el cual fue encontrado de forma experimental para un giro óptimo de la figura sin necesidad de incluir un control más robusto, por lo cual la prueba se realizó a nueve volts (v) con una referencia de peso de diez gramos (g) como adición para encontrar el punto de ruptura en el cual se presenta un pico de peso que el motor de caja reductora no puede mover tal como se ve en la figura 9. Al realizar la distribución de pesos se encontró que cada motor es capaz de realizar los movimientos esperados al voltaje suministrado sin la necesidad de apoyo mecánicos externos. Para dicha prueba se tomo en cuenta una gramera para medir el peso que se iba poniendo a prueba, así como una relación entre la masa y el torque para evidenciar el progreso lineal de cada uno de los motores.

Figura 9.*Prueba de los motores*

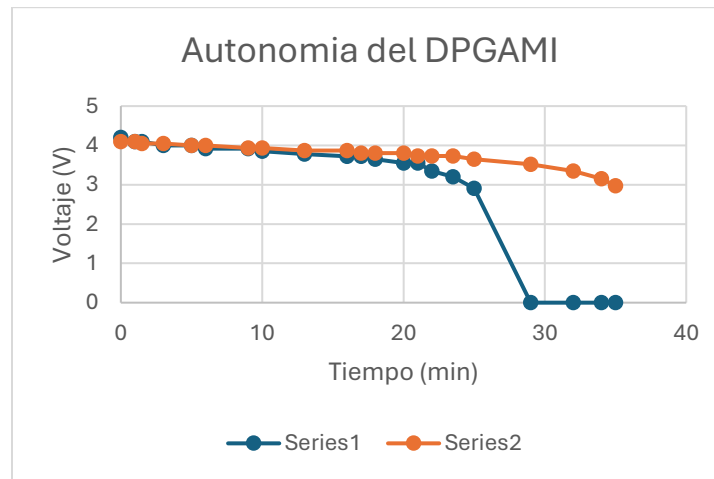
Nota: En la parte izquierda se visualiza la prueba realizada a los motores del cual se grafico el punto de ruptura que se evidencia en la izquierda donde el motor ya no tiene la capacidad de levantar la masa y no se genera un torque.

4.6.3 Autonomía del DPGAMI

Para la obtención de una gráfica para el montaje final se evaluó el voltaje que entrega la batería en distintos tiempos, tanto para el sistema de tracción como para el sistema de plegado y ver las diferencias entre las dos alimentaciones. De esta forma se analizó la duración general del sistema como se muestra en la figura 10. En la prueba se tomaron los datos a partir de los datos suministrados por un multímetro, así como un reloj ordinario para contabilizar desde que momento inicio la prueba hasta que las dos baterías se descarguen.

Figura 10.

Prueba de autonomía



Nota: La serie 1 representa la batería a la que se somete mas carga y la serie 2 la batería con menos sometimiento de carga, la muestra de datos se realizó en conjunto todo el DPGAMI para constatar que componente deja de funcionar primero.

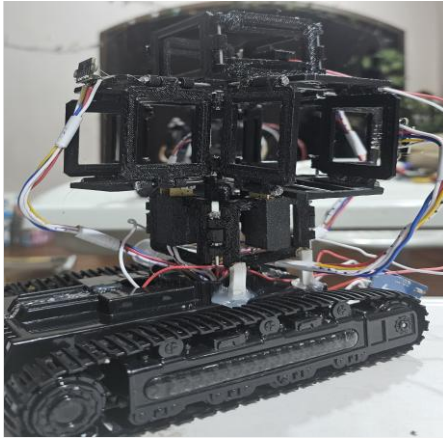
4.6.4 Validación del prototipo en general.

La validación del dispositivo final DPGAMI se realizó mediante pruebas funcionales en entornos controlados, evaluando su capacidad de plegado, respuesta a estímulos externos y autonomía operativa. El sistema respondió de manera eficiente ante la detección de obstáculos, ejecutando los movimientos de transformación estructural según lo programado. La integración entre sensores, motores y la lógica de control embebido en la ESP32 permitió confirmar el correcto funcionamiento del prototipo, evidenciando la viabilidad de su diseño para aplicaciones en espacios confinados o de difícil acceso. El dispositivo final el cual ya integra todas las partes constituye la unión de cada uno de los componentes, así como su debida relación al montaje final

en la ejecución de los pliegues trabajados. La validación se realizó con el prototipo mostrado en la figura 11.

Figura 11.

Prototipo final con sensores y tracción.



Nota: El prototipo final es la unión final de cada una de las partes involucradas donde se destaca la unión entre los dos componentes de tracción y plegado, así como el cableado a cada uno de los motores y los sensores.

