

**Título del Proyecto  
de Investigación a que corresponde el Reporte Técnico:**

DISEÑO Y MODELADO DE BIOROBOTS

**Tipo de financiamiento**

Sin financiamiento

**TÍTULO DEL REPORTE TÉCNICO**

Autores del reporte técnico:

Edgar Alonso Martínez García  
Rafael Torres Cordoba  
Victor Manuel Carrillo Saucedo  
Elifalet López Gonzalez

# DISEÑO Y MODELADO DE BIOROBOTS

## **Resumen del reporte técnico en español:**

En este proyecto se propusieron varios diseños de plataformas robóticas biónicas: un sistema biomecánico de un robot acuático de aleta dorsal, así como también el sistema articulado de nado de un vehículo subacuático propulsado por aletas articuladas. Además como temas centrales se presentaron el análisis matemático y el control estos biorobots, los cuales fueron validados por simulación en 3D. También se diseñaron: la estructura biónica de un robot insecto trepador, así como también el de un arácnido hexápodo caminante con un mecanismo subactuado de tres actuadores, con funcionalidad cuasi-omnidireccional. En ambos casos, se desarrollaron el análisis cinemático y el control dinámico con propiedades variantes en el tiempo, validados por simulaciones en 3D. Finalmente, se diseñó una prótesis de mano antropomórfica para sustitución, con un análisis enfocado en el análisis cinemático de la destreza musculo-esquelética, y un modelo de control dinámico retroalimentado por odometría visual externa y lectura de señales electromiográficas.

## **Resumen del reporte técnico en inglés :**

In this research numerous bionic robotic platform models were proposed: an underwater robot comprised of a dorsal fin biomechanical system. Likewise, an underwater vehicle with propulsion exerted by asynchronous multi-articulated swimming limbs. As key issues, the mathematical models and the locomotion controller algorithms were developed, which were validated through 3D numerical simulations. In addition, the following were types of robotic models were designed: the bionic limb's structure resembling a climbing-like insect; a hexapod spider-like multi-legged walking robot with an underactuated locomotion mechanism deploying three rotary actuators, which ultimately provided quasi-omnidirectional mobility. In both cases, the kinematic analysis and the dynamic time-variant controller, were validated through 3D numerical simulations. Eventually, a bio-mechatronic higher-limb prosthesis was designed resembling anthropomorphic dexterity for substitution, and an analysis focused on the muscle-skeletal kinematics controlled by a recursive model and feedback comprised of external visual odometry and electromyographic biosignals.

**Palabras clave: biorobot, modelado, actuadores, control dinamico, sensado**

**Usuarios potenciales (del proyecto de investigación): UACJ**

## 1. INTRODUCCIÓN

Los robots son entidades artificiales que buscan realizar y mejorar las actividades diarias del hombre, preservando niveles de autonomía e inteligencia en los que el hombre no tenga la necesidad de intervenir en la realización de las tareas o misiones robotizadas. Por ejemplo, los vehículos inteligentes para transportación en entornos urbanos, robots multi-morfológicos para búsqueda y rescate en zonas de desastre, robots de campo e industriales realizando tareas repetitivas y de larga duración, robots de servicios que interactúan con seres humanos, robots domésticos que realizan actividades de limpieza y organización en el hogar, robots de búsqueda y exploración espacial y/o reparación en el espacio, robots subacuáticos que modelan y reconstruyen el entorno submarino, asistentes personales que auxilian al ser humano en sus actividades laborales, robots de limpieza y construcción, robots aéreos también conocidos como drones, etc. Sin embargo, existe una diversidad de factores los cuales a la fecha todavía limitan y alejan a los robots de realizar tareas generales o específicas con verdadera autonomía e inteligencia. Algunos de esos factores limitantes son: los sistemas actuales de computo y los dispositivos físicos disponibles no poseen todavía capacidades de paralelismo masivo tal como cualquier entidad biológica simple si posee.

La idoneidad de los materiales con que se manufacturan los sensores para diferentes entornos físicos. Los actuadores y las partes móviles de una plataforma robótica por lo general no son completamente idóneos debido a la rigidez y/o tamaños, lo cual se debe a la dependencia tecnológica disponible en el mercado. La incertidumbre inherente que perturba la adquisición de datos en los dispositivos sensoriales. El software y los sistemas operativos son de propósito general, y no con enfoque puramente robótico diseñados para gestionar procesos y recursos de cerebros artificiales. Los algoritmos de sensado y los esquemas perceptuales se vuelven ineficientes cuando la complejidad computacional se incrementa debido al uso masivo de datos. Además, la mayoría de los algoritmos de control se enfrentan a robots cuya tecnología es redundantemente activa [2], ocasionando que la movilidad se vea artificial y mecanizada (movimientos discretizados), y no con

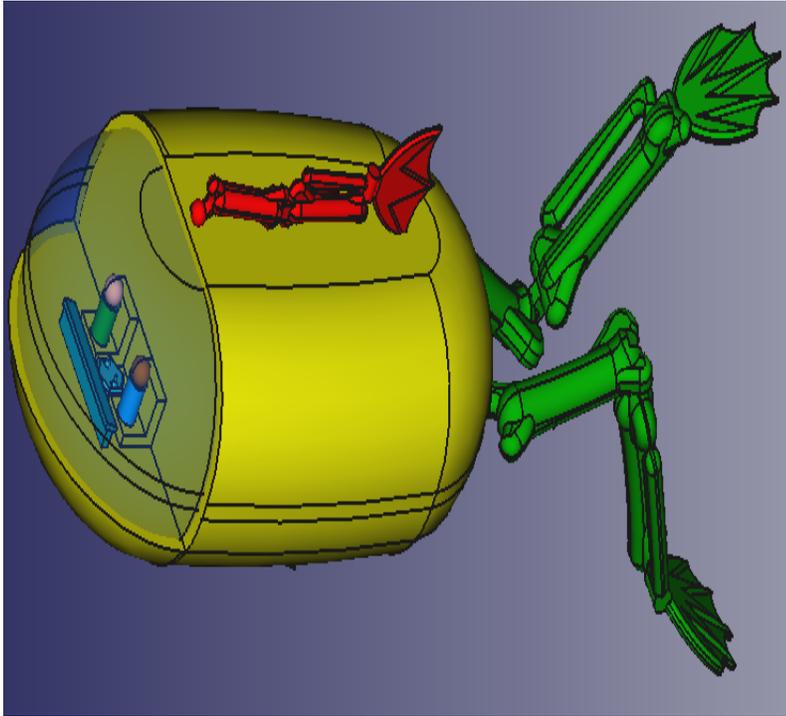
movilidad natural como lo hacen las entidades biológicas con subsistemas inherentemente subactuados.

Los sistemas subactuados aprovechan mejor el uso de la energía inercial, y la energía de sistemas conservativos como la gravitacional. Mientras estos factores no se resuelvan, las maquinas inteligentes estarán todavía muy distantes de equipararse a las funciones que un ser humano u otra entidad biológica son capaces de realizar. De tal manera, el enfoque primordial de este proyecto es el diseño y análisis matemático para modelar biorobots con destreza de movimientos, manipulabilidad, y maniobrabilidad del movimiento utilizando mecanismos bioinspirados y subactuados [1].

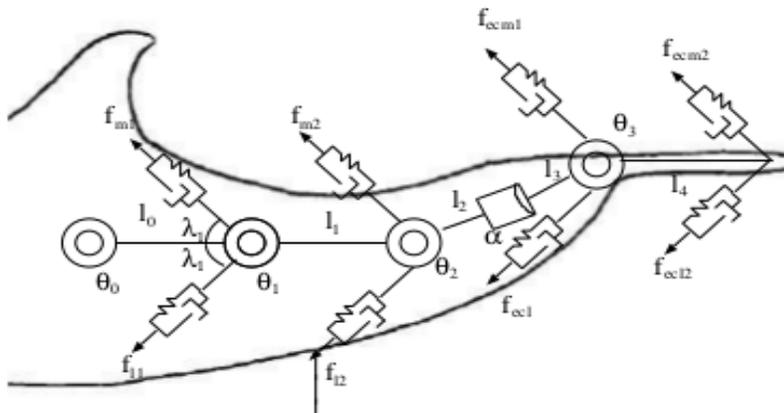
En este proyecto se diseñaron tres tipos de modelos de plataformas biorrobóticas: dos subacuáticas, dos del tipo insectos, y una del tipo exoesqueleto. También se estableció un enfoque analítico en el modelado de sus sistemas físicos, sus modalidades de control, así como la simulación en 3D.

En este proyecto se diseñaron: un sistema biomecánico de un robot acuático de aleta dorsal (figura 1b), así como también el sistema articulado de nado de un vehículo subacuático propulsado por aletas articuladas (figura 1a). Además como temas centrales se presentaron el análisis matemático y el control estos biorobots, los cuales fueron validados por simulación en 3D.

a)



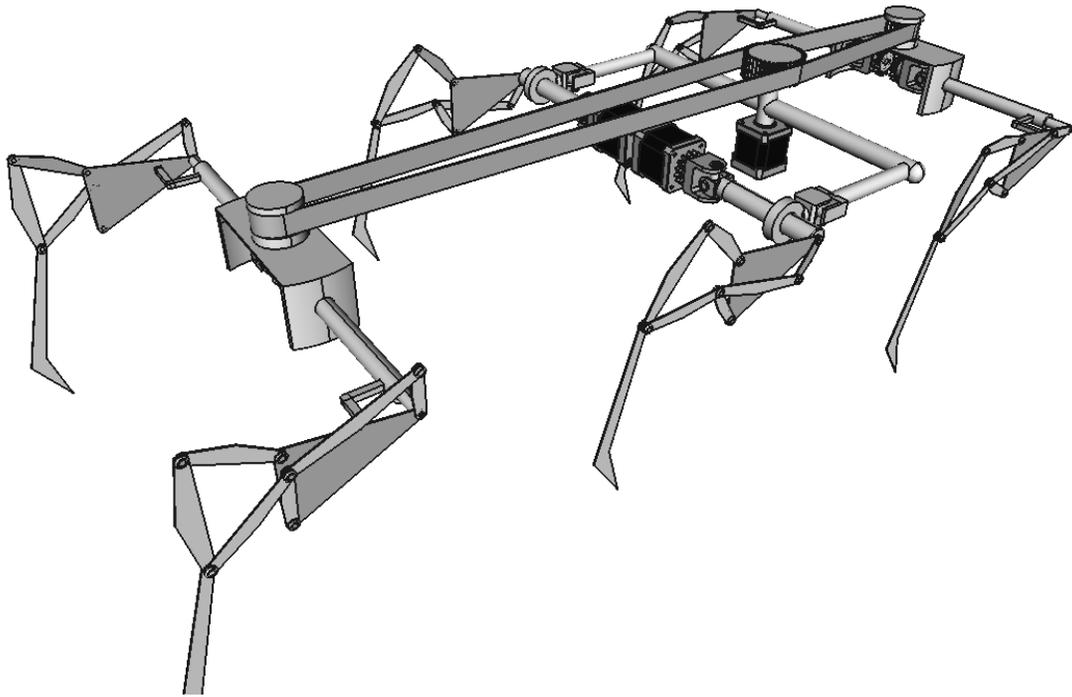
b)



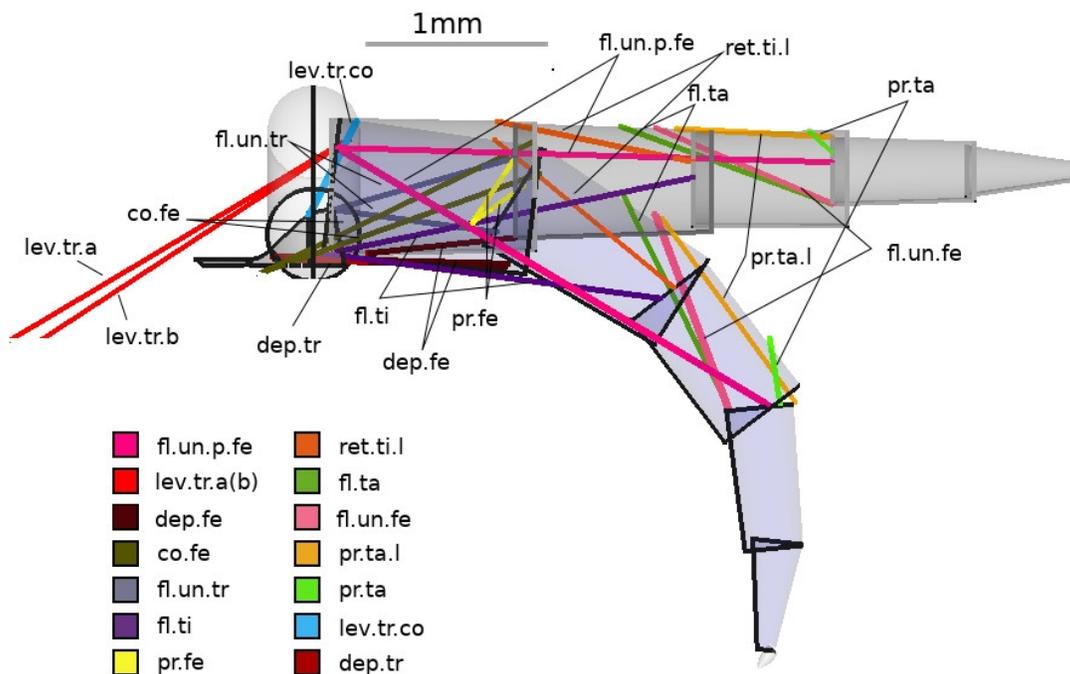
**Figura 1.** Biorobots acuáticos propuestos. a) Robot acuático articulado. b) Modelo elástico subactuado de propulsión dorsal.

También se diseñaron: la estructura biónica de un robot insecto trepador; así como también el de un arácnido hexápodos caminante, tal como se muestran en la figura 2.

a)



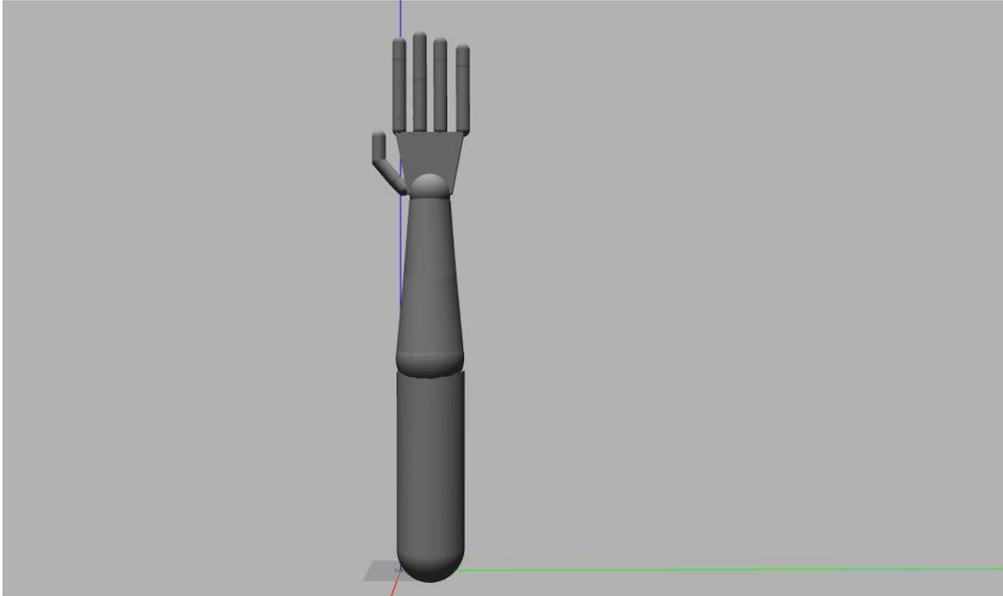
b)



**Figura 2.** Biorobots tipo insecto. a) Arácnido subactuado. b) Extremidad trepadora.

De los cuales también se desarrollaron el análisis matemático y el control, validados por simulación en 3D.

Además se diseñó una prótesis de mano antropomórfica para sustitución, con un análisis enfocado a la destreza musculo-esquelética, y su control dinámico, ver la figura 3.



**Figura 3.** Prótesis antropomorfa retroalimentada por señales electromiográficas.

## **2. PLANTEAMIENTO**

### **Antecedentes**

A diferencia de los actuadores eléctricos convencionales (motores DC, a pasos, servos, neumáticos, hidráulicos, etc), los músculos, tendones y ligamentos biológicos, así como sus posturas y proporciones geométricas con los elementos óseos, logran un mayor uso eficiente de la energía y generan movimientos con gran capacidad de destreza. Además, esa capacidad biomecánica, permite que las estructuras de los cuerpos de diferentes entidades biológicas como los insectos, criaturas marinas, cuadrúpedos o aves puedan generar procesos de locomoción altamente eficientes. Esas capacidades biomecánicas inspiradas en la naturaleza permitirán en el futuro próximo crear plataformas robóticas que puedan realizar un mayor número de tareas altamente eficientes, estables, y de larga duración.

La naturaleza provee diseños eficientes en la inteligencia biológica, la cual es el producto de miles de años de evolución, y adaptación de la fauna al entorno del planeta. Por lo

tanto tomar como base el diseño físico de algunas especies para analizar la anatomía [19], es ventajoso para crear robots novedosos y con una ingeniería más eficientes.

## **Marco teórico**

Hay cuatro aspectos generales que actualmente se investigan sobre las entidades biológicas para la emulación y desarrollo de robots: a) la inteligencia y estructura cognitiva de la fauna para crear nuevas arquitecturas computacionales y algoritmos de inteligencia artificial [3,17]. b) el comportamiento y la inteligencia en grupos tal como bancos de peces, rebaños, bandadas de aves, o colonias de insectos [10]; los cuales han permitido crear arquitecturas multi-robots, que realizan misiones complejas basados en esquemas de sincronización, coordinación, y planificación. c) el proceso de locomoción que permite entender como se realiza, y como se eficiencia la energía al rodar, caminar, arrastrar, volar, trepar y nadar [9], y dicho enfoque ha permitido la creación de comportamientos de movilidad en robots que optimizan rutas, tiempo, combustible, u otros recursos aplicados en sistemas robóticos [16]. d) y las estructuras biomecánicas de las entidades biológicas para construir sistemas de control dinámico que mejoren la maniobrabilidad, estabilidad, destreza, y la controlabilidad [4,5].

El interés en este proyecto se centra en el estudio de las estructuras biomecánicas de entidades biológicas para crear modelos de robots artificiales y comprender sus capacidades de destreza y maniobrabilidad [6], abordando una perspectiva del análisis cinemático, dinámico, y de control no lineal variante en el tiempo [18] (ejem. matrices Jacobianas con valores instantáneos). Existen diversas morfologías en la estructura biomecánica de las entidades biológicas proveídas por la naturaleza misma, que de ser emulados se crean máquinas artificiales bioinspiradas, con múltiples extremidades como bípedos [8], cuadrúpedos, hexápodos u octápodos [9,15]. Todos ellos capaces de escalar [20] o caminar sobre una diversidad de tipos de terrenos (acuáticos, arenosos, accidentados, o estructurados por el hombre). Algunos robots combinan las capacidades biológicas de las extremidades con los sistemas rodantes [11]. Otro tipo de morfología con materiales blandos [13] son las aletas y/o extremidades acuáticas cuyos diseños biológicos proveen nado de propulsión potente, o lento de precisión como alerones. Tales

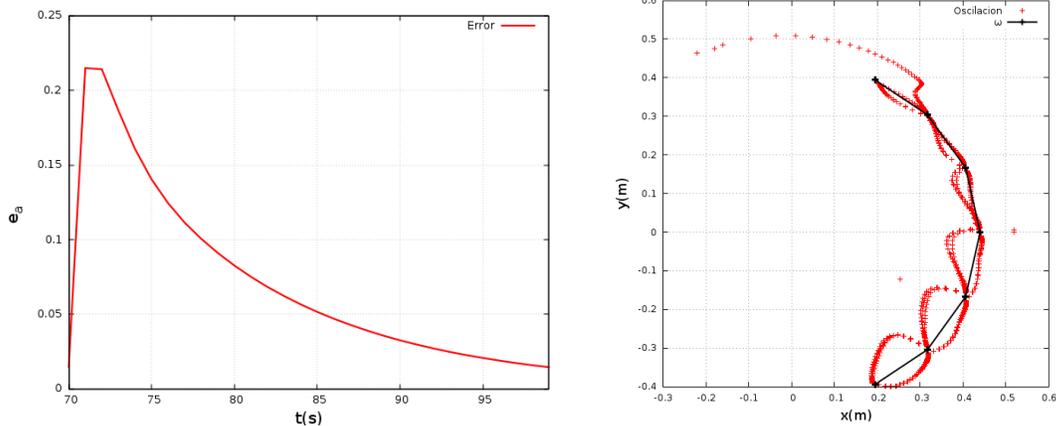
capacidades biomecánicas producen comportamientos locomotivos, cuyos resultados han servido para la exploración del fondo marino, o para el estudio del comportamiento de la inteligencia de grupo de bancos de peces.

En la última década, las entidades biológicas como las aves han inspirado a los investigadores al estudio de la aerodinámica, y la mecánica de vuelo para la creación de aerobots. En principio, para lograr suficiente estabilidad se crearon robots con número de actuadores mayor al número de grados de libertad en el espacio de vuelo. Sin embargo, las características robotizadas de los aerobots son cada vez más cercanas a la naturaleza subactuada de las aves. Los robots aéreos, han permitido realizar misiones de mapeo, vigilancia, entretenimiento, y exploración en diversos campos científicos. Otro aspecto del estudio biomecánico en entidades biológicas también se centra en extremidades para modelar la destreza y la manipulabilidad [7, 14]. Es de interés en la comunidad científica internacional, la creación de exoesqueletos para extremidades superiores e inferiores en humanos para terapia, y rehabilitación. O bien, la creación de prótesis biomecánicas inteligentes para sustitución parcial o total de extremidades.

### **3. METODOLOGÍA**

Las metas se desarrollaron de acuerdo al planteamiento de los objetivos específicos establecidos originalmente en la propuesta de este proyecto. Las metas se agruparon por la clasificación morfológica de los robots, y se llevaron a cabo de manera concurrente, con todos los alumnos tesistas participantes, generalizando un robot-modelo por alumno.

Se analizaron y se estudiaron algunos biomecanismos y la forma en que se genera la locomoción bioinspirada. Se estudiaron los dos casos: un robot bioinspirado en los cetáceos y su movimiento de aleta dorsal; y la de un vehículo robotizado con aletas articuladas, tal como se muestra en la figura 4.



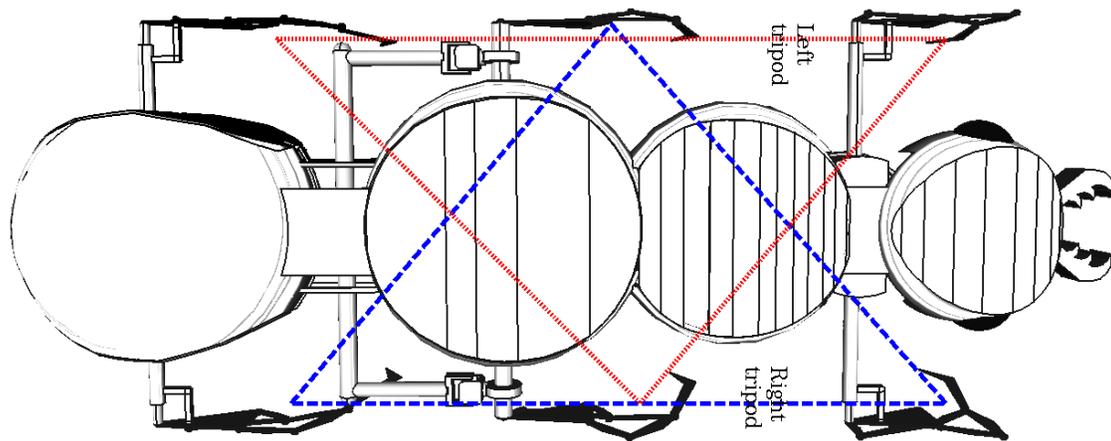
**Figura 4.** Vehículo acuático de propulsión articulada. Izquierda: Error métrico. Derecha: posición métrica.

Se diseñaron los mecanismos artificiales que emulan a los organismos biomecánicos con base en la anatomía biológica, los cuales sirvieron como los modelos físicos a ser modelados.

A partir de los modelos físicos planteados, se establecieron los modelos de las funciones de posición durante el movimiento de locomoción. Mediante análisis matemático y su simulación numérica, se obtuvieron las leyes de control cinemáticas que gobiernan al sistema biomecánico, y se logró ganar entendimiento de los mecanismos artificiales.

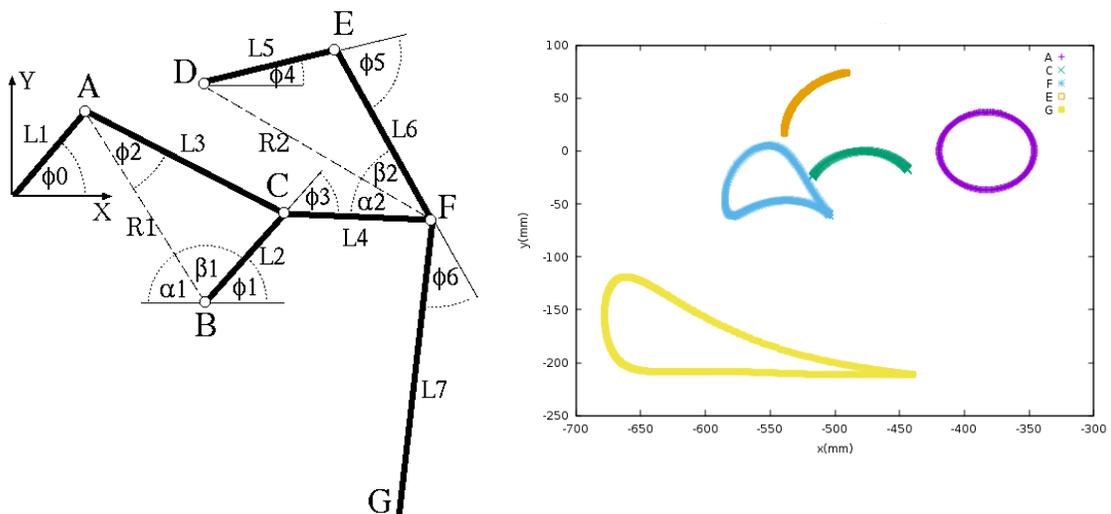
Se documentaron las simulaciones animadas del movimiento de los robots, y la simulación parcial del entorno de trabajo mediante vídeos experimentales. Localizados en el portal de internet del laboratorio de robótica.

Se desarrollo un análisis y estudio de biomecanismos, y de la locomoción bioinspirada de un robot arácnido hexápodos, y de un robot tipo insecto trepador con análisis de destreza, estabilidad y maniobrabilidad.



**Figura 5.** Hexápodo con mecanismo subactuado cuasi-omnidireccional.

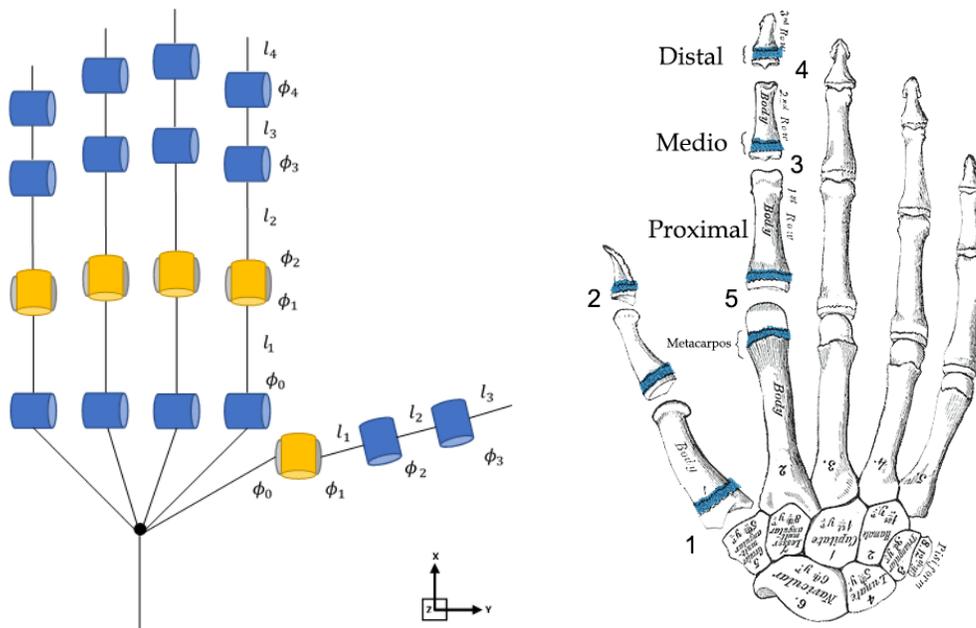
Se diseñaron los mecanismos artificiales que emulan a los organismos biomecánicos, con particular enfoque en la reducción del número de actuadores, particularmente para las extremidades caminantes (figura 6). Se obtuvo el modelado de las funciones de posición, y análisis y simulación de las leyes de control cinemáticas que gobiernan al sistema biomecánico, así como también el modelado y desarrollo del esquema de control dinámico.



**Figura 6.** Extremidades Klann subactuadas del hexápodo.

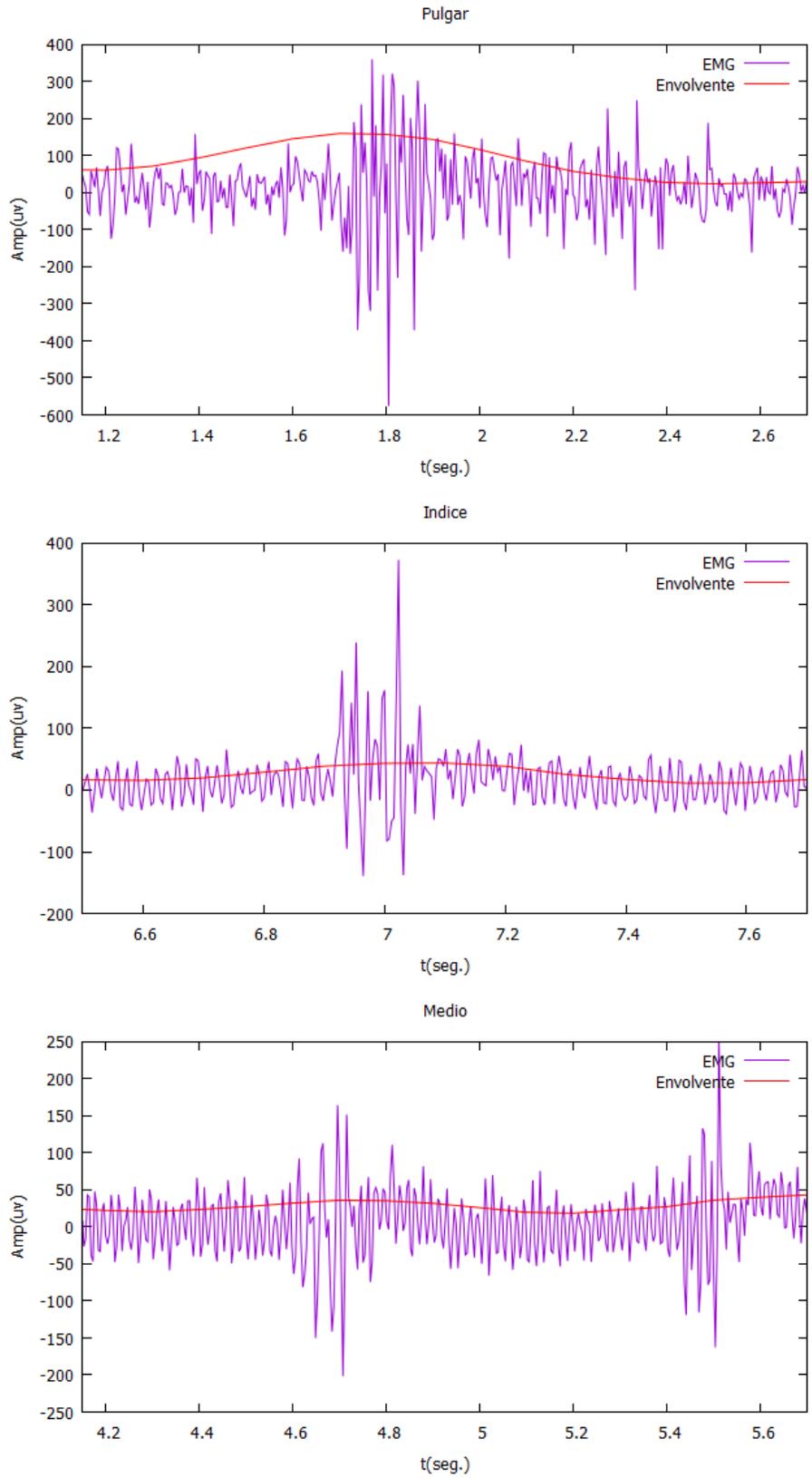
La figura 6 (derecha) es una simulación animada de las extremidades del hexápodo, a partir de las cuales se desarrollaron vídeos experimentales para documentar el trabajo, que se encuentran en el portal de internet del laboratorio de robótica. El anexo 1, muestra el espacio de movilidad y su grado de omnidireccionalidad.

Adