



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño generativo de un
mecanismo de pliegue del
fuselaje de un cuadricóptero
basado en cómputo evolutivo**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Aeroespacial

P R E S E N T A

Jesús Alejandro Herrera Velasco

DIRECTOR DE TESIS

Dr. César Abraham Luna Estrada



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DISEÑO GENERATIVO DE UN MECANISMO DE PLIEGUE DEL FUSELAJE DE UN CUADRICOPTERO BASADO EN COMPUTO EVOLUTIVO que presenté para obtener el título de INGENIERO AEROESPACIAL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

JESUS ALEJANDRO HERRERA VELASCO
Número de cuenta: 318172569

Resumen

Las operaciones de Búsqueda y Rescate (SAR) exigen el despliegue inmediato de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAVs) para maximizar las probabilidades de éxito en escenarios de emergencia. Sin embargo, los drones plegables actuales enfrentan una disyuntiva crítica entre la velocidad de actuación, la integridad estructural y la masa añadida. Esta tesis propone la optimización paramétrica de un mecanismo centralizado de biela-manivela-corredora (BMC) orientado a efectuar el ciclo completo de pliegue y despliegue del fuselaje de un cuadricóptero en un tiempo total de exactamente 0.1 segundos.

Para resolver este desafío multidimensional, se desarrolló una arquitectura basada en Algoritmos Genéticos (AG) que minimiza el par motor requerido. El algoritmo convergió en una configuración geométrica óptima con un radio de manivela de 30[mm] y una longitud de biela de 12[cm], demandando un torque máximo de apenas 0.145[N-m]. Posteriormente, el diseño fue validado mediante simulaciones de Análisis de Elementos Finitos (FEA), confirmando que los componentes críticos impresos en Ácido Poliláctico (PLA) operan dentro del régimen elástico lineal. El sistema alcanza un factor de seguridad global de 1.71 frente a esfuerzos estáticos y garantiza inmunidad a fenómenos de resonancia dinámica. Los resultados consolidan una solución escalable y ultrarrápida que incrementa drásticamente la eficacia logística de las plataformas aéreas de morfología variable.

Dedicatoria

A mamá y papá

Agradecimientos

A mis padres

A ustedes, Mónica y Manuel, origen y cimiento de mi propia historia.

A ti, mamá, cuya alma posee la transparencia del agua y la resistencia de la piedra; en tu nombre he encontrado siempre el primer refugio ante la intemperie del mundo.

A ti, papá, cuya constancia silenciosa ha sido el mapa con el que he aprendido a navegar la vida; tu fortaleza no necesita estruendo para ser inmensa.

Existen antes de mi memoria y que, como la raíz invisible que sostiene al árbol frente a la tormenta, han soportado el peso de mis días. No hay palabra en el lenguaje humano capaz de contener la inmensidad de su renuncia silenciosa. Todo lo que soy es un reflejo de su luz; su amor no ha sido un refugio, sino el vasto horizonte que me permitió caminar. A su lado he aprendido que el sacrificio es la forma más pura de la belleza y que la gratitud, más que un sentimiento, es una deuda eterna del alma que jamás podré saldar, pero que honraré con cada paso de mi vida.

A mi abuelita, María (Abit)

A ti, abue, cuyo afecto posee la calidez de lo que nunca perece. En la fragilidad de tus manos reside la fuerza de mi historia; eres la ternura que detiene el tiempo. Gracias por ser el consuelo en las tardes grises y por recordarme, con tu sola presencia, que el amor es la única sustancia que sobrevive al olvido. Tu existencia es para mí un verso sagrado, una luz blanca y suave que no hiere, pero que todo lo ilumina.



A la Universidad Nacional Autónoma de México

A esta Alma Máter, inmensa y generosa, que no solo erige muros, sino que construye conciencias. Gracias por abrirme las puertas del espíritu y por entregarme, sin reservas, el tesoro del conocimiento universal. En tus aulas no solo recibí instrucción, sino la libertad de pensar y la responsabilidad de ser. Eres el faro que disipa las tinieblas de la ignorancia; llevaré tu raza y tu espíritu grabados en el pecho, como el sello indeleble de quien ha sido forjado en la grandeza.

A mis amigos

A aquellos que caminaron conmigo durante estos cinco años, testigos de mi trabajo. Ustedes, que no solo compartieron la luz de las cumbres, sino que descendieron conmigo a los abismos de la duda y la fatiga. Nuestra amistad ha sido una afinidad electiva, un pacto sellado no con tinta, sino con tiempo compartido. En la risa y en el llanto, en la calma y en la tempestad, su presencia fue el ancla que me impidió derivar. Gracias por demostrarme que ninguna soledad es absoluta mientras exista una mano amiga extendida en la penumbra.

A mis mentores y profesores

A quienes cultivaron mi mente con la paciencia del jardinero que confía en la primavera. Al Dr. César Luna, mi asesor, gracias por ser la brújula en la niebla de esta investigación; su guía transformó la incertidumbre en método y la duda en hallazgo. Al Mtro. Gibrán, por compartir la generosidad de su intelecto. Y muy especialmente al Dr. Carlos Romo, quien tuvo la nobleza de creer en mí desde los albores de mi carrera, cuando yo mismo apenas vislumbraba mi camino; su fe temprana fue el viento que impulsó mis velas. Mi más sincero agradecimiento, a los tres, por todos sus consejos y apoyo a lo largo de estos años.

Índice general

Introducción	5
I Problemática y su contexto	8
I.1 Operaciones de Búsqueda y Rescate (SAR)	9
I.2 Drones con capacidades de plegado o morfología variable	9
I.3 El imperativo del despliegue rápido	9
I.4 Mecanismos de plegado y despliegue en drones	10
I.4.1 Sistemas de Articulación Activos (Servomotores)	10
I.4.2 Mecanismos Pasivos y Reversión de Empuje	13
I.4.3 Sistemas de Transformación Multimodales	13
I.5 Análisis Comparativo del Despliegue en Drones SAR Plegables	15
I.6 Implicaciones del Rendimiento y Consideraciones de Diseño	17
I.7 Selección de la herramienta para resolver el problema de diseño paramétrico	17
I.7.1 Redes Neuronales Artificiales (RNA)	18
I.7.2 Deep Learning (Aprendizaje Profundo)	18
I.7.3 Algoritmos Genéticos (AG)	18
I.7.4 Redes Bayesianas	19
I.7.5 Árboles de Decisión (y Random Forests)	19
I.7.6 Elección final de la herramienta de solución	20
I.8 Objetivos y Alcances	22
I.8.1 Objetivo General	22



I.8.2	Objetivos Específicos	22
I.8.3	Alcances de la Investigación	23
I.8.4	Limitaciones y Fronteras Metodológicas	23

II Antecedentes **25**

II.1 Mecanismo base y justificación de la geometría centrada **26**

II.1.1	Análisis Cinemático del Mecanismo	27
II.1.1.1	Ecuación de Posición	27
II.1.1.2	Ecuación de Velocidad	29
II.1.1.3	Ecuación de Aceleración	30
II.1.2	Análisis Dinámico del Sistema	30
II.1.2.1	Derivación de la Relación Fundamental Par-Fuerza:	31
II.1.2.2	Desglose de la Fuerza de Carga (F_x)	31
II.1.2.3	Ecuación Final del Par (Síntesis):	31
II.1.2.4	Par Total del Actuador:	32
II.1.3	Justificación de la Selección Tecnológica: Engranajes vs. Actuadores	
	Lineales	32
II.1.3.1	Argumentos a Favor del Mecanismo Centralizado:	32
II.1.3.2	Consideraciones sobre Actuadores Lineales Independientes:	32

II.2 Fundamentos de los Algoritmos Genéticos **33**

II.2.1	Operadores Genéticos	33
II.2.2	Parámetros Fundamentales del Algoritmo	34
II.2.3	Ejemplos de funcionamiento de AGs para Optimizar Funciones	35
II.2.4	Implementación Computacional del Algoritmo Genético 1D	35
II.2.4.1	Inicialización y Parámetros de Control	36
II.2.4.2	Función Objetivo o de Aptitud (Fitness) y Operadores Genéticos	36
II.2.4.3	Núcleo del Ciclo Evolutivo	37
II.2.4.4	Interfaz de Ejecución y Visualización	39
II.2.4.5	Resultados y Curva de Convergencia	39
II.2.5	Optimización Multidimensional y Metaheurísticas	41
II.2.5.1	El Papel de la Heurística y la Metaheurística	42
II.2.5.2	Topología del Espacio de Búsqueda	43
II.2.6	Optimización en Hiperespacios: Cuatro Variables	46



III Desarrollo	48
III.1 Propuesta de diseño	49
III.2 Algoritmo Genético propuesto	49
III.2.1 Arquitectura del programa	49
III.2.1.1 Capa de modelado físico-matemático	50
III.2.1.2 Capa de optimización evolutiva (núcleo algorítmico)	50
III.2.1.3 Capa de orquestación experimental	52
III.2.1.4 Capa de interacción humano-máquina (<i>GUI</i>)	53
III.2.1.5 Postprocesado y análisis automático	53
III.2.1.6 Diagrama de Bloques del AG propuesto	54
III.3 Preparación del caso de estudio	57
III.3.1 Estudio de parámetros que afectan a la masa del dron	58
III.3.2 Implementación en el Algoritmo Genético	58
III.4 Evaluación y Resultados del Algoritmo Genético	60
III.4.1 Evolución y Convergencia	61
III.4.2 Impacto de la Población y Precisión del Modelo	62
III.4.3 Análisis de Correlación y Sensibilidad	63
III.5 Selección de materiales	71
III.5.1 Propiedades de los Materiales (Valores Típicos)	71
III.5.2 Desarrollo de Índices de Desempeño (<i>M</i>)	72
III.5.3 Selección Final	75
III.6 Prototipo de dron usando software especializado	76
IV Validación estructural	82
IV.1 Justificación y Alcance de las Simulaciones Estructurales	83
IV.1.1 Propósito del Análisis Estático Estructural	83
IV.1.2 Modelado Dinámico y Magnificación mediante Función de Transferencia	83
IV.1.3 Criterios de Evaluación y Caracterización de Componentes Críticos	84
IV.2 Interpretación de las simulaciones estructurales	87
IV.2.1 Simulaciones estructurales estáticas de componentes principales	87
IV.2.2 Análisis de frecuencia de componentes estructurales principales	97
IV.2.2.1 Caracterización del amortiguamiento del PLA	97
IV.2.2.2 Modelo dinámico y función de transferencia	98



IV.2.2.3 Estimación de la tensión dinámica máxima	98
IV.2.2.4 Comparación con el límite elástico del material	99
IV.2.2.5 Discusión y justificación de la metodología adoptada para el análisis dinámico	99
V Conclusiones	101
V.1 Conclusiones principales	102
V.2 Limitaciones encontradas	103
V.3 Direcciones futuras	104
Anexos	110
A Glosario	111
A.1 Siglas y Acrónimos	112
B Códigos de los Algoritmos Genéticos	114
B.1 AG Unidimensional	114
B.2 AG Bidimensional	119
B.3 AG Cuadrimensional	125
C Planos Mecánicos del Dron	126
C.1 Plano D.1: Dibujo de engrane	127
C.2 Plano D.2: Dibujo de biela	128
C.3 Plano D.3: Dibujo de Case 2	129
C.4 Plano D.4: Dibujo de Tapa Base	130
C.5 Plano D.5: Dibujo de Tapa Superior	131
C.6 Plano D.6: Dibujo de brazo	132
C.7 Plano D.7: Dibujo de Case 1	133

Introducción

La frontera entre la tragedia y la supervivencia en los escenarios de Búsqueda y Rescate (SAR, por sus siglas en inglés [1]) se mide, invariablemente, en segundos. En estas operaciones, la rapidez de respuesta no es solo un indicador de eficiencia, sino un imperativo ético y técnico, dado que las probabilidades de éxito disminuyen drásticamente una vez superadas las denominadas “horas doradas” posteriores a un siniestro [2, 3]. En las últimas décadas, la integración de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAVs) ha provocado un cambio de paradigma en la gestión de emergencias, permitiendo una cobertura visual y sensorial de terrenos extensos, hostiles o de difícil acceso que, de otro modo, representarían un riesgo inasumible para el personal humano [4].

Sin embargo, el despliegue de esta tecnología enfrenta una paradoja logística: mientras que el vuelo del dron es inherentemente ágil, los procesos previos a su operación suelen ser el eslabón más débil de la cadena de respuesta. La efectividad de un UAV en misiones críticas no reside únicamente en su autonomía o capacidad de carga, sino en su capacidad de transición inmediata desde el transporte hasta la operatividad total. Productos comerciales de vanguardia, como el Teledyne FLIR SIRAS o el FIXAR 007 NG, han comenzado a abordar este desafío prometiendo tiempos de preparación de entre 60 y 120 segundos. No obstante, la presión del mercado y la urgencia de los escenarios de desastre demandan una evolución hacia la instantaneidad, donde el dron deje de ser un equipo de montaje para convertirse en una extensión del rescatista [5, 6].

Esta necesidad de despliegue ultrarrápido ha impulsado una línea de investigación



fascinante y compleja: la morfología variable y los sistemas de plegado. Estos diseños, concebidos bajo principios de portabilidad mejorada, permiten un almacenamiento compacto sin comprometer la envergadura necesaria para un vuelo eficiente [7]. La ingeniería contemporánea ha encontrado inspiración en la naturaleza para resolver estos dilemas; desde drones como el “Flying Squirrel”, que utiliza alas plegables para modular fuerzas verticales y mejorar la agilidad en un 13.1 %, hasta vehículos híbridos como el Longbow II (LB-II), donde el plegado reduce la resistencia hidrodinámica en un 15.3 % durante transiciones de medio [8, 9].

No obstante, la implementación de mecanismos de transformación introduce una dicotomía de diseño fundamental: la velocidad de actuación frente a la integridad del sistema. La literatura técnica reporta un espectro de soluciones que van desde sistemas activos de alta precisión, como el mecanismo de manivela-balancín del cuadricóptero FOLLY que logra el despliegue en 0.6[s] [10], hasta soluciones pasivas impulsadas por energía elástica o incluso compuestos pirotécnicos que alcanzan tiempos de 11[ms], aunque a menudo sacrificando la reversibilidad y la vida útil del mecanismo [11, 9]. Esta tensión intrínseca entre masa, complejidad mecánica y velocidad de respuesta constituye el núcleo del desafío que enfrenta la próxima generación de drones SAR [12].

A pesar de los avances notables, persiste una carencia de metodologías estandarizadas y análisis estructurales holísticos que acompañen al diseño cinemático. Las penalizaciones de peso y la inestabilidad dinámica siguen siendo barreras críticas que limitan la autonomía y la seguridad operativa [13, 14]. Es en esta intersección entre la cinemática y la optimización donde se sitúa la presente investigación.

Esta tesis aborda la optimización del mecanismo de biela-manivela-corredora desplazada como una solución prometedora para el despliegue ágil en drones de rescate. A diferencia de las aproximaciones convencionales, este trabajo propone un marco de diseño paramétrico generativo sustentado en el cómputo evolutivo. La elección de algoritmos genéticos no es azarosa; responde a la necesidad de explorar un espacio de soluciones multidimensional donde variables como la velocidad angular, el radio de la manivela, la longitud de la biela y el ángulo crítico de articulación deben armonizarse para minimizar el tiempo de despliegue sin comprometer la masa total del sistema ni su integridad estructural.



A través de esta metodología, la investigación no solo busca alcanzar hitos de velocidad de despliegue —comparables a los 0.42[s] reportados en estudios recientes [15]— sino también proporcionar un modelo de diseño escalable y validado mediante simulaciones de análisis de frecuencia (dinámicas) y estática estructural. El propósito final es trascender la teoría académica para ofrecer una herramienta de ingeniería que incremente, de manera tangible, la eficacia de los sistemas SAR en el mundo real, garantizando que cuando el tiempo sea el enemigo, la tecnología sea el aliado más veloz.

Capítulo I

Problemática y su contexto



I.1. Operaciones de Búsqueda y Rescate (SAR)

Las operaciones de Búsqueda y Rescate (SAR) operan bajo una restricción temporal crítica. En escenarios de desastre, la ventana de supervivencia disminuye exponencialmente con el tiempo, definiendo las vitales “horas doradas” [3]. Históricamente, estas misiones han dependido de aeronaves tripuladas y extensos equipos terrestres, enfrentando altos costos, riesgos operativos y retrasos logísticos considerables [4].

La integración de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAVs) representa un cambio de paradigma. Los drones superan a los métodos tradicionales en velocidad de despliegue in situ, seguridad y rentabilidad [4]. Su despegue casi instantáneo permite escanear vastas áreas en minutos, proveyendo una conciencia situacional en tiempo real que optimiza la toma de decisiones, la asignación de recursos y, en última instancia, las probabilidades de rescate [3].

I.2. Drones con capacidades de plegado o morfología variable

A pesar de sus ventajas inherentes, los UAVs de geometría fija presentan limitaciones logísticas en entornos operativos complejos [16]. Los diseños de morfología variable y brazos reconfigurables resuelven este obstáculo al maximizar la portabilidad, facilitando el transporte compacto hacia zonas remotas o siniestradas [7].

Más allá del simple almacenamiento, la morfología variable dota al sistema de adaptabilidad dinámica. En pleno vuelo, permite la navegación a través de espacios confinados en estructuras colapsadas [17], o bien, la reducción de la resistencia hidrodinámica en vehículos híbridos (aéreo-subacuáticos) [8]. Esta versatilidad transforma al dron en una plataforma multidominio capaz de operar en escenarios impredecibles [18].

I.3. El imperativo del despliegue rápido

En el contexto SAR, el tiempo de despliegue —desde la llegada al sitio hasta la transmisión de datos— es un determinante absoluto de la eficacia [2]. El mercado comercial subraya esta urgencia; equipos como el Teledyne FLIR SIRAS (Figura I.1) garantizan operatividad en menos de 60 segundos [6].



Figura I.1: Fotografía del Dron Teledyne FLIR SIRAS [6].

Para minimizar este margen operativo, la velocidad de actuación mecánica es crucial [18]. La brecha de rendimiento entre un mecanismo que demanda 10[s] [14] y uno optimizado de 0.42[s] [15] trasciende la métrica ingenieril: representa una ganancia tangible en el ciclo de adquisición de inteligencia visual. Por lo tanto, la optimización cinemática de estos sistemas es un componente crítico para salvaguardar vidas.

I.4. Mecanismos de plegado y despliegue en drones

La ingeniería de drones morfológicos abarca diversas soluciones de actuación, clasificables por su principio mecánico y propósito funcional.

I.4.1. Sistemas de Articulación Activos (Servomotores)

Los servomotores garantizan un control posicional de alta precisión, esencial para mantener la estabilidad aerodinámica [19]. Un exponente de esta categoría es el cuadricóptero FOLLY (Figura I.2), cuyo mecanismo manivela-balancín logra un despliegue en 0.6[s], reduciendo su volumen en un 58.3 % [10]. Optimizaciones posteriores basadas en biela-manivela-corredora desplazada han comprimido este tiempo a 0.42[s] [15].

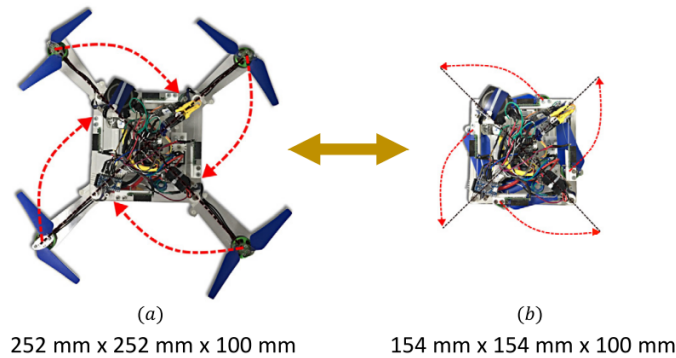


Figura I.2: Ilustración de las configuraciones del dron FOLLY. (a) Desplegado, (b) Plegado. [10]

En aplicaciones anfibas extremas, el híbrido Nezha-III emplea un mecanismo de retracción de brazos (11 a 13[s]) para mitigar el arrastre bajo el agua [12]. En contraparte, el dron de Zúrich/EPFL (Figura I.3) readapta su configuración (X, H, O, T) en pleno vuelo mediante brazos independientes, sacrificando el 11 % de su masa total para albergar este complejo sistema morfológico [17].



Figura I.3: Diferentes morfologías del dron reconfigurable. Se muestran las configuraciones (a) H, (b) O y (c) T. [17]

Por otro lado, diseños bioinspirados como la “Ardilla Voladora” (Figuras I.4 y I.5) apalancan brazos de manivela impulsados por servomotores MG92B para desplegar alas retráctiles, induciendo arrastre intencional para incrementar su agilidad cinemática [18].

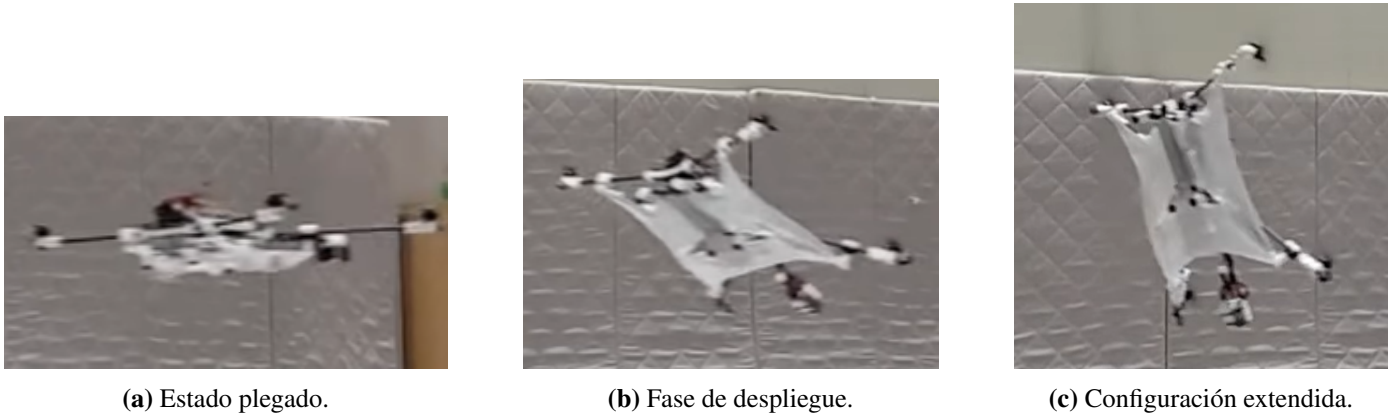


Figura I.4: Secuencia de transformación morfológica del dron bio-inspirado “Ardilla Voladora” [18], usando imágenes extraídas del video elaborado por los autores del artículo [20]. Se observa la evolución desde (a) el almacenamiento compacto, pasando por (b) la apertura de brazos, hasta (c) la configuración final de planeo similar a una ardilla voladora.



Figura I.5: Análisis cinemático del mecanismo de despliegue. Comparación entre (a) la posición inicial de los eslabones y (b) la posición final para máxima envergadura.

Finalmente, el Peregrine Falcon (Figura I.6) ejecuta un despliegue balístico autónomo tras ser lanzado desde un cañón tubular, gobernando la extensión de sus brazos mediante señales PWM desde su controlador de vuelo central [14].

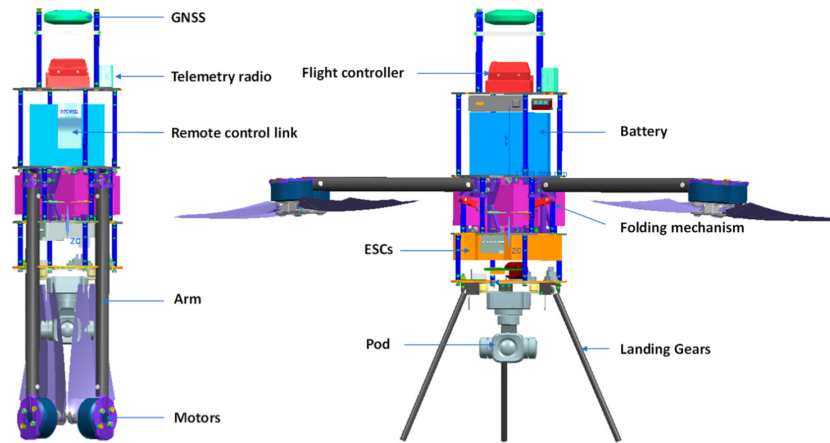


Figura I.6: Imagen detallada de las partes del dron Peregrine Falcon. [14]

I.4.2. Mecanismos Pasivos y Reversión de Empuje

Priorizando la inmediatez mecánica, sistemas pasivos como el UAV estratosférico liberan resortes de torsión pre-tensados para ejecutar un despliegue alar en apenas 0.65[s] [21]. Arquitecturas bioinspiradas en origami replican este rendimiento autodesplegándose en 0.5[s] [22]. Como alternativa radical para suprimir actuadores dedicados, ciertos cuadricópteros utilizan bisagras libres que colapsan deliberadamente al invertir la dirección de empuje de los rotores, aligerando drásticamente el fuselaje [23].

I.4.3. Sistemas de Transformación Multimodales

Plataformas vanguardistas como el ATMO (Figura I.7) trascienden el plegado volumétrico para alternar su naturaleza locomotiva. A través de una articulación central monomotor, este sistema transiciona entre un modo de vuelo convencional y una configuración terrestre sobre ruedas [24, 25].



Figura I.7: Fotografía de la transición de vuelo de ATMO a aterrizaje sobre ruedas [25].

En el rubro de la evasión dinámica, el Quad-Morphing (Figura I.8) retrae sus hélices en 200[ms] para sortear obstáculos [26]. Sistemas experimentales basados en aleaciones de memoria de forma (SMA) logran reposicionamientos de rotor en tan solo 50[ms] [27], demostrando las capacidades ultrarrápidas de los materiales inteligentes en transiciones de vuelo a conducción.

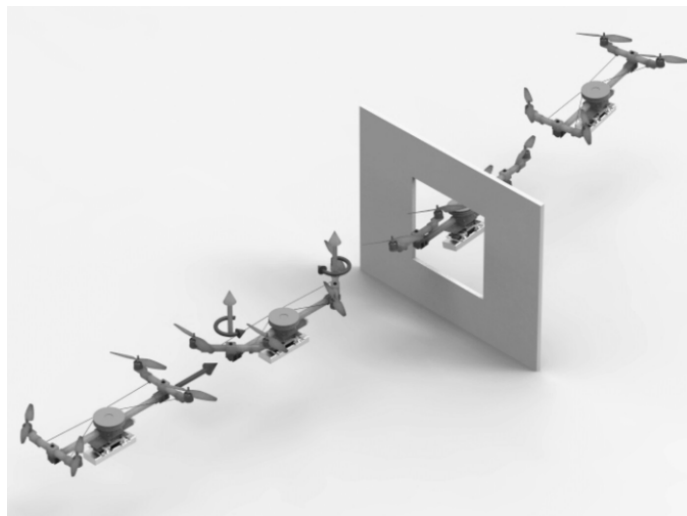


Figura I.8: Vista de diseño asistido por computadora de la plataforma Quad-Morphing volando hacia un espacio mientras gira (pliega) los brazos que sostienen sus cuatro hélices para reducir su envergadura de manera suave y rápida para evitar chocar con el espacio [26].



I.5. Análisis Comparativo del Despliegue en Drones SAR Plegables

La evaluación de los tiempos de actuación revela una polarización marcada dictada por la arquitectura física. Transiciones instantáneas ($\leq 0.2[s]$) dominan en sistemas pasivos, materiales elásticos o aleaciones SMA [28, 27, 26]. No obstante, en mecanismos activos orientados específicamente a fuselajes de dron, los diseños optimizados encabezan el rendimiento con $0.42[s]$ [15], seguidos por el despliegue automático de $0.6[s]$ en el dron FOLLY [10]. En agudo contraste, los sistemas diseñados para transiciones subacuáticas lentas (Nezha-III, $11-13[s]$) o deflexiones aerodinámicas finas ($\sim 60[s]$) cambian velocidad por robustez extrema o precisión micrométrica [14, 29].

Cabe destacar la distinción crítica entre el tiempo intrínseco del mecanismo y el tiempo logístico de preparación comercial (e.g., los $60[s]$ del FLIR SIRAS [6] o los $120[s]$ del FIXAR 007 [5]). El desafío de la investigación en morfología aérea radica precisamente en comprimir el componente físico de este intervalo, dotando al sistema de una disponibilidad casi refleja.

La Tabla I.1 consolida estas métricas, evidenciando que los actuadores pasivos o monomotor promueven la inmediatez, mientras que la morfología continua en vuelo exige un compromiso estructural superior.

Tabla I.1: Especificaciones Comparativas de Drones Plegables para Búsqueda y Rescate.

Modelo de Dron	Plataforma	Mecanismo de Plegado/Desplegado	Tiempo [s]	Tipo de Actuador	Modelo de Actuador	Torque [kg-cm]	Velocidad [s/60°]	Grados de Rotación	Notas Importantes
Mecanismo de Brazo de Dron Portátil Optimizado	Multirrotor	Manivela-corredera desplazada y cremallera	0.42	Servomotor	-	-	-	-	Despliegue muy rápido, reducción 58.3 %
FOLLY Quadcopter	Multirrotor	Manivela-balancín de 4 barras con engranajes	0.6	Servomotor	-	-	-	-	Auto-plegable, reducción 58.3 %
UAV Ala Fija (Globo)	Ala Fija	Resorte de torsión y bloqueo elástico	0.65	Resorte	N/A	N/A	N/A	~90	Fiable a gran altitud.
Nezha-III	Híbrido	Plegado de brazos	11-13	PVBS	-	-	-	-	Reducción de resistencia hidrodinámica.
Dron Zúrich/EPFL	Cuadricóptero	Brazos giratorios independientes con servomotores	Morfología Continua	Servomotor	HS-5070MH	3.0-3.7 (a 6-7.4[V])	0.14-0.12 (60°)	~170	Morfología en vuelo (X, H, O, T).
Ardilla Voladora	Cuadricóptero	Brazos de manivela para alas plegables	Morfología Continua	Servomotor	MG92B (x2)	3.1 (5[V]) y 3.5 (6[V])	0.13 (5[V]) y 0.08 (6[V])	-	Mejora agilidad aerodinámica.
Peregrine Falcon	Cuadricóptero	Plegado de brazos	-	Servomotor	-	-	-	-	Lanzamiento desde barril.
ATMO (Morphobot)	Multimodo	Articulación central monomotor	Morfología Continua	Motor	-	-	-	-	Transición aire-tierra en vuelo.
Dron Plegable Inspirado en Origami (EPFL)	Cuadricóptero	Plegado de brazos	0.5 / 0.05	Pasivo/Act.	No espec.	N/A	N/A	N/A	Auto-despliegue e inversión de rotor.
Robot Quad-Morphing	Cuadricóptero	Estructura de hélices plegable	0.2	Elástico	-	-	-	-	Plegado para huecos estrechos.
Diseño Inspirado en Kirigami	N/A	Cambio de forma	< 0.1	Material	N/A	N/A	N/A	-	Fijación rápida tras impacto.
Vehículo Robótico Multimodal (SMA)	Multimodo	Reposicionamiento de rotor	0.05	SMA	N/A	N/A	N/A	-	Transición vuelo-conducción rápida.
Nezha-F	Híbrido (Aéreo - Submarino)	Transición de modo	0.16	Hélices	N/A	N/A	N/A	-	Transición fluida entre dominios.
Sistema de Morfología Automático (Túnel de Viento)	Ala Fija	Deflexión de superficies	~60	-	-	-	-	-	Configuración en túnel de viento.



I.6. Implicaciones del Rendimiento y Consideraciones de Diseño

El diseño paramétrico de drones morfológicos impone compensaciones ineludibles. Principalmente, existe una tensión fundamental entre la velocidad de actuación y la robustez mecánica. Los sistemas pasivos garantizan respuestas sub-segundo con mínima masa añadida, pero carecen de la reversibilidad progresiva de los actuadores activos [21]. Paradójicamente, estos últimos, pese a su precisión, presentan vulnerabilidades críticas: colisiones dinámicas pueden forzar el plegado involuntario e inducir sobrecargas de par destructivas en los servomotores [17].

Adicionalmente, la agilidad morfológica tributa una penalización directa sobre la autonomía. Un mecanismo multiservomotor incrementa sensiblemente la masa inercial de la plataforma —representando hasta un 11 % del peso total en modelos documentados [17]. Finalmente, la viabilidad de la transformación en vuelo radica en la arquitectura de control. La reconfiguración asimétrica del centro de gravedad y la inercia rotacional exige algoritmos de control adaptativo que recalculen matrices de estabilidad en tiempo real [17, 24]. En conclusión, la excelencia en el diseño requiere equilibrar magistralmente la agresividad cinemática del pliegue con la contención de masa, garantizando de manera ininterrumpida la integridad estructural y la estabilidad de vuelo durante operaciones SAR.

I.7. Selección de la herramienta para resolver el problema de diseño paramétrico

El problema abordado en este trabajo corresponde a un proceso de diseño paramétrico de un sistema mecánico, donde múltiples variables geométricas y físicas influyen de manera no lineal en una métrica de desempeño específica (el torque). Dado que la evaluación de cada configuración requiere la ejecución de un modelo físico o simulador computacional, la selección de la herramienta de solución debe considerar no solo la precisión, sino también el coste computacional, la interpretabilidad y la capacidad de exploración del espacio de diseño.

En esta sección se analizan y comparan diversas herramientas comúnmente utilizadas en problemas de modelado, predicción y optimización en ingeniería, con el objetivo de justificar rigurosamente la elección final.



I.7.1. Redes Neuronales Artificiales (RNA)

Las Redes Neuronales Artificiales ([RNA](#)) son modelos de aprendizaje supervisado capaces de aproximar funciones altamente no lineales. En el contexto de este problema, una RNA puede entrenarse con los datos generados por el simulador físico para construir un *modelo sustituto* (*surrogate model*), que aprenda la relación entre los parámetros de entrada (dimensiones geométricas, masas, longitudes) y la salida de interés (torque) [30].

Una vez entrenada, la RNA permite realizar predicciones prácticamente instantáneas, eliminando la necesidad de ejecutar el modelo físico completo para cada evaluación, lo cual resulta especialmente atractivo en escenarios de exploración intensiva del espacio de diseño.

A pesar de su potencia predictiva, las RNA no realizan optimización de forma directa. Su uso resulta más adecuado como modelos auxiliares dentro de un esquema de optimización, pero no como herramienta principal para la búsqueda del diseño óptimo.

I.7.2. Deep Learning (Aprendizaje Profundo)

El aprendizaje profundo ([DL](#)) constituye una extensión de las RNA tradicionales, caracterizada por arquitecturas con múltiples capas ocultas y millones de parámetros entrenables. Estas técnicas han demostrado un rendimiento excepcional en problemas de altísima dimensionalidad, como visión por computadora y procesamiento de lenguaje natural [31]. Podría decirse entonces que permiten la extracción automática de características en datos de alta dimensionalidad no estructurados, como imágenes o series temporales.

No obstante, el problema tratado en este trabajo involucra un número relativamente reducido de variables continuas, con relaciones físicas bien definidas, lo cual hace que el uso de Deep Learning resulte desproporcionado. Por estas razones, el aprendizaje profundo se descarta como alternativa viable para este problema específico.

I.7.3. Algoritmos Genéticos (AG)

Los Algoritmos Genéticos ([AG](#)) son métodos de optimización inspirados en los principios de la evolución natural. A diferencia de las RNA, los AG no intentan aprender explícitamente la relación entrada-salida, sino que buscan directamente configuraciones óptimas



mediante la exploración iterativa del espacio de diseño.

Cada individuo de la población representa un conjunto de parámetros del diseño, y su desempeño se evalúa mediante una función de aptitud, que en este caso corresponde al torque calculado por el simulador físico.

En contraste con los modelos predictivos anteriores, el AG es una técnica de búsqueda global que opera sobre una población de soluciones candidatas, aplicando operadores de selección, cruce y mutación para evolucionar hacia el óptimo global [32].

I.7.4. Redes Bayesianas

Las redes bayesianas son modelos probabilísticos gráficos que permiten representar dependencias causales entre variables, incorporando explícitamente la incertidumbre [33]. Aunque son extremadamente valiosas para análisis de riesgo y diagnóstico, su enfoque no está orientado a la optimización directa de sistemas mecánicos.

I.7.5. Árboles de Decisión (y Random Forests)

Desde una perspectiva algorítmica, los Árboles de Decisión operan mediante la partición recursiva del espacio de diseño en regiones de decisión, definidas por *hiperplanos* ortogonales a los ejes de los parámetros de entrada. Este enfoque genera una estructura jerárquica de reglas lógicas (tipo *if-then-else*) que destaca por su alta interpretabilidad, permitiendo trazar claramente la ruta de decisión desde las variables geométricas hasta la predicción de rendimiento.

Para mitigar la varianza y la tendencia al sobreajuste (*overfitting*) inherentes a los árboles individuales, métodos de ensamble como *Random Forest* agregan las predicciones de múltiples árboles desacoplados, utilizando técnicas de *bagging (Bootstrap Aggregating)*. Esto mejora significativamente la robustez y la capacidad de generalización del modelo global [34].

Sin embargo, la aplicabilidad de estas técnicas en el diseño mecánico de precisión presenta una limitación estructural crítica: su naturaleza discreta. Matemáticamente, estos modelos aproximan la función objetivo (en este caso, el torque o comportamiento dinámico) como una superficie de respuesta escalonada o función constante a trozos.



Esta topología discontinua es incapaz de capturar las derivadas suaves y las relaciones continuas que rigen la física de los mecanismos articulados. En problemas donde la optimización requiere el ajuste fino de parámetros continuos (ej., variaciones milimétricas en la longitud de un eslabón), la falta de suavidad en la superficie de respuesta impide el uso eficiente de gradientes y puede enmascarar la sensibilidad real del mecanismo ante pequeñas perturbaciones dimensionales.

I.7.6. Elección final de la herramienta de solución

Tabla I.2: Análisis comparativo de herramientas computacionales y justificación de los Algoritmos Genéticos (AG) para el diseño paramétrico.

Herramienta	Tipo de Modelo	Limitación en el Proyecto	Adecuación al Problema
Redes Neuronales (RNA)	Predictivo (Modelo sustituto continuo).	No realiza optimización directa; requiere de un optimizador externo acoplado.	<i>Inadecuada como motor principal.</i> Útil solo para acelerar evaluaciones.
Deep Learning (DL)	Predictivo (Extracción de características complejas).	Complejidad algorítmica y dimensionalidad desproporcionadas para este sistema.	<i>Descartada.</i> Requiere volúmenes masivos de datos inviables en simulación física.
Redes Bayesianas	Inferencia causal y diagnóstico probabilístico.	Su propósito fundacional es el manejo de incertidumbre, no la minimización de funciones.	<i>Inadecuada.</i> No busca explorar un espacio de diseño hacia un óptimo global.
Árboles de Decisión / RF	Clasificación y regresión discreta.	Genera superficies de respuesta escalonadas, incapaces de captar derivadas suaves.	<i>Inadecuada.</i> La física continua de la cinemática no es compatible con saltos discretos.
Algoritmos Genéticos (AG)	Optimización Global Estocástica.	Alto coste computacional por evaluación (asumible en fase de diseño).	Óptima. Explora directamente el espacio no convexo y gestiona restricciones geométricas de forma nativa.

Tras el análisis comparativo, se concluye que la estrategia más adecuada para el problema



planteado consiste en el uso de un **Algoritmo Genético como herramienta de optimización**, tal y como se muestra en la Tabla I.2. Esta elección se justifica porque el objetivo central no es únicamente predecir el torque, sino encontrar configuraciones geométricas óptimas dentro de un espacio de diseño complejo, no convexo y con múltiples restricciones.

A diferencia de las RNA o los árboles de decisión, los Algoritmos Genéticos permiten explorar el espacio de diseño de manera global sin necesidad de gradientes ni simplificaciones del modelo físico. Aunque su coste computacional es mayor, este se ve compensado por la robustez del método y su capacidad para encontrar soluciones de alta calidad en problemas de ingeniería reales.

Adicionalmente, los AG pueden integrarse de manera natural con modelos sustitutos (como RNA) en trabajos futuros, dando lugar a enfoques híbridos que combinen eficiencia computacional y capacidad de optimización. Esta decisión se fundamenta en tres pilares técnicos críticos que distinguen a los AG de las herramientas predictivas (RNA, DL, Random Forest) y de inferencia (Redes Bayesianas):

1. **Naturaleza del Problema (Optimización vs. Predicción):** El objetivo central no es construir un modelo que *prediga* el torque dado un diseño (lo cual hacen las RNA o Random Forests), sino *descubrir* el diseño que minimice el torque. Las herramientas predictivas requerirían un paso adicional de optimización sobre la superficie de respuesta generada, introduciendo errores de aproximación. El AG ataca el problema de raíz, utilizando el simulador físico directamente como función de evaluación, garantizando que la solución final sea validada por la física del sistema y no por una aproximación estadística.
2. **Exploración del Espacio de Diseño No Convexo:** Los mecanismos articulados presentan a menudo comportamientos altamente no lineales donde pequeños cambios en una longitud (L) pueden causar grandes variaciones en el torque o incluso bloquear el mecanismo (singularidades). Esto crea un “paisaje de aptitud” con múltiples mínimos locales. Los métodos basados en gradiente o las aproximaciones suaves de las RNA pueden quedar atrapados en estos óptimos locales subóptimos. La naturaleza estocástica y poblacional de los AG permite explorar múltiples regiones del espacio de diseño



simultáneamente, maximizando la probabilidad de hallar el óptimo global [35].

3. **Gestión de Restricciones Geométricas Complejas:** El diseño del mecanismo está sujeto a restricciones estrictas (la longitud de los eslabones debe formar un polígono cerrado, no debe haber auto-colisiones, límites de masa, etc.). Los AG permiten integrar estas reglas de forma nativa mediante funciones de penalización en el cálculo de la aptitud. Por el contrario, forzar a una RNA o a un Árbol de Decisión a respetar estas restricciones físicas durante la generación de nuevas muestras es matemáticamente complejo y computacionalmente ineficiente.

Si bien el coste computacional de los AG es elevado debido a la evaluación iterativa de la simulación, este es un compromiso aceptable en una fase de diseño ingenieril donde la prioridad es la calidad y viabilidad de la solución final, por encima de la velocidad de ejecución en tiempo real. Por tanto, el AG se implementará orquestando la simulación dinámica para evolucionar la geometría del mecanismo hacia su configuración última y óptima de mínimo esfuerzo mecánico.

I.8. Objetivos y Alcances

I.8.1. Objetivo General

Diseñar un mecanismo que permita reducir el tiempo de pliegue y despliegue del fuselaje de un cuadricóptero utilizado en operaciones de búsqueda y rescate, empleando el diseño paramétrico basado en el cómputo evolutivo para encontrar la solución óptima para las variables cinemáticas (velocidad angular, radio de manivela, longitud de biela y ángulo crítico), evaluando posteriormente su integridad mediante simulaciones estructurales.

I.8.2. Objetivos Específicos

Para dar cumplimiento al objetivo central, se establecen las siguientes metas particulares:

- Seleccionar y fundamentar una topología mecánica idónea, optándose por un mecanismo de biela-manivela-corredora (BMC) centrado, que favorezca la actuación centralizada y la eficiencia energética.
- Desarrollar una arquitectura algorítmica modular basada en Algoritmos Genéticos



(AG) que minimice el par motor requerido, garantizando un tiempo de despliegue ultrarrápido equivalente a 0.1 segundos.

- Validar la integridad estructural del diseño mediante un Análisis de Elemento Finito (FEA), confirmando que las piezas principales, sometidas a los picos inerciales de la actuación, operen dentro del régimen elástico lineal de sus respectivos materiales.
- Evaluar el comportamiento dinámico del sistema y estimar la tensión dinámica pico para justificar su operatividad ante fenómenos de resonancia, prescindiendo de análisis transitorios complejos.

I.8.3. Alcances de la Investigación

El desarrollo de este proyecto contempla la conceptualización, dimensionamiento paramétrico y validación virtual del mecanismo de despliegue. El principal entregable metodológico es un modelo digital capaz de efectuar la transformación morfológica eficientemente, acompañado de la caracterización de los esfuerzos estáticos y las frecuencias vibratorias para los componentes propuestos en Ácido Poliláctico (PLA). Este marco analítico provee las cotas geométricas óptimas que garantizan la compatibilidad directa con actuadores comerciales tipo OTS (Off-The-Shelf).

I.8.4. Limitaciones y Fronteras Metodológicas

Para acotar el espectro de estudio y mantener el rigor científico de la simulación, la investigación asume de manera transparente las siguientes delimitaciones operativas:

- Desacoplamiento de la dinámica aerodinámica: El modelo de optimización aísla deliberadamente la cinemática del mecanismo respecto a la mecánica de vuelo global. Por consiguiente, no se evalúan las alteraciones dinámicas derivadas del desplazamiento súbito del centro de gravedad, ni las perturbaciones transitorias por la interacción fluido-estructura (CFD y FSI) durante la transformación del fuselaje en pleno vuelo.
- Régimen térmico e hipótesis de fluencia (Creep): El comportamiento mecánico del PLA se rige bajo la premisa de un régimen puramente elástico lineal y a temperatura controlada. Se omiten los efectos viscoelásticos y la fluencia lenta que podrían cobrar protagonismo en misiones a la intemperie donde la temperatura estructural se



aproxime a la región de transición vítrea del polímero (alrededor de los 55 [°C]).

- Resolución topológica del análisis computacional: A consecuencia de las restricciones en las licencias académicas, la discretización espacial en los estudios FEA se encuentra restringida a una malla global de 4[mm], con refinamientos locales hasta 3.6[mm]. Aunque esta escala ratifica macroscópicamente la seguridad del ensamble, la captura absoluta de las tensiones hertzianas y concentraciones microscópicas de esfuerzos en los flancos y raíces de los engranes exige futuros estudios de convergencia de malla tipo h .

Capítulo II

Antecedentes

II.1. Mecanismo base y justificación de la geometría centrada

El mecanismo de la barra de aguja en la mayoría de las máquinas de coser es una aplicación clásica del mecanismo BMC, como se observa en la Figura II.1. La función primaria en ambos casos es convertir el movimiento rotatorio (proveniente del motor eléctrico) en movimiento lineal alternativo. El sistema consta de tres elementos móviles fundamentales:

- **Manivela:** Eje principal impulsado por el motor que describe una trayectoria circular.
- **Biela:** Elemento acoplador que transmite el movimiento desde la manivela.
- **Corredera:** Eslabón de salida (en el caso del dron, la base del brazo) restringido por guías estructurales para moverse únicamente en traslación pura.

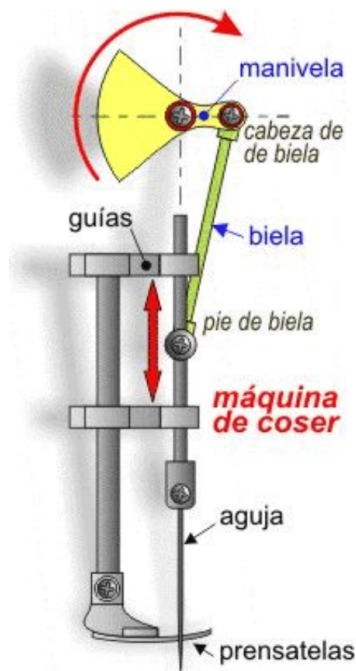


Figura II.1: Ilustración del mecanismo de una máquina de coser. [36]

Es importante destacar una divergencia crucial de diseño entre la inspiración y el modelo final. Mientras que las máquinas de coser utilizan frecuentemente un mecanismo *desplazado* (con excentricidad entre el eje de la manivela y el eje de la corredera) para lograr tiempos de retorno asimétricos necesarios para la formación del bucle de hilo [37, 38], **el sistema de despliegue de este UAV ha sido diseñado estrictamente como un mecanismo**



biela-manivela-corredera centrado. La eliminación de la excentricidad (fijando el offset en cero) es una decisión de diseño deliberada, justificada por las siguientes necesidades:

1. **Simetría temporal y dinámica:** En un mecanismo centrado, el tiempo de despliegue es idéntico al tiempo de repliegue bajo una velocidad angular constante de entrada [39]. Para un dron, evitar movimientos asimétricos bruscos previene la generación de perturbaciones inerciales no deseadas que podrían desestabilizar el controlador de vuelo durante las transiciones morfológicas.
2. **Reducción de momentos flectores:** Al alinear el eje de traslación de la corredera con el centro de rotación del servomotor principal, se minimizan las fuerzas laterales y los momentos de flexión sobre el chasis central. Esto permite reducir el espesor y la masa del marco estructural del dron, favoreciendo la autonomía.
3. **Simplicidad en el modelado y control:** La cinemática centrada reduce la no-linealidad de las ecuaciones de movimiento, lo que facilita el cálculo de torques en tiempo real y simplifica la parametrización dentro del Algoritmo Genético, al eliminar la excentricidad como variable de búsqueda.

II.1.1. Análisis Cinemático del Mecanismo

Con base en la topología centrada, el primer paso consiste en describir la geometría y el movimiento del sistema. Se analiza un único brazo, ya que la cinemática de los cuatro es idéntica y síncrona.

II.1.1.1. Ecuación de Posición

Se busca determinar la posición lineal de la corredera (x) en función del ángulo de entrada de la manivela (θ), controlado por el servomotor.

Las variables mostradas en la Figura II.2, son:

- r Radio de la manivela (engrane).
- L Longitud de la biela.
- θ Ángulo de la manivela.
- x Posición de la corredera.

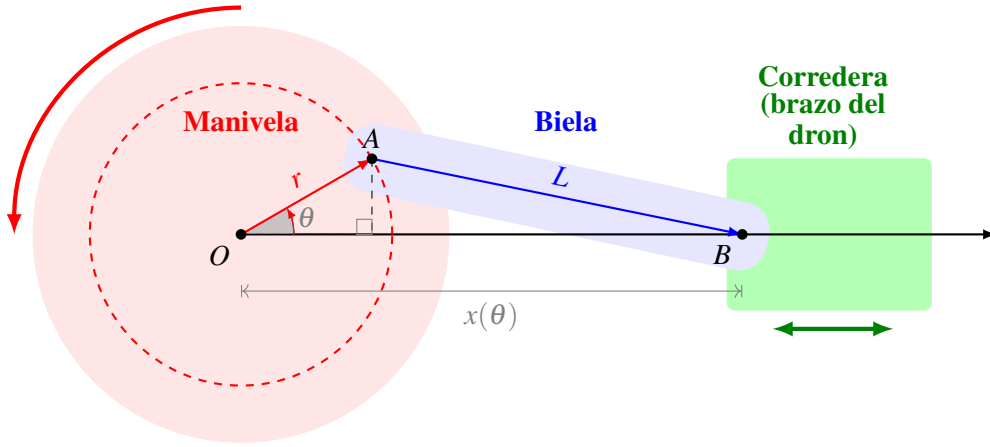


Figura II.2: Esquema del mecanismo centrado con las variables cinemáticas e indicaciones de movimiento traslacional y rotativo.

En la fase de síntesis de tipo para el sistema de despliegue del UAV, resulta imperativo definir una arquitectura mecánica que logre un equilibrio riguroso entre la velocidad de actuación, la simplicidad de control y la minimización de la masa agregada al sistema. Tras analizar diversas configuraciones cinemáticas, en esta investigación se ha fijado la topología del mecanismo de biela-manivela-corredera centrado (un caso especial del varillaje de cuatro barras) como el esqueleto cinemático base para el proceso de optimización dimensional.

La justificación fundamental de esta elección topológica se sustenta en la teoría cinemática clásica [40]. Aplicando el criterio de movilidad de Kutzbach-Grübler para mecanismos planos, los grados de libertad (M) se calculan mediante:

$$M = 3(n - 1) - 2j_1 - j_2 \quad (\text{II.1})$$

donde $n = 4$ (bancada, manivela, biela, corredera), $j_1 = 4$ (tres articulaciones de revolución y un par prismático), y $j_2 = 0$. Sustituyendo, el sistema arroja una movilidad de $M = 1$. Un solo grado de libertad garantiza que el despliegue sea determinista y gobernable mediante un único actuador primario. Además, el varillaje ofrece ventajas mecánicas significativas en las proximidades de sus posiciones límite (puntos muertos), ideal para asegurar el bloqueo estructural del brazo soportando cargas aerodinámicas sin exigir torque de retención continuo.

Dado que la corredera se desplaza sobre el mismo eje horizontal que cruza el centro



de rotación de la manivela (excentricidad cero), la derivación analítica parte de las relaciones geométricas del triángulo rectángulo formado por la proyección de la biela. La posición del pivote entre la manivela y la biela tiene coordenadas $(r \cos \theta, r \sin \theta)$. La posición del pivote de la corredera es $(x, 0)$. La distancia euclidiana entre estos dos puntos es invariablemente la longitud de la biela, L . Aplicando el Teorema de Pitágoras:

$$(x - r \cos \theta)^2 + (0 - r \sin \theta)^2 = L^2 \quad (\text{II.2})$$

Se procede a despejar la variable de interés, x :

$$(x - r \cos \theta)^2 + r^2 \sin^2 \theta = L^2 \quad (\text{II.3})$$

$$(x - r \cos \theta)^2 = L^2 - r^2 \sin^2 \theta \quad (\text{II.4})$$

$$x - r \cos \theta = \sqrt{L^2 - r^2 \sin^2 \theta} \quad (\text{II.5})$$

Finalmente, se obtiene la ecuación de posición de la corredera en función del ángulo de la manivela:

$$\boxed{\therefore x(\theta) = r \cos \theta + \sqrt{L^2 - r^2 \sin^2 \theta}} \quad (\text{II.6})$$

II.1.1.2. Ecuación de Velocidad

La velocidad lineal de la corredera (v_x) se obtiene derivando la ecuación de posición (II.6) con respecto al tiempo, aplicando la regla de la cadena:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.7})$$

Donde $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ es la velocidad angular del servomotor. Primero, se calcula la derivada $\frac{dx}{d\theta}$:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\theta} &= \frac{d}{d\theta} \left(r \cos \theta + \left(L^2 - r^2 \sin^2 \theta \right)^{1/2} \right) \\ &= -r \sin \theta + \frac{1}{2} \left(L^2 - r^2 \sin^2 \theta \right)^{-1/2} \cdot \left(-r^2 \cdot 2 \sin \theta \cos \theta \right) \\ \frac{dx}{d\theta} &= -r \sin \theta - \frac{r^2 \sin \theta \cos \theta}{\sqrt{L^2 - r^2 \sin^2 \theta}} \end{aligned}$$



La ecuación de velocidad es entonces:

$$\therefore v_x(\theta) = \omega \left(-r \sin \theta - \frac{r^2 \sin \theta \cos \theta}{\sqrt{L^2 - r^2 \sin^2 \theta}} \right) \quad (\text{II.8})$$

II.1.1.3. Ecuación de Aceleración

De forma análoga, la aceleración (a_x) es la derivada de la velocidad con respecto al tiempo:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{dv_x}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \omega \frac{d}{d\theta} (v_x(\theta)) \quad (\text{II.9})$$

Asumiendo una velocidad angular ω constante:

$$a_x(\theta) = \omega^2 \frac{d^2 x}{d\theta^2} \quad (\text{II.10})$$

Al derivar nuevamente, se obtiene la expresión analítica de la aceleración:

$$\therefore a_x(\theta) = \omega^2 \left(-r \cos \theta - \frac{r^4 \cos^2 \theta \sin^2 \theta}{(L^2 - r^2 \sin^2 \theta)^{3/2}} - \frac{r^2 \cos^2 \theta}{\sqrt{L^2 - r^2 \sin^2 \theta}} + \frac{r^2 \sin^2 \theta}{\sqrt{L^2 - r^2 \sin^2 \theta}} \right) \quad (\text{II.11})$$

II.1.2. Análisis Dinámico del Sistema

Este análisis determina las fuerzas y pares necesarios para producir el movimiento descrito por la cinemática. Para ello, se deriva la ecuación de par basándose en el Principio de Conservación de la Energía.

El Principio de la Conservación de la Energía

Considerando un sistema mecánico ideal, toda la potencia que se introduce en un sistema debe ser igual a la potencia que sale de él en ese mismo instante:

$$P_{\text{entrada}} = P_{\text{salida}} \quad (\text{II.12})$$

Su gran ventaja es que permite relacionar directamente el par del motor con la fuerza que mueve el brazo, eludiendo el cálculo de las complejas fuerzas de reacción en los pivotes.

- **Potencia de Entrada (P_{entrada}):** $P_{\text{entrada}} = \tau_{\text{brazo}} \cdot \omega$
- **Potencia de Salida (P_{salida}):** $P_{\text{salida}} = F_x \cdot v_x$



II.1.2.1. Derivación de la Relación Fundamental Par-Fuerza:

Igualando potencias y sustituyendo la cinemática ($v_x = \frac{dx}{d\theta} \cdot \omega$):

$$\tau_{\text{brazo}} \cdot \omega = F_x \cdot \left(\frac{dx}{d\theta} \cdot \omega \right) \implies \tau_{\text{brazo}} = F_x \cdot \frac{dx}{d\theta} \quad (\text{II.13})$$

Esta es la ecuación fundamental. El término $\frac{dx}{d\theta}$ representa la “ganancia cinemática”.

II.1.2.2. Desglose de la Fuerza de Carga (F_x)

La fuerza total F_x en la corredera es la suma de las fuerzas de oposición:

1. **Fuerza de Fricción ($F_{\text{fricción}}$):** Modelada con fricción de Coulomb sobre una superficie horizontal ($N = mg$):

$$F_{\text{fricción}} = \mu \cdot m \cdot g \quad (\text{II.14})$$

2. **Fuerza de Inercia (F_{inercia}):** Basada en el Principio de d'Alembert para la masa m del brazo:

$$F_{\text{inercia}}(\theta) = m \cdot a_x(\theta) \quad (\text{II.15})$$

Fuerza Total:

$$F_x(\theta) = m \cdot a_x(\theta) + \mu mg \quad (\text{II.16})$$

II.1.2.3. Ecuación Final del Par (Síntesis):

Sustituyendo F_x y $\frac{dx}{d\theta}$ en la ecuación fundamental:

$$\therefore \tau_{\text{brazo}}(\theta) = (m \cdot a_x(\theta) + \mu mg) \cdot \left(-r \sin \theta - \frac{r^2 \sin \theta \cos \theta}{\sqrt{L^2 - r^2 \sin^2 \theta}} \right) \quad (\text{II.17})$$

Esta ecuación rige el simulador para calcular el par necesario en cualquier ángulo θ .



II.1.2.4. Par Total del Actuador:

Dado que el servomotor central acciona un tren de engranes 1:1, este debe ejercer la suma de los pares de los cuatro brazos idénticos:

$$\therefore \tau_{\text{servo}}(\theta) = \sum_{i=1}^4 \tau_{\text{brazo},i}(\theta) = 4 \cdot \tau_{\text{brazo}}(\theta) \quad (\text{II.18})$$

II.1.3. Justificación de la Selección Tecnológica: Engranes vs. Actuadores Lineales

II.1.3.1. Argumentos a Favor del Mecanismo Centralizado:

- **Sincronización Perfecta:** Al estar mecánicamente acoplados, se elimina el riesgo de despliegues asimétricos, crucial para la estabilidad aerodinámica.
- **Eficiencia de Masa:** Un único servo potente suele presentar una mejor relación potencia-peso global que cuatro pequeños actuadores lineales con sus respectivas carcasas y vástagos.
- **Perfil de Movimiento Natural:** La cinemática de la biela genera curvas de aceleración suaves, reduciendo el *jerk* (derivada de la aceleración) y el estrés estructural consecuente.
- **Bloqueo Geométrico (Toggle Position):** En los extremos ($\theta=0[^\circ]$ o $180[^\circ]$), el mecanismo soporta altas cargas sin consumir energía eléctrica del actuador.

II.1.3.2. Consideraciones sobre Actuadores Lineales Independientes:

Aunque ofrecen control independiente y una fuerza lineal constante a lo largo del recorrido, añaden complejidad de software, multiplican los puntos de fallo de hardware (pasando de 1 motor a 4) y su huella espacial descentralizada complica el empaquetado de componentes electrónicos en el chasis. Por ende, para los requisitos de Búsqueda y Rescate, el enfoque mecánico centralizado demuestra ser superior.



II.2. Fundamentos de los Algoritmos Genéticos

Los Algoritmos Genéticos (**AG**) son métodos de búsqueda y optimización global de naturaleza estocástica, profundamente inspirados en los principios de la evolución biológica y la genética de poblaciones postulados por Charles Darwin [32]. A diferencia de los métodos de optimización clásicos basados en gradientes, los **AG** operan sobre una población de posibles soluciones (individuos), aplicando el principio de “la supervivencia del más apto” para guiar la búsqueda hacia el óptimo global dentro de espacios de diseño complejos, discontinuos o multimodales.

En el contexto de la ingeniería aeroespacial y el diseño mecánico, esta metaheurística resulta invaluable, ya que permite la exploración exhaustiva de topologías y parámetros de diseño sin requerir que la función objetivo sea derivable o continua [35].

II.2.1. Operadores Genéticos

La evolución de la población a lo largo de las iteraciones se rige por operadores estocásticos que imitan los mecanismos de reproducción y mutación biológica:

- **Selección:** Es el proceso mediante el cual se eligen los individuos que tendrán la oportunidad de reproducirse, basándose en su nivel de adaptación (aptitud o *fitness*).
 - *Selección por Ruleta:* La probabilidad de que un individuo sea seleccionado es directamente proporcional a su valor de aptitud. Es análogo a una ruleta donde los individuos más fuertes ocupan un área mayor, teniendo más probabilidades de ser elegidos, aunque permitiendo que los más débiles tengan una oportunidad residual.
 - *Selección por Torneo:* Se elige aleatoriamente un subconjunto de individuos de la población y se selecciona al mejor de ellos. Este método permite ajustar la presión selectiva variando el tamaño del torneo, siendo computacionalmente muy eficiente.
- **Cruce (Recombinación):** Es el operador principal de explotación del algoritmo. Combina la información genética (cromosomas) de dos “padres” seleccionados para generar descendencia con características mixtas, esperando que hereden las mejores virtu-



des de ambos.

- *Cruce de un punto*: Se selecciona un punto de corte aleatorio en los cromosomas de los padres; los genes previos al punto provienen del primer padre y los posteriores del segundo.
- *Cruce de dos puntos*: Se eligen dos puntos de corte, intercambiando el segmento central entre los padres. Esto permite una mezcla genética más dinámica y reduce el sesgo posicional de los extremos del cromosoma.
- **Mutación**: Es el operador de exploración por excelencia. Consiste en la alteración aleatoria de uno o más genes del cromosoma (por ejemplo, invertir un bit de 0 a 1 en codificación binaria). Su función vital es inyectar diversidad genética en la población para evitar la convergencia prematura hacia mínimos locales subóptimos.

II.2.2. Parámetros Fundamentales del Algoritmo

El comportamiento, la velocidad de convergencia y la calidad de las soluciones de un Algoritmo Genético están fuertemente condicionados por la configuración de sus parámetros base:

- **Población (N)**: Es el conjunto total de soluciones candidatas (individuos) que existen simultáneamente en una generación dada. Un tamaño de población grande explora mejor el espacio de diseño, pero incrementa significativamente el coste computacional por iteración.
- **Generaciones (G)**: Representa el número de ciclos evolutivos o iteraciones que ejecutará el algoritmo. Sirve comúnmente como el criterio de parada principal del proceso de optimización.
- **Ejecuciones ($\mathcal{R}$)**: Dado el carácter inherentemente estocástico de los AG, una única ejecución no garantiza el hallazgo del óptimo global, ni produce el mismo resultado dos veces. Es un rigor científico obligatorio realizar múltiples ejecuciones independientes para poder evaluar la robustez y consistencia estadística del algoritmo.
- **Función de Aptitud (Fitness Function)**: Es el modelo matemático que evalúa qué tan



“buena” o apta es una solución. Sirve como el puente fundamental entre el problema físico real (en este caso, minimizar el torque de un mecanismo) y el motor numérico de optimización.

- **Elitismo (ϵ):** Es una estrategia protectora que consiste en copiar directamente al mejor individuo (o fracción de los mejores) de la generación actual hacia la siguiente, sin someterlo a los riesgos del cruce o la mutación. Esto garantiza matemáticamente que la máxima aptitud de la población sea monótonamente no decreciente a lo largo del tiempo.

II.2.3. Ejemplos de funcionamiento de AGs para Optimizar Funciones

A menudo buscamos minimizar o maximizar una función de costo que represente, por ejemplo, la eficiencia aerodinámica, la minimización de masa estructural, o la reducción de torque o par de un mecanismo articulado. En esencia esto es lo que pueden ayudarnos a hacer los AGs, relacionándolo con este trabajo de tesis.

Para comprender la lógica y el proceso que hay detrás del algoritmo propuesto, se presentan, a continuación, tres casos de estudio simplificados. Siendo estos de una, dos y cuatro dimensiones, respectivamente. Es importante hacer mención de que cuando hablamos de “dimensiones” en el espacio de resultados de un AG, no referimos a la cantidad de variables que se están estudiando.

Por brevedad en este documento, se omite el código extenso encargado del renderizado estético del panel (en caso de requerirlo, este puede ser encontrado en el apartado de Anexos) al final de este escrito.

II.2.4. Implementación Computacional del Algoritmo Genético 1D

Para validar la arquitectura de la metaheurística propuesta antes de escalarla al problema de cuatro dimensiones del mecanismo de pliegue, se desarrolló un entorno de prueba unidimensional (1D o de una variable). El objetivo es maximizar la función:

$$f(x) = x \cdot \sin(10\pi x) + 1.0, \quad x \in [-1, 2] \quad (\text{II.19})$$

Se eligió este problema en específico porque es ideal para evaluar la capacidad del algoritmo para evadir óptimos locales y buscar el global.



A continuación, se detalla la arquitectura del código desarrollado en lenguaje Python, dividido en sus componentes lógicos fundamentales.

II.2.4.1. Inicialización y Parámetros de Control

El primer módulo del código establece las bibliotecas necesarias y los hiperparámetros que dirigirán la dinámica evolutiva del algoritmo. Se fija una semilla (*seed*) para garantizar la reproducibilidad de los resultados experimentales ante el jurado. Se definió una población de 50 individuos, iterando a lo largo de 100 generaciones, con una tasa de mutación del 15 % para mantener una presión exploratoria constante.

1_parametros.py

```
1  import numpy as np
2  import matplotlib.pyplot as plt
3  import matplotlib.gridspec as gridspec
4
5  # Reproducibilidad de los experimentos
6  np.random.seed(42)
7
8  # PARAMETROS DEL ALGORITMO
9  POP_SIZE      = 50      # Numero de individuos por generacion
10 GEN_MAX       = 100     # Numero maximo de generaciones
11 P_MUTATION    = 0.15    # Probabilidad de mutacion por individuo
12 SIGMA_MUT     = 0.05    # Desviacion estandar de la mutacion
13               gaussiana
14 ELITE_COUNT    = 2      # Individuos que pasan directamente (
15               elitismo)
16 X_MIN, X_MAX  = -1.0, 2.0 # Dominio de busqueda
```

II.2.4.2. Función Objetivo o de Aptitud (Fitness) y Operadores Genéticos

El corazón matemático del algoritmo reside en la función de evaluación y en los mecanismos estocásticos que imitan la evolución biológica.

- **Selección:** Se implementó un *torneo de tamaño 3*, logrando un equilibrio eficiente entre presión selectiva y diversidad genética.
- **Cruce:** Se utilizó un cruce aritmético que genera combinaciones convexas de los cro-



mosomas progenitores.

- **Mutación:** La inyección de variabilidad se realiza mediante ruido gaussiano, confiando siempre al individuo resultante dentro del espacio de diseño válido $[-1.0, 2.0]$.

2_operadores.py

```
1 def fitness(x: np.ndarray) -> np.ndarray:
2     # Evalua f(x) para un array de individuos. Retorna array de
3     # aptitudes.
4     return x * np.sin(10 * np.pi * x) + 1.0
5
6 def seleccion_torneo(poblacion: np.ndarray, aptitudes: np.ndarray,
7     k: int = 3) -> np.ndarray:
8     # Seleccion por torneo de tamaño k. Retorna un padre ganador.
9     indices = np.random.choice(len(poblacion), k, replace=False)
10    ganador = indices[np.argmax(aptitudes[indices])]
11    return poblacion[ganador]
12
13 def cruce_aritmetico(padre1: float, padre2: float) -> tuple:
14     # Cruce aritmetico: genera dos hijos con mezcla convexa.
15     alpha = np.random.rand()
16     hijo1 = alpha * padre1 + (1 - alpha) * padre2
17     hijo2 = (1 - alpha) * padre1 + alpha * padre2
18     return hijo1, hijo2
19
20 def mutacion_gaussiana(individuo: float) -> float:
21     # Mutacion gaussiana con restriccion de dominio.
22     if np.random.rand() < P_MUTATION:
23         individuo += np.random.normal(0, SIGMA_MUT)
24     return np.clip(individuo, X_MIN, X_MAX)
```

II.2.4.3. Núcleo del Ciclo Evolutivo

Este bloque lleva a cabo el proceso intergeneracional. La rutina inicializa una población aleatoria distribuida uniformemente en todo el dominio y, posteriormente, ejecuta el ciclo iterativo de reemplazo poblacional protegiendo a los mejores especímenes mediante *elitismo explícito*.



3_nucleo_evolutivo.py

```
1  def ejecutar_ag():
2      # Inicializacion aleatoria uniforme en el dominio
3      poblacion = np.random.uniform(X_MIN, X_MAX, POP_SIZE)
4
5      # Arreglos para telemetria y graficacion
6      historial_mejor = []
7      historial_promedio = []
8      historial_poblacion = []
9
10     for gen in range(GEN_MAX):
11         aptitudes = fitness(poblacion)
12
13         historial_mejor.append(np.max(aptitudes))
14         historial_promedio.append(np.mean(aptitudes))
15         historial_poblacion.append(poblacion.copy())
16
17         # Elitismo: preservar los mejores sin modificarlos
18         idx_elite = np.argsort(aptitudes)[-ELITE_COUNT:]
19         elite = poblacion[idx_elite].copy()
20
21         # Generar nueva poblacion por seleccion + cruce + mutacion
22         nueva_poblacion = []
23         while len(nueva_poblacion) < POP_SIZE - ELITE_COUNT:
24             p1 = seleccion_torneo(poblacion, aptitudes)
25             p2 = seleccion_torneo(poblacion, aptitudes)
26             h1, h2 = cruce_aritmetico(p1, p2)
27             nueva_poblacion.extend([mutacion_gaussiana(h1),
28                                     mutacion_gaussiana(h2)])
29
30         poblacion = np.concatenate([elite,
31                                     np.array(nueva_poblacion[:POP_SIZE - ELITE_COUNT])])
32
33         aptitudes_finales = fitness(poblacion)
34         idx_mejor = np.argmax(aptitudes_finales)
35         return (poblacion[idx_mejor], aptitudes_finales[idx_mejor],
36                 historial_mejor, historial_promedio, historial_poblacion)
```




II.2.4.4. Interfaz de Ejecución y Visualización

Finalmente, el sistema cuenta con un bloque de ejecución que no solo desarrolla la evolución, sino que también calcula el error relativo frente al máximo analítico conocido ($f(1.8503) \approx 2.8503$). A continuación se muestra la llamada principal del programa:

4_main.py

```
1  if __name__ == '__main__':
2      print("
          ===== "
        )
3      print("  AG 1D -- Maximizacion de funcion multimodal")
4      print(f"  Poblacion: {POP_SIZE}    |    Generaciones: {GEN_MAX}"
        )
5      print(f"  P_mutacion: {P_MUTATION}    |    Elitismo: {ELITE_COUNT}"
        )
6      print("
          ----- "
        )
7
8      x_opt, f_opt, h_mejor, h_prom, h_pob = ejecutar_ag()
9
10     print("\n  [Exito] Optimo encontrado")
11     print(f"      x*      = {x_opt:.6f}")
12     print(f"      f(x*)    = {f_opt:.6f}")
13     print("\n  Referencia analitica (maximo global real):")
14     print("      x ~ 1.8503,  f(x) ~ 2.8503")
15     print(f"      Error relativo: {abs(f_opt - 2.8503) / 2.8503 *
          100:.3f} %")
16
17     # Llamada a rutina externa para guardar dashboard analitico
18     graficar(x_opt, f_opt, h_mejor, h_prom, h_pob)
```

II.2.4.5. Resultados y Curva de Convergencia

A continuación, se visualiza la función objetivo y la evolución teórica del fitness a lo largo de las generaciones.

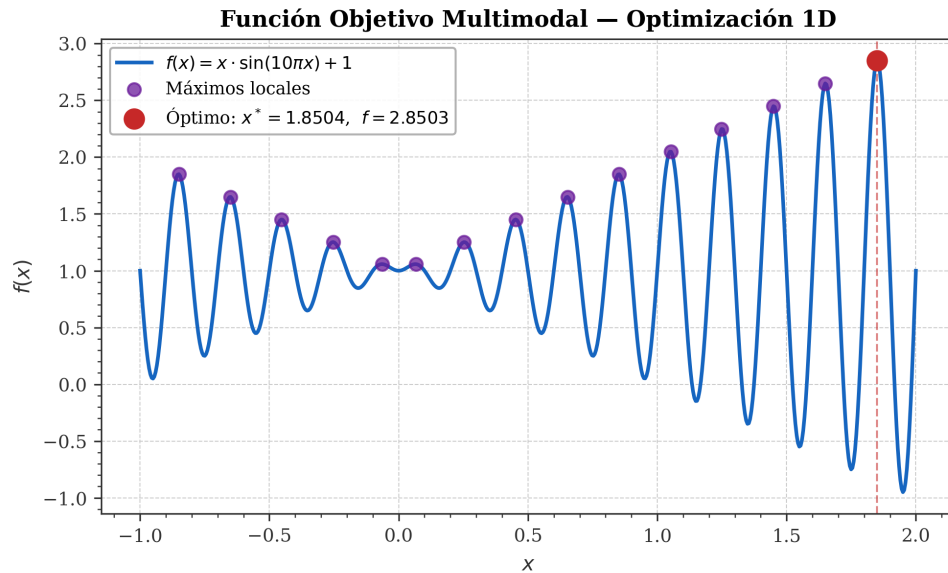


Figura II.3: Función objetivo del ejemplo de Algoritmo Genético de una variable. Marcado con un punto rojo se observa el máximo global que fue encontrado por el AG y con puntos morados los múltiples máximos locales de la función.

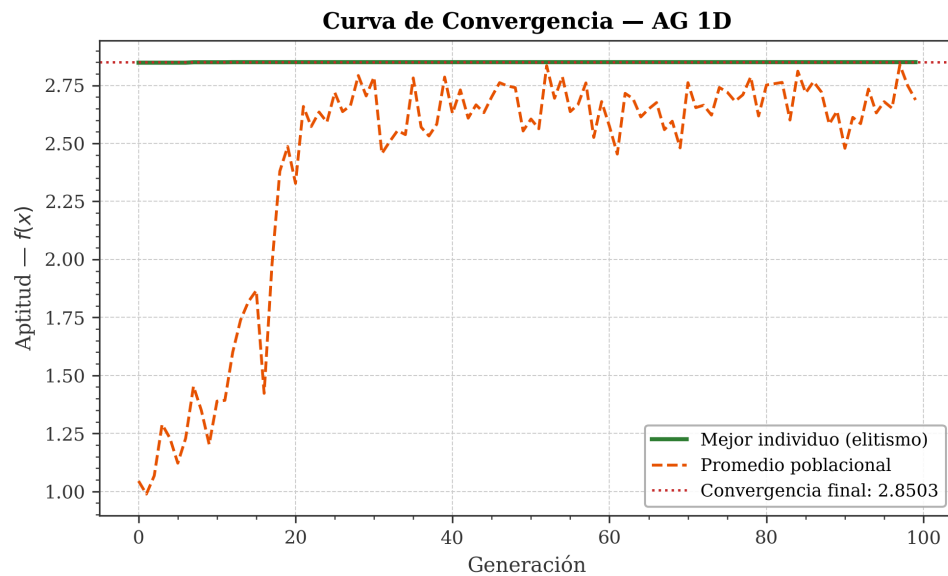


Figura II.4: Curva de convergencia del AG que muestra en color verde al mejor individuo de acuerdo con el elitismo, en naranja el promedio poblacional y en rojo (línea punteada) el valor de convergencia final.

Como se observa en el gráfico de convergencia, el mecanismo de **elitismo** asegura que el

fitness máximo (línea verde) nunca decrezca, funcionando como una memoria de la mejor configuración hallada. Paralelamente, el proceso de cruce y selección hace que la **población promedio** (línea naranja) mejore progresivamente su aptitud, indicando que la mayoría de los individuos han convergido y se están agrupando cerca del óptimo global del sistema.

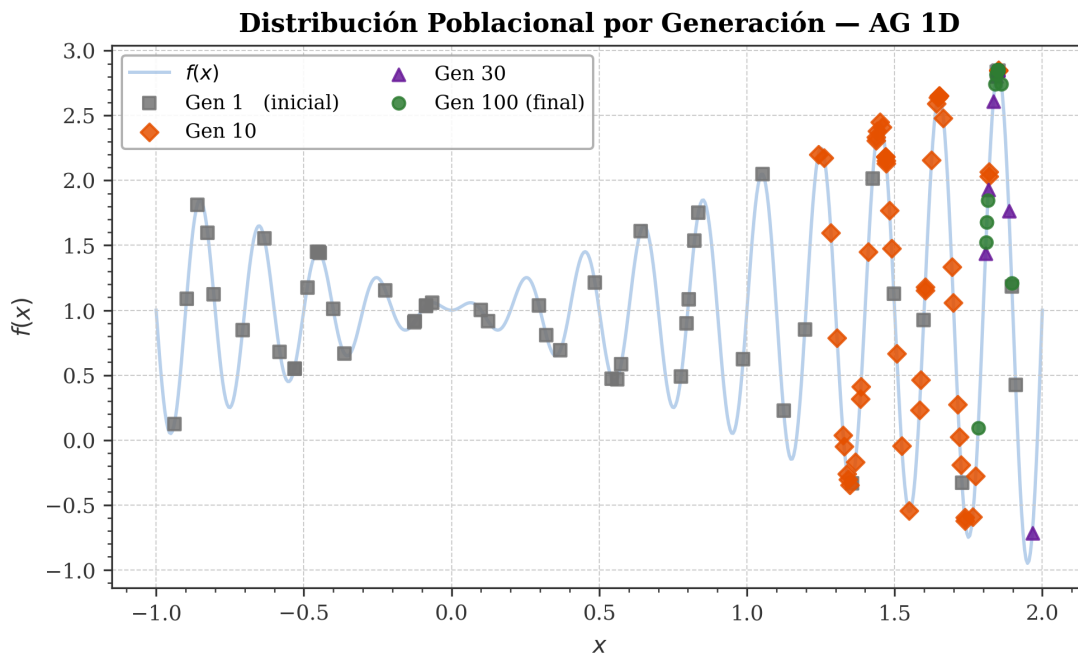


Figura II.5: En esta gráfica se muestra la función objetivo en contraste con los valores obtenidos de acuerdo con la generación evaluada; gris para la primera generación, naranja para la décima, morado para la trigésima y verde para la centésima. Nótese que en esta última se alcanzan en su mayoría resultados sobre el punto del máximo global de la función.

II.2.5. Optimización Multidimensional y Metaheurísticas

A medida que el problema físico adquiere complejidad, como en la cinemática de un brazo plegable donde interactúan múltiples ángulos y longitudes de eslabones simultáneamente, el espacio de búsqueda deja de ser una línea para convertirse en una superficie bidimensional o en un hipervolumen N -dimensional. Este incremento exponencial en las combinaciones posibles se conoce como la *maldición de la dimensionalidad*. Para ilustrarlo, evaluaremos una función de dos variables (que genera una superficie tridimensional). Modelaremos



un escenario con múltiples máximos locales y un único máximo global en el centro:

$$f(x_1, x_2) = \cos\left(5\sqrt{x_1^2 + x_2^2}\right) \cdot e^{-0.1(x_1^2 + x_2^2)} \quad \text{para } x_1, x_2 \in [-3, 3] \quad (\text{II.20})$$

II.2.5.1. El Papel de la Heurística y la Metaheurística

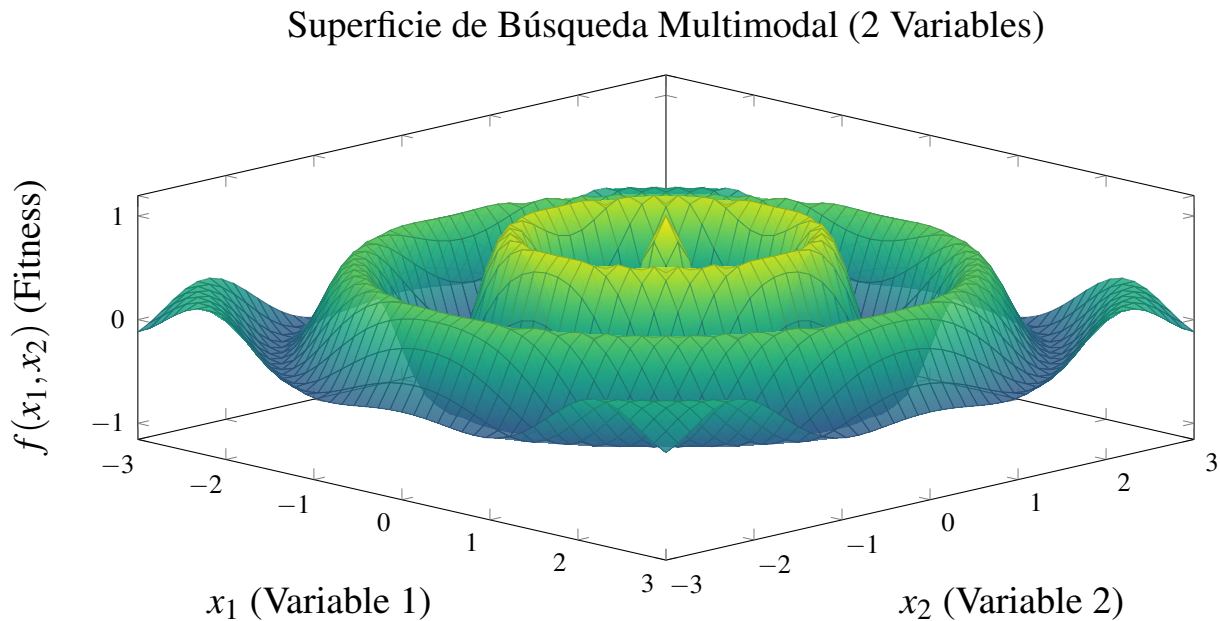
En un entorno tridimensional con múltiples “colinas” y “valles”, una **heurística** clásica (como el método de ascenso de la colina basado en el gradiente) simplemente evaluaría la pendiente local y subiría. El riesgo inminente es converger en un pico secundario, ignorando el máximo global del sistema. Un Algoritmo Genético actúa como una **metaheurística**, que es una estrategia de orden superior que coordina la exploración aleatoria (mutación) para saltar entre diferentes picos de la superficie, y la explotación direccional (cruce) para escalar el pico más prometedor.

ag_multidimensional.py

```
1  import numpy as np
2
3  NUM_VARIABLES = 2 # Representa, por ejemplo, dos angulos de
   articulation
4
5  def objective_function_3d(chromosome):
6      # El cromosoma ahora es un arreglo [x1, x2]
7      x1, x2 = chromosome[0], chromosome[1]
8      r = np.sqrt(x1**2 + x2**2)
9      # Funcion con multiples picos y caída exponencial
10     return np.cos(5 * r) * np.exp(-0.1 * (r**2))
11
12     def crossover_nd(parent1, parent2):
13         # Recombinacion independiente para cada dimension
14         alpha = np.random.rand(NUM_VARIABLES)
15         return alpha * parent1 + (1 - alpha) * parent2
16
17     def mutate_nd(individual, rate):
18         # La mutacion se evalua gen por gen (variable por variable)
19         for i in range(NUM_VARIABLES):
20             if np.random.rand() < rate:
21                 individual[i] += np.random.normal(0, 0.5)
22         return np.clip(individual, -3, 3)
```

II.2.5.2. Topología del Espacio de Búsqueda

Al ejecutar la metaheurística en este espacio tridimensional, la población inicial se distribuye a lo largo de toda la superficie. Generación tras generación, los individuos que caen en las “ondas” exteriores son descartados, mientras que las mutaciones permiten a la población cruzar los valles y concentrar su material genético en la aguja central.



La gráfica ilustra visualmente el desafío: sin un mecanismo de mutación agresivo en las etapas tempranas, los individuos podrían estancarse en cualquiera de los anillos periféricos. La capacidad de la metaheurística para procesar arreglos N -dimensionales de forma paralela la convierte en la opción ideal para optimizar sistemas mecatrónicos acoplados.



Mapa de Aptitud y Distribución Poblacional — AG 2D

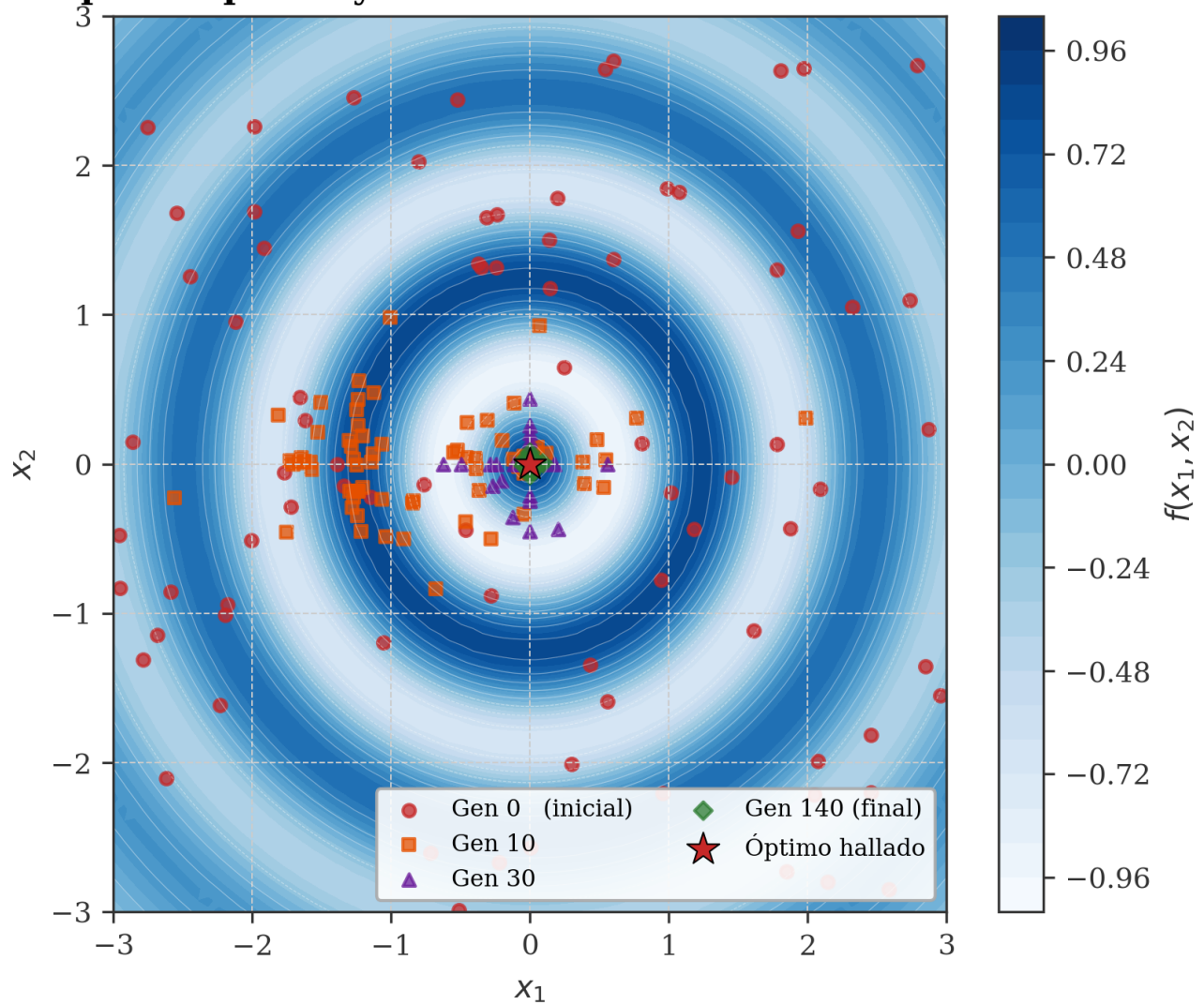


Figura II.6: En esta gráfica.

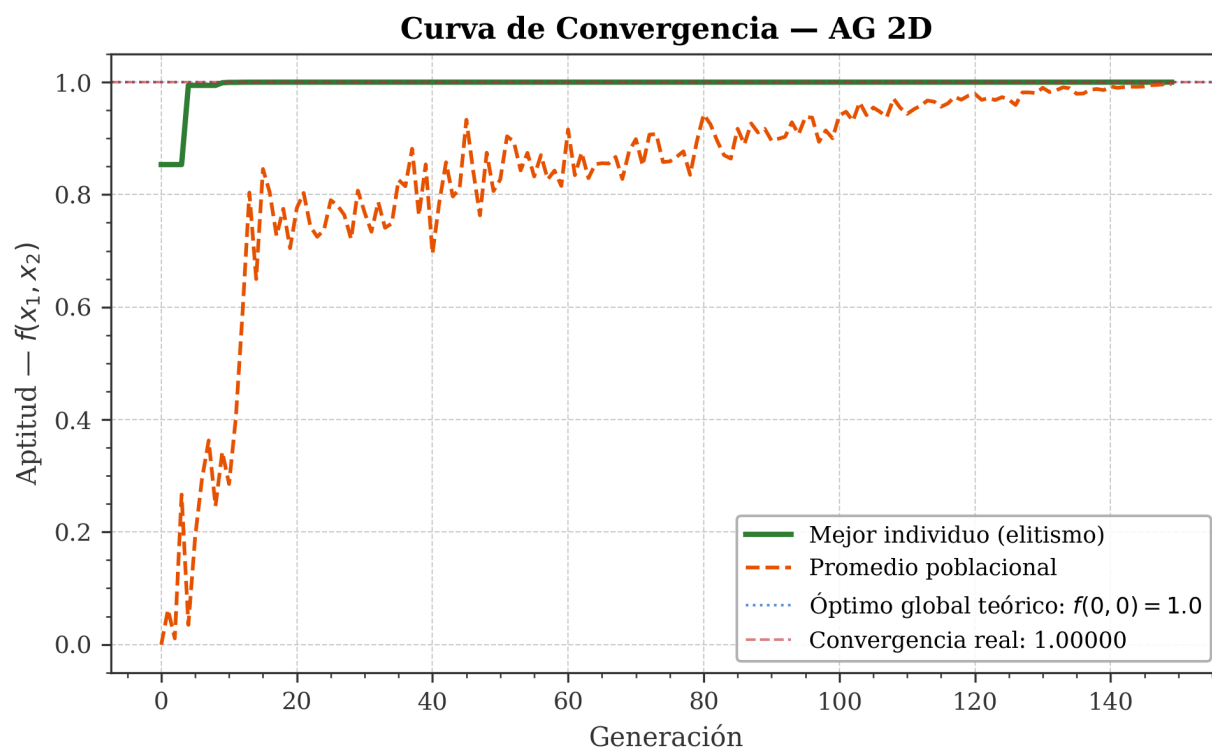


Figura II.7: En esta gráfica.

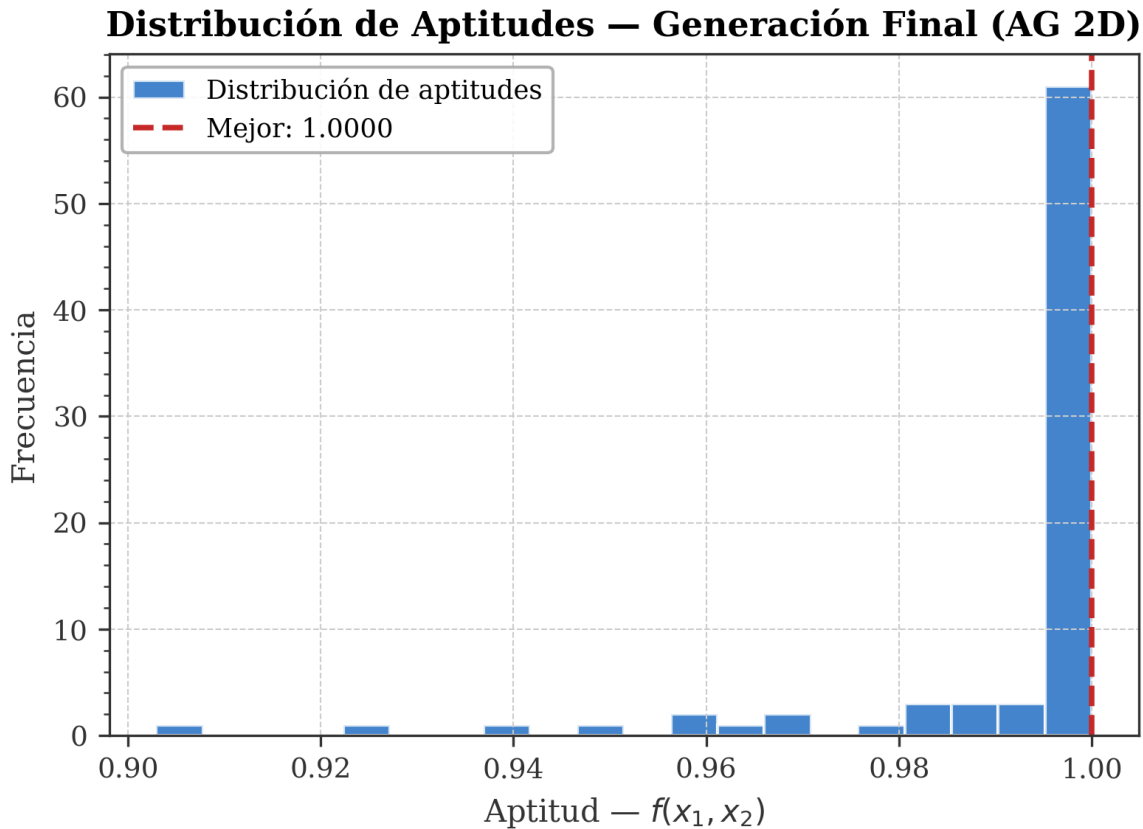


Figura II.8: En esta gráfica.

II.2.6. Optimización en Hiperespacios: Cuatro Variables

La transición de una optimización bidimensional a un sistema de cuatro variables marca la frontera donde los métodos heurísticos simples colapsan debido a la magnitud del espacio de búsqueda. La complejidad geométrica de este problema radica en el crecimiento exponencial de las combinaciones posibles. Si decidiéramos discretizar el rango de movimiento o de longitud de cada una de las 4 variables en apenas 100 divisiones para realizar una búsqueda de “fuerza bruta” (evaluar todas las opciones), el espacio de búsqueda se expandiría a $100^4 = 100,000,000$ (cien millones) de configuraciones distintas.

Evaluar torque requerido para cien millones de variantes estructurales en un ciclo total de simulación de plegado y desplegado de 0.1[s] (empezando con 0.5[s] y buscando disminuir gradualmente ese número), requeriría recursos computacionales y tiempos



de procesamiento inasumibles. Es aquí donde el Algoritmo Genético, como metaheurística, brilla al muestrear de forma inteligente solo las fracciones más prometedoras de este hiperespacio.

Una vez aclarado lo anterior, resulta aún más razonable la elección de este tipo de algoritmos como método de solución para este problema de diseño. Es así que, en el capítulo siguiente, se aborda en su totalidad el desarrollo de la propuesta de diseño a partir del planteamiento del AG y, posteriormente, la preparación del caso de estudio para, finalmente, obtener y mostrar los resultados obtenidos.

Capítulo III

Desarrollo



III.1. Propuesta de diseño

El desafío central de esta investigación consiste en retraer y desplegar los brazos de un cuatricóptero **SAR** de la manera más rápida y mecánicamente eficiente posible. Para lograr esto, se requiere un sistema capaz de transformar el movimiento rotatorio continuo o semi-continuo de un actuador (alojado en el fuselaje por cuestiones de inercia y distribución de peso) en un movimiento de traslación rectilínea para extender las extremidades del dron.

Tras una evaluación de síntesis cinemática, se llegó a la conclusión de que el mecanismo óptimo para esta tarea es el de Biela-Manivela-Corredera (**BMC**). Esta decisión se fundamenta en su alta confiabilidad, su capacidad de generar una ventaja mecánica excepcional en los extremos de su recorrido (posición de bloqueo) y su simplicidad constructiva. La inspiración conceptual inicial partió de los sistemas mecánicos robustos utilizados en las máquinas de coser, los cuales emplean mecanismos análogos enlazados para sincronizar el movimiento.

La propuesta final adapta este principio conectando los cuatro brazos del dron a un tren de engranes central impulsado por un único servomotor. Esta topología centralizada busca eficientar el uso de la batería del dron al minimizar el número de actuadores, permitiendo así un mayor tiempo de vuelo y garantizando matemáticamente la sincronización mecánica de los cuatro brazos durante la transición morfológica.

III.2. Algoritmo Genético propuesto

III.2.1. Arquitectura del programa

El sistema implementado en el código `AG_final_v13.py` responde a una *Arquitectura Monolítica Modular (Modulith)*, organizada funcionalmente en cuatro capas conceptuales bien definidas, aunque no separadas físicamente en distintos módulos:

- Capa de modelado físico-matemático
- Capa de optimización evolutiva (núcleo algorítmico)
- Capa de orquestación experimental



- Capa de interacción humano–máquina y postprocesado

Esta arquitectura está diseñada para resolver un problema de optimización mecánica altamente paramétrico, manteniendo trazabilidad experimental, robustez numérica y reproducibilidad científica.

III.2.1.1. Capa de modelado físico-matemático

Clase `CrankSliderMechanism`: constituye el núcleo determinista del sistema, encapsulando el modelo dinámico del mecanismo BMC. Desde el punto de vista arquitectónico:

- Implementa un modelo de dominio puro, sin dependencias del algoritmo genético ni de la interfaz gráfica.
- Funciona como un servicio físico invocable desde cualquier capa superior.

Responsabilidades principales:

- Cinemática directa (`position`)
- Derivada cinemática (`velocity_derivative`)
- Aceleración exacta no lineal (`acceleration`)
- Cálculo del par resistivo considerando fricción (`torque_brazo`)
- Evaluación del peor caso dinámico (`max_torque_in_cycle`)
- Validación geométrica (`is_valid_configuration`)

El cálculo del torque máximo sobre todo el ciclo angular transforma el problema en una optimización min–max, elevando el nivel de exigencia del fitness y garantizando buenas soluciones desde el punto de vista ingenieril.

III.2.1.2. Capa de optimización evolutiva (núcleo algorítmico)

Representación genética El sistema utiliza una codificación binaria clásica:

- Cada individuo es un vector binario de longitud $M \times 1$



- Cada variable real se obtiene mediante un mapeo lineal discreto (`decode_individual`)
- Variables optimizadas:
 - Radio de manivela r
 - Longitud de biela L
 - Ángulo crítico θ
 - Velocidad angular ω (indirectamente ligada al tiempo de despliegue)

Este enfoque prioriza:

- Control explícito de resolución
- Reproducibilidad
- Comparabilidad con literatura clásica de AGs

Función de fitness: `fitness = 1 / max_torque`

Desde un punto de vista específico, esta función presenta tres características de suma importancia:

- Escalarización física directa (minimización de torque)
- Evaluación en peor escenario dinámico
- Penalización implícita de configuraciones inválidas
- El AG ahora es un optimizador físicamente informado, no meramente numérico.

Algoritmo genético principal La función `genetic_algorithm()` implementa un AG canónico, pero cuidadosamente controlado, con los siguientes elementos:

En este punto, resulta importante destacar que el elitismo explícito garantiza monotonía no decreciente del fitness global, propiedad deseable para análisis de convergencia.



Tabla III.1: Componentes e Implementación del Algoritmo Genético.

Componente	Implementación
Selección	Ruleta con fitness desplazado
Cruce	Doble punto (<code>two_point_crossover</code>) con probabilidad <code>Pc</code>
Mutación	Bit a bit con probabilidad <code>Pm</code>
Elitismo	Forzado (mejor individuo preservado) (<code>$\epsilon=1$</code>)
Paralelismo	Indirecto vía múltiples ejecuciones

III.2.1.3. Capa de orquestación experimental

Barrido paramétrico completo El sistema ejecuta un producto cartesiano exhaustivo sobre:

- Tamaños de población (`N`)
- Generaciones (`G`)
- Probabilidad de cruce (`Pc`)
- Probabilidad de mutación (`Pm`)
- Número de ejecuciones (`N`)
- Tiempos de despliegue (`t`)

Esto transforma el algoritmo genético en un meta-experimento sistemático, donde el AG deja de ser una “caja negra” y pasa a ser un objeto de estudio científico.

Control estadístico Para cada configuración se...

- ejecutan múltiples ejecuciones independientes
- conserva el mejor individuo global
- registran métricas temporales y dinámicas

Los resultados se almacenan en un `DataFrame`, habilitando:

- Boxplots
- *RMSE*
- Análisis de robustez
- Sensibilidad



- Correlaciones

- Frentes de Pareto

III.2.1.4. Capa de interacción humano-máquina (*GUI*)

Arquitectura de la GUI La clase `OptimizationGUI` implementa una arquitectura *MVC* implícita:

- **Modelo:** parámetros físicos y del AG
- **Vista:** widgets Tkinter con soporte modo claro/oscuro
- **Controlador:** callbacks, validaciones y threading

El uso de *threading* evita bloquear el loop principal, manteniendo:

- Responsividad
- Actualización en tiempo real
- Estimación dinámica del *ETA*

Visualización científica en tiempo real El panel de resultados:

- Agrupa por tiempo de despliegue
- Muestra rankings dinámicos
- Prioriza legibilidad técnica (formato tabular tipo consola científica)

III.2.1.5. Postprocesado y análisis automático

La función `generate_analysis()` convierte el sistema en una plataforma de análisis autónoma, capaz de generar:

- Mapas de calor Pc-Pm
- Estudios de robustez (HTML + PNG)
- Gráficas de convergencia
- Informes completos por tiempo y globales



En este sentido, podría decirse que este módulo equivale a un capítulo completo de resultados, automatizado y reproducible.

III.2.1.6. Diagrama de Bloques del AG propuesto

1. **Inicialización y Validación (UI Layer):** el proceso inicia con la captura de parámetros a través de la GUI. El sistema valida la integridad de los datos (e.g., que $t_{min} < t_{max}$) antes de bifurcar la ejecución a un hilo secundario (Worker Thread), liberando la interfaz principal. Se inicializa la estructura de directorios para la persistencia de datos.
2. **Orquestación Experimental (Experiment Layer):** el sistema genera un espacio de búsqueda experimental mediante el producto cartesiano de todos los hiperparámetros seleccionados (Población N , Generaciones G , Probabilidades P_c, P_m). Se establecen dos bucles anidados: uno para iterar sobre cada configuración única y otro para realizar múltiples ejecuciones independientes (Runs) y asegurar validez estadística.
3. **Ciclo Evolutivo (Solver Layer):** este es el núcleo iterativo.
 - **Decodificación:** convierte el genotipo (cadena de bits) en fenotipo (variables físicas).
 - **Evaluación:** consulta al Motor Físico.
 - **Operadores:** aplica selección, cruce y mutación para generar la siguiente generación, manteniendo siempre al mejor individuo (Elitismo) para garantizar que la aptitud no decaiga.
4. **Evaluación Física (Physics Layer):** representada como una subrutina externa al bucle evolutivo. Actúa como un filtro de viabilidad: Si la configuración viola restricciones geométricas ($L \leq r$), se asigna un fitness nulo inmediatamente. Si es viable, se resuelve la dinámica inversa del mecanismo para obtener el torque máximo requerido, devolviendo su inverso como valor de aptitud.
5. **Pipeline de Análisis o Canalización de Datos (Analytics Layer):** al concluir todos los bucles experimentales, el sistema consolida los resultados históricos. Se activan



rutinas de visualización que generan boxplots estadísticos, mapas de calor de sensibilidad paramétrica y, finalmente, se calcula el Frente de Pareto para identificar las soluciones óptimas de compromiso entre velocidad de despliegue y cantidad de torque.

El diagrama de flujo presentado en la Figura [III.1](#) ilustra la secuencia operativa del sistema, dividida en cinco etapas críticas:

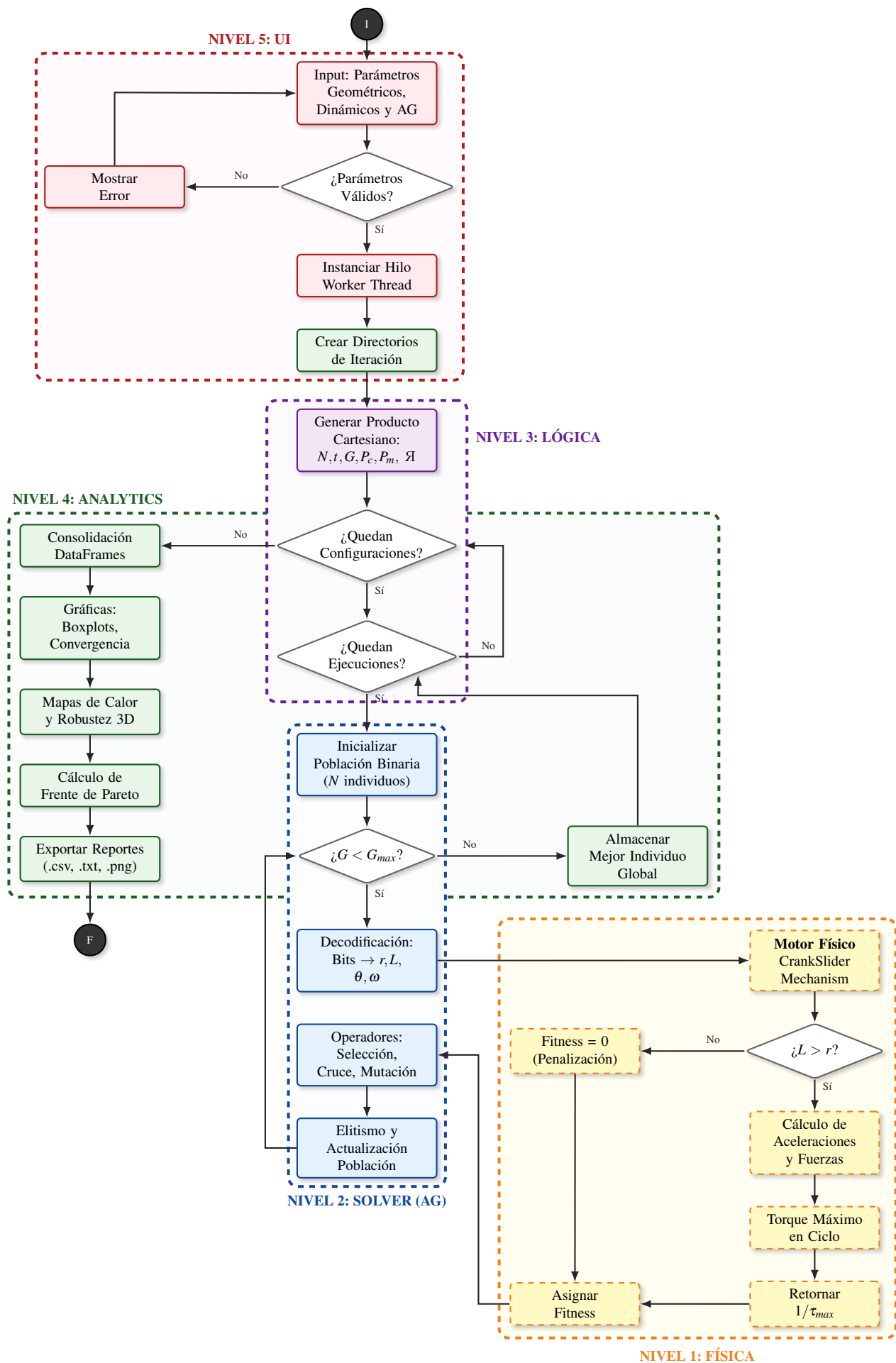


Figura III.1: Diagrama de flujo del sistema de optimización evolutiva propuesto. Se ilustra la arquitectura organizada en 5 niveles funcionales, mostrando la clara separación entre la física del mecanismo, la lógica del AG y el análisis de datos. (I = Inicio, F = Fin).



III.3. Preparación del caso de estudio

Para configurar el entorno de simulación y ejecutar el motor evolutivo de manera controlada, es fundamental establecer con precisión tanto las condiciones físicas del problema como el espacio de búsqueda paramétrica del Algoritmo Genético. Estos valores garantizan que el mecanismo diseñado opere dentro de límites físicamente viables y seguros.

En la Tabla III.2 se detallan las constantes mecánicas y temporales utilizadas para evaluar las ecuaciones cinemáticas y dinámicas previamente deducidas.

Tabla III.2: Parámetros físicos y restricciones operativas del caso de estudio.

Parámetro Físico	Símbolo	Valor Asignado
Coeficiente de fricción cinemática	μ	0.15
Factor de Seguridad	FS	2.0
Tiempo de despliegue objetivo	t	0.1 [s]
Rango del ángulo de entrada	θ	0° hasta 180°

De manera análoga, la exploración del espacio de soluciones requiere configurar los hiperparámetros que controlan la heurística del Algoritmo Genético. En la Tabla III.3 se presentan los rangos de las variables de diseño morfológico y la configuración estadística empleada para las iteraciones de la población.

Tabla III.3: Variables de diseño geomorfológico e hiperparámetros del Algoritmo Genético.

Variable / Hiperparámetro	Rango o Valores Evaluados
Radio de la manivela (r)	10 [mm] hasta 50 [mm]
Longitud de la biela (L)	1 [cm] hasta 12 [cm]
Tamaño de la Población (N)	20, 50, 100, 250, 500, 1000
Número de Generaciones (G)	20, 50, 100, 250
Probabilidad de Cruce (P_c)	0.1, 0.2
Probabilidad de Mutación (P_m)	0.005, 0.01
Ejecuciones independientes (Runs, R)	1, 2, 3, 4, 5
Bits por variable (M , fijo)	12



III.3.1. Estudio de parámetros que afectan a la masa del dron

El parámetro de masa (m) utilizado en las ecuaciones del análisis dinámico representa la carga total inercial y gravitacional que el mecanismo de un solo brazo debe desplazar linealmente. Este valor no corresponde únicamente al peso estructural del eslabón, sino que incluye todos los componentes periféricos acoplados a la extremidad del cuadricóptero.

Ahora bien, con la finalidad de establecer un modelo dinámico preciso, se realizó el siguiente desglose de las masas involucradas en cada corredera:

- **Masa de la estructura del brazo:** 0.02 [kg]
- **Masa del motor (rotor sin escobillas):** 0.25 [kg]
- **Masa de la hélice aerodinámica:** 0.005 [kg]

Por lo tanto, la masa total (m) que el actuador debe acelerar por cada cuadrante es de **0.275 [kg]**. Este es el valor estático introducido en la ecuación de fuerza de inercia y fricción para el cálculo del par resistivo del sistema.

III.3.2. Implementación en el Algoritmo Genético

En esta fase, el modelo físico-matemático deducido se trasladó al entorno de programación orientado a objetos, acoplándose al motor de optimización evolutiva. La arquitectura modular permitió construir una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) capaz de monitorear la evolución de las poblaciones y la minimización de la función objetivo.

A continuación, se presentan las capturas de pantalla de la herramienta de software desarrollada. La Figura III.3 ilustra el panel de configuración geométrica y dinámica del mecanismo, mientras que la Figura III.2 muestra el panel dedicado a los parámetros heurísticos del motor evolutivo.



Optimización de Mecanismo BMCv13 - Versión Unificada v6.0

Modo Noche

Configuración Mecanismo | **Algoritmo Genético** | Ejecución y Resultados

Tamaños de Población (N)

N = 20 N = 50 N = 100
N = 250 N = 500
Población personalizada (ej: 150,300): 20,50,100,250,500,1000

Parámetros del AG (separados por coma)

Generaciones (G): 50, 100, 250
Ejecuciones por config: 1, 2, 3, 4, 5
Valores Pc (Cruce): 0.10, 0.20, 0.30
Valores Pm (Mutación): 0.005, 0.01, 0.05
Bits por variable (fijo): 12

Figura III.2: Interfaz Gráfica de Usuario (GUI): Panel de configuración de los hiperparámetros del Algoritmo Genético (población, generaciones, operadores genéticos y ejecuciones independientes).

Optimización de Mecanismo BMCv13 - Versión Unificada v6.0

Modo Noche

Configuración Mecanismo | Algoritmo Genético | Ejecución y Resultados

Parámetros del Mecanismo

Coef. de fricción μ : 0.15
Factor de seguridad FS: 2.0

Componentes de Masa

Masa brazo [kg]: 0.02
Masa motor [kg]: 0.25
Masa hélice [kg]: 0.005
Masa total [kg]: 0.000
Calcular Total

Tiempo de Despliegue

Rango de Tiempos
Mínimo [s]: 0.1
Máximo [s]: 0.5
Paso [s]: 0.1

Tiempo Único
Valor [s]: 0.1

Rangos de Variables de Diseño (sin masa)

Variable	Mínimo	Máximo
r [mm]	10.0	50.0
L [cm]	1.0	12.0
θ [grados]	0.0	180.0

Figura III.3: Interfaz Gráfica de Usuario (GUI): Panel de configuración de las variables geométricas, físicas y restricciones de diseño del mecanismo BMC.



III.4. Evaluación y Resultados del Algoritmo Genético

La ejecución del Algoritmo Genético (AG) propuesto generó un amplio volumen de datos que permite evaluar no solo el diseño mecánico final, sino el desempeño y robustez del propio optimizador. A lo largo del meta-experimento, se evaluaron múltiples configuraciones paramétricas para garantizar que la solución óptima no fuera producto de una convergencia prematura o un mínimo local.

En la Figura III.4 se puede ver el perfil de resultados arrojado para el tiempo de plegado y desplegado de $t = 0.1[s]$ ilustrado por la GUI del AG por medio de una tabla que posiciona en orden descendente las 10 mejores iteraciones del mismo.

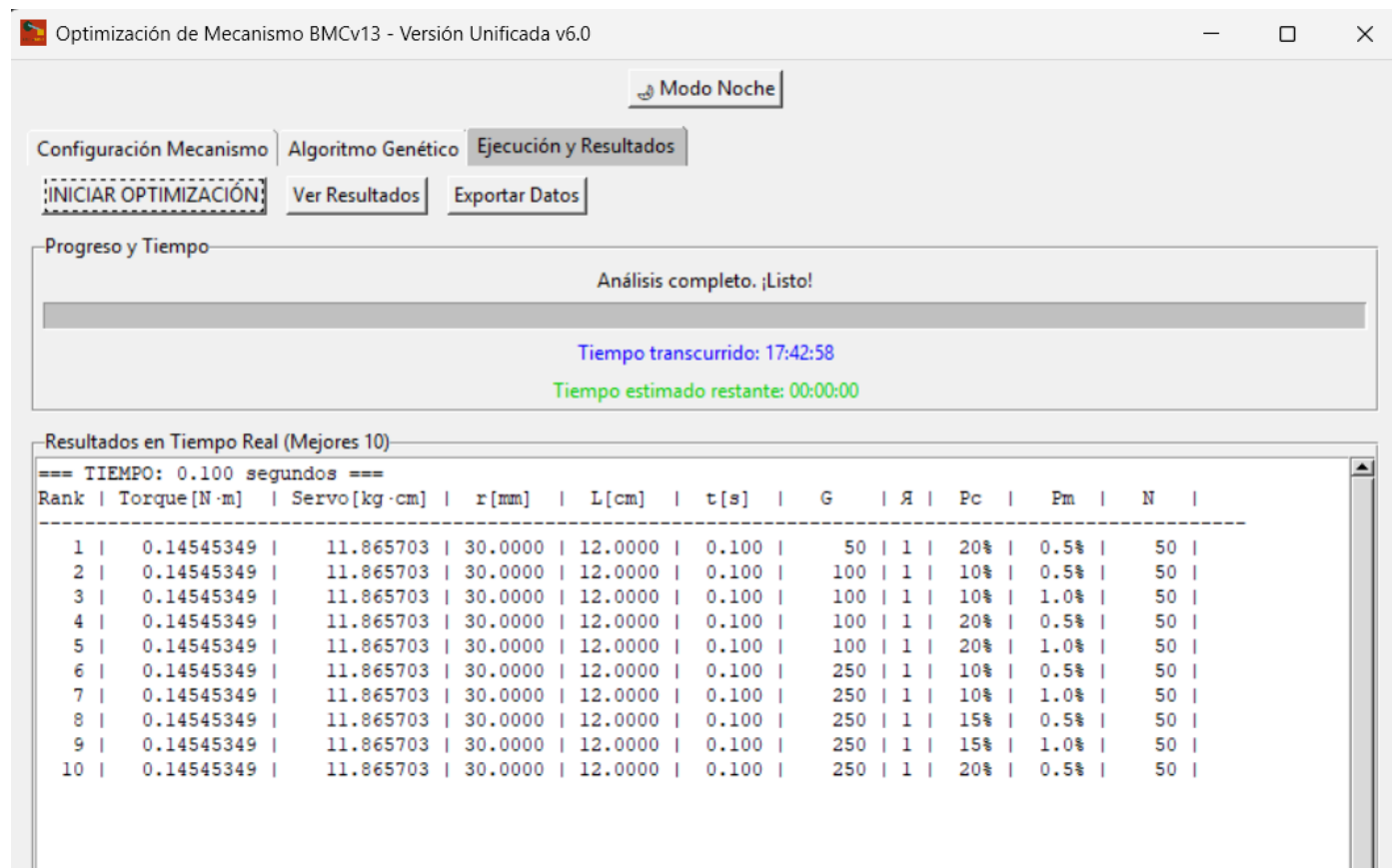


Figura III.4: Visualización en tiempo real de los resultados evolutivos, destacando la convergencia del diseño óptimo y la reducción del torque.

III.4.1. Evolución y Convergencia

La capacidad del algoritmo para refinar las soluciones se visualiza a través de la evolución del torque máximo a lo largo de las generaciones. Como se observa en la Figura III.5, el uso de elitismo y la correcta calibración de las probabilidades de cruce y mutación (P_c, P_m) permitieron una reducción drástica de la dispersión de las soluciones conforme avanzaban los ciclos evolutivos. En las primeras generaciones ($G=20$), el sistema exploró configuraciones con un esfuerzo mecánico considerable, pero hacia la generación $G=500$, la población convergió sólidamente hacia el mínimo absoluto del paisaje de aptitud, estabilizando el torque requerido en su límite físico inferior.

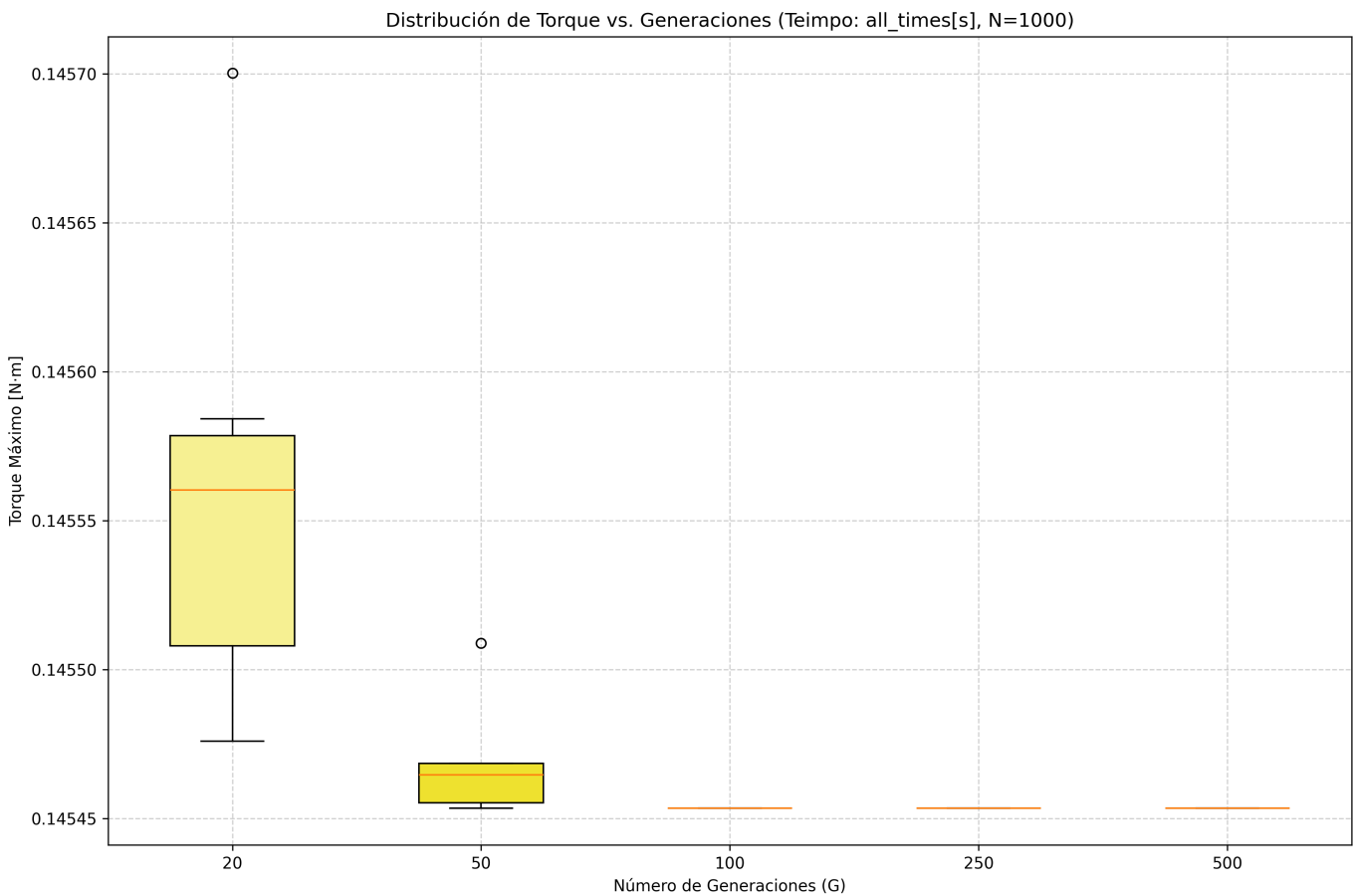


Figura III.5: Distribución del torque máximo requerido frente al número de generaciones evolutivas. Se aprecia la convergencia del algoritmo hacia el óptimo global reduciendo la varianza en generaciones avanzadas.

III.4.2. Impacto de la Población y Precisión del Modelo

El tamaño de la población (N) es el hiperparámetro que dicta la capacidad de exploración espacial del **AG**. En la Figura III.6 se expone la distribución del valor de *fitness* (inverso del torque). Es evidente que poblaciones pequeñas ($N = 50$) presentan valores atípicos y mayor desviación estándar debido a la escasez de diversidad genética.

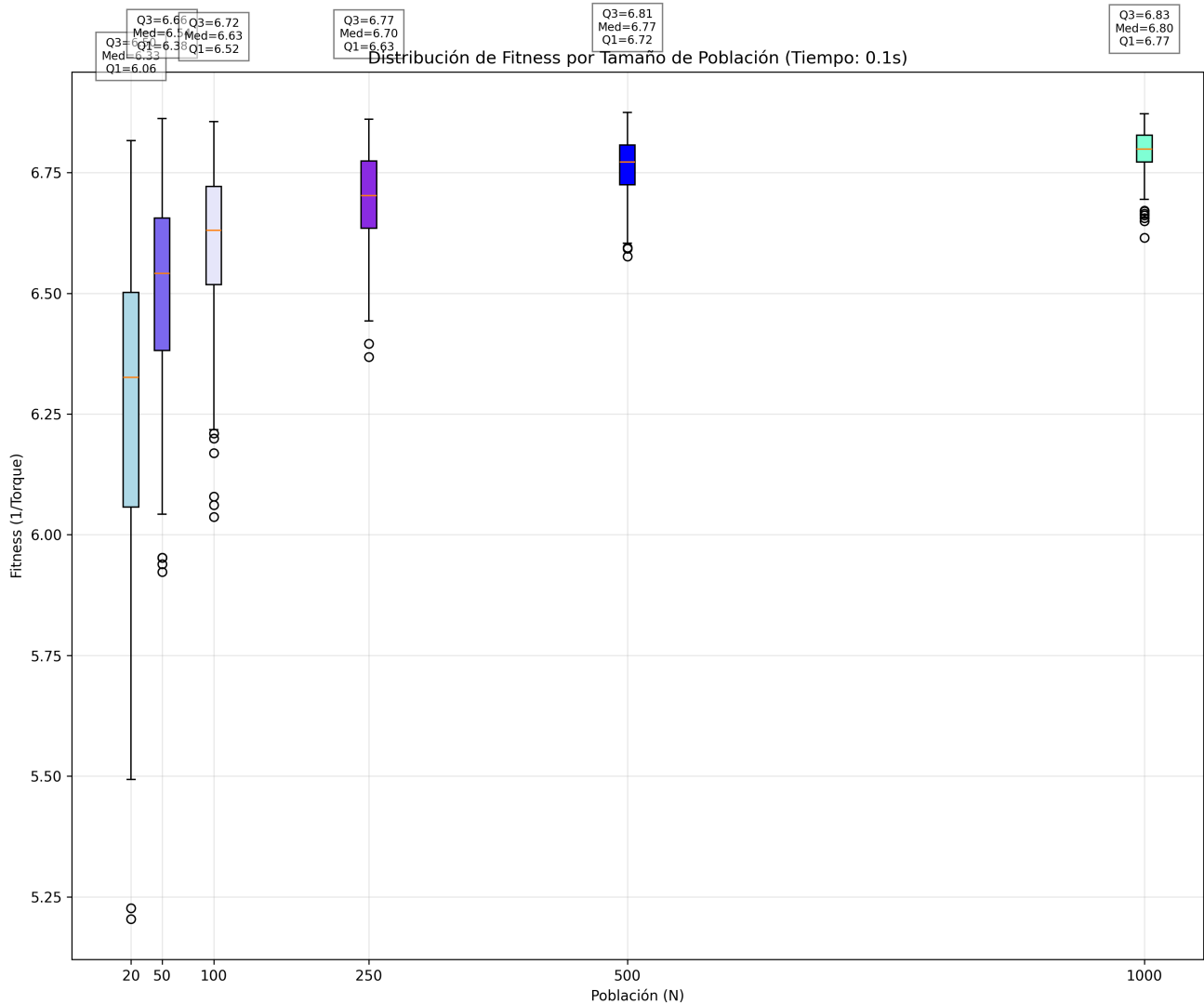


Figura III.6: Distribución de aptitud (Fitness) en función del tamaño de población (N).

Esta observación se corrobora con el Análisis de Precisión del Modelo (Figura III.7), donde se calculó la Raíz del Error Cuadrático Medio (**RMSE**) frente a la convergencia ideal. El error se desploma de 0.0024 [$N \cdot m$] para $N = 50$, hasta alcanzar una precisión asintótica

de 0.000059 [N · m] para $N = 1000$. Esto demuestra que el algoritmo es estadísticamente consistente.

III.4.3. Análisis de Correlación y Sensibilidad

Para comprender la influencia geométrica en el esfuerzo del actuador, se extrajeron mapas de calor y gráficas de sensibilidad (Figuras III.8 a III.12). La Matriz de Correlaciones de la Figura III.8 revela una dependencia lineal casi perfecta (0.98) entre el radio de la manivela (r) y el torque máximo. Por el contrario, la longitud de la biela (L) exhibe una correlación fuertemente negativa (-0.83). Físicamente, esto significa que el algoritmo “descubrió” que

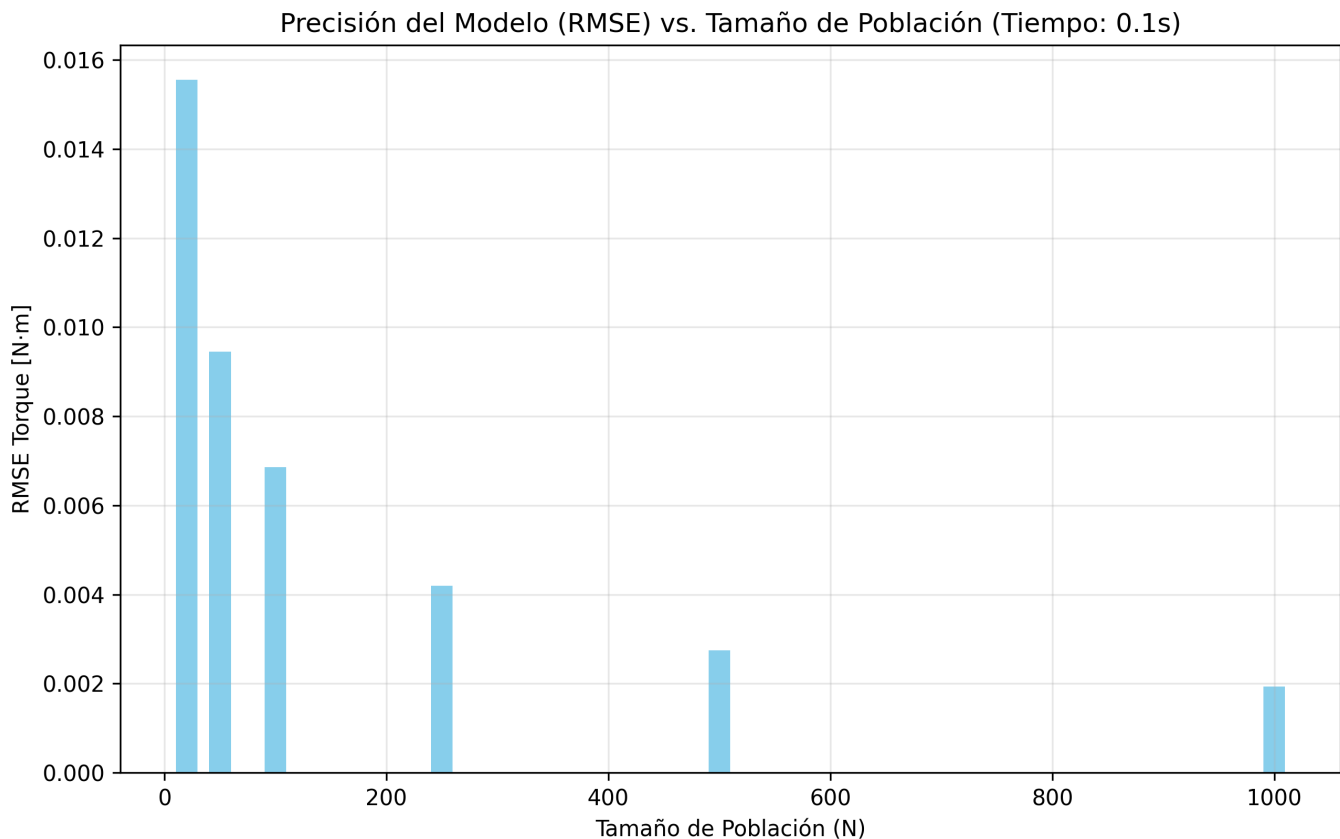


Figura III.7: Reducción del error cuadrático medio (RMSE) al incrementar la población.

para minimizar el torque del servomotor manteniendo el tiempo de despliegue, el mecanismo debe tender invariablemente a minimizar la excentricidad inercial (manivela corta) y maximizar el brazo de palanca secundario (biela larga), validando de forma autónoma los principios clásicos del diseño de maquinaria.

El análisis de sensibilidad paramétrica correspondiente al espacio temporal de 0.1[s]

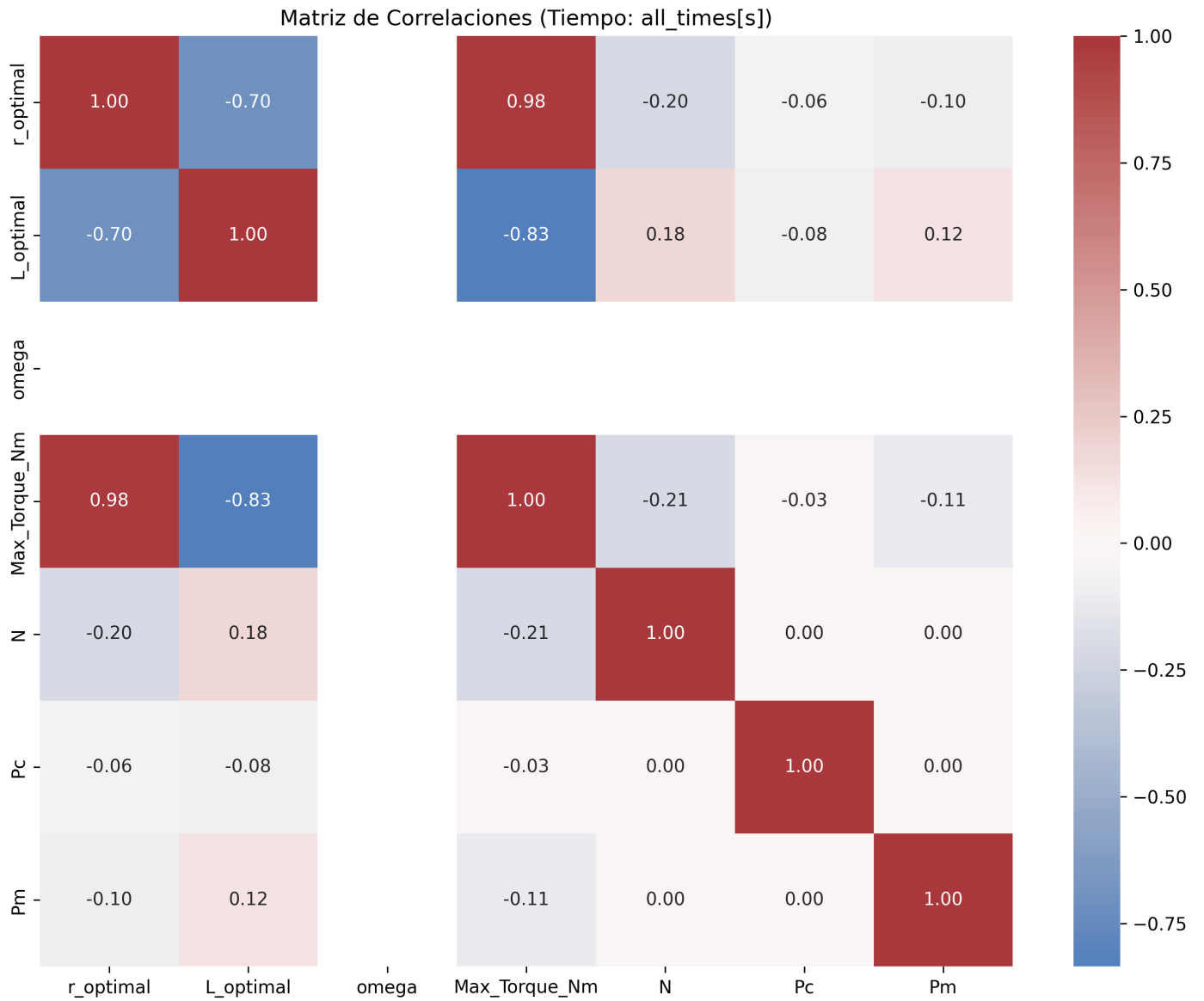


Figura III.8: Matriz de correlaciones de Pearson entre variables geométricas y dinámicas. Nótese que la fila y columna de omega (ω) se encuentran en blanco, esto es así porque se bloqueó este valor para evitar problemas en la correlación de los otros dos valores (r y L) que realmente determinan dimensiones físicas del dron.

hasta 0.5[s], visible en las Figuras III.9 revela hallazgos clave sobre el comportamiento dinámico del mecanismo. Las gráficas evalúan el impacto de tres variables fundamentales (el radio (r), la longitud (L) y la velocidad angular (ω)) sobre el requerimiento de torque máximo, permitiendo identificar de manera clara los factores que dominan el esfuerzo mecánico del sistema.

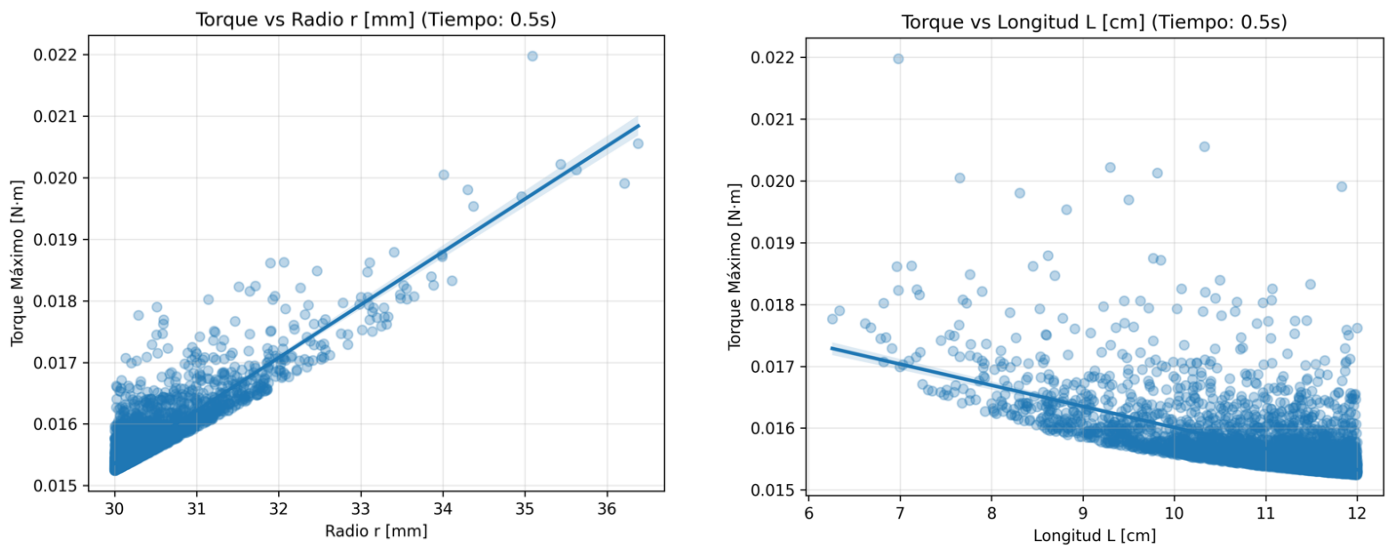


Figura III.9: Análisis de sensibilidad aislando el impacto de r y L sobre el torque (en $t=0.1[s]$ hasta $t=0.5[s]$). Se observa que la cantidad de puntos es absurdamente excesiva sobre todo entre más acercan al valor ideal, que en este caso son las esquina inferior izquierda (para r) y en la derecha (para L).

En primer lugar, los resultados evidencian que el radio (r) es el parámetro más crítico y restrictivo del diseño. Se observa una fuerte correlación lineal positiva, lo que indica que cualquier incremento en esta cota geométrica se traduce de manera directa y estrictamente proporcional en un aumento del torque máximo exigido al actuador. En contraste, la longitud (L) del elemento presenta un comportamiento inverso, mostrando una tendencia a la baja con una correlación negativa. A medida que la longitud aumenta, el requerimiento de torque tiende a disminuir, aunque los datos presentan una mayor dispersión, sugiriendo que la influencia de la longitud es menos dominante y más sujeta a la interacción con el resto del ensamble.

Finalmente, el análisis de la velocidad angular (ω) muestra una concentración total de los datos en una única línea vertical alrededor de los 6.28 [rad/s]. Esto demuestra que, para este escenario temporal específico, la velocidad de rotación o despliegue no actuó como una variable independiente, sino que se mantuvo como una restricción cinemática constante impuesta al sistema.

De manera que para efectos de optimización del diseño y reducción del consumo

energético o tamaño de los motores, el ajuste fino de la geometría debe priorizar el control meticuloso del radio, ya que es la variable que dicta de forma definitiva e inequívoca la exigencia de torque máximo.

Una vez comprendido esto, acotando el estudio únicamente al instante temporal de 0.1[s] de pliegue/despliegue del mecanismo, se tienen los resultados de las gráficas de la Figura III.10, en donde resulta notable que, independientemente de la agresividad del tiempo de ciclo, las leyes de sensibilidad geométrica se conservan intactas. El radio (r) se mantiene como el factor penalizante primario y la longitud (L) como el elemento mitigador. Sin embargo, en el régimen de despliegue rápido (0.1[s]), el impacto de estas variables se amplifica drásticamente. Esto significa que cualquier pequeña ineficiencia en el diseño de las articulaciones (un ligero aumento en el radio) generará picos de esfuerzo mucho más violentos que en el escenario de despliegue pausado.

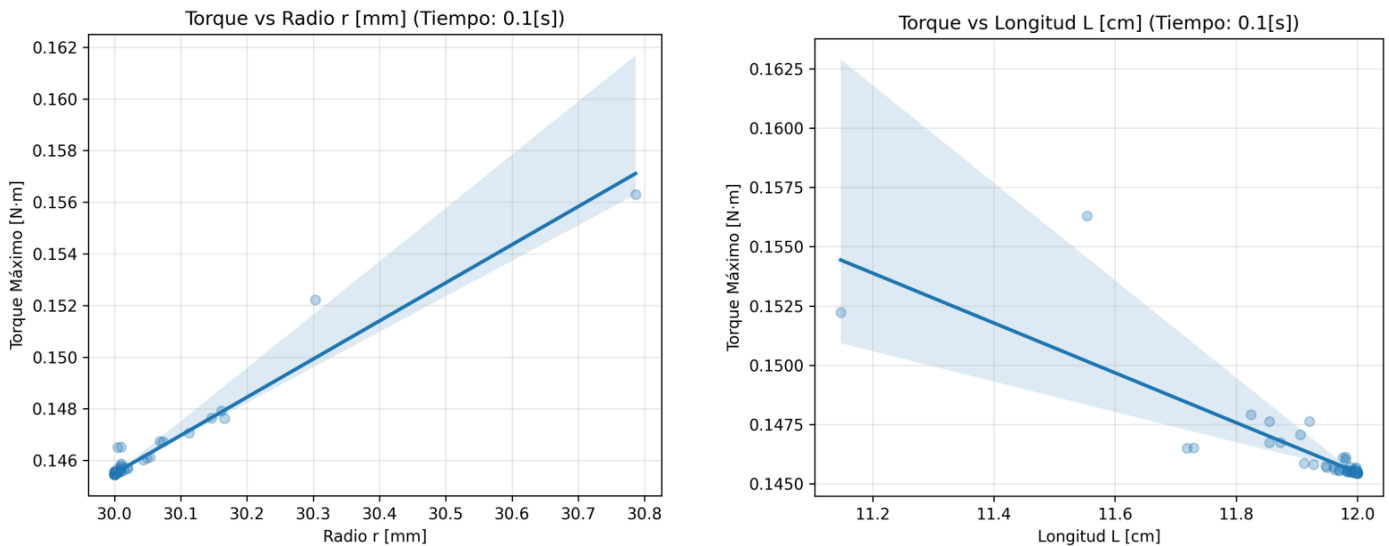


Figura III.10: Análisis de sensibilidad aislando el impacto de L sobre el torque (en $t=0.1[s]$). Obsérvese que hay una geometría de un tono azul muy claro en ambas gráficas, esta representa el área donde se distribuyó el resto de los puntos que no corresponden al tiempo de despliegue/pliegue de 1[s].

Puede concluirse entonces que la comparativa entre ambas métricas plantea un compromiso de diseño clásico en la ingeniería de sistemas móviles: la agilidad operativa frente al peso y el consumo energético. Si la aplicación exige un despliegue súbito (0.1[s]), el algoritmo de optimización deberá castigar rigurosamente cualquier incremento en el radio para contener la demanda de torque, obligando además a la selección de actuadores más robustos y pesados. Por el contrario, relajar el tiempo de actuación a 0.5[s] relaja las restricciones cinemáticas, permitiendo geometrías más flexibles y el uso de motores significativamente más ligeros, lo cual es una variable crítica para maximizar la autonomía y el rendimiento en sistemas donde la masa total es una restricción estricta.

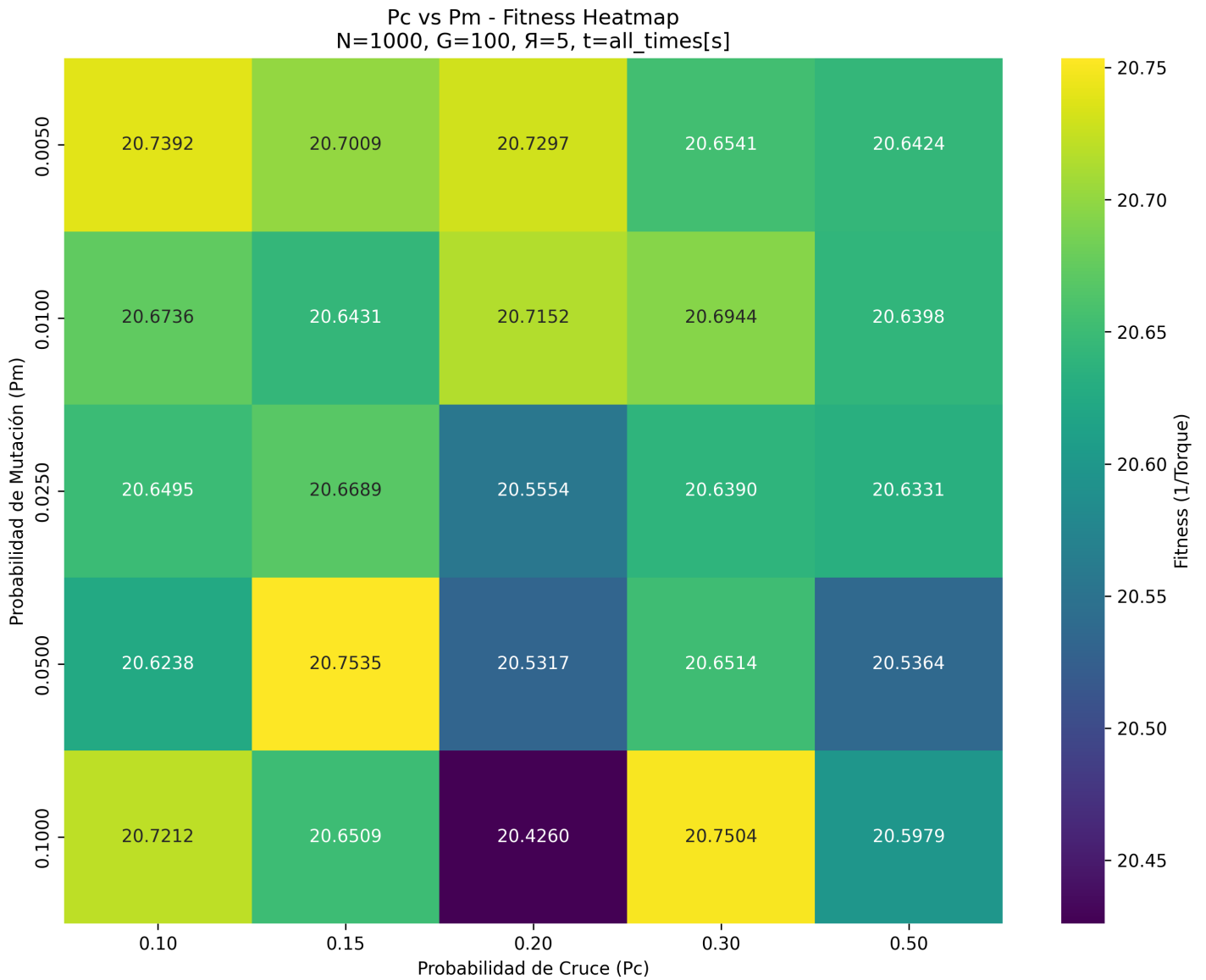


Figura III.11: Mapa de calor que relaciona el fitness con la Probabilidad de Cruce y la Probabilidad de Mutación a partir de los valores de Población, Generaciones, Ejecuciones y Tiempo de pliegue/despliegue.



El mapa de calor presentado en la Figura III.11 está diseñado para representar la magnitud de una variable de interés a través de un gradiente de colores dentro de una matriz bidimensional. En el contexto de la optimización paramétrica mediante algoritmos genéticos, la idea que le dio origen para este proyecto es tener la función de ilustrar el “paisaje de aptitud” (fitness landscape). Su utilidad radica en permitir identificar de manera gráfica e intuitiva las regiones de convergencia, evaluar la sensibilidad del algoritmo ante variaciones en sus parámetros de control y, en última instancia, localizar la configuración óptima que maximiza el rendimiento del sistema evaluado.

Al analizar los resultados obtenidos en este estudio en particular, el eje horizontal representa la Probabilidad de Cruce (P_c) y el eje vertical indica la Probabilidad de Mutación (P_m). La variable de respuesta o aptitud (fitness), definida como el inverso del torque, alcanza su máximo global con un valor de 20.7535 en las coordenadas exactas de $P_c = 0.15$ y $P_m = 0.05$. Desde una perspectiva mecánica, este pico de rendimiento se traduce en la configuración geométrica y cinemática que demanda el menor esfuerzo de los actuadores para operar el sistema de retracción, garantizando así la máxima eficiencia del diseño.

Es de suma importancia destacar el comportamiento de la probabilidad de cruce en este dominio específico. Los resultados muestran que el rendimiento óptimo se sitúa en un P_c del 15 %, lo cual concuerda con la literatura especializada consultada [32] [35]. En problemas de síntesis de mecanismos donde las variables de diseño presentan un alto grado de acoplamiento (*epistasis*), se reportan como aceptables valores de cruce con un límite máximo del 20 %. Esto se debe a que una tasa de recombinación superior resultaría destructiva; alterar simultáneamente múltiples parámetros geométricos desestabilizaría las proporciones críticas necesarias para que los eslabones articulen correctamente. Por lo tanto, operar dentro de este margen conservador asegura que las características favorables de las soluciones se transmitan de generación en generación sin perder su integridad.

Por otro lado, la matriz revela el impacto significativo que tiene la probabilidad de mutación en la estabilidad de la búsqueda. Al observar las franjas superiores, correspondientes a tasas de mutación bajas (como 0.005), se evidencia un comportamiento sumamente consistente, con valores de aptitud que se mantienen estables alrededor de 20.64 a 20.73. En marcado contraste, una tasa de mutación elevada del 10 % (0.1) introduce una volatilidad considerable en el sistema. Es precisamente en esta región donde se registra el desempeño más deficiente de toda la matriz, con un valor de 20.4260 (ubicado en $P_c = 0.20$). Este fenómeno indica que una mutación excesiva fomenta una exploración aleatoria desproporcionada, lo que impide que el algoritmo converja de manera confiable.

El punto óptimo encontrado con una mutación del 5 % logra, por tanto, el equilibrio ideal entre la exploración del espacio de diseño y la explotación de las mejores soluciones. En conclusión, este análisis paramétrico demuestra la madurez y robustez del algoritmo genético configurado. La acotada variación general entre el mejor y el peor escenario sugie-

re un espacio de diseño donde el método es capaz de identificar soluciones mecánicamente viables de manera consistente. La sintonización final de los parámetros no solo maximiza la aptitud computacional, sino que garantiza una traducción directa hacia un mecanismo físico altamente eficiente y optimizado para reducir la exigencia de torque.

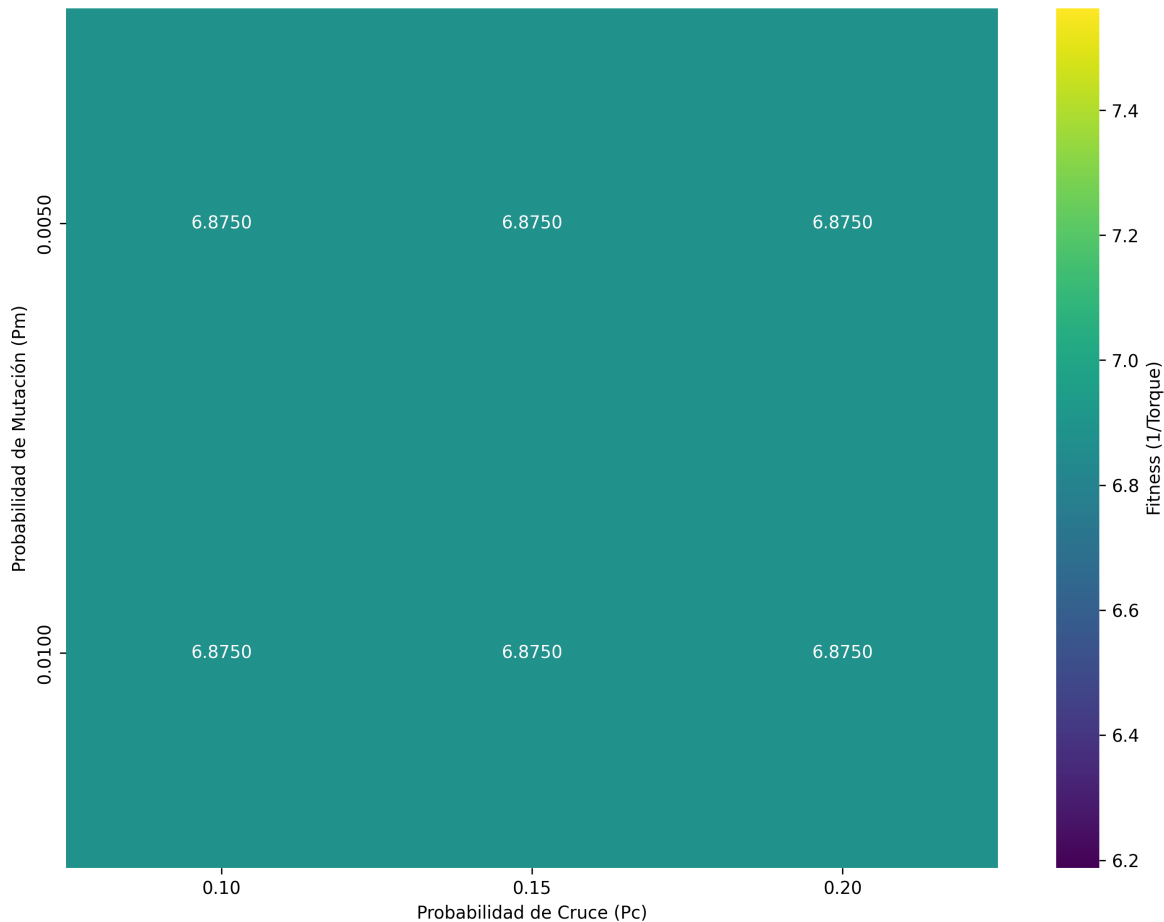


Figura III.12: Mapa de calor que relaciona el fitness con la Probabilidad de Cruce y la Probabilidad de Mutación a partir de los valores de Población, Generaciones, Ejecuciones y Tiempo de pliegue/despliegue.

Acotando a la cantidad de parámetros evaluados en la iteración final (con la intención de minimizar el tiempo de ejecución del AG) que dió solución al problema, se puede hablar de la Figura III.12, que muestra los resultados obtenidos para el tiempo de pliegue/despliegue $t = 0.1[s]$, contemplando que los valores de los parámetros principales son $N=1000$ y $G=500$, asegurando un buen resultado, el análisis del mapa de calor muestra una convergencia absoluta y uniforme en todo el dominio paramétrico analizado. Al evaluar las probabilidades de cruce en el intervalo de 0.10 a 0.20, combinadas con tasas de mutación de 0.005 y 0.01, el modelo alcanzó un valor de aptitud idéntico y sostenido de 6.8750 en todos los escenarios. Esta marcada homogeneidad indica que, dadas las condiciones de eje-

cución establecidas (con una población de 1000 individuos a lo largo de 500 generaciones), la convergencia del algoritmo es excepcionalmente robusta e insensible a las variaciones finas de estos operadores evolutivos. De esta manera, se puede concluir que la obtención de este valor constante sugiere que el algoritmo ha logrado identificar con éxito un óptimo global (o un óptimo local altamente dominante) que minimiza de manera estable el torque requerido para la actuación del mecanismo. Este comportamiento valida la fiabilidad de la metodología de optimización propuesta, demostrando que la solución cinemática hallada no es producto de una estocasticidad favorable en los hiperparámetros, sino el resultado de una exploración y explotación eficientes de un espacio de soluciones matemáticamente estable.

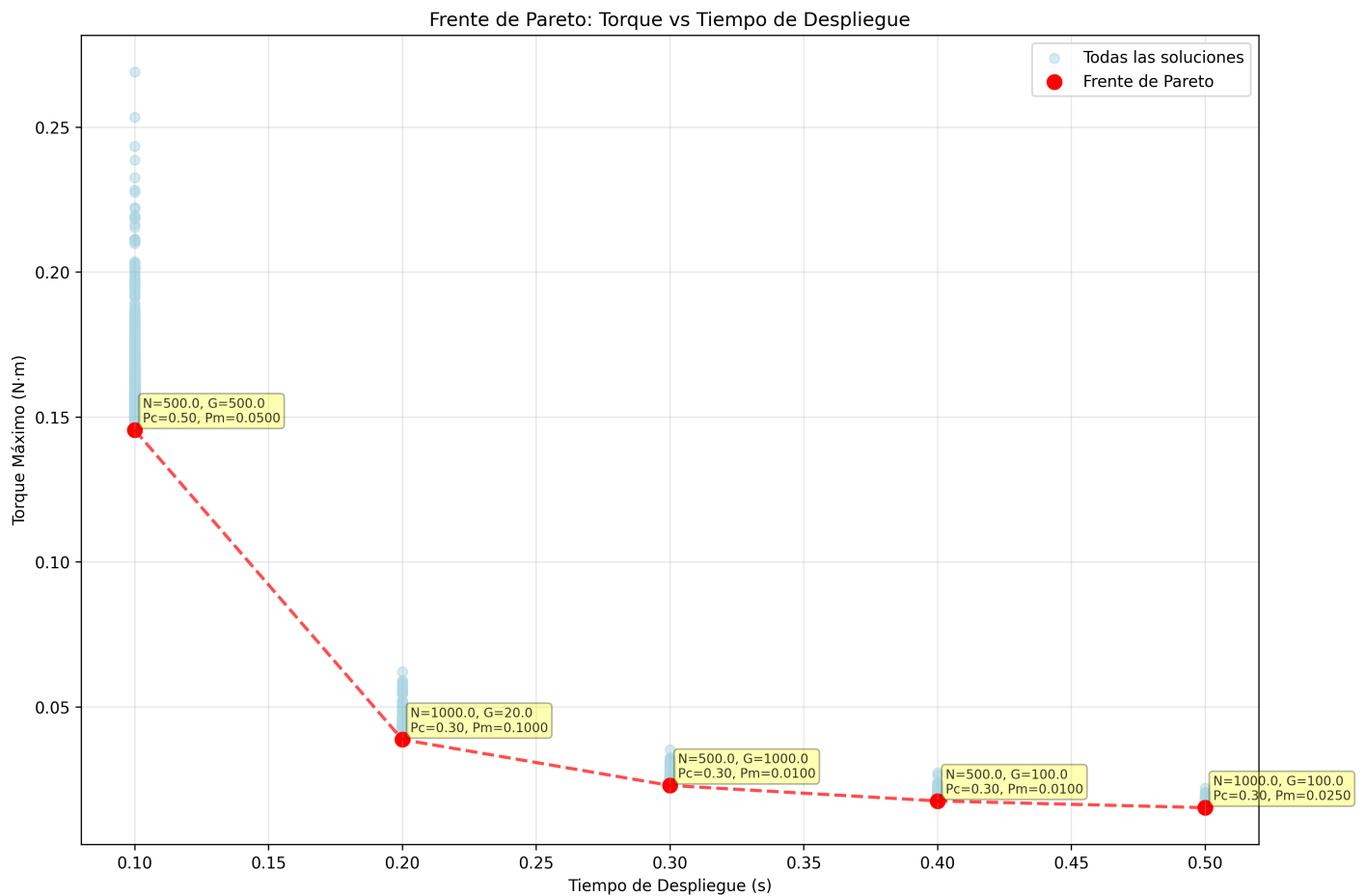


Figura III.13: Frente de Pareto que ilustra el compromiso entre el tiempo de despliegue objetivo y el torque máximo requerido por el servomotor central.

Ahora bien, el gráfico de la Figura III.13 muestra que de las **6,750 configuraciones** ($[t]_5 * [N]_6 * [G]_5 * [R]_5 * [Pc]_3 * [Pm]_3$) únicas evaluadas exhaustivamente en el meta-experimento, el Algoritmo Genético aisló la solución óptima global para el escenario más



agresivo: un **tiempo de despliegue de 0.10 segundos**. Para lograr este hito sin exceder la capacidad de los actuadores comerciales tipo **OTS**, las dimensiones geométricas sugeridas y validadas por el optimizador son:

- **Radio de manivela óptimo (r):** 30.00 [mm]
- **Longitud de biela óptima (L):** 12.00 [cm]
- **Torque máximo del ciclo:** 0.145453 [N · m]
- **Par equivalente requerido en el Servo:** 11.866 [kg · cm]

Estas dimensiones no solo son estructuralmente coherentes ($L > r$), sino que el torque resultante de aproximadamente 12 [kg · cm] es fácilmente manejable por servomotores metálicos comerciales de tamaño estándar y bajo peso, confirmando la superioridad de la arquitectura centralizada para el cuadricóptero morfológico.

III.5. Selección de materiales

Para el diseño de un UAV de SAR requiere la selección sistemática de materiales. Se utiliza el **Método de Ashby** para optimizar el diseño en función de la **minimización de masa** (maximizar autonomía de vuelo) y la **minimización de costo** (prioridad en la etapa de prototipado), manteniendo la rigidez y resistencia necesarias.

III.5.1. Propiedades de los Materiales (Valores Típicos)

Se comparan polímeros comunes de fabricación aditiva, concretamente la *Modelado por Deposición Fundida (FDM)*, como el *Acrilonitrilo Butadeno Estireno (ABS)* y el *Ácido Poliláctico (PLA)*, comparados con el *Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (CFRP)*, que es una referencia de alto rendimiento. C_m es el costo relativo por unidad de masa y, dado que el PLA es el más barato de los materiales analizados, se tomará como $C_m(PLA) = 1$.

Tabla III.4: Propiedades de Materiales Seleccionados.

Material	ρ [g/cm ³]	E [GPa]	σ_y [MPa]	C_m [Relativo]
PLA	1.25	3.5	50	1.0
ABS	1.05	2.3	40	1.2
Nylon PA6	1.14	1.8	60	2.5
CFRP (Típico)	1.55	140.0	-	10.0



III.5.2. Desarrollo de Índices de Desempeño (M)

Estructura del Dron (Brazos/Fuselaje): Índice M_1 : Minimizar Masa con Rigidez Prescrita

La estructura se modela como una viga en flexión, buscando maximizar la rigidez por unidad de masa.

$$\text{MAX}[M_1] = \frac{\sqrt{E}}{\rho} \quad (\text{III.1})$$

■ **Cálculo:**

$$M_{1,\text{PLA}} = \frac{\sqrt{3.5}}{1.25} \approx 1.49 \quad (\text{III.2})$$

$$M_{1,\text{ABS}} = \frac{\sqrt{2.3}}{1.05} \approx 1.45 \quad (\text{III.3})$$

$$M_{1,\text{Nylon}} = \frac{\sqrt{1.8}}{1.14} \approx 1.18 \quad (\text{III.4})$$

$$M_{1,\text{CFRP}} = \frac{\sqrt{140.0}}{1.55} \approx 7.62 \quad (\text{III.5})$$

- **Justificación del PLA:** Aunque el CFRP es técnicamente superior, el **PLA** ofrece la mejor relación rigidez-masa entre los polímeros FDM ($M_{1,\text{PLA}} = 1.49$), haciéndolo el mejor candidato polimérico para estructuras ligeras y prototipos rápidos.

Índice M_2 : Minimizar Costo con Rigidez Prescrita

Se maximiza la rigidez por unidad de costo-masa, priorizando la viabilidad económica del prototipado.

$$\text{MAX}[M_2] = \frac{\sqrt{E}}{C_m \rho} \quad (\text{III.6})$$



■ **Cálculo:**

$$M_{2,PLA} = \frac{\sqrt{3.5}}{1.0 \times 1.25} \approx 1.49 \quad (III.7)$$

$$M_{2,ABS} = \frac{\sqrt{2.3}}{1.2 \times 1.05} \approx 1.21 \quad (III.8)$$

$$M_{2,Nylon} = \frac{\sqrt{1.8}}{2.5 \times 1.14} \approx 0.47 \quad (III.9)$$

- **Justificación del PLA:** El **PLA** maximiza el valor de M_2 ($M_{2,PLA} = 1.49$), confir-mándolo como la opción más **rentable** para el prototipado de la estructura.

Mecanismo de Plegado (Engranajes): Índice M_3 : Minimizar Masa con Resistencia Prescri-ta

Se modela la resistencia a la fluencia y al desgaste para los engranajes, minimizando la masa.

$$MAX[M_3] = \frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho} \quad (III.10)$$

■ **Cálculo:**

$$M_{3,PLA} = \frac{50^{2/3}}{1.25} \approx 10.86 \quad (III.11)$$

$$M_{3,ABS} = \frac{40^{2/3}}{1.05} \approx 11.39 \quad (III.12)$$

$$M_{3,Nylon} = \frac{60^{2/3}}{1.14} \approx 13.44 \quad (III.13)$$

- **Justificación del PLA:** Aunque el Nylon es superior, el **PLA** ofrece un rendimiento adecuado para un mecanismo de baja carga y ciclo de trabajo. Su selección se justifica por la **restricción de fabricación**: la PLA tiene **excelente precisión dimensional** y **mínima deformación** (warping), cruciales para el ajuste de engranajes impresos en 3D.



Índice M_4 : Minimizar Costo con Resistencia Prescrita

Se maximiza la resistencia por unidad de costo-masa para el prototipado de engranajes.

$$\text{MAX}[M_4] = \frac{\sigma_y^{2/3}}{C_m \rho} \quad (\text{III.14})$$

■ Cálculo:

$$M_{4,\text{PLA}} = \frac{50^{2/3}}{1.0 \times 1.25} \approx 10.86 \quad (\text{III.15})$$

$$M_{4,\text{ABS}} = \frac{40^{2/3}}{1.2 \times 1.05} \approx 9.50 \quad (\text{III.16})$$

$$M_{4,\text{Nylon}} = \frac{60^{2/3}}{2.5 \times 1.14} \approx 5.38 \quad (\text{III.17})$$

- **Justificación del PLA:** El PLA ofrece la máxima resistencia por costo ($M_{4,\text{PLA}} = 10.86$), siendo la mejor opción para la fabricación económica de engranajes funcionales durante el desarrollo.

Selección para Patas de Aterrizaje (Columnas): Las patas de aterrizaje actúan como columnas que soportan la carga a compresión y deben evitar el **pandeo** bajo la carga crítica (F_{crit}). El objetivo es minimizar la masa.

Índice M_1 : Minimizar Masa con Resistencia al Pandeo Prescrita El índice es el mismo que el estructural (de la ec. III.1), ya que el pandeo está dominado por el módulo E y la densidad ρ :

- **Restricción Crítica:** Una pata de aterrizaje debe soportar **altas fuerzas de compresión y impactos abruptos** (alta tenacidad) sin fracturarse.
- **Análisis de Materiales:**
 - **PLA:** Su valor $M_1 \approx 1.49$ es **insuficiente** para una columna crítica que requiere alta rigidez para prevenir el pandeo.
 - **CFRP:** Con $M_1 \approx 7.62$, es el material con **mayor rendimiento** en el diagrama E vs ρ . Además, posee la **alta tenacidad** requerida para absorber la energía de aterrizajes bruscos, a diferencia de los cerámicos.



- **Conclusión:** El **PLA** se **descarta** para las patas de aterrizaje, ya que su bajo M_1 y rigidez comprometen la resistencia al pandeo y las propiedades de tenacidad requeridas. El material seleccionado es el **CFRP**.

III.5.3. Selección Final

Habiendo dicho todo lo anterior, en la Tabla III.5 se muestran los materiales elegidos para cada componente diseñado de acuerdo con los índices antes mencionados.

Tabla III.5: Selección de Materiales Justificada.

Componente	Material	Justificación (Índice)
Estructura Principal (Prototipo)	PLA	M_2 Máximo (Minimizar Costo con Rigidez)
Engranajes Mecanismo Plegable	PLA	M_4 Máximo (Minimizar Costo con Resistencia y Precisión Dimensional)
Patas de Aterrizaje (Columnas)	CFRP	M_1 Máximo y Alta Tenacidad (Resistencia al Pandeo o Impacto)

III.6. Prototipo de dron usando software especializado

Con base en los valores geométricos sugeridos por la iteración óptima del Algoritmo Genético, se procedió a la materialización virtual del sistema completo. Utilizando software de *Diseño Asistido por Computadora (CAD)*, se modelaron los ensambles de la bancada central, el tren de engranes, las bielas y las correderas tubulares que conforman los brazos del UAV.

En las siguientes figuras se expone el prototipo digital en tres dimensiones, evidenciando la capacidad de empaquetado del diseño centralizado y la validación espacial del despliegue morfológico sin interferencias mecánicas.

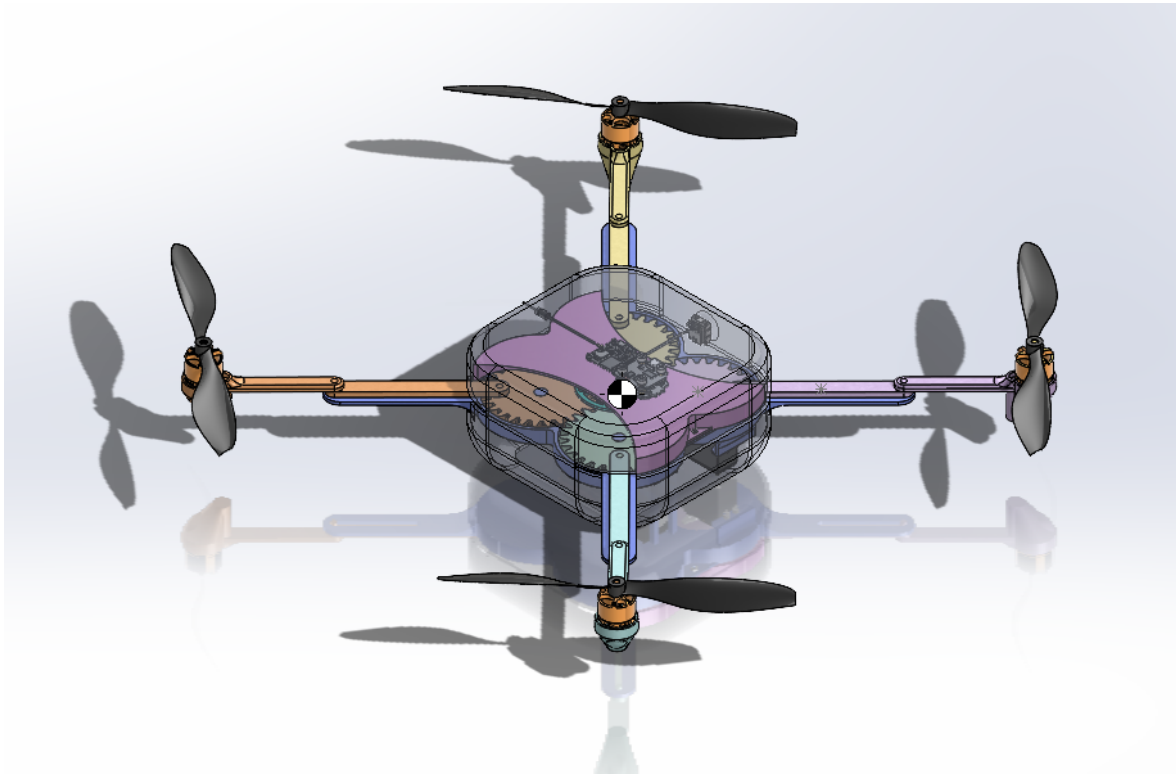


Figura III.14: Vista isométrica del ensamblaje CAD del cuadricóptero en configuración plegada. Las tapas, tanto inferior como superior, están transparentadas con la finalidad de poder visualizar con claridad la parte interna del dron, donde se encuentra el mecanismo de plegado.

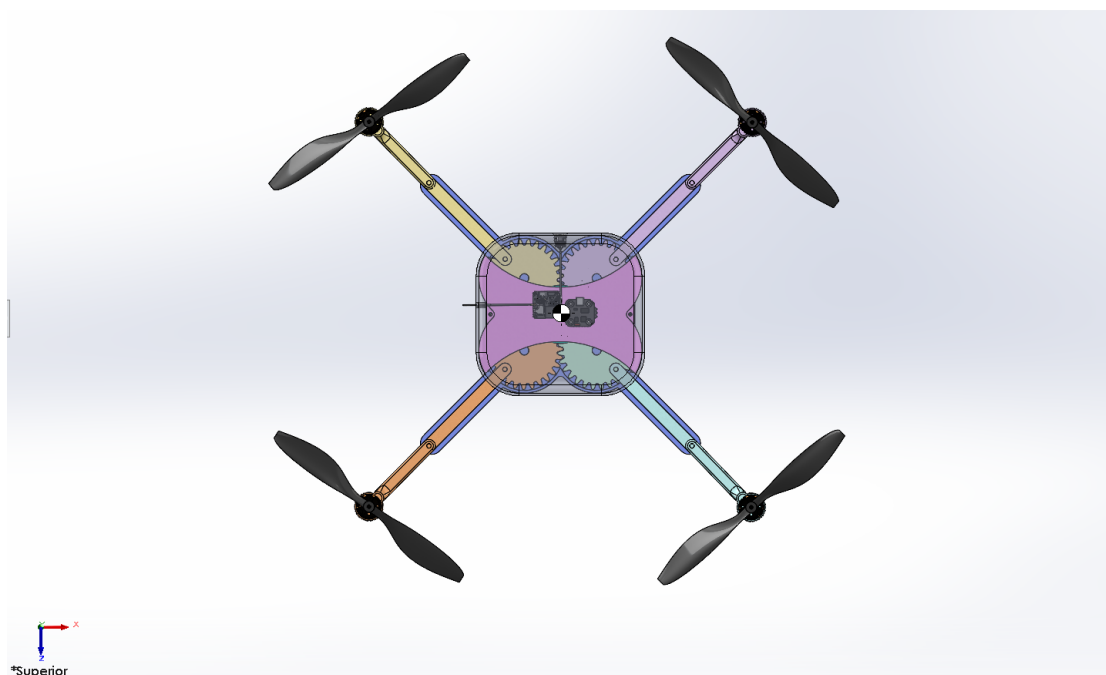


Figura III.15: Vista superior y de detalle del tren de engranes central y el mecanismo de actuación de los brazos en estado **desplegado**.

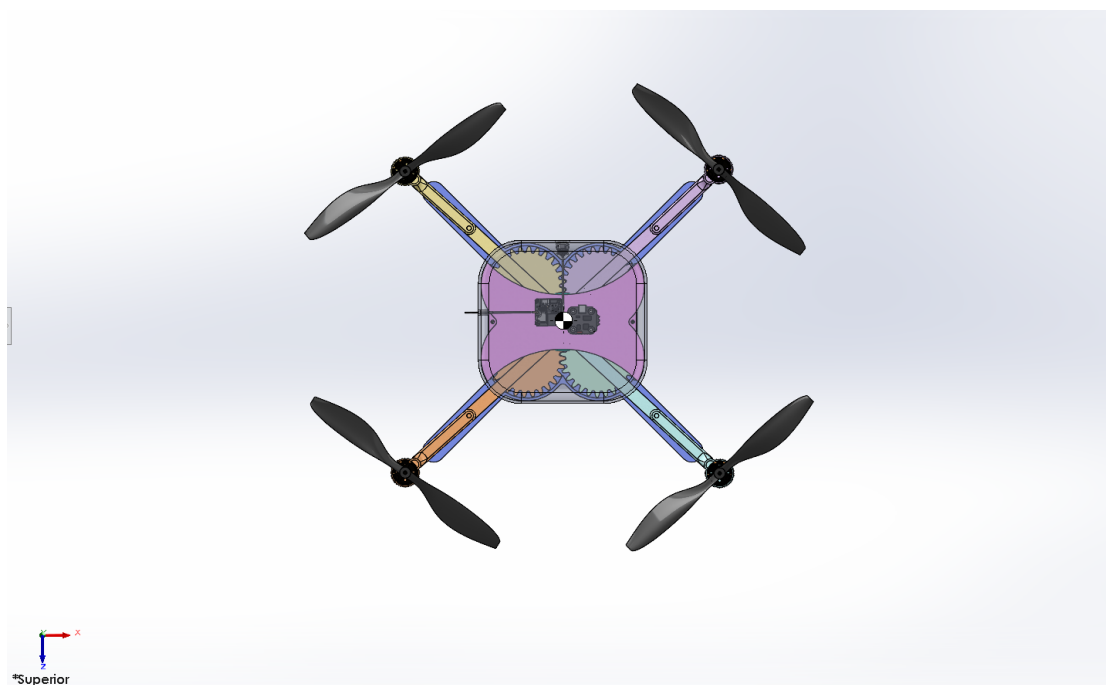


Figura III.16: Vista superior y de detalle del tren de engranes central y el mecanismo de actuación de los brazos en estado **plegado**.

Para concluir la etapa de diseño y consolidar la propuesta del sistema, se llevó a cabo el renderizado del modelo tridimensional del cuadricóptero. El propósito fundamental de esta representación visual es validar la integración espacial de los componentes y proporcionar una perspectiva detallada de la arquitectura del ensamble (ver Figura III.17). En la configuración de materiales, se aplicó un acabado totalmente transparente para las piezas estructurales correspondientes al *Case 1* y *Case 2*. Esta selección permite la inspección visual del mecanismo de pliegue interno (el BMC) y la interacción de los engranes, modelados simulando Ácido Poliláctico (PLA) color amarillo pastel.

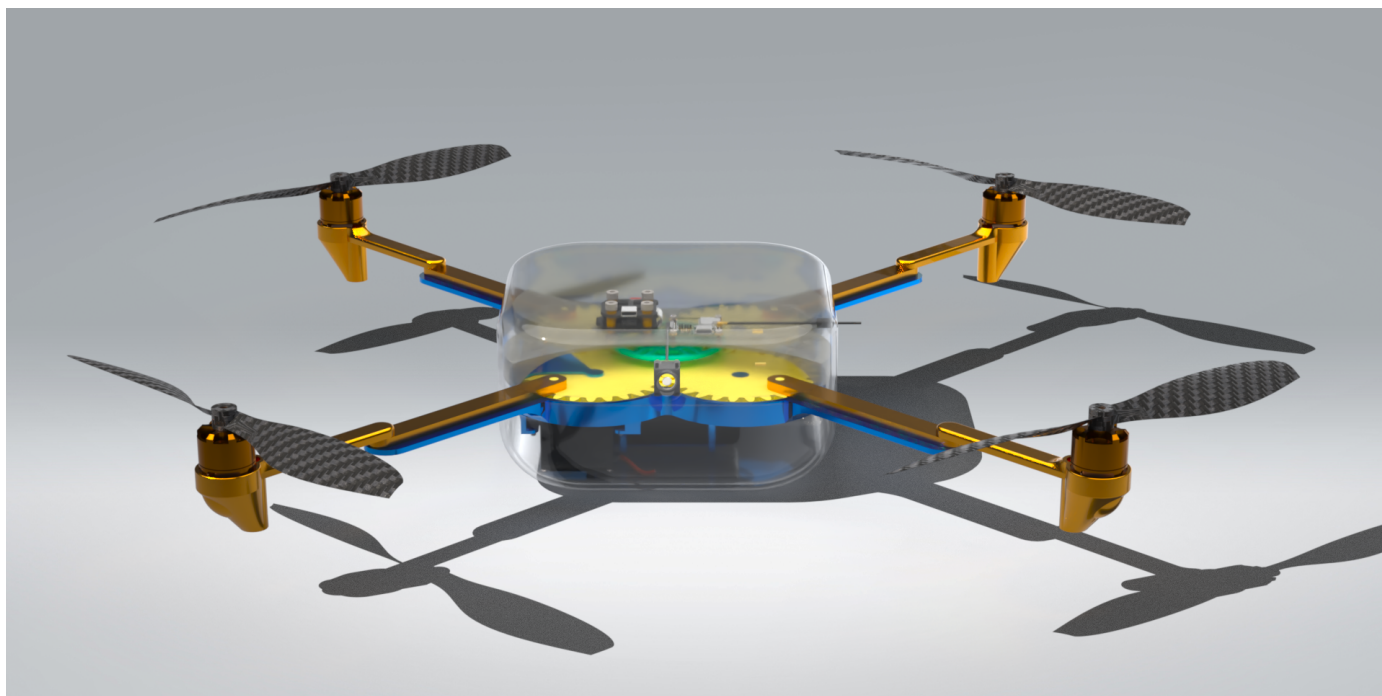


Figura III.17: Vista isométrica frontal del cuadricóptero. Nótese el contraste entre las carcasas transparentes, que revelan los engranajes del mecanismo de pliegue en amarillo pastel, y el acabado metalizado automotriz de los brazos estructurales.

Para los elementos aerodinámicos, se asignó una textura de fibra de carbono a las hélices de los motores, proyectando el uso de materiales compuestos característicos en la industria aeroespacial por su alta relación resistencia-peso. En contraste, los componentes estructurales externos, es decir, los brazos del dron en tonalidad naranja/dorada y la base en color azul, fueron configurados simulando una manufactura en Ácido Poliláctico (PLA) sometido a un postprocesado superficial. Se les aplicó un acabado tipo “pintura automotriz” (de acuerdo con el nombre que recibe dicha apariencia en el software de renderizado utilizado, SW Visualize), el cual integra micropartículas reflectantes que generan un efecto metalizado, otorgando a las piezas una apariencia de alta calidad estética e industrial.

Desde una perspectiva de empaquetado electrónico, el modelo integra representaciones de los sistemas de aviónica y potencia para comprobar el volumen útil del fuselaje (ver Figura III.18). En la sección interior se alojan el controlador electrónico de velocidad (ESC) con su circuito eliminador de batería (BEC), la batería principal, el servomotor de accionamiento y el módulo de la cámara frontal (ver Figura III.19). Para centrar el análisis en la interferencia volumétrica, el modelo prescinde del ruteo completo del cableado, proyectando únicamente terminales de salida ilustrativas.

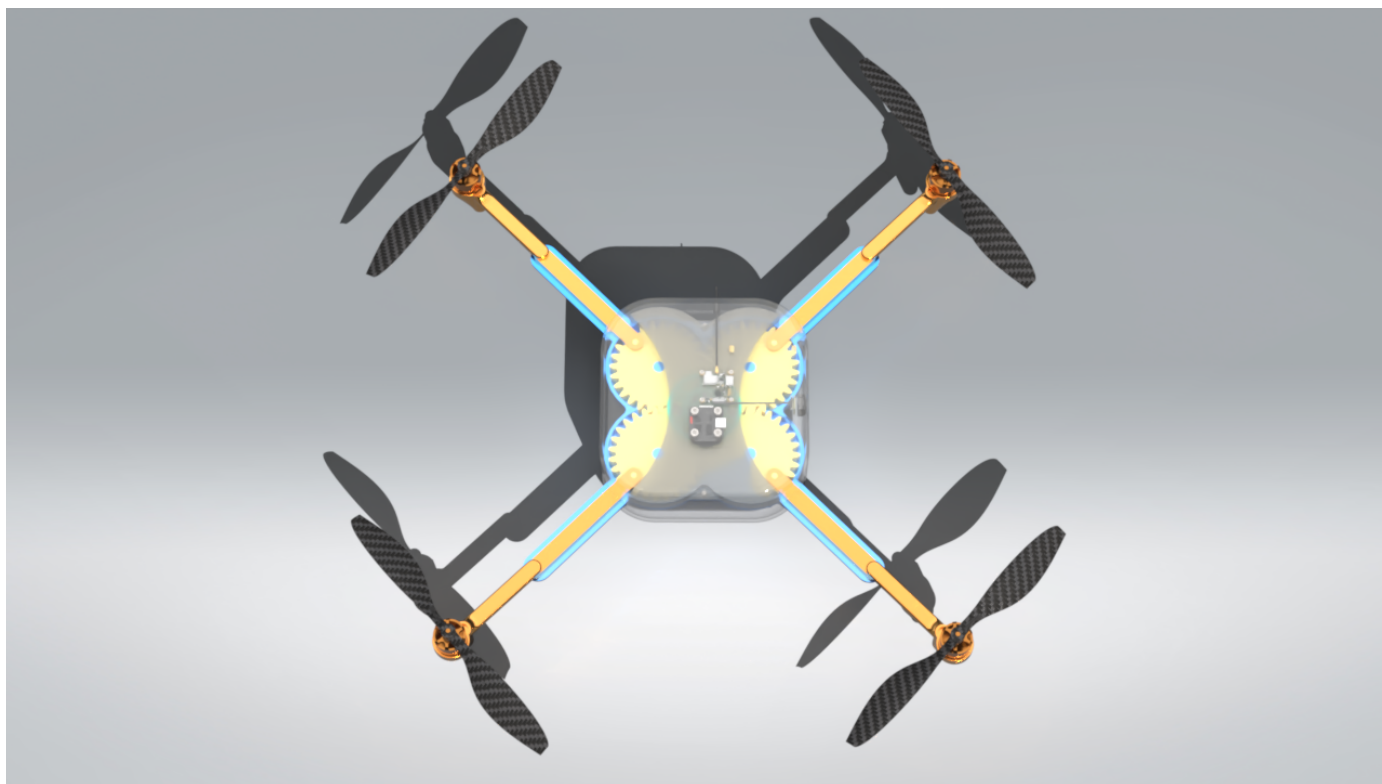


Figura III.18: Vista cenital del ensamble. Préstese especial atención a la distribución espacial interna y al volumen útil destinado al empaquetado de los subsistemas de aviónica y telemetría.

La arquitectura se complementa con una placa superior estructural de geometría cruciforme y acabado translúcido ahumado (ver Figura III.20). Este componente funge como plataforma de montaje para el controlador de vuelo (sistema integrado SpeedyBee), la cámara de navegación y el módulo de telemetría, permitiendo simultáneamente la inspección del mecanismo subyacente. Finalmente, la validación tridimensional corrobora la simetría radial del chasis totalmente desplegado y garantiza la holgura de diseño entre el área de barrido de las hélices y la envolvente del fuselaje, asegurando un flujo de aire libre de interferencias (ver Figura III.21).

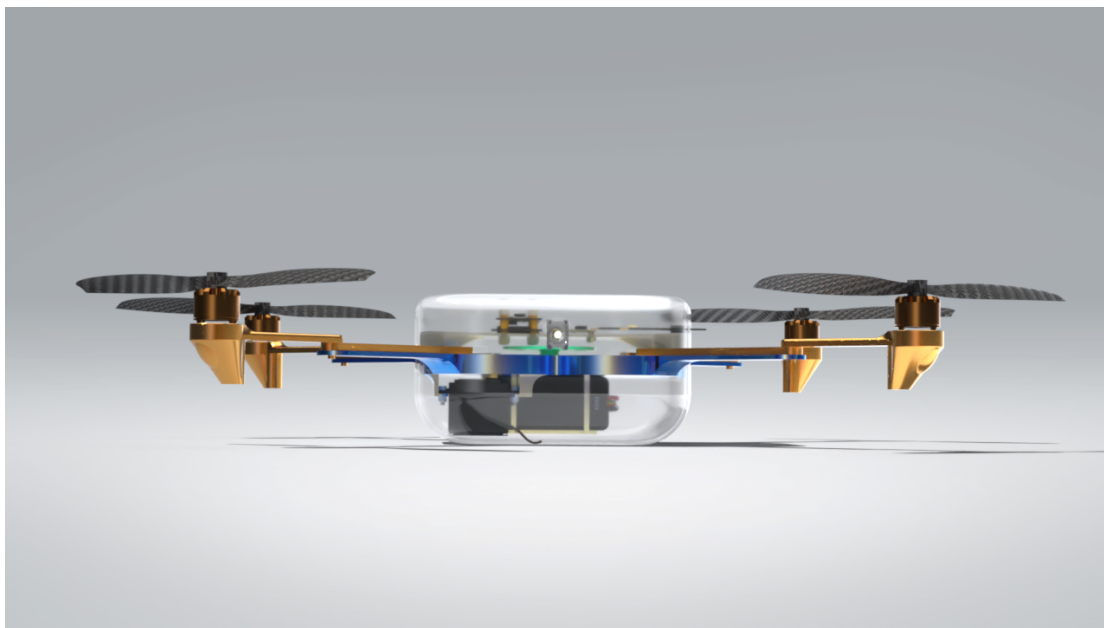


Figura III.19: Vista frontal a nivel de suelo. Obsérvese detalladamente la disposición del ESC/BEC, la batería, el servomotor y la cámara frontal dentro del fuselaje, representados con terminales de cableado simplificadas para evaluar la interferencia volumétrica.

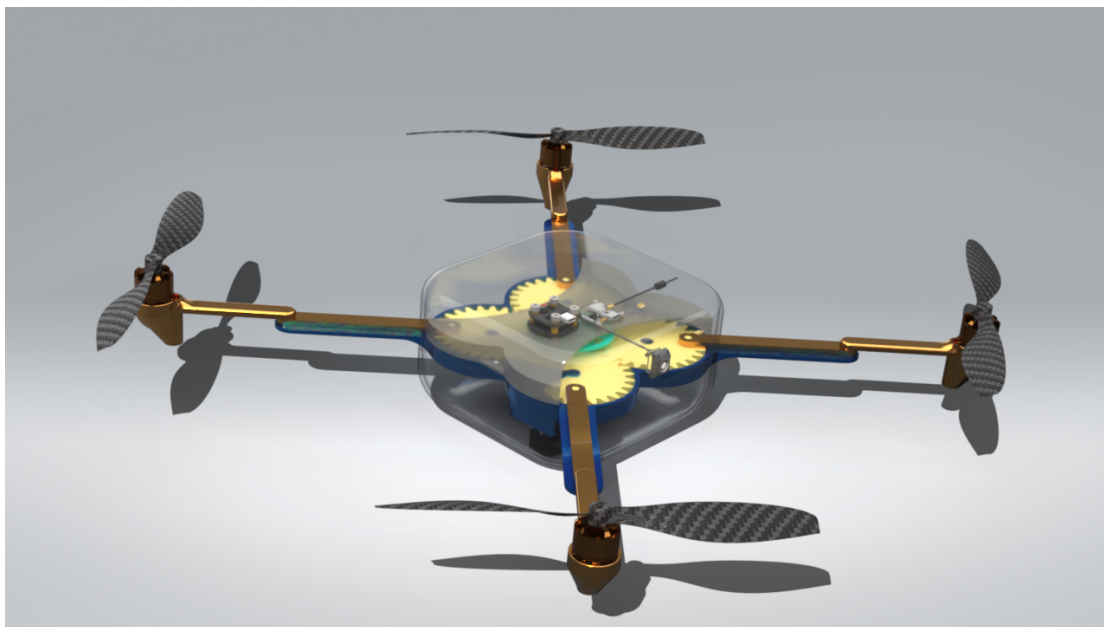


Figura III.20: Vista enfocada en la placa superior estructural. Nótese su geometría cruciforme de acabado translúcido ahumado y observe su función como soporte principal para el controlador de vuelo *SpeedyBee* y los módulos de comunicación.



Figura III.21: Perspectiva aérea oblicua del sistema desplegado. Póngase especial atención en la simetría radial del ensamble y en la holgura geométrica existente entre el barrido de las hélices de fibra de carbono y el chasis central.

Capítulo IV

Validación estructural



IV.1. Justificación y Alcance de las Simulaciones Estructurales

IV.1.1. Propósito del Análisis Estático Estructural

El análisis estático estructural mediante el método de los elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) constituye la fase primaria de validación para garantizar la integridad mecánica del mecanismo de pliegue. Debido a los severos requerimientos cinemáticos impuestos al sistema (particularmente un tiempo de despliegue crítico de $t = 0.1[s]$), los componentes mecánicos experimentan elevadas aceleraciones angulares y lineales. Estas condiciones inducen fuerzas inerciales significativas que, de acuerdo con el principio de d'Alembert, pueden ser modeladas en un estado de equilibrio cuasiestático equivalente para evaluar las condiciones del "peor escenario" (*worst-case scenario*).

El objetivo fundamental de esta aproximación es determinar la distribución de los esfuerzos combinados a lo largo de la geometría optimizada y validar que el material propuesto opera exclusivamente dentro de su régimen elástico lineal. Para los componentes fabricados en Ácido Poliláctico (PLA) mediante manufactura aditiva, se establece el criterio de falla macroscópica de Von Mises, definido mediante la tensión equivalente σ_{vM} en la ecuación IV.1:

$$\sigma_{vM} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq \frac{\sigma_y}{FDS_{min}} \quad (IV.1)$$

Donde σ_1 , σ_2 y σ_3 representan los esfuerzos principales primarios, $\sigma_y = 50[\text{MPa}]$ representa el límite elástico o esfuerzo de fluencia nominal del PLA, y FDS_{min} es el factor de seguridad mínimo admisible. La simulación estática permite aislar los efectos de las concentraciones de esfuerzos de origen geométrico y verificar que, bajo el par torsor pico del servomotor y las fuerzas reactivas en los nodos de articulación, no existan regiones propensas a la plastificación o a la falla por deformación permanente, consolidando así una base estructural rígida antes de evaluar los efectos dinámicos acoplados.

IV.1.2. Modelado Dinámico y Magnificación mediante Función de Transferencia

Debido a que el despliegue del fuselaje ocurre en un intervalo altamente transitorio, las excitaciones de tipo impulsivo al inicio y al final de la carrera estructural pueden acoplarse con las frecuencias naturales del sistema, induciendo fenómenos de resonancia elástica. Los materiales poliméricos como el PLA exhiben un comportamiento viscoelástico con propiedades de amortiguamiento estructural intrínsecamente bajas, caracterizadas por un factor de pérdida de energía típico de $\tan \delta \approx 0.04$, lo que se traduce en una razón de amortiguamiento crítico aproximada de $\zeta \approx 0.02$.



Para evitar el elevado costo computacional y la complejidad de convergencia que implican las simulaciones dinámicas transitorias no lineales en el dominio del tiempo, se implementó una metodología analítica conservadora basada en la modelación del mecanismo como un sistema lineal de segundo orden en el dominio de la frecuencia. La ecuación de movimiento generalizada se expresa en la ecuación IV.2:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (\text{IV.2})$$

Al aplicar la transformada de Laplace bajo condiciones iniciales nulas, se obtiene la función de transferencia estandarizada $H(s)$ que relaciona el desplazamiento de la estructura con la fuerza de excitación externa (ecuación IV.3):

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1/m}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{IV.3})$$

Donde ω_n representa la frecuencia natural del modo de vibrar predominante y ζ es la razón de amortiguamiento. Al evaluar la respuesta en frecuencia estacionaria ($s = j\omega$) en el punto de máxima criticidad, correspondiente a la condición de resonancia teórica ($\omega = \omega_n$), el factor de magnificación dinámica (DFA o ganancia máxima H_{max}) queda determinado por la ecuación IV.4:

$$H_{max} = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \approx \frac{1}{2(0.02)} \approx 25 \quad (\text{IV.4})$$

Este factor de magnificación de $H_{max} \approx 25$ representa una cota superior extremadamente conservadora del comportamiento vibratorio. Al multiplicar los esfuerzos nominales cuasiestáticos por este factor analítico, se calcula un esfuerzo dinámico pico límite de diseño de aproximadamente $\sigma_{dyn} \approx 37$ [MPa]. Debido a que este valor máximo amplificado se mantiene por debajo del umbral de fluencia del PLA ($\sigma_y = 50$ [MPa]), se demuestra matemáticamente que la estructura es inmune a la falla por resonancia o fatiga de corto plazo durante la metamorfosis del UAV, validando la suficiencia del diseño sin recurrir a análisis transitorios redundantes.

IV.1.3. Criterios de Evaluación y Caracterización de Componentes Críticos

La validación estructural del sistema mecánico exige un escrutinio individualizado de los componentes que integran la cadena cinemática espacial. A continuación, se detallan los



criterios de evaluación mecánica y la justificación de criticidad para cada elemento fundamental:

1. **Base (Fuselaje Principal):** Constituye la espina dorsal estructural de la aeronave. Su función principal es unificar el sistema de almacenamiento de energía y aviónica con las articulaciones del mecanismo de pliegue. Es evaluada bajo un criterio de rigidez flexotorsional; se requiere limitar las deflexiones elásticas locales para evitar desalineaciones angulares en los ejes de los eslabones, lo cual provocaría el atascamiento (*binding*) cinemático de la carrera de despliegue.
2. **Tren de Engranajes (Piñón y Corona):** Representa el nodo con mayor severidad en la transferencia de flujo de potencia desde el actuador rotativo hacia las extremidades. Su análisis es crítico debido a la naturaleza geométrica del engranaje, el cual experimenta esfuerzos de contacto Hertziano en las caras de los dientes y esfuerzos de flexión severos en la raíz del diente (zona de transición del filete). Las simulaciones identifican este componente como el limitante global del diseño, registrando un esfuerzo pico de 29.24[MPa], lo que fija el Factor de Seguridad estricto del ensamble en $FDS \approx 1.71$.
3. **Case 2 (Carcasa Inferior):** Actúa como el elemento de cierre estructural inferior y soporte de la aviónica embarcada. Al estar sometido a las reacciones de empotramiento de los pasadores y los momentos torsores excéntricos generados durante la desaceleración del brazo, su evaluación se centra en la identificación de esfuerzos cortantes puros e interlaminares derivados de la anisotropía propia del proceso de manufactura aditiva.
4. **Biela de Acoplamiento:** Este eslabón binario funciona bajo condiciones de carga puramente axial (tensión y compresión uniaxiales) para transmitir el movimiento del servo hacia la corredera del brazo. Su evaluación estructural es indispensable para descartar el fenómeno de inestabilidad elástica por pandeo flexional de Euler. El análisis numérico demuestra un comportamiento sobredimensionado óptimo, alcanzando un factor de seguridad frente al pandeo superior a un orden de magnitud de 1200 ($FDS > 1200$), eliminando cualquier riesgo de colapso geométrico por compresión.
5. **Brazo Portador (Corredera Cinemática):** Es la extensión estructural que soporta directamente el conjunto rotor-hélice, transfiriendo el empuje aerodinámico y el torque giroscópico al fuselaje. Su evaluación es obligatoria debido a que presenta discontinuidades geométricas internas y muescas necesarias para los toques del mecanismo de pliegue. Estas transiciones actúan como concentradores de esfuerzos locales (K_t), donde las simulaciones predicen tensiones localizadas de 1.05[MPa] bajo las condiciones combinadas de flexión por empuje y fuerzas inerciales de despliegue.

En sustitución de los diagramas de cuerpo libre (DCL) analíticos tradicionales, las condi-



ciones de frontera impuestas a cada componente (incluyendo las restricciones cinemáticas espaciales y la aplicación de los vectores de carga externa) se ilustran de manera directa sobre la geometría tridimensional en las figuras de resultados correspondientes al análisis de elementos finitos (FEA). Esta aproximación visual permite una comprensión más fidedigna y directa de cómo las fuerzas interactúan con la topología optimizada de las piezas en su entorno de ensamble, evitando las simplificaciones bidimensionales que resultarían imprecisas para geometrías de esta complejidad.



IV.2. Interpretación de las simulaciones estructurales

IV.2.1. Simulaciones estructurales estáticas de componentes principales

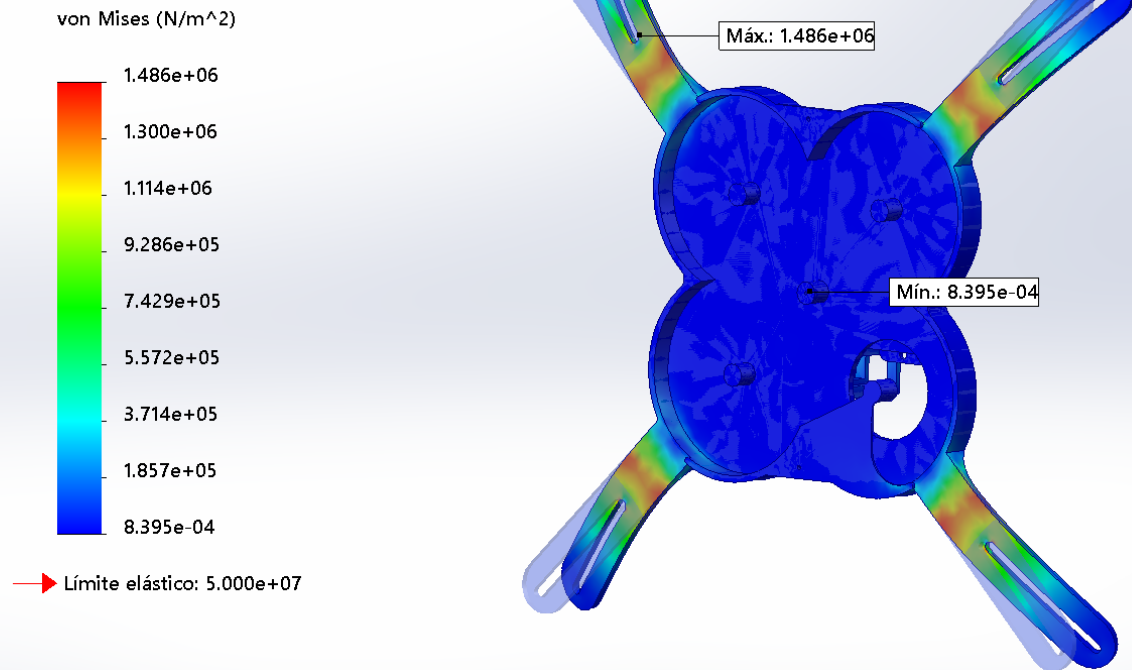
Esta sección presenta los resultados del análisis estático cuasiestático, enfocándose en los esfuerzos de Von Mises, la deformación y el Factor de Seguridad (FDS) en los componentes sometidos a mayores solicitaciones mecánicas.

En primer lugar, simulando la pieza que tiene mayor importancia estructural, que es la base del mecanismo y funge como fuselaje del dron entero, se puede ver en la Figura IV.1, el límite elástico es de $5 \times 10^7 [\text{N/m}^2]$ y, el máximo alcanzado dada la carga sometida que fue de $7.848 [\text{N}]$ (al multiplicar $0.2 [\text{kg}] \times 9.81 [\text{m/s}^2] = 1.962 [\text{N}] \rightarrow 1.962 [\text{N}] \times 4 [\text{brazos}] = 7.848 [\text{N}]$), es de $1.48E + 6 [\text{N/m}^2]$. Siendo de un orden de magnitud la diferencia entre el esfuerzo máximo y el límite elástico del material, se concluye que soporta la carga fácilmente. Por otro lado, la figura muestra una deformación irreal dados los resultados antes señalados, esto es así puesto que la escala de deformación, misma que se observa en la figura es de 35.0768 y se usó de esa manera para demostrar cómo es que podría verse afectada la pieza hipotéticamente si las cargas fueran mucho mayores, es decir, meramente se toma como algo ilustrativo en este caso.

Ahora bien, la Figura IV.2 muestra la distribución de esfuerzos en el ensamble central del mecanismo. Como se observa, a pesar de la complejidad del tren de engranajes, los esfuerzos máximos se localizan de manera puntual en los puntos de contacto de los dientes y en los anclajes de las bancadas. Sin embargo, estas tensiones permanecen muy por debajo del límite elástico del PLA (50 [MPa]), validando el concepto de la arquitectura centralizada, esto puede ser así debido a la complejidad del mallado, puesto que la cantidad de nodos se ve reducida dadas las limitaciones de la licencia estudiantil, siendo que es una carga puntual, y que en terminos generales las cargas más frecuentemente se pueden ver en color verde, podría decirse que se encuentran entre 6[MPa] y 29.24[MPa] como máximo.

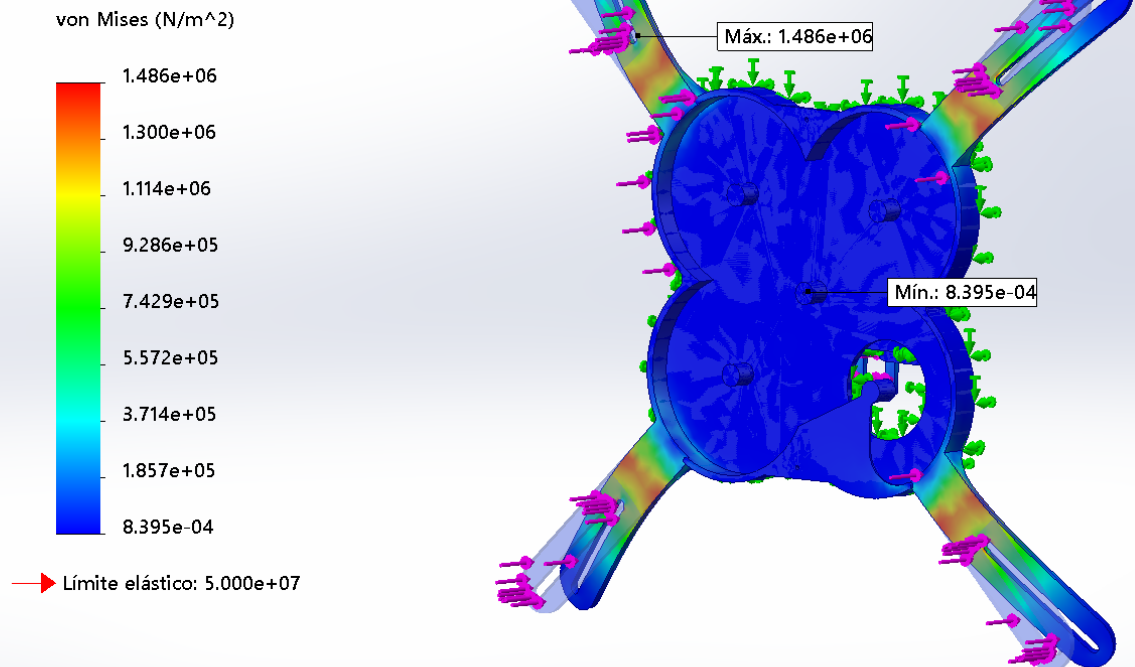
Con la intención de profundizar en cuanto a lo que se muestra en la Figura IV.2, es de suma importancia recalcar que los parámetros de discretización indican un tamaño de elemento global de 4[mm], con un tamaño mínimo de elemento refinado a 3.6[mm] y una resolución de 8 elementos por círculo. En el contexto de un contacto hertziano entre flancos de engranes y la subsecuente concentración de esfuerzos en la raíz del diente (zona de entalle), esta resolución de malla resulta relativamente gruesa. Aunque es computacionalmente eficiente para una iteración inicial de ensamble, un tamaño de elemento de 3.6[mm] podría subestimar los picos de esfuerzo locales, sugiriendo la necesidad de un estudio de convergencia de malla (refinamiento h) o la aplicación de un control de malla local en las interfaces de contacto para futuras validaciones, sin embargo esta fue la malla más refinada que permitió la licencia estudiantil del software utilizado.

Nombre del modelo: base_opt_v1
 Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
 Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
 Escala de deformación: 35.0768



(a) Aislamiento del gradiente de esfuerzos sin vectores.

Nombre del modelo: base_opt_v1
 Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
 Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
 Escala de deformación: 35.0768



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

(b) Visualización acoplada con vectores de carga y restricciones.

Figura IV.1: Esfuerzos de Von Mises en la base bajo carga estática máxima: (a) gradiente libre de vectores y (b) con cargas y restricciones. La silueta azul traslúcida representa la geometría original no deformada como referencia del mínimo desplazamiento frente al límite elástico ($\sigma_y = 50[\text{MPa}]$, $\sigma_{max} = 1.486[\text{MPa}]$).

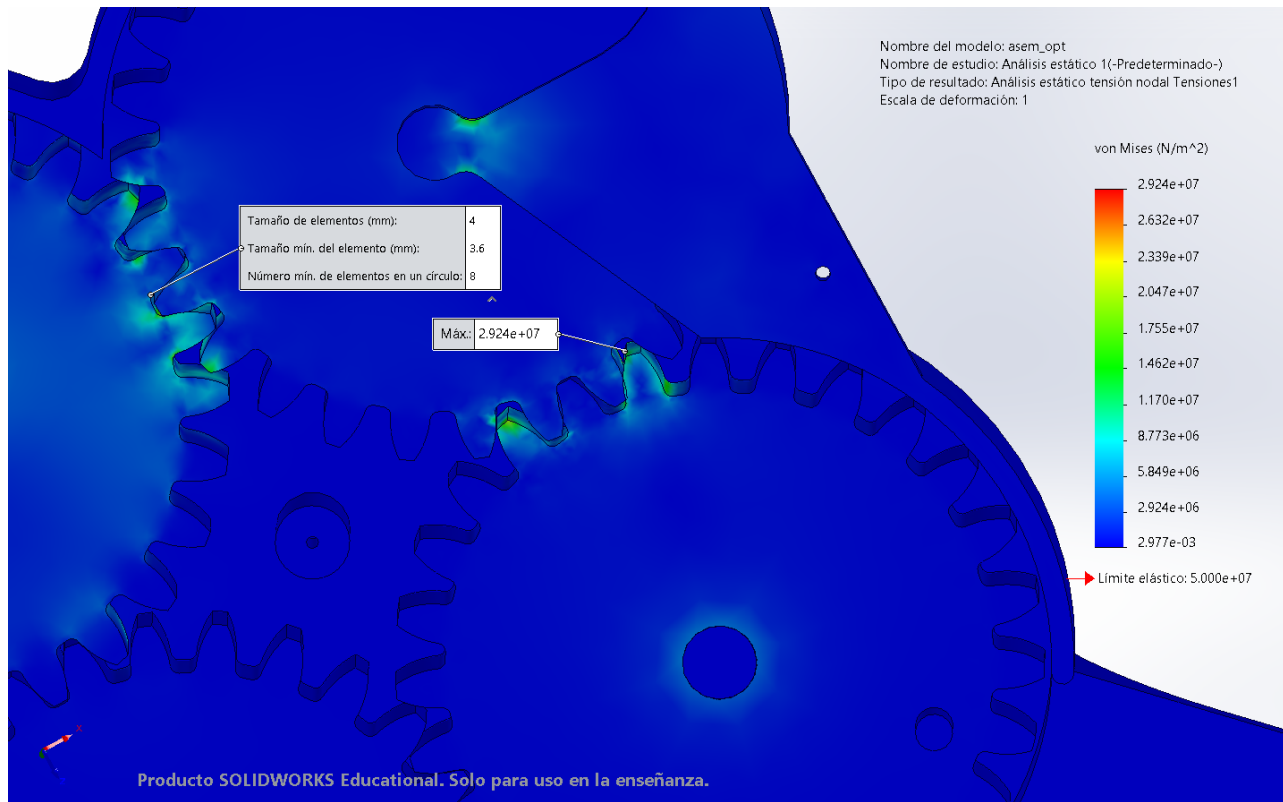


Figura IV.2: Distribución de esfuerzos de Von Mises en el ensamble central del mecanismo bajo carga máxima. Se observa que el mecanismo soporta la carga con esfuerzos bajos y distribuidos estructuralmente.

El gradiente de los esfuerzos, representado en la escala de colores, muestra una distribución cinemática de un engrane sometido a un par torsor. El campo base de la pieza se mantiene en un régimen de tensión insignificante (región azul), rondando los valores mínimos de 2.977×10^{-3} [N/m²]. El fenómeno de interés se localiza en la interacción entre el piñón y la rueda dentada adyacente. La tensión máxima nodal se muestra en el flanco activo y la zona de transición hacia la raíz del diente que se encuentra engranado, alcanzando un valor pico de $\sigma_{vM, \text{máx}} = 2.924 \times 10^7$ [N/m²] (aproximadamente 29.24[MPa]), como se dijo anteriormente. Para determinar la viabilidad del diseño de este mecanismo frente al criterio de falla por fluencia, se contrastó el esfuerzo máximo obtenido contra el límite elástico del material (σ_y). De manera que el factor de seguridad del sistema se define mediante la relación:

$$FDS = \frac{\text{Límite elástico del material}}{\text{Esfuerzo de Von Mises máximo}} \quad (IV.5)$$

$$FDS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{vM, \text{máx}}} \quad (IV.6)$$



Al sustituir los valores correspondientes, se obtiene un factor de seguridad mínimo global de FDS.

$$\text{FDS} = \frac{50[\text{MPa}]}{29.24[\text{MPa}]}$$
$$\therefore \text{FDS} = 1.7099 \approx 1.71$$

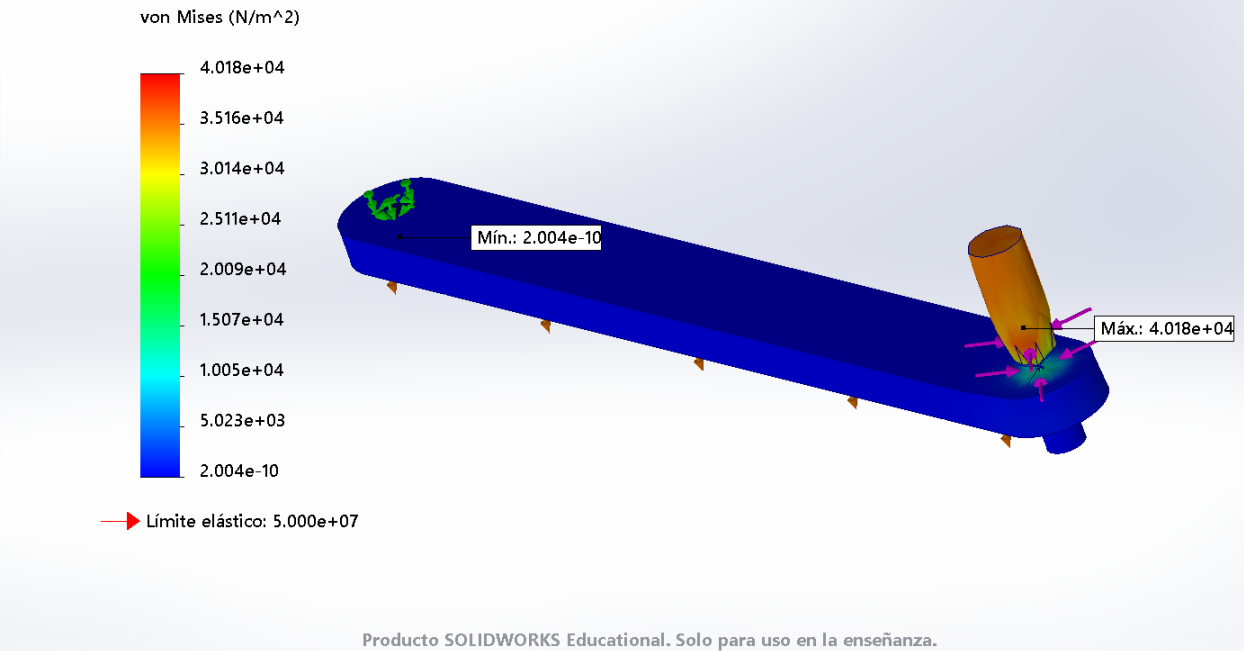
Posteriormente, se realizó una evaluación detallada de los componentes individuales más críticos: la biela, el case inferior (que da soporte a la base del mecanismo del dron) y el brazo del dron donde se colocan los motores. Para este análisis, se utilizó el par resistivo de $0.145 [\text{N} \cdot \text{m}]$ validado en la sección anterior. Habiendo dicho esto, se puede revisar con detenimiento la Figura IV.3, concretamente en la IV.3a en donde se observan, los esfuerzos de Von Mises en la biela con un valor máximo de $4.018 \times 10^4 [\text{N}/\text{m}^2]$, de manera que resulta insignificante tomando en cuenta el límite elástico del material, siendo una diferencia de tres órdenes de magnitud.

Así pues, se usó un factor de deformación de 378.313, según la sugerencia del software, con la intención de ilustrar cómo se vería afectada la pieza aunque sea de forma hipotética. Con respecto a la IV.3b, puede verse claramente que el factor de seguridad de la pieza es en extremo alto dadas los requerimientos mecánicos. En este sentido, resulta importante esclarecer la forma en que se calcula el factor de seguridad.

Dicho lo anterior y retomando la leyenda de la Figura IV.3b indica que el FDS mínimo es de 1.2×10^3 (es decir, 1,200). Esto significa que la biela es capaz de soportar 1,200 veces la carga actual antes de sufrir deformación plástica. Es crucial notar que, aunque la biela se ve completamente roja, en este caso el rojo no significa peligro o falla. SolidWorks ajusta automáticamente la escala de colores. El rojo simplemente representa el valor más bajo de FDS en la pieza ($1.244\text{e}+03$), mientras que el azul representa un FDS absurdamente alto en zonas donde el esfuerzo es prácticamente cero (1×10^{16}).

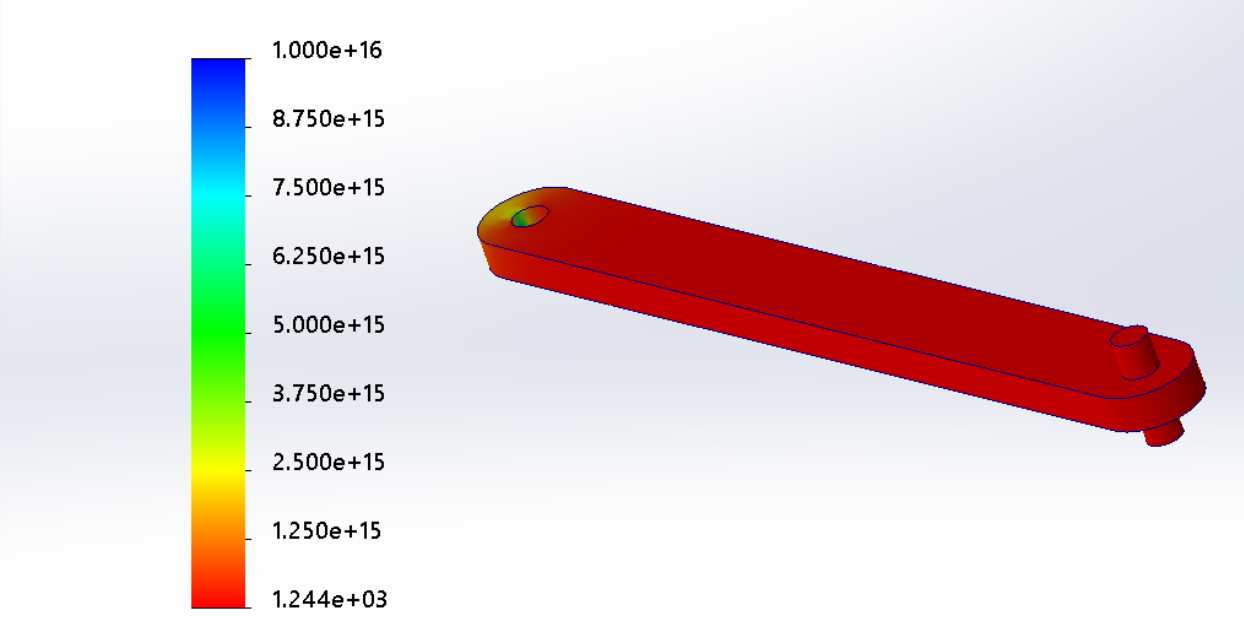
Continuando con el análisis de las simulaciones de las piezas críticas del dron, los brazos de este son cruciales, pues ellos se encargan de soportar el peso de los motores y las hélices. Con esto en mente, se simularon con las cargas correspondientes al peso de los motores y las hélices, fijando el barreno que conecta con la biela. Para revisar estos resultados, se tiene la Figura IV.4 que permite, primero, en IV.4a observar el gradiente de colores muestra que la inmensa mayoría del volumen del componente opera en un régimen de esfuerzos excepcionalmente bajo, representado por el color azul oscuro. En estas regiones, el esfuerzo nominal es cercano a $8.084 \times 10^{-5} [\text{N}/\text{m}^2]$, un valor prácticamente nulo.

Nombre del modelo: biela12cm_opt_v1
 Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
 Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
 Escala de deformación: 378,313



(a) Esfuerzos de Von Mises en la biela.

Nombre del modelo: biela12cm_opt_v1
 Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
 Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1
 Criterio: Automático
 Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 1.2e+03
 FDS



(b) Factor de Seguridad (FDS) en la biela.

Figura IV.3: Resultados de FEA de la biela. Se observa que la tensión máxima en la biela (a), y el factor de seguridad en toda la superficie de la biela (b).

Existe una clara singularidad tensional identificada por el indicador "Máx.", donde claramente se ve que el esfuerzo máximo alcanza los 1.053×10^6 [N/m²] (aproximadamente 1.05[MPa]). Este pico se localiza de manera muy puntual en la arista interior (entalle) donde el brazo longitudinal se intercepta con el cuerpo de la base proximal. Esta concentración es un fenómeno geométrico clásico derivado de la transición abrupta de la sección transversal, lo que restringe el flujo de las líneas de esfuerzo. Haciendo uso de la ec. IV.5, se calculó el factor de seguridad del brazo, para luego comprobar el resultado mediante su simulación.

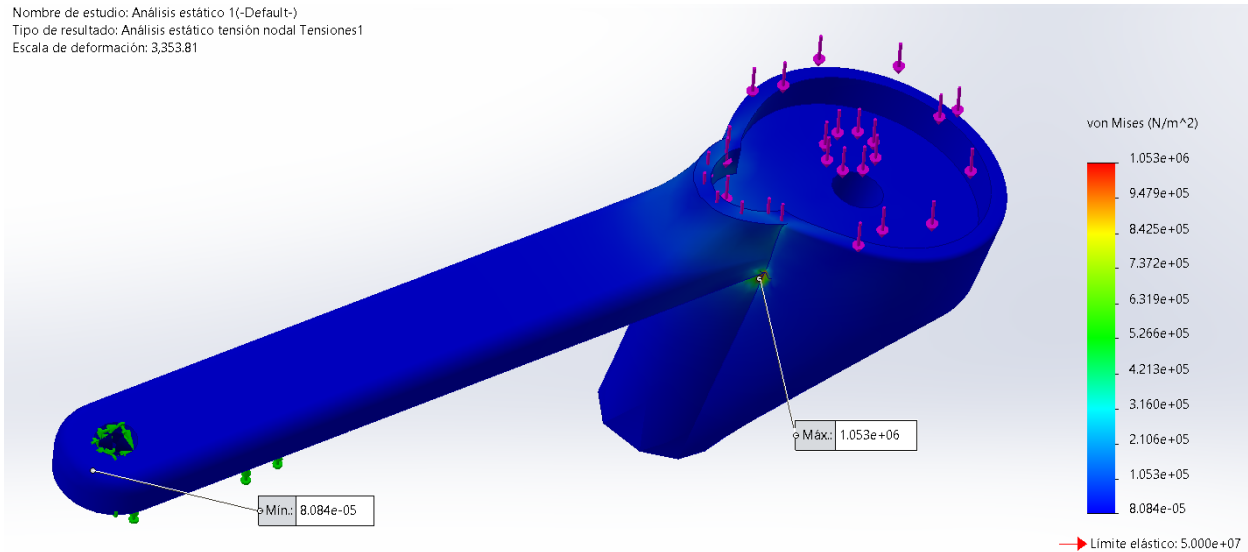
$$FDS_{\text{brazo}} = \frac{\sigma_y}{\sigma_{vm_max}} = \frac{50 \text{ [MPa]}}{1.053 \text{ [MPa]}} \approx 47.48$$

El resultado anterior se puede ver en toda la superficie de color rojo del brazo mostrado en la Figura IV.4b. Ahora bien, es imperativo notar que la representación visual del componente se encuentra bajo una escala de deformación de 3,353.81. La flexión observable en la imagen está magnificada por este factor para facilitar la comprensión cualitativa del modo de deformación, tal y como se explicó con anterioridad. La deformación unitaria y los desplazamientos absolutos reales en la pieza física bajo esta configuración de carga son microscópicos y enteramente dentro del régimen elástico lineal. El factor de seguridad calculado ($FDS > 47$) demuestra que el diseño estructural es excesivamente conservador para las solicitaciones mecánicas estáticas evaluadas. El componente operará sin riesgo de deformación plástica o falla estática.

Analizando ahora los resultados de la parte inferior del case, que soporta el peso de la batería, la base del mecanismo que trabaja como fuselaje y el resto de los componentes antes mencionados, se revisa la Figura IV.5. En el caso de la Figura IV.5a, las flechas verdes y cafés en la superficie inferior plana del modelo indican la aplicación de una geometría fija. Esto significa que los grados de libertad traslacionales y rotacionales en esa región han sido restringidos a cero, simulando un empotramiento o anclaje a una base rígida. Las flechas de color púrpura que apuntan hacia abajo sobre los bordes y caras superiores representan una carga distribuida (ya sea una fuerza o una presión) aplicada verticalmente a lo largo del perímetro superior de la carcasa.

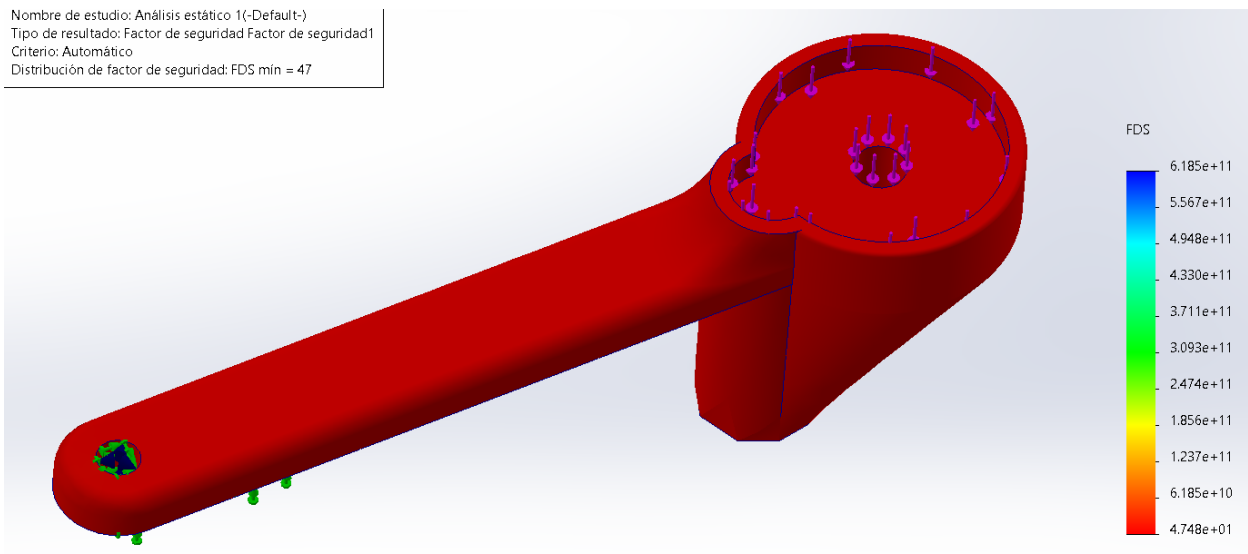
El esfuerzo máximo registrado es de 1.895×10^5 [N/m²] (aproximadamente 0.19[MPa]), y se localiza en el borde inferior interno de la pieza, cerca de la zona de transición geométrica sujeta a la base. Este fenómeno es típico de los concentradores de esfuerzos generados por cambios de sección o cercanía a las restricciones fijas. El esfuerzo mínimo es de 2.473×10^{-3} [N/m²], localizado en la superficie plana inferior, lo cual es congruente con la restricción de movimiento en esa área. Es crucial destacar que la escala de deformación configurada en el software es de 2,552.89. Esto significa que la curvatura y el pandeo que se observan en las paredes laterales de la carcasa no representan la deformación física real, sino una exageración visual multiplicada por más de 2500 veces. Esta amplificación se uti-

Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Default-)
 Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
 Escala de deformación: 3,353.81



(a) Esfuerzos de Von Mises en el brazo del dron.

Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Default-)
 Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1
 Criterio: Automático
 Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 47



(b) Factor de Seguridad (FDS) en el brazo del dron.

Figura IV.4: Resultados del FEA; (a) esfuerzos de von Mises y (b) FDS, para el brazo del dron. Se observa una singularidad tensional localizada de 1.05[MPa] en el entalle interior, evidenciando un comportamiento estructural en régimen elástico lineal bajo las cargas nominales.



liza en ingeniería para comprender la forma del modo de deformación sin que esto implique un desplazamiento catastrófico del material.

Dado que el esfuerzo máximo de la pieza (0.19[MPa]) es órdenes de magnitud inferior al límite de fluencia, la pieza opera enteramente dentro del régimen elástico lineal. El componente es mecánicamente robusto para este caso de carga específico, descartando cualquier riesgo de deformación plástica permanente o falla por sobrecarga estática.

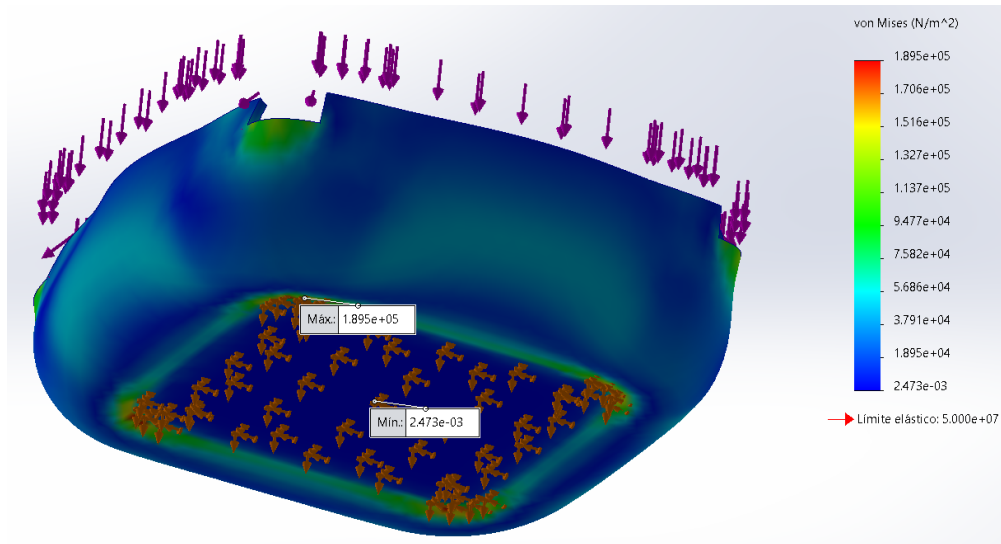
Y, para el caso de la Figura IV.5b, esta visualización corrobora los resultados del análisis previo, manteniendo los mismos valores críticos ($\sigma_{max} = 1.895 \times 10^5 \text{ N/m}^2$). La variación en el color de los vectores de carga (de púrpura a marrón) corresponde estrictamente a una modificación en los parámetros de visualización de la interfaz del software y no representa ninguna alteración en la magnitud, dirección o naturaleza de las condiciones de frontera impuestas. Se observa una propagación de los esfuerzos desde las paredes verticales hacia la base, generando zonas de tensión moderada (tonalidades cian y verde claro) que convergen hacia el centro de la placa inferior. Este patrón centralizado sugiere que la carga periférica aplicada en el borde superior induce un momento flector en las paredes, el cual se transfiere a la base empotrada, generando un ligero efecto de membrana o flexión biaxial en el piso de la carcasa. A pesar de esto, la magnitud de estos esfuerzos sigue siendo ínfima respecto a la capacidad del material.

Calculando ahora el FDS del case inferior, del mismo modo que se hizo antes:

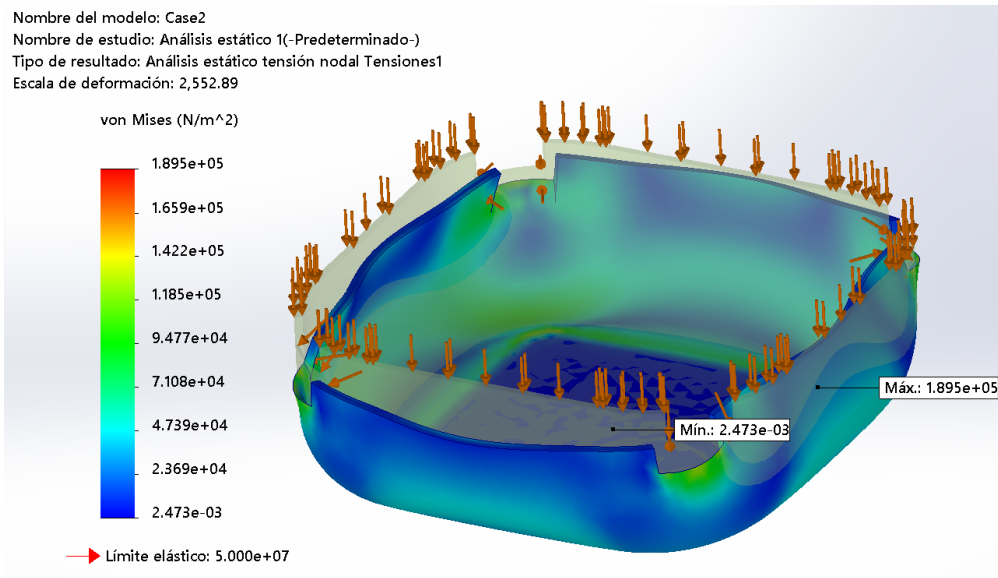
$$\begin{aligned} \text{FDS} &= \frac{50[\text{MPa}]}{0.19[\text{MPa}]} \\ \text{FDS} &= 263.1579 \times 10^2 \approx 263.2 \end{aligned}$$

Este cálculo manual coincide perfectamente con el límite inferior de la escala de la simulación visible en la Figura IV.6, la cual reporta un FDS mínimo de 2.638×10^2 .

Como se evidencia en el Cuadro IV.1, el componente limitante del diseño a nivel sistémico es el tren de engranes, el cual establece el factor de seguridad global del ensamble en 1.71. Todos los demás componentes exhiben un comportamiento holgadamente sobredimensionado frente a las cargas cuasiestáticas evaluadas.



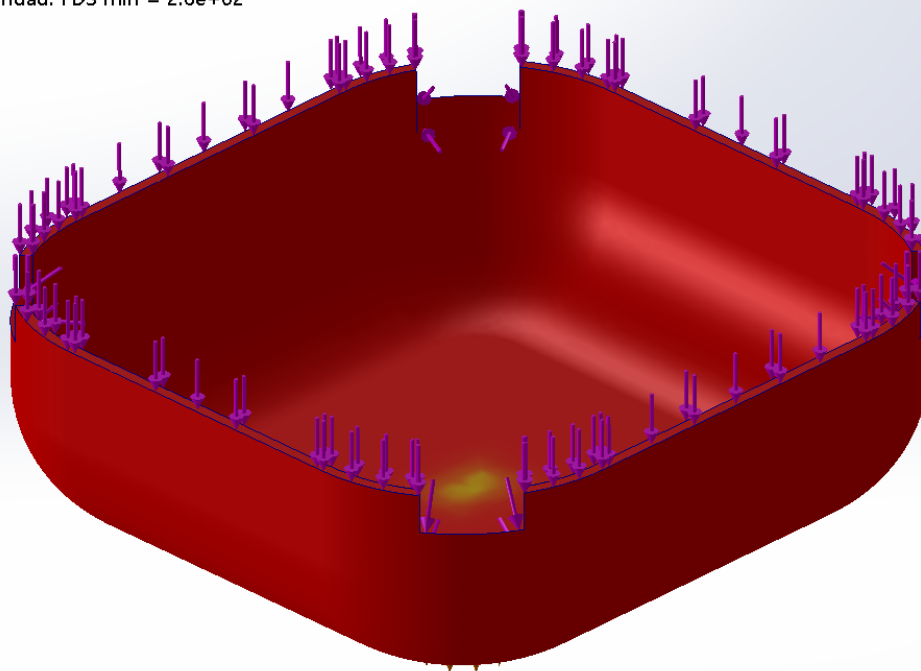
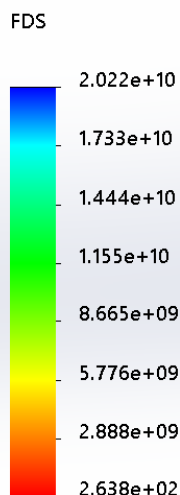
(a) Esfuerzos de Von Mises en el case inferior del dron al apoyarse sobre él.



(b) Esfuerzos de Von Mises en el case inferior del dron debidos a las cargas sobre la base del mecanismo del fuselaje.

Figura IV.5: Resultados del FEA con la distribución de esfuerzos equivalentes de von Mises para el case inferior sometido a carga estática lineal. Los resultados indican un esfuerzo máximo de 0.19[MPa], situado muy por debajo del límite elástico del material (50[MPa]), garantizando la integridad estructural en la zona de comportamiento elástico.

Nombre del modelo: Case2
 Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
 Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1
 Criterio: Automático
 Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 2.6e+02



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Figura IV.6: FDS en el case inferior del dron.

Tabla IV.1: Resumen de resultados del análisis estático estructural por componente crítico (Material: PLA, Límite elástico nominal = 50 MPa).

Componente	Esfuerzo Máximo	Límite Elástico	FDS Mínimo	Criterio Evaluado
Tren de Engranes	29.24 MPa	50 MPa	1.71	Flexión en raíz / Contacto
Brazo Portador	1.05 MPa	50 MPa	47.48	Flexión por empuje / Inercia
Base (Fuselaje)	1.486 MPa	50 MPa	≈ 33.6	Rigidez flexotorsional
Carcasa Inferior (Case)	0.19 MPa	50 MPa	263.2	Esfuerzo cortante / Carga base
Biela de Acoplamiento	0.040 MPa	50 MPa	> 1200	Pandeo axial (Compresión)



IV.2.2. Análisis de frecuencia de componentes estructurales principales

En el análisis estructural de componentes sometidos a cargas dinámicas, resulta fundamental evaluar la posible amplificación de la respuesta mecánica cuando la frecuencia de excitación se aproxima a la frecuencia natural del sistema. En materiales poliméricos como el ácido poliláctico (PLA), este análisis cobra especial relevancia debido a su naturaleza viscoelástica y a su relativamente bajo amortiguamiento interno. No obstante, en determinadas condiciones es posible demostrar que la respuesta dinámica permanece dentro del régimen elástico del material, lo que permite simplificar el estudio y prescindir de un análisis transitorio completo.

El presente apartado tiene como objetivo evaluar el comportamiento dinámico del PLA mediante un modelo lineal amortiguado de segundo orden, estimar la amplificación máxima de tensiones en condiciones cercanas a la resonancia y contrastar dicho valor con el límite elástico del material, con el fin de justificar la validez de un enfoque no transitorio.

IV.2.2.1. Caracterización del amortiguamiento del PLA

El comportamiento dinámico del PLA se caracteriza habitualmente mediante ensayos de Análisis Dinámico Mecánico (DMA, por sus siglas en inglés) [41], en los cuales se miden el módulo de almacenamiento E' y el módulo de pérdida E'' . A partir de estos parámetros se define el factor de pérdida del material [42] como:

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (\text{IV.7})$$

Este parámetro cuantifica la fracción de energía mecánica disipada por ciclo de carga y constituye una medida directa del amortiguamiento interno del material. Diversos estudios experimentales reportan que, para PLA sólido sin refuerzos y a temperatura ambiente (20–30 [°C]), el valor típico del factor de pérdida es del orden de:

$$\tan \delta \approx 0.04$$

Dado que este valor es significativamente menor que la unidad, resulta válida la aproximación clásica que relaciona el factor de pérdida con el coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente de un sistema lineal de segundo orden:

$$\zeta \approx \frac{\tan \delta}{2} \quad (\text{IV.8})$$

De esta forma, para el PLA analizado se obtiene: $\zeta \approx 0.02$. Este resultado indica que el PLA presenta un amortiguamiento bajo, típico de materiales predominantemente elásticos fuera de su región de transición vítrea.



IV.2.2.2. Modelo dinámico y función de transferencia

El sistema estructural se modela como un sistema lineal masa–resorte–amortiguador de un grado de libertad, cuya respuesta en el dominio de la frecuencia frente a una excitación armónica se describe mediante la función de transferencia:

$$H(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (\text{IV.9})$$

Dicha función representa la relación entre la amplitud de la respuesta y la amplitud de la excitación en función de la frecuencia angular ω , siendo ω_n la frecuencia natural no amortiguada del sistema.

Para sistemas subamortiguados ($\zeta < 0.1$), la respuesta presenta un pico bien definido en las proximidades de la resonancia. La ganancia máxima puede aproximarse analíticamente por:

$$H_{\max} \approx \frac{1}{2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (\text{IV.10})$$

Sustituyendo $\zeta = 0.02$:

$$H_{\max} \approx \frac{1}{2(0.02) \sqrt{1 - (0.02)^2}} \approx 25 \quad (\text{IV.11})$$

Este valor representa la máxima amplificación dinámica esperable bajo excitación armónica cercana a la frecuencia natural del sistema.

IV.2.2.3. Estimación de la tensión dinámica máxima

Considerando una amplitud de tensión asociada a la excitación base de:

$$\sigma_{\text{input}} = 1.48 \times 10^6 [\text{Pa}] \quad (\text{IV.12})$$

la tensión dinámica máxima en condiciones resonantes puede estimarse como:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{dyn,max}} &= H_{\max} \times \sigma_{\text{input}} \\ &= (25)(1.48 \times 10^6) \\ &= 3.7 \times 10^7 [\text{Pa}] \end{aligned} \quad (\text{IV.13})$$

$$\therefore \sigma_{\text{dyn,max}} = 37 [\text{MPa}] \quad (\text{IV.14})$$

Este valor constituye una estimación conservadora del máximo esfuerzo dinámico que podría alcanzarse en el material bajo condiciones desfavorables de excitación.



IV.2.2.4. Comparación con el límite elástico del material

El límite elástico del PLA considerado en este estudio es:

$$\sigma_y = 5 \times 10^7 [\text{Pa}] = 50 [\text{MPa}] \quad (\text{IV.15})$$

Comparando ambos valores...

$$\frac{\sigma_{\text{dyn,max}}}{\sigma_y} \times 100 \% = \frac{37}{50} \times 100 \% \approx 0.74 \times 100 \% \approx 74 \% \quad (\text{IV.16})$$

Se observa que, incluso en el escenario más crítico de resonancia, la tensión dinámica máxima permanece aproximadamente un 26 % por debajo del límite elástico del material.

IV.2.2.5. Discusión y justificación de la metodología adoptada para el análisis dinámico

El análisis anterior demuestra que la amplificación dinámica asociada a la baja disipación interna del PLA no es suficiente para inducir comportamiento plástico en el material bajo las condiciones de carga consideradas. En consecuencia:

- La respuesta estructural se mantiene dentro del régimen elástico lineal.
- No se espera acumulación de daño inmediato por sobreesfuerzo dinámico.
- La utilización de un análisis armónico o cuasiestático amplificado resulta adecuada para evaluar la integridad estructural.

Cabe señalar que esta conclusión es válida siempre que:

- La excitación sea aproximadamente armónica y estacionaria.
- No exista un barrido lento de frecuencia que mantenga al sistema en resonancia durante periodos prolongados.
- No se evalúen fenómenos dependientes del tiempo como fatiga de alto número de ciclos o *creep*, relevantes en materiales poliméricos.

En polímeros termoplásticos como el PLA, el creep está asociado a la movilidad molecular de las cadenas poliméricas, la cual permite reordenamientos internos lentos que se manifiestan como un incremento gradual de la deformación. Desde un punto de vista mecánico, el creep implica que la relación tensión–deformación deja de ser puramente instantánea, introduciendo un efecto de memoria temporal en la respuesta del material. Este comportamiento se acentúa a temperaturas cercanas a la temperatura de transición vítrea y bajo cargas sostenidas durante largos periodos de tiempo [42].



En el contexto de este trabajo, el fenómeno de creep no se considera dominante debido a que el análisis se centra en excitaciones dinámicas armónicas de carácter estacionario, donde la tensión varía de forma oscilatoria alrededor de un valor medio cercano a cero. Bajo estas condiciones, no existe una componente de carga constante suficientemente prolongada como para inducir deformaciones acumulativas significativas por fluencia. Ahora bien, la simplificación del problema dinámico y la exclusión explícita del análisis de creep son válidas únicamente bajo las siguientes hipótesis:

- La excitación aplicada es predominantemente armónica y no contiene componentes estáticas o de muy baja frecuencia de magnitud relevante.
- La duración de la carga es limitada, evitando la aplicación de tensiones constantes durante intervalos prolongados.
- La temperatura de operación se mantiene suficientemente alejada de la región de transición vítrea (T_g) del PLA (El PLA amorfo o comercial común muestra una T_g en el rango de aproximadamente 55 [°C] a 65 [°C] [43]), donde los efectos viscoelásticos dependientes del tiempo se intensifican¹.
- El nivel de tensiones dinámicas permanece dentro del régimen elástico del material, sin inducir daño microestructural que pueda acelerar la fluencia.

Bajo estas condiciones, la respuesta del material puede describirse adecuadamente mediante un modelo lineal elástico con amortiguamiento viscoso equivalente, siendo la influencia del creep despreciable en comparación con la respuesta vibratoria inmediata.

En este sentido, puede decirse que a partir de la caracterización del amortiguamiento del PLA, la estimación de la ganancia máxima en resonancia y la comparación directa con el límite elástico del material, se concluye que la respuesta dinámica del sistema permanece dentro de márgenes seguros. Por tanto, la cuestión dinámica queda adecuadamente cubierta sin necesidad de realizar un análisis transitorio completo, lo que permite simplificar el estudio sin comprometer la validez ni la seguridad de los resultados obtenidos.

¹Por debajo de este rango (~ 55 [°C]), el PLA se comporta como un sólido rígido y frágil. Por encima de ~ 55 – 65 [°C], el material empieza a suavizarse y volverse más dúctil, y por encima de este rango pierde gran parte de su rigidez mecánica [44].

Capítulo V

Conclusiones



V.1. Conclusiones principales

La presente investigación demuestra la viabilidad técnica y computacional de diseñar un mecanismo de despliegue morfológico ultrarrápido para Vehículos Aéreos No Tripulados (UAVs) aplicados en escenarios de Búsqueda y Rescate (SAR). Mediante la implementación de una arquitectura modular basada en Algoritmos Genéticos (AG), se logró superar la dicotomía tradicional entre velocidad de actuación y masa estructural al mismo tiempo que se optimizaron los parámetros de diseño (velocidad angular, radio de la manivela, longitud de la biela y ángulo crítico de articulación). De los resultados obtenidos tras evaluar exhaustivamente el espacio de diseño, se desprenden las siguientes conclusiones fundamentales:

- **Optimización Cinemática y Dinámica:** El Algoritmo Genético, al operar sobre 6,750 configuraciones únicas, convergió exitosamente hacia una solución óptima global que satisface el tiempo de despliegue crítico de 0.1[s] exigido para misiones SAR. La configuración geométrica ideal dictaminó un radio de manivela de 30[mm] y una longitud de biela de 12[cm].
- **Eficiencia Energética y de Actuación:** La topología de Biela-Manivela-Corredera (BMC) centrada, validada por la optimización, confirmó los principios clásicos de diseño al maximizar el brazo de palanca secundario y minimizar la excentricidad inercial. Esto permitió restringir el requerimiento de torque máximo a 0.145453[N-m] (11.866 [kg-cm]), habilitando la utilización de servomotores comerciales ligeros y eficientando el consumo de batería global del cuadricóptero.
- **Integridad Estructural Cuasiestática:** Las simulaciones de Análisis de Elemento Finito (FEA) demostraron que la estructura centralizada diseñada en Ácido Poliláctico (PLA) opera holgadamente dentro del régimen elástico lineal. Bajo las cargas inerciales máximas, el esfuerzo pico de Von Mises se focalizó en los flancos de los engranes con un valor de 29.24[MPa], proporcionando un Factor de Seguridad (FDS) global de 1.71 frente al límite de fluencia de 50[MPa] del material.
- **Comportamiento Dinámico y Resonancia:** A pesar del bajo amortiguamiento interno del PLA, el análisis del modelo dinámico demostró que, incluso en un escenario crítico de resonancia con una ganancia de amplificación máxima estimada de 25, la tensión dinámica pico (37[MPa]) se mantiene un 26 % por debajo del límite de fluencia estructural. Esto justifica la omisión de análisis transitorios complejos, confirmando la seguridad del componente sin riesgo inminente de plastificación.

Retomando lo mencionado en el capítulo de Resultados, específicamente hablando de la Figura IV.2 bajo las condiciones de frontera estipuladas, el mecanismo opera de manera segura dentro del régimen elástico lineal, sin presentar riesgo inminente de deformación



plástica o fluencia macroscópica. No obstante, al tratarse de un sistema rotativo sujeto a ciclos de carga repetitivos, el esfuerzo máximo calculado (29.24[MPa]) deberá ser el parámetro de entrada para un subsecuente análisis de fatiga, donde se evaluará la vida útil del componente considerando factores de modificación de la resistencia a la fatiga (factores de Marin) y el límite de resistencia a la fatiga del material en cuestión.

V.2. Limitaciones encontradas

Considero imperioso mencionar, antes que otra cosa, que las restricciones de las que se alimenta el AG son de carácter estructural y de operación conforme a los tiempos, de manera que a partir de estos resultados obtenidos y presentados, hay que considerar la dinámica vehicular dada la optimización de la parte central del sistema completo.

El rigor inherente a toda investigación de alto nivel exige una delimitación exhaustiva y honesta de las fronteras metodológicas bajo las cuales operan los modelos propuestos. En el ámbito del diseño de sistemas aeroespaciales, toda simulación analítica constituye, por necesidad, una abstracción de una realidad física infinitamente más compleja y matizada. En este sentido, una de las principales restricciones abordadas en el presente trabajo emana directamente de la discretización del continuo durante el modelado en el Análisis de Elementos Finitos (FEA). Las barreras impuestas por el licenciamiento académico del software computacional coartaron la capacidad de realizar un refinamiento topológico absoluto, forzando la adopción de una malla paramétrica con un tamaño de elemento global de 4[mm] y un límite de miniaturización de 3.6[mm] para el análisis del tren de engranes del mecanismo. En el ecosistema microscópico de las interfaces de contacto hertziano (específicamente en la fricción de los flancos activos y en las raíces de los dientes del tren de engranajes), esta resolución geométrica resulta analíticamente gruesa. Consecuentemente, el modelo computacional alberga la posibilidad latente de estar subestimando la verdadera magnitud de los picos de concentración de esfuerzos locales, un fenómeno que subraya la ineludible necesidad de implementar futuros estudios de convergencia mediante un refinamiento de malla tipo h para dilucidar con precisión micrométrica las tensiones exactas en la zona de entalle.

De manera paralela, la arquitectura misma de la formulación evolutiva impuso un aislamiento deliberado de la cinemática interna respecto al vasto universo de la mecánica de vuelo general. Las restricciones que delinearon el paisaje de aptitud del Algoritmo Genético fueron de índole netamente estructural y temporal, enfocándose en gobernar las inercias periféricas bajo el incesante apremio de los cronómetros de rescate. Sin embargo, la alteración morfológica ultrarrápida del fuselaje induce alteraciones dinámicas asimétricas y violentas en el tensor de inercia espacial del cuadricóptero, desplazando su centro de gravedad en fracciones de segundo. Al marginar la dinámica aerodinámica transitoria de las funciones de evaluación evolutiva, la presente optimización asume de forma táci-



ta que el vehículo opera en un vacío hidrodinámico o que el controlador de vuelo posee una capacidad inagotable para el rechazo de perturbaciones. Esta abstracción conceptual suspende temporalmente la comprensión del acoplamiento fluido-estructura en escenarios reales, donde las ráfagas cruzadas y la resistencia del aire modificarán, sin lugar a duda, el umbral de par resistivo exigido al servomotor primario.

Finalmente, la naturaleza constitutiva del material empleado encierra profundas consideraciones termodinámicas y reológicas que superan el alcance de la simulación elástica tradicional. La matriz de Ácido Poliláctico (PLA) fue proyectada bajo el cobijo del régimen elástico lineal, una concesión matemáticamente legítima cuando se trata de excitaciones armónicas veloces a temperatura controlada, donde la deformación progresiva por fluencia lenta (creep) carece de protagonismo temporal. No obstante, los drones concebidos para misiones de salvaguarda humana habitan la intemperie y están perpetuamente sometidos a gradientes climáticos hostiles. Si el calor disipado por la electrónica o el entorno acerca la temperatura estructural a la región de transición vítrea del polímero (típicamente umbralada alrededor de los 55 [°C]), el despertar de la movilidad molecular alterará de forma irreversible su rigidez mecánica. En este umbral crítico, los caprichos viscoelásticos del material reclaman su dominio temporal, fracturando la certidumbre de los cálculos puramente elásticos y exigiendo la adopción futura de un modelo termomecánico complejo para proteger la integridad del diseño frente a la entropía térmica.

V.3. Direcciones futuras

La culminación de esta investigación no representa un final absoluto, sino el umbral hacia nuevos paradigmas en el diseño de plataformas aéreas de geometría variable. El éxito rotundo en la optimización topológica y cinemática del cuerpo principal trajo consigo un corolario inexorable: la migración de la densidad estructural hacia las extremidades del vehículo. Al aligerar el chasis central y concentrar la masa inercial en los brazos del dron, el propósito original de minimizar el tiempo de despliegue morfológico ha mutado orgánicamente hacia un desafío complejo de dinámica vehicular. Esta alteración drástica en la distribución de masa y su impacto en la estabilidad del vuelo escapan a los alcances fundacionales de la presente tesis, erigiéndose como una problemática secundaria de vital importancia que demanda ser desentrañada en trabajos futuros.

La metamorfosis que experimenta el cuadricóptero en apenas una décima de segundo implica una perturbación transitoria, severa y altamente no lineal de su tensor de inercia espacial. En consecuencia, las futuras líneas de investigación deberán adentrarse en la frontera de la teoría de control, enfocándose en el desarrollo de arquitecturas de control adaptativo, predictivo o enfoques basados en aprendizaje profundo (Deep Learning) orientados a la navegación. Estos algoritmos deberán poseer la latencia y robustez necesarias para recalcular



y estabilizar las matrices de estado en tiempo real durante el evento de transformación. Este abordaje no solo requerirá simulaciones numéricas avanzadas de la dinámica de cuerpos rígidos, sino también un análisis exhaustivo del acoplamiento aerodinámico mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), con el propósito de cuantificar y mitigar las fuerzas de arrastre y las turbulencias que asaltan a la aeronave durante su despliegue cinemático.

Finalmente, para elevar este concepto mecatrónico desde la viabilidad teórica hasta la certificación requerida por los implacables estándares de la industria aeroespacial, la validación mecánica deberá trascender el análisis cuasiestático para abrazar la inevitable realidad del desgaste dinámico. Resulta imperativo someter la topología del engranaje y los entalles de la estructura a rigurosos estudios de fatiga de alto ciclaje, evaluando la nucleación y propagación de microgrietas bajo el embate continuo de miles de ciclos operativos. Esta progresión analítica deberá culminar, invariablemente, en la materialización de prototipos físicos instrumentados con galgas extensiométricas y cámaras de correlación digital de imágenes (DIC), ensayados empíricamente en bancos de prueba y túneles de viento. Solo a través de la íntima convergencia entre la predicción computacional y la validación empírica, este mecanismo morfológico podrá consolidarse como una tecnología infalible para salvaguardar vidas en misiones de Búsqueda y Rescate.

Bibliografía

- [1] Merriam-Webster, *Merriam-Webster's Collegiate Dictionary*, 11th ed. Springfield, MA: Merriam-Webster, Inc., 2013, ch. SAR.
- [2] P. van Blyenburgh, "Uavs: an overview," *Air & Space Europe*, vol. 1, no. 5–6, pp. 43–47, 1999. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1290095800888693>
- [3] Ideaforge, "How drones aid Search And Rescue operations: a game-changer in emergency response," 2025, [Online] Disponible en: Ideaforge.
- [4] Unmanned Systems Technology, "SAR drones - Unmanned search and rescue - First responder UAVs," n.d., [Online] Disponible en: Unmanned Systems Technology. [Online]. Available: <https://www.dslrpros.com/blogs/search-and-rescue-drones>
- [5] FIXAR, "Fixed wing drone solution for commercial operations," 2024. [Online]. Available: <https://fixar.pro/products/fixar007ng/>
- [6] Y. H. Tan, B. H. Liew, X. Liu, and B. M. Chen, "Wing design studies for small submersible-launched uavs," in *2018 IEEE 14th International Conference on Control and Automation (ICCA)*, 2018, pp. 350–354. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICCA.2018.8444275>
- [7] Xi'an Supersonic Aviation Technology (SAT-UAV), "China customized small foldable drone," 2025. [Online]. Available: <https://www.satuav.com/multi-rotor-drone-rotary-wing-drone//small-foldable-drone.html>
- [8] Sun, X., Cao, J., Li, Y. & Wang, B., "Design and field test of a foldable wing unmanned aerial underwater vehicle," 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/rob.22265>
- [9] G. Wang, G. Xu, Y. Wang *et al.*, "Deployment Modes and Aerodynamic Analysis of UAV Orthogonal Biaxial Folding Wing," *Aerospace*, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/aerospace10010026>
- [10] T. Tuna, S. Ovr, E. Gökbek, and T. Kumbasar, "Design and development of FOLLY: A self-foldable and self-deployable quadcopter," *Aerospace Science and Technology*, vol. 100, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105807>



-
- [11] H. Zhang and Y. Yang, “Dynamic analysis of wing deployment of high altitude balloon launched small size folding-wing uav,” *MEAE*, 2018.
- [12] Y. Bai, Y. Jin, C. Liu, Z. Zeng, and L. Lian, “Nezha-f: Design and analysis of a foldable and self-deployable hauh,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. PP, pp. 1–8, 04 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3252343>
- [13] M. Bartlett and B. Wilcox, “Morphing Drone Through Shape Change for Multimodal Vehicles,” 2024, vTIP. [Online]. Available: <http://vtip.technologypublisher.com/technology/55600>
- [14] G. Wu, X. Pei, D. Wang *et al.*, “Peregrine Falcon: Design and Experimentation of a Folding and Launchable Quadcopter Drone,” *MDPI: Drones*, vol. 8(10), 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/drones8100565>
- [15] H. Tian, Z. Zhang, Z. Zhou *et al.*, “Design and optimization of self-foldable and self-deployable mechanism for portable drone arm,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 39, pp. 2195–2209, 2025, ResearchGate. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12206-025-0341-z>
- [16] Y. Wang, Y. Zhang, and W. Chen, “Design and Analysis of MataMorph-3; A Fully Morphing UVA with Camber-Morphing Wings and Tail Stabilizers,” *Applied Sciences*, vol. 9(7), 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app9070382>
- [17] D. Falanga, K. Kleber, S. Mintchev, D. Floreano, and D. Scaramuzza, “The foldable drone: A morphing quadrotor that can squeeze and fly,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 209–216, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2885575>
- [18] D. Lee, J. G. Kang, and S. Han, “A highly maneuverable flying squirrel drone with agility-improving foldable wings,” *arXiv*, 2025, Preprint. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.09609>
- [19] D. Floreano and R. J. Wood, “Science, technology and the future of small autonomous drones,” *Nature*, vol. 521, pp. 460–466, 2015.
- [20] Dohyeon Lee, “[RA-L] A Highly Maneuverable Flying Squirrel Drone With Agility-Improving Foldable Wings,” [Online, Video]. YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=O8nrip18azY>, apr 2025, Revisado el 16 de junio de 2025.
- [21] X. Cao, Z. Gu, and J. Li, “Dynamic analysis of wing deployment of high altitude balloon-borne UAV,” in *MATEC Web of Conferences*, vol. 198. EDP Sciences, 2018, p. 05004. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819805004>
- [22] E. Palermo, “Pocket-size drone can fold up like origami,” *Live Science*, 2015. [Online]. Available: <https://www.livescience.com/50866-tiny-foldable-drone.html>
- [23] N. Bucki, J. Tang, and M. W. Mueller, “Design and control of a midair-reconfigurable quadcopter using unactuated hinges,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 39, no. 1, pp. 539–557, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TRO.2022.3193792>
- [24] L. Dajose, “Mid-air transformation helps flying, rolling robot to transition smoothly,” *Caltech News*, may 2023. [Online]. Available: <https://www.caltech.edu/about/news/mid-air-transformation-helps-flying-rolling-robot-to-transition-smoothly>
-



-
- [25] B. Coxworth, "Flying robot morphs mid-air to land and roll on wheels," *New Atlas*, may 2023. [Online]. Available: <https://newatlas.com/robotics/atmo-flying-wheeled-morphing-robot/>
- [26] V. Riviere, A. Manecy, and S. Viollet, "Agile robotic fliers: A morphing-based approach," *Soft Robotics*, vol. 5, no. 5, pp. 541–553, 2018, pMID: 29846133. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1089/soro.2017.0120>
- [27] M. Bartlett and B. Wilcox, "Morphing drone through shape change for multimodal vehicles," Virginia Tech Intellectual Properties (VTIP), 2024, tech ID: 23-004. [Online]. Available: <http://vtip.technologypublisher.com/technology/55600>
- [28] D. Hwang, E. J. Barron III, A. B. M. T. Haque, and M. D. Bartlett, "Shape morphing mechanical metamaterials through reversible plasticity," *Science Robotics*, vol. 7, no. 63, Feb 2022. [Online]. Available: <https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.abg2171>
- [29] T. Lungu and R. M. Botez, "A brief review of the actuation systems of the morphing systems in wind tunnel models and a case study," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 627, pp. 302–308, 2014. [Online]. Available: <https://www.scientific.net/AMM.627.302>
- [30] S. Haykin, *Neural networks and learning machines*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2009.
- [31] I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, *Deep learning*. Cambridge, MA: MIT press, 2016.
- [32] D. E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [33] J. Pearl, *Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1988.
- [34] L. Breiman, "Random forests," *Machine learning*, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, 2001.
- [35] K. Deb, *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2002.
- [36] H. Manchola, "Biela manivela excentrica biela," <https://harnalmanchola.wordpress.com/2013/08/18/biela-manivela-excentrica-biela/>, 2013.
- [37] D. H. Myszka, *Máquinas y mecanismos*, 4th ed. Pearson Educación, 2012.
- [38] Y. Li, J. Wang *et al.*, "Kinematics and dynamics simulation of feed mechanism of sewing machine based on SimMechanics," *Advanced Materials Research*, vol. 694-697, pp. 31–34, 2013. [Online]. Available: <https://10.4028/www.scientific.net/AMR.694-697.31>
- [39] R. L. Norton, *Diseño de maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*, 6th ed. McGraw-Hill Education, 2020.
- [40] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 11th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2020.
- [41] K. Arunprasath, M. Vijayakumar, M. Ramarao, T. Arul, S. Peniel Pauldoss, M. Selwin, B. Radhakrishnan, and V. Manikandan, "Dynamic mechanical analysis performance of pure 3D printed polylactic acid (PLA) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS)," *Materials Today: Proceedings*, vol. 50, pp. 1559–1562, 2022, 2nd
-



International Conference on Functional Material, Manufacturing and Performances (ICFMMP-2021). [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321059101>

- [42] J. D. Ferry, *Viscoelastic Properties of Polymers*. Wiley, 1980.
- [43] L. Ranakoti, B. Gangil, S. K. Mishra, T. Singh, S. Sharma, R. A. Ilyas, and S. El-Khatib, “Critical review on polylactic acid: Properties, structure, processing, biocomposites, and nanocomposites,” *Materials*, vol. 15, no. 12, p. 4312, jun 2022, pMID: 35744371. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ma15124312>
- [44] E. González Ballón and C. Guillermo Abarca, “Evaluación de las propiedades mecánicas de compuestos biodegradables elaborados con Ácido Poliláctico (PLA) y reforzados con cáscara de arroz,” Tesis de Licenciatura, Universidad Católica de Santa María (UCSM), 2015. [Online]. Available: <https://repositorio.ucsm.edu.pe/server/api/core/bitstreams/401c539f-8c7c-43a4-9fc1-bff69cbc0f6c/content>
- [45] IBM. (2021, Sep.) Bagging. IBM. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/bagging>
- [46] P. C. Phillips, “Epistasis—the essential role of gene interactions in the structure and evolution of genetic systems,” *Nature Reviews Genetics*, vol. 9, no. 11, pp. 855–867, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/nrg2452>
- [47] J. E. García-Farieta, A. Hurtado Márquez, M. Mancera, and D. Hernández, “El jerk, su explicación más allá de la derivada de la aceleración sustentada en una práctica de laboratorio,” 2019.

ANEXOS

Contenido de Anexos

A	Glosario	111
A.1	Siglas y Acrónimos	112
B	Códigos de los Algoritmos Genéticos	114
B.1	AG Unidimensional	114
B.2	AG Bidimensional	119
B.3	AG Cuadrimensional	125
C	Planos Mecánicos del Dron	126



A Glosario

En este anexo se muestra un glosario organizado alfabéticamente para clarificar los conceptos técnicos, términos o acrónimos empleados en este escrito. El lector podrá acceder a estas definiciones haciendo clic en los hipervínculos que acompañan a cada término la primera vez que se mencionan en el documento.

Acrilonitrilo Butadeno Estireno Es un polímero termoplástico amorfo muy resistente y versátil, resultado de combinar tres monómeros que le otorgan dureza (estireno), resistencia química (acrilonitrilo) y tenacidad (butadieno). Es popular en juguetes como LEGO. [71](#)

Arquitectura Monolítica Modular (Modulith) es un patrón de diseño de software donde una aplicación única y cohesionada se divide internamente en módulos lógicos bien definidos, débilmente acoplados y con límites claros, mejorando la organización del código. [49](#)

bagging (Bootstrap Aggregating) Es una técnica de ensamblaje que entrena múltiples árboles de decisión en subconjuntos aleatorios de los datos (muestreo Bootstrap con reemplazo) para reducir la varianza y el sobreajuste (overfitting), creando un modelo más robusto y preciso al combinar sus predicciones (por voto para clasificación o promedio para regresión) [\[45\]](#). [19](#)

creep Fenómeno característico de los materiales viscoelásticos en el cual se produce una deformación progresiva dependiente del tiempo cuando el material es sometido a una tensión constante o cuasi-constante, incluso si dicha tensión es inferior a su límite elástico [\[42\]](#). También se conoce como *fluencia*. [99](#)

epistasia ocurre cuando el efecto de un gen (o variable) sobre la aptitud (fitness) depende de los valores de otros genes, dificultando la optimización al enmascarar soluciones prometedoras [\[46\]](#). [68](#)

hiperplanos es un límite de decisión que separa diferentes categorías de datos. [19](#)

jerk Tasa de cambio de la aceleración en el tiempo, correspondiente a la tercera derivada de la posición. Se utiliza para controlar la suavidad del movimiento en sistemas mecánicos, evitando movimientos bruscos y vibraciones [\[47\]](#). [32](#)

Modelado por Deposición Fundida es la tecnología que construye objetos capa por capa, fundiendo y extruyendo filamentos termoplásticos a través de un cabezal calentado. [71](#)

overfitting También conocido como “sobreajuste”, en los árboles de decisión ocurre cuando el modelo aprende los datos de entrenamiento con demasiado detalle, capturando incluso el ruido y las fluctuaciones aleatorias, en lugar de los patrones subyacentes generales. Esto resulta en un modelo con un error de entrenamiento muy bajo, pero un error de validación (con datos nuevos) relativamente alto. [19](#)

Polímero Reforzado con Fibra de Carbono Es un material compuesto de alta resistencia y peso ligero que combina fibras de carbono fuertes con una matriz polimérica (como resina epoxi) para crear un material mucho más robusto. [71](#)



Random Forest Random Forest (Bosque Aleatorio) es una técnica de aprendizaje automático que crea un conjunto (“ensemble”) de múltiples árboles de decisión para mejorar la precisión y estabilidad, superando las limitaciones de un solo árbol, como el sobreajuste, mediante el entrenamiento de cada árbol con subconjuntos aleatorios de datos y características, y combinando sus predicciones (por mayoría de votos o promedio) para una respuesta final más robusta y fiable [34]. 19

threading La programación con hilos (*threading*) permite ejecutar múltiples tareas concurrentemente dentro de un mismo programa, dividiendo un proceso en subtarefas más pequeñas llamadas hilos (*threads*) que comparten memoria y recursos, mejorando la eficiencia para tareas de entrada/salida (I/O) como descargas o peticiones de red. 53

Ácido Poliláctico es un plástico biodegradable y renovable, comúnmente hecho de almidón de maíz o caña de azúcar. Es ideal para prototipado rápido y muy frecuentemente usado para impresión 3D (FDM). 71

A.1. Siglas y Acrónimos

ABS Acrilonitrilo Butadeno Estireno. 71

AG *Algoritmo Genético*. Son métodos de optimización estocástica basados en la teoría de la evolución natural [32]. 18, 33, 34, 60, 62

BMC *Biela-Manivela-Corredora*. 26, 49, 59

CAD *Diseño Asistido por Computadora*. 76

CFRP Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*, por sus siglas en inglés). 71

DL *Deep Learning*. Aprendizaje Profundo. 18

ETA *Estimated Time of Arrival*. Tiempo Estimado de Llegada, en computación se utiliza como la estimación del tiempo restante hasta la finalización de un proceso. 53

FDM Modelado por Deposición Fundida (*Fused Deposition Modeling*, por sus siglas en inglés). 71

GUI *Graphical User Interface*. Interfaz Gráfica de Usuario, es un sistema visual que permite interactuar con programas y sistemas operativos mediante iconos, botones y menús, en lugar de comandos de texto, haciendo la computación más intuitiva y fácil de usar para cualquier persona. 3, 53, 58

MVC *Modelo-Vista-Controlador*. Es un patrón de diseño de software que organiza aplicaciones separando la lógica de negocio (Modelo), la interfaz de usuario (Vista) y el manejo de eventos (Controlador) en tres componentes interconectados. 53

OTS *Off-The-Shelf*. Componentes comerciales listos para usar que no requieren desarrollo personalizado. 71



PLA *Ácido Poliláctico* (*Polylactic Acid*, por sus siglas en inglés). [71](#)

RMSE *Root Mean Square Error*. Raíz del Error Cuadrático Medio, es una métrica fundamental en modelos de regresión que cuantifica la diferencia promedio entre los valores predichos y los valores reales, expresada en las mismas unidades que la variable objetivo, penalizando más los errores grandes. Indica la precisión del modelo; un valor de RMSE más bajo significa un mejor ajuste y un mejor rendimiento predictivo. [52](#), [62](#), [63](#)

RNA *Redes Neuronales Artificiales*. Son modelos computacionales inspirados en la estructura biológica del cerebro, capaces de aproximar funciones complejas no lineales [\[30\]](#). [18](#)

SAR *Search And Rescue*. Búsqueda y Rescate [\[1\]](#). Normalmente se le agrega una “O” (para Operación/Operation) o una “M” (para misión), es decir, SARO/SARM. [5–7](#), [49](#)

UAV *Unmanned Aerial Vehicle*. Vehículo Aéreo No Tripulado. [5](#), [26](#), [28](#)

B Códigos de los Algoritmos Genéticos

En este apartado de anexos se presentan todos los códigos utilizados en la [Sección II.2.3](#) con la final de que si el lector de esta tesis quiere ejecutarlos por sí mismo, tenga forma de hacerlo. Del mismo modo, es importante hacer mención de que para una explicación detallada y paso a paso sobre el funcionamiento principal de cada uno de los códigos aquí desarrollados, habrá que regresar a la sección correspondiente de acuerdo con la cantidad de variables evaluadas por el AG, todas ellas se encuentran en el [Capítulo II](#).

B.1. AG Unidimensional

El siguiente código fuente en lenguaje Python corresponde a la implementación del Algoritmo Genético unidimensional. Para consultar la teoría, configuración de hiperparámetros y la explicación detallada de la arquitectura de este código, diríjase a la [Sección II.2.4](#).

ag_1d_completo.py

```
1 """
2 =====
3 ALGORITMO GENETICO -- EJEMPLO 1D
4 Problema real: Maximizar  $f(x) = x * \sin(10 * \pi * x) + 1.0$  en  $x$  en
   [-1, 2]
5 Funcion multimodal con multiples maximos locales
6 =====
7 Requisitos: pip install numpy matplotlib scipy
8 Ejecutar   : python ag_1d_completo.py
9
10 Archivos generados (fondo blanco, 300 dpi, listos para tesis):
11 fig1a_1d_funcion_objetivo.png
12 fig1b_1d_convergencia.png
13 fig1c_1d_distribucion_poblacional.png
14 =====
15 """
16
17 import numpy as np
18 import matplotlib.pyplot as plt
19 import matplotlib.ticker as ticker
20 from scipy.signal import argrelextrema
21
22 # -- Reproducibilidad -----
23 np.random.seed(42)
24
25 # =====
26 # ESTILO GLOBAL
27 # =====
28 plt.rcParams.update({
29     'figure.facecolor': 'white',
30     'axes.facecolor': 'white',
31     'axes.edgecolor': '#333333',
32     'axes.linewidth': 0.8,
```

```

33     'axes.grid':          True,
34     'grid.color':         '#CCCCCC',
35     'grid.linewidth':     0.5,
36     'grid.linestyle':     '--',
37     'xtick.color':        '#333333',
38     'ytick.color':        '#333333',
39     'xtick.labelsize':    9,
40     'ytick.labelsize':    9,
41     'axes.labelsize':     10,
42     'axes.titlesize':     11,
43     'axes.titleweight':   'bold',
44     'axes.labelcolor':    '#333333',
45     'legend.framealpha':  0.9,
46     'legend.edgecolor':   '#AAAAAA',
47     'legend.fontsize':    8.5,
48     'font.family':        'serif',
49     'savefig.dpi':         300,
50     'savefig.bbox':        'tight',
51     'savefig.facecolor':  'white',
52 })
53
54 C_AZUL      = '#1565C0'
55 C_ROJO      = '#C62828'
56 C_VERDE     = '#2E7D32'
57 C_NARANJA   = '#E65100'
58 C_GRIS      = '#757575'
59 C_MORADO    = '#6A1B9A'
60
61 # =====
62 #  PARAMETROS DEL ALGORITMO
63 # =====
64 POP_SIZE      = 50
65 GEN_MAX       = 100
66 P_MUTATION    = 0.15
67 SIGMA_MUT     = 0.05
68 ELITE_COUNT   = 2
69 X_MIN, X_MAX  = -1.0, 2.0
70
71 # =====
72 #  FUNCION OBJETIVO Y OPERADORES GENETICOS
73 # =====
74 def fitness(x):
75     return x * np.sin(10 * np.pi * x) + 1.0
76
77 def seleccion_torneo(poblacion, aptitudes, k=3):
78     idx = np.random.choice(len(poblacion), k, replace=False)
79     return poblacion[idx[np.argmax(aptitudes[idx])]]
80
81 def cruce_aritmetico(p1, p2):
82     a = np.random.rand()

```

```

83     return a * p1 + (1 - a) * p2, (1 - a) * p1 + a * p2
84
85 def mutacion_gaussiana(ind):
86     if np.random.rand() < P_MUTATION:
87         ind += np.random.normal(0, SIGMA_MUT)
88     return np.clip(ind, X_MIN, X_MAX)
89
90 # =====
91 #  NUCLEO DEL AG
92 #  =====
93 def ejecutar_ag():
94     pob = np.random.uniform(X_MIN, X_MAX, POP_SIZE)
95     h_mejor, h_prom, h_pob = [], [], []
96
97     for _ in range(GEN_MAX):
98         apt = fitness(pob)
99         h_mejor.append(np.max(apt))
100        h_prom.append(np.mean(apt))
101        h_pob.append(pob.copy())
102
103        elite = pob[np.argsort(apt)[-ELITE_COUNT:]].copy()
104        nueva = []
105        while len(nueva) < POP_SIZE - ELITE_COUNT:
106            p1 = seleccion_torneo(pob, apt)
107            p2 = seleccion_torneo(pob, apt)
108            h1, h2 = cruce_aritmetico(p1, p2)
109            nueva.extend([mutacion_gaussiana(h1), mutacion_gaussiana(h2
110                                )])
111            pob = np.concatenate([elite, np.array(nueva[:POP_SIZE -
112                                ELITE_COUNT])])
113
114        apt_f = fitness(pob)
115        i_opt = np.argmax(apt_f)
116        return pob[i_opt], apt_f[i_opt], h_mejor, h_prom, h_pob
117
118 # =====
119 #  RUTINAS DE GENERACION DE FIGURAS
120 #  =====
121 def fig_funcion(x_opt, f_opt):
122     fig, ax = plt.subplots(figsize=(7.5, 4.2))
123     x_v = np.linspace(X_MIN, X_MAX, 600)
124     y_v = fitness(x_v)
125
126     ax.plot(x_v, y_v, color=C_AZUL, lw=1.8, label=r'$f(x) = x \cdot \sin(10\pi x) + 1$')
127     idx_max = argrelextrema(y_v, np.greater, order=10)[0]
128     ax.scatter(x_v[idx_max], y_v[idx_max], color=C_MORADO, s=40, zorder
129                =4, alpha=0.75, label='Maximos locales')
130     ax.axvline(x_opt, color=C_ROJO, ls='--', lw=1.0, alpha=0.55)

```

```

128     ax.scatter([x_opt], [f_opt], color=C_ROJO, s=90, zorder=5, label=f'
        Optimo:  $x^*=\{x\_opt:.4f\}$ ,  $f=\{f\_opt:.4f\}$ ')
129
130     ax.set_xlabel('$x$')
131     ax.set_ylabel('$f(x)$')
132     ax.set_title('Funcion Objetivo Multimodal -- Optimizacion 1D')
133     ax.legend(loc='upper left')
134     ax.xaxis.set_minor_locator(ticker.AutoMinorLocator())
135     ax.yaxis.set_minor_locator(ticker.AutoMinorLocator())
136     plt.savefig('fig1a_1d_funcion_objetivo.png')
137     plt.close()
138
139 def fig_convergencia(f_opt, h_mejor, h_prom):
140     fig, ax = plt.subplots(figsize=(7.5, 4.2))
141     gens = list(range(GEN_MAX))
142
143     ax.plot(gens, h_mejor, color=C_VERDE, lw=2.0, label='Mejor
        individuo (elitismo)')
144     ax.plot(gens, h_prom, color=C_NARANJA, lw=1.4, ls='--', label='
        Promedio poblacional')
145     ax.axhline(f_opt, color=C_ROJO, ls=':', lw=1.2, label=f'
        Convergencia final:  $\{f\_opt:.4f\}$ ')
146
147     ax.set_xlabel('Generacion')
148     ax.set_ylabel('Aptitud --  $f(x)$ ')
149     ax.set_title('Curva de Convergencia -- AG 1D')
150     ax.legend(loc='lower right')
151     ax.xaxis.set_minor_locator(ticker.AutoMinorLocator())
152     ax.yaxis.set_minor_locator(ticker.AutoMinorLocator())
153     plt.savefig('fig1b_1d_convergencia.png')
154     plt.close()
155
156 def fig_distribucion(h_pob):
157     fig, ax = plt.subplots(figsize=(7.5, 4.2))
158     x_v = np.linspace(X_MIN, X_MAX, 600)
159     y_v = fitness(x_v)
160     ax.plot(x_v, y_v, color=C_AZUL, lw=1.4, alpha=0.30, zorder=1, label=
        '$f(x)$')
161
162     snaps = {
163         0: (C_GRIS, 's', 'Gen 1 (inicial)'),
164         9: (C_NARANJA, 'D', 'Gen 10'),
165         29: (C_MORADO, '^', 'Gen 30'),
166         99: (C_VERDE, 'o', 'Gen 100 (final)')
167     }
168     for gen_idx, (color, marker, etiqueta) in snaps.items():
169         pob = h_pob[gen_idx]
170         apt = fitness(pob)
171         ax.scatter(pob, apt, color=color, marker=marker, s=28, alpha
            =0.85, zorder=3, label=etiqueta)

```

```

172
173     ax.set_xlabel('$x$')
174     ax.set_ylabel('$f(x)$')
175     ax.set_title('Distribucion Poblacional por Generacion -- AG 1D')
176     ax.legend(loc='upper left', ncol=2)
177     ax.xaxis.set_minor_locator(ticker.AutoMinorLocator())
178     ax.yaxis.set_minor_locator(ticker.AutoMinorLocator())
179     plt.savefig('fig1c_1d_distribucion_poblacional.png')
180     plt.close()
181
182 # =====
183 # PUNTO DE ENTRADA
184 # =====
185 if __name__ == '__main__':
186     print("=====
187         ")
188     print(" AG 1D -- Maximizacion de funcion multimodal")
189     print(f" Poblacion: {POP_SIZE} | Generaciones: {GEN_MAX}")
190     print("=====
191         ")
192
193     x_opt, f_opt, h_mejor, h_prom, h_pob = ejecutar_ag()
194
195     print(f"\n Optimo encontrado:")
196     print(f"      x* = {x_opt:.6f}")
197     print(f"      f(x*) = {f_opt:.6f}")
198     print(f"      Error vs. teorico (2.8503): {abs(f_opt - 2.8503) /
199         2.8503 * 100:.3f} %")
200
201     print("\n Generando figuras...")
202     fig_funcion(x_opt, f_opt)
203     fig_convergencia(f_opt, h_mejor, h_prom)
204     fig_distribucion(h_pob)
205     print("\n 3 figuras guardadas (300 dpi, fondo blanco).")
206     print("=====
207         ")

```

A continuación, se muestra la salida arrojada por la consola tras la ejecución del Algoritmo Genético, demostrando la convergencia hacia el óptimo global con un margen de error minúsculo.


```
>_ output_ag_1d.log
```

```
=====
AG 1D -- Maximizacion de funcion multimodal
Poblacion: 50 | Generaciones: 100
=====

[OK] Optimo encontrado:
x* = 1.850428
f(x*) = 2.850261
Error vs. teorico (2.8503): 0.001 %

[OK] Generando figuras...
Guardada -> fig1a_1d_funcion_objetivo.png
Guardada -> fig1b_1d_convergencia.png
Guardada -> fig1c_1d_distribucion_poblacional.png

3 figuras guardadas (300 dpi, fondo blanco).
=====
```

B.2. AG Bidimensional

A continuación, se presenta el código fuente en lenguaje Python correspondiente a la implementación del Algoritmo Genético bidimensional. Este modelo resuelve la optimización de la superficie multimodal y genera automáticamente los gráficos tridimensionales, mapas de calor e histogramas explicados en la **Sección ??**.

```
ag_2d_completo.py
```

```
1 """
2 =====
3 ALGORITMO GENETICO -- EJEMPLO 2D
4 Problema real: Maximizar  $f(x_1, x_2) = \cos(5 \cdot r) \cdot \exp(-0.1 \cdot r^2)$ ,  $r = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$ 
5 en el dominio  $x_1, x_2$  en  $[-3, 3]$ 
6 Superficie multimodal con anillos concentricos decrecientes
7 =====
8 Requisitos: pip install numpy matplotlib scipy
9 Ejecutar : python ag_2d_superficie_multimodal.py
10
11 Archivos generados (fondo blanco, 300 dpi, listos para tesis):
12 fig2a_2d_superficie_3d.png
13 fig2b_2d_mapa_calor_poblacion.png
14 fig2c_2d_convergencia.png
15 fig2d_2d_histograma_aptitudes.png
```

```

16 =====
17 """
18
19 import numpy as np
20 import matplotlib.pyplot as plt
21 import matplotlib.ticker as ticker
22 from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D # noqa: F401
23
24 np.random.seed(7)
25
26 # =====
27 # ESTILO GLOBAL
28 # =====
29 plt.rcParams.update({
30     'figure.facecolor': 'white',
31     'axes.facecolor': 'white',
32     'axes.edgecolor': '#333333',
33     'axes.linewidth': 0.8,
34     'axes.grid': True,
35     'grid.color': '#CCCCCC',
36     'grid.linewidth': 0.5,
37     'grid.linestyle': '--',
38     'xtick.color': '#333333',
39     'ytick.color': '#333333',
40     'xtick.labelsize': 9,
41     'ytick.labelsize': 9,
42     'axes.labelsize': 10,
43     'axes.titlesize': 11,
44     'axes.titleweight': 'bold',
45     'axes.labelcolor': '#333333',
46     'legend.framealpha': 0.9,
47     'legend.edgecolor': '#AAAAAA',
48     'legend.fontsize': 8.5,
49     'font.family': 'serif',
50     'savefig.dpi': 300,
51     'savefig.bbox': 'tight',
52     'savefig.facecolor': 'white',
53 })
54
55 C_AZUL = '#1565C0'
56 C_ROJO = '#C62828'
57 C_VERDE = '#2E7D32'
58 C_NARANJA = '#E65100'
59 C_GRIS = '#757575'
60 C_MORADO = '#6A1B9A'
61
62 # =====
63 # PARAMETROS
64 # =====
65 POP_SIZE = 80

```

```

66 GEN_MAX      = 150
67 P_MUTATION   = 0.20
68 SIGMA_MUT    = 0.30
69 ELITE_COUNT   = 3
70 BOUNDS = np.array([[-3.0, 3.0], [-3.0, 3.0]])
71
72 # Malla para graficas
73 N_GRID = 80
74 x1g = np.linspace(-3, 3, N_GRID)
75 x2g = np.linspace(-3, 3, N_GRID)
76 X1, X2 = np.meshgrid(x1g, x2g)
77 R_GRID = np.sqrt(X1**2 + X2**2)
78 Z_GRID = np.cos(5 * R_GRID) * np.exp(-0.1 * R_GRID**2)
79
80 # =====
81 #  FUNCION OBJETIVO
82 #  =====
83 def fitness(pob):
84     x1, x2 = pob[:, 0], pob[:, 1]
85     r = np.sqrt(x1**2 + x2**2)
86     return np.cos(5 * r) * np.exp(-0.1 * r**2)
87
88 # =====
89 #  OPERADORES
90 #  =====
91 def torneo(pob, apt, k=4):
92     idx = np.random.choice(len(pob), k, replace=False)
93     return pob[idx[np.argmax(apt[idx])]].copy()
94
95 def cruce_blend(p1, p2, alpha=0.5):
96     d = np.abs(p1 - p2)
97     lo = np.minimum(p1, p2) - alpha * d
98     hi = np.maximum(p1, p2) + alpha * d
99     return (lo + np.random.rand(2) * (hi - lo),
100            lo + np.random.rand(2) * (hi - lo))
101
102 def mutacion(ind, sigma):
103     mascara = np.random.rand(2) < P_MUTATION
104     ind = ind + mascara * np.random.normal(0, sigma, 2)
105     return np.clip(ind, BOUNDS[:, 0], BOUNDS[:, 1])
106
107 # =====
108 #  NUCLEO DEL AG
109 #  =====
110 def ejecutar_ag():
111     pob = np.random.uniform(BOUNDS[:, 0], BOUNDS[:, 1], (POP_SIZE, 2))
112     h_mejor, h_prom, h_pob = [], [], []
113
114     for gen in range(GEN_MAX):
115         apt = fitness(pob)

```

```

116         h_mejor.append(float(np.max(apt)))
117         h_prom.append(float(np.mean(apt)))
118         if gen % 10 == 0:
119             h_pob.append((gen, pob.copy(), apt.copy()))
120
121         sigma = SIGMA_MUT * (1 - gen / GEN_MAX) + 0.02
122         elite = pob[np.argsort(apt)[-ELITE_COUNT:]].copy()
123         nueva = []
124         while len(nueva) < POP_SIZE - ELITE_COUNT:
125             p1 = torneo(pob, apt)
126             p2 = torneo(pob, apt)
127             h1, h2 = cruce_blend(p1, p2)
128             nueva.append(mutacion(h1, sigma))
129             if len(nueva) < POP_SIZE - ELITE_COUNT:
130                 nueva.append(mutacion(h2, sigma))
131         pob = np.vstack([elite, np.array(nueva)])
132
133         apt_f = fitness(pob)
134         i_opt = np.argmax(apt_f)
135         return pob[i_opt].copy(), apt_f[i_opt], h_mejor, h_prom, h_pob
136
137 # =====
138 # FIGURA 2A -- Superficie 3D
139 # =====
140 def fig_superficie(x_opt, f_opt):
141     fig = plt.figure(figsize=(7.5, 5.5))
142     ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
143     ax.set_facecolor('white')
144     fig.patch.set_facecolor('white')
145
146     ax.xaxis.pane.fill = True; ax.xaxis.pane.set_facecolor('white')
147     ax.yaxis.pane.fill = True; ax.yaxis.pane.set_facecolor('white')
148     ax.zaxis.pane.fill = True; ax.zaxis.pane.set_facecolor('#F5F5F5')
149     ax.xaxis.pane.set_edgecolor('#CCCCCC')
150     ax.yaxis.pane.set_edgecolor('#CCCCCC')
151     ax.zaxis.pane.set_edgecolor('#CCCCCC')
152
153     surf = ax.plot_surface(X1, X2, Z_GRID, cmap='Blues',
154                           linewidth=0, antialiased=True, alpha=0.88)
155     fig.colorbar(surf, ax=ax, shrink=0.5, aspect=12, pad=0.08,
156                 label='$f(x_1, x_2)$')
157
158     ax.scatter([x_opt[0]], [x_opt[1]], [f_opt + 0.04],
159               color=C_R0J0, s=80, zorder=5, label='Optimo hallado')
160
161     ax.set_xlabel('$x_1$', labelpad=6)
162     ax.set_ylabel('$x_2$', labelpad=6)
163     ax.set_zlabel('$f(x_1, x_2)$', labelpad=6)
164     ax.set_title('Superficie Multimodal -- Optimizacion 2D\n(vista isometrica)')

```

```

165     ax.view_init(elev=35, azim=45)
166     ax.tick_params(labelsize=7)
167
168     plt.savefig('fig2a_2d_superficie_3d.png')
169     plt.close()
170
171 # =====
172 #  FIGURA 2B -- Mapa de calor + distribucion poblacional
173 #  =====
174 def fig_mapa_calor(x_opt, h_pob):
175     fig, ax = plt.subplots(figsize=(6.0, 5.2))
176
177     cf = ax.contourf(X1, X2, Z_GRID, levels=25, cmap='Blues')
178     fig.colorbar(cf, ax=ax, label='$f(x_1, x_2)$')
179     ax.contour(X1, X2, Z_GRID, levels=10, colors='white',
180               linewidths=0.3, alpha=0.4)
181
182     snaps = [
183         (h_pob[0], C_ROJO, 'o', 'Gen 0 (inicial)'),
184         (h_pob[1], C_NARANJA, 's', 'Gen 10'),
185         (h_pob[3], C_MORADO, '^', 'Gen 30'),
186         (h_pob[-1], C_VERDE, 'D', f'Gen {h_pob[-1][0]} (final)'),
187     ]
188     for (gen_idx, pob, _), color, marker, etiqueta in snaps:
189         ax.scatter(pob[:, 0], pob[:, 1], color=color, marker=marker,
190                   s=16, alpha=0.75, label=etiqueta)
191
192     ax.scatter(*x_opt, color=C_ROJO, s=120, marker='*', zorder=6,
193               edgecolors='black', linewidths=0.5, label='Optimo
194                  hallado')
195
196     ax.set_xlabel('$x_1$')
197     ax.set_ylabel('$x_2$')
198     ax.set_title('Mapa de Aptitud y Distribucion Poblacional -- AG 2D')
199     ax.legend(loc='lower right', fontsize=7.5, ncol=2)
200
201     plt.savefig('fig2b_2d_mapa_calor_poblacion.png')
202     plt.close()
203 # =====
204 #  FIGURA 2C -- Curva de convergencia
205 #  =====
206 def fig_convergencia(f_opt, h_mejor, h_prom):
207     fig, ax = plt.subplots(figsize=(7.5, 4.2))
208     gens = list(range(GEN_MAX))
209
210     ax.plot(gens, h_mejor, color=C_VERDE, lw=2.0,
211           label='Mejor individuo (elitismo)')
212     ax.plot(gens, h_prom, color=C_NARANJA, lw=1.4, ls='--',
213           label='Promedio poblacional')

```

```

214     ax.axhline(1.0, color=C_AZUL, ls=':', lw=1.0, alpha=0.7,
215                label='Optimo global teorico: $f(0,0)=1.0$')
216     ax.axhline(f_opt, color=C_ROJO, ls='--', lw=1.0, alpha=0.6,
217                label=f'Convergencia real: {f_opt:.5f}')
218
219     ax.set_xlabel('Generacion')
220     ax.set_ylabel('Aptitud -- $f(x_1, x_2)$')
221     ax.set_title('Curva de Convergencia -- AG 2D')
222     ax.legend(loc='lower right')
223     ax.xaxis.set_minor_locator(ticker.AutoMinorLocator())
224     ax.yaxis.set_minor_locator(ticker.AutoMinorLocator())
225
226     plt.savefig('fig2c_2d_convergencia.png')
227     plt.close()
228
229 # =====
230 # FIGURA 2D -- Histograma de aptitudes (generacion final)
231 # =====
232 def fig_histograma(f_opt, h_pob):
233     fig, ax = plt.subplots(figsize=(6.0, 4.0))
234
235     apt_final = h_pob[-1][2]
236     ax.hist(apt_final, bins=20, color=C_AZUL, edgecolor='white',
237            alpha=0.80, label='Distribucion de aptitudes')
238     ax.axvline(f_opt, color=C_ROJO, lw=1.8, ls='--',
239               label=f'Mejor: {f_opt:.4f}')
240
241     ax.set_xlabel('Aptitud -- $f(x_1, x_2)$')
242     ax.set_ylabel('Frecuencia')
243     ax.set_title('Distribucion de Aptitudes -- Generacion Final (AG 2D)')
244
245     ax.legend()
246     ax.yaxis.set_minor_locator(ticker.AutoMinorLocator())
247
248     plt.savefig('fig2d_2d_histograma_aptitudes.png')
249     plt.close()
250 # =====
251 # PUNTO DE ENTRADA
252 # =====
253 if __name__ == '__main__':
254     print("=" * 60)
255     print("  AG 2D -- Superficie multimodal con anillos concentricos")
256     print(f"  Poblacion: {POP_SIZE} | Generaciones: {GEN_MAX}")
257     print("=" * 60)
258
259     x_opt, f_opt, h_mejor, h_prom, h_pob = ejecutar_ag()
260
261     print(f"\n  Optimo encontrado:")
262     print(f"      x1* = {x_opt[0]:.6f}   (teorico: 0.0)")

```

```

263     print(f"      x2* = {x_opt[1]:.6f} (teorico: 0.0)")
264     print(f"      f* = {f_opt:.6f} (teorico: 1.0)")
265     print(f"      Error: {abs(f_opt - 1.0) * 100:.4f} %")
266     print("\n  Generando figuras...")
267
268     fig_superficie(x_opt, f_opt)
269     fig_mapa_calor(x_opt, h_pob)
270     fig_convergencia(f_opt, h_mejor, h_prom)
271     fig_histograma(f_opt, h_pob)
272
273     print("\n  4 figuras guardadas (300 dpi, fondo blanco).")
274     print("=" * 60)

```

Salida obtenida tras la compilación y ejecución exitosa del sistema 2D:

>_ output_ag_2d.log

```

=====
AG 2D -- Superficie multimodal con anillos concentricos
Poblacion: 80 | Generaciones: 150
=====

[OK] Optimo encontrado:
x1* = 0.000000 (teorico: 0.0)
x2* = -0.000000 (teorico: 0.0)
f* = 1.000000 (teorico: 1.0)
Error: 0.0000 %

[OK] Generando figuras...
Guardada -> fig2a_2d_superficie_3d.png
Guardada -> fig2b_2d_mapa_calor_poblacion.png
Guardada -> fig2c_2d_convergencia.png
Guardada -> fig2d_2d_histograma_apititudes.png

4 figuras guardadas (300 dpi, fondo blanco).
=====

```

B.3. AG Cuadrimensional

C Planos Mecánicos del Dron

Aquí se incluyen los dibujos técnicos y planos de fabricación detallados de los componentes mecánicos del sistema, optimizados para su manufactura.

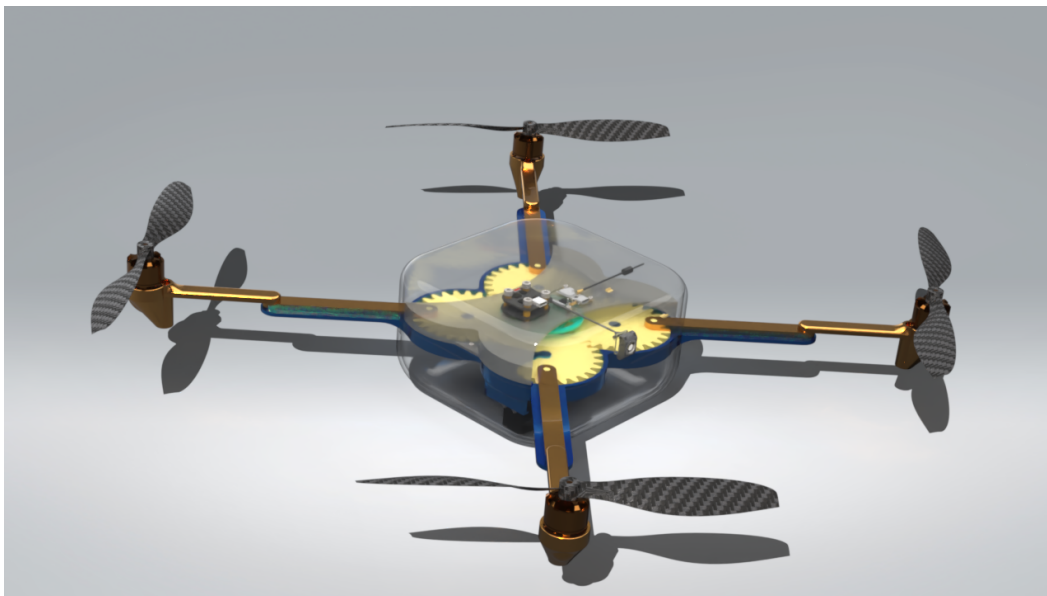
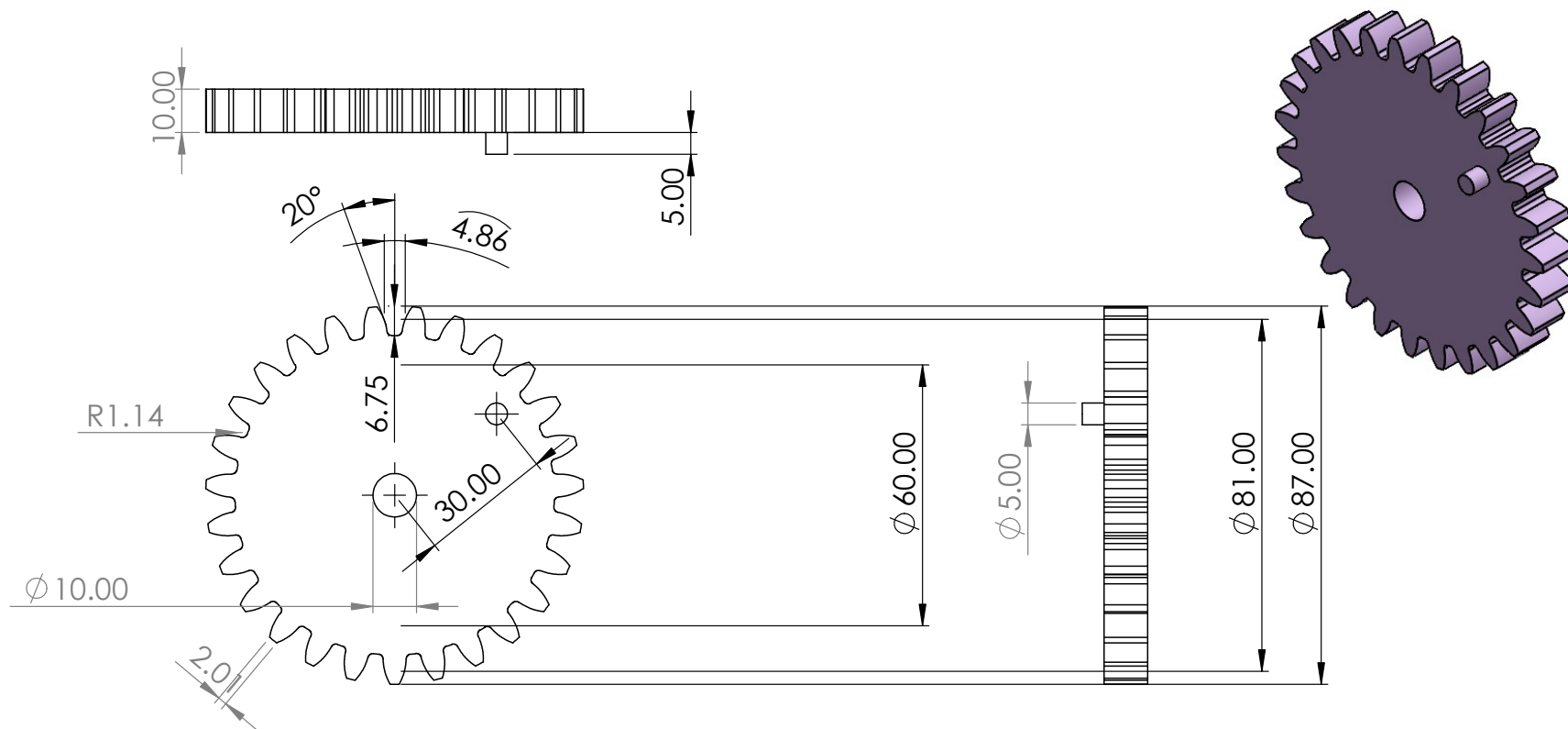


Figura V.1: Render del ensamble general del mecanismo de despliegue.

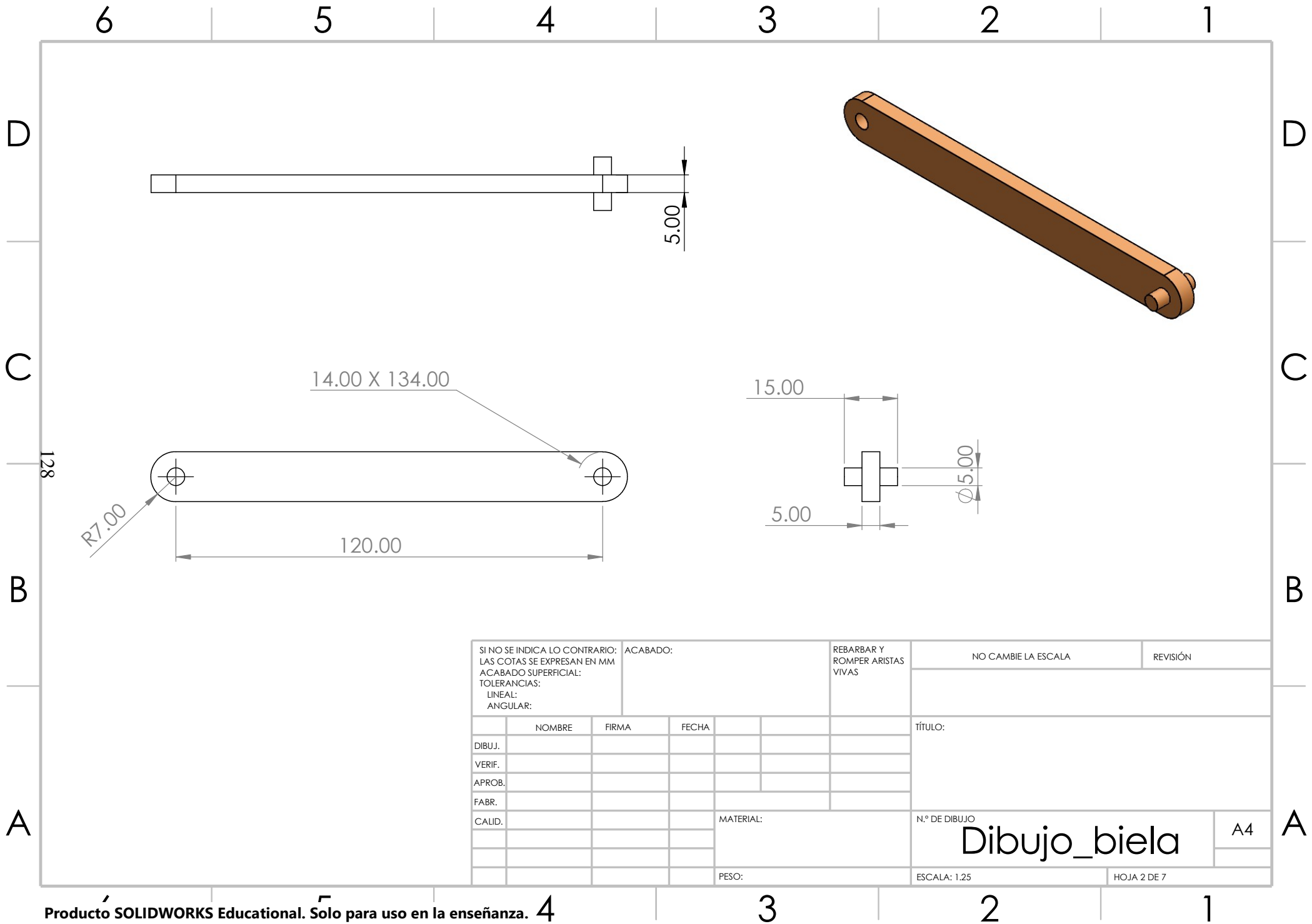
Contenido de este anexo

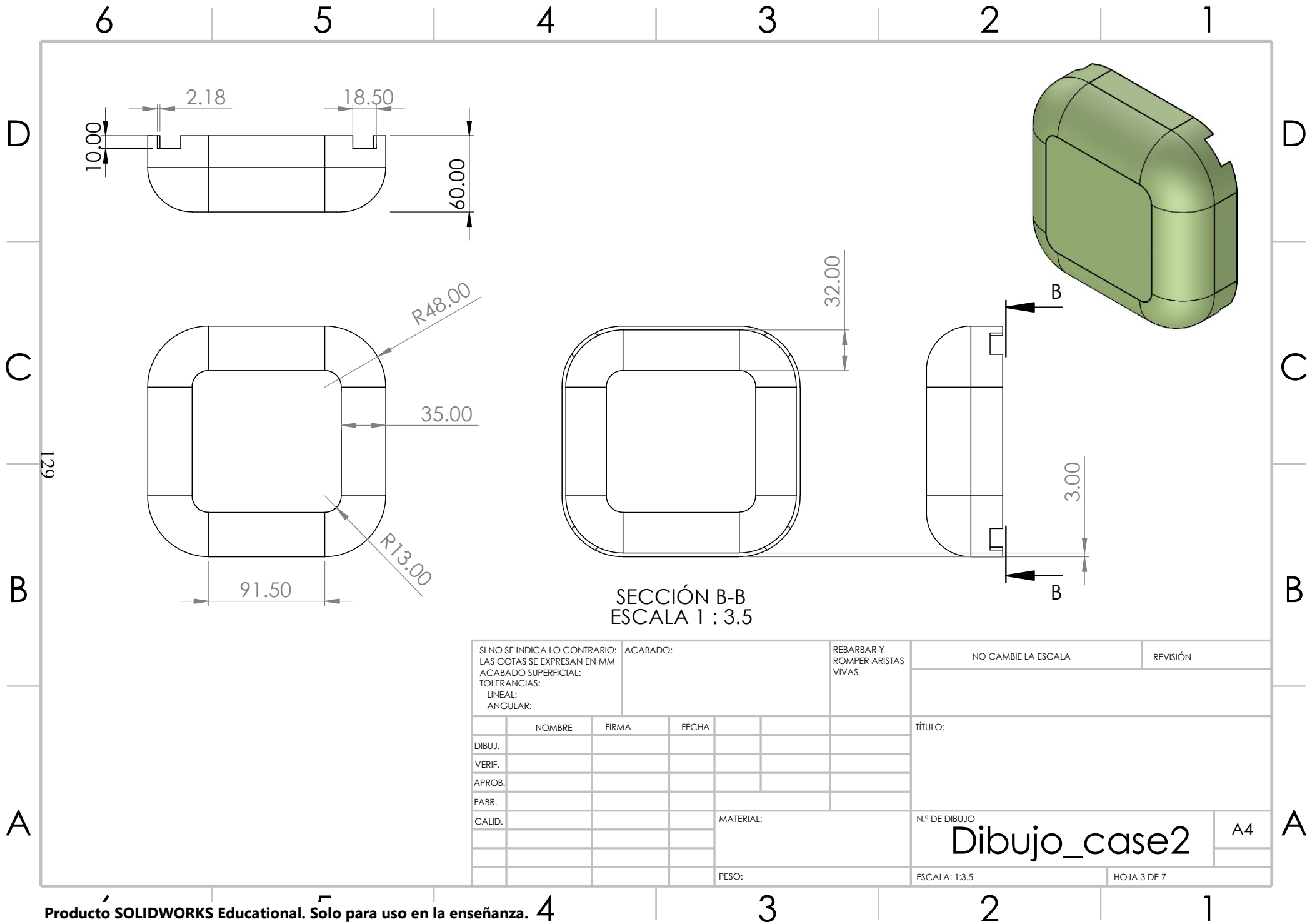
A continuación se detalla la ubicación de cada uno de los elementos integrados:

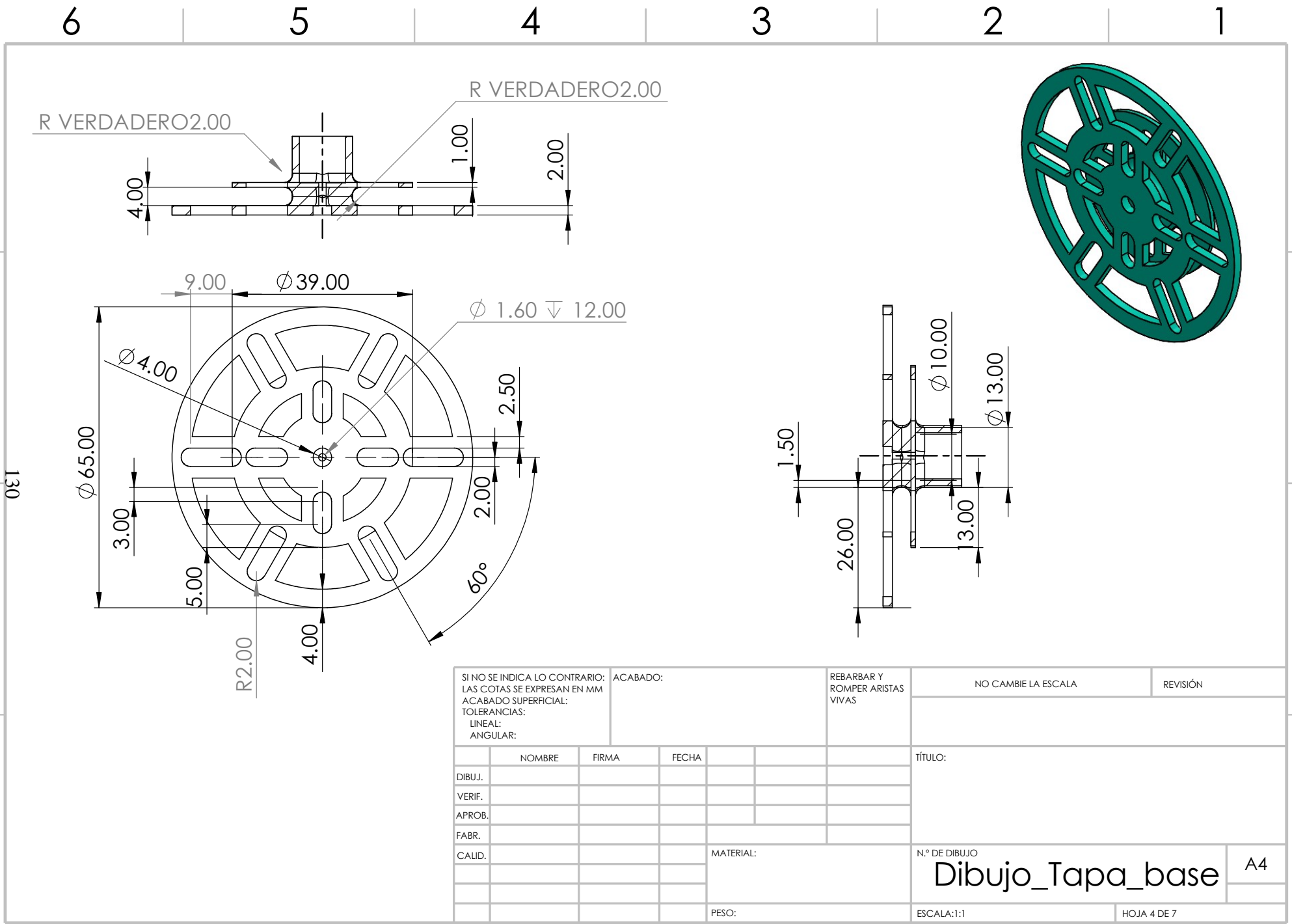
- **Plano D.1:** Dibujo de engrane Pág. [127](#)
- **Plano D.2:** Dibujo de biela Pág. [128](#)
- **Plano D.3:** Dibujo de Case 2 Pág. [129](#)
- **Plano D.4:** Dibujo de Tapa Base Pág. [130](#)
- **Plano D.5:** Dibujo de Tapa Superior Pág. [131](#)
- **Plano D.6:** Dibujo de brazo Pág. [132](#)
- **Plano D.7:** Dibujo de Case 1 Pág. [133](#)



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
						TÍTULO: N.º DE DIBUJO Dibujo_engrane A4			
NOMBRE		FIRMA		FECHA					
DIBUJ.									
VERIF.									
APROB.									
FABR.									
CALID.				MATERIAL:					
				PESO:		ESCALA: 1:1,5		HOJA 1 DE 7	







SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE				FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ.											
VERIF.											
APROB.											
FABR.											
CALID.											
						MATERIAL:		N.º DE DIBUJO			
								Dibujo_Tapa_base			
								ESCALA:1:1			
						PESO:		HOJA 4 DE 7			