El prototipo final del DPGAMI se llevó a cabo en un entorno controlado y arbitrario, específicamente una superficie plana que ofreció una base estable y uniforme para el desplazamiento y la ejecución de los pliegados. Esta condición fue fundamental para asegurar una evaluación estandarizada del comportamiento mecánico y electrónico del sistema, ya que el modelo actual no está optimizado aún para operar en entornos impredecibles o con geometría variable. Donde se obtuvieron pliegues incómodos y en momentos poco naturales sin llegar a afectar la estructura general del prototipo.

Los resultados obtenidos fueron positivos, ya que el sistema logró ejecutar correctamente los movimientos programados al someter la pieza final a la detección de obstáculos con activación de plegados y mantener una operatividad estable durante los ciclos de prueba. Destacando que la figura final aun no presenta una lógica total de todos los pliegues ya que en ausencia de mas sensores y cantidad de pines disponibles en la ESP32 no es posible darle una lógica completa a la generación de todos los pliegues.

En cuanto a los ángulos de cierre siempre existe un error bastante amplio para llegar a las marcas de 180° o en algunos puntos 90° , con desviaciones que oscilaron entre 25° y 40° respecto al cierre ideal. Este margen impide que el sistema alcance una transformación completa. Las causas se deben a un manejo interno del espacio poco eficiente, con cableado que interfiere en el movimiento; un diseño estructural que no siempre garantiza un acople perfecto entre las piezas móviles; y la flexibilidad del PETG junto con las tolerancias de impresión, que generan pequeñas deformaciones acumulativas. Como resultado, aunque el sistema logra plegarse funcionalmente, no alcanza la perfección geométrica esperada, para la verificación de estos aspectos también se tuvo en cuenta modelos previos al final donde se rescata de la misma la capacidad que tuvo a la hora de plegarse encontrando errores similares.

También se identificó que el cableado y el espacio interno podrían estar mejor organizados. El uso de una placa universal con conexiones por cable monohilo, aunque funcional, genera un diseño voluminoso y expuesto a interferencias mecánicas. Se recomienda una PCB personalizada, adaptada al modelo estructural, para mejorar la organización interna y evitar conflictos durante los plegados.

Pese a estas observaciones, la relación costo-beneficio del prototipo es notablemente positiva. La selección de componentes como el ESP32, los motores con caja reductora, sensores ultrasónicos

y el PETG permitió desarrollar un sistema funcional y adaptable con costos reducidos, ideal para el entorno académico trabajado, prototipos de validación y pruebas experimentales.

5. Conclusiones

1. El proyecto DPGAMI permitió comprobar la factibilidad de desarrollar un robot modular con capacidad de transformación estructural, mediante la implementación de patrones de plegado inspirados en el origami combinados con sistemas electrónicos y mecánicos. A través de un proceso iterativo de diseño, selección de materiales, integración de sensores y actuadores, así como programación embebida en una ESP32, se logró construir un prototipo funcional capaz de modificar su configuración física en tiempo real para desplazarse en superficies controladas. La estructura impresa en PETG proporcionó el equilibrio necesario entre rigidez y flexibilidad, permitiendo la ejecución repetitiva de los pliegues sin comprometer su integridad. Además, la lógica de control ON/OFF, los sensores ultrasónicos y la interfaz móvil desarrollada permitieron que el sistema respondiera correctamente a estímulos del entorno. En conjunto, estos resultados validan el enfoque propuesto y demuestran que la robótica plegable representa una alternativa viable para escenarios donde la adaptabilidad es crítica, como misiones de rescate, exploración o entornos educativos, aportando una metodología replicable y con alto potencial de mejora.
2. El diseño del DPGAMI se basó con éxito en principios geométricos del origami, permitiendo traducir patrones de plegado en una estructura mecánica reconfigurable. A partir de modelos físicos iniciales y su evolución hacia una

versión 3D impresa, se definieron las dimensiones, posiciones de bisagras, distribución de actuadores y criterios de plegado, lo que permitió establecer especificaciones claras para su operación estructural.

3. Se seleccionaron adecuadamente los materiales y tecnologías más aptos para la construcción del robot. El PETG fue elegido como material estructural por su equilibrio entre rigidez y flexibilidad, mientras que los motores con caja reductora proporcionaron el torque necesario para generar plegados efectivos. Asimismo, se eligieron sensores ultrasónicos por su precisión en la detección de obstáculos, lo que permitió una integración coherente entre estructura, movimiento y entorno.
4. El sistema de control del DPGAMI fue implementado con éxito mediante una ESP32, sensores de proximidad ultrasónicos y motores con caja reductora. La lógica de control permitió responder en tiempo real a estímulos del entorno y ejecutar secuencias de plegado precisas, demostrando la capacidad del robot para modificar su forma estructural de manera autónoma y adaptativa, según lo programado.
5. La validación funcional del prototipo en entornos controlados demostró que el DPGAMI es capaz de realizar plegados estructurales, adaptarse a obstáculos y mantener autonomía operativa limitada. Las pruebas evidenciaron una correcta interacción entre sensores, actuadores y sistema de control, así como una autonomía funcional acorde al diseño planteado, aunque con oportunidades de mejora en la eficiencia energética para futuras iteraciones.

6. Recomendaciones

1. Mejorar el sistema de alimentación, evaluando opciones como baterías de mayor capacidad, gestión de consumo más eficiente o la incorporación de fuentes de energía alternativas.
2. Evaluar otros materiales estructurales con mayor capacidad de recuperación elástica o memoria de forma, que puedan ofrecer mejoras en peso, durabilidad y eficiencia del plegado.
3. Realizar pruebas en entornos reales o más exigentes, como superficies irregulares o con obstáculos móviles, para validar el desempeño del robot en condiciones de operación más cercanas a su aplicación final.
4. Ampliar el sistema sensorial, incorporando sensores adicionales como acelerómetros, giroscopios o sistemas de visión, con el fin de mejorar la toma de decisiones del robot frente a distintos escenarios.
5. Implementar algoritmos más complejos de control, incluyendo inteligencia artificial o aprendizaje automático, para permitir que el sistema no solo reaccione, sino que también optimice sus acciones con base en la experiencia.
6. Documentar exhaustivamente cada iteración de diseño, permitiendo que futuros investigadores puedan replicar o modificar el sistema de manera ágil y fundamentada.
7. Explorar oportunidades de colaboración interdisciplinaria, especialmente con áreas como diseño industrial, biomecánica o ingeniería de materiales, para enriquecer el proceso de desarrollo con perspectivas complementarias.

Referencias Bibliográficas

- Lang, R. J. (Varias obras). *Origami Design Secrets: Mathematical Methods for an Ancient Art* .
- Shafer, J. (Varias obras). *Jeremy Shafer's Origami, Toys, & Tricks* y otros.
- Li, Y., Di Lallo, A., Zhu, J., Chi, Y., Su, H., & Yin, J. (2024). Adaptive hierarchical origami-based metastructures. *Nature communications*, 15(1), 6247.
- Becerra-Ramírez, D. (2021). Origami como Herramienta Gamificadora en los Procesos de Aprendizaje de la Geometría en Estudiantes de Básica Secundaria . Universidad de Santander.
- Zheng, Y., Xu, R., Fei, C., Parenti Castelli, V., Meng, Q., & Yu, H. (2024). A neural network feedforward PID control method for soft pneumatic actuator based on origami mechanism: Achieving accurate position control. *Proceedings of the 9th International Conference on Automation, Control and Robot*. IEEE.
- She, Y., Hurd, C. J., & Su, H.-J. (n.d.). A transformable wheel robot with a passive leg. *Proceedings of a Robotics Conference*. IEEE.
- O'Rourke, J. (2011). *How to fold it: The mathematics of linkages, origami, and polyhedra*. Cambridge University Press.
- Liu, S., Wu, H., Yang, Y., & Wang, M. Y. (n.d.). Parallel-motion thick origami structure for robotic design. *IEEE Conference Paper*.
- Bian, S., Garibaldi, J. M., & Li, Z. (2023). Reshaping wearable robots using fuzzy intelligence: Integrating type-2 fuzzy decision,

- intelligent control, and origami structure. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 31(11), 3741–3755.
- Firouzeh, A., Sun, Y., Paik, J., & Lee, H. (n.d.). Sensor and actuator integrated low-profile robotic origami. *Reconfigurable Robotics Laboratory, EPFL*.
- Hu, Q., Li, J., Dong, E., & Sun, D. (2023). Soft scalable crawling robots enabled by programmable origami and electrostatic adhesion. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(4), 2365–2372.
- eSUN. (2021). *PETG Filament Technical Data Sheet (V4.0)*. Shenzhen eSUN Industrial Co., Ltd.
- EasyEDA. (s.f.). *EasyEDA (Versión estándar)* [Software de diseño electrónico]. EasyEDA.
- MIT App Inventor. (s.f.). *MIT App Inventor* [Entorno de desarrollo]. Massachusetts Institute of Technology.
- Blender Foundation. (s.f.). *Blender (Versión 3D)* [Software de modelado y animación]. Blender Foundation.
- Arduino. (s.f.). *Arduino IDE* [Entorno de desarrollo integrado]. Arduino.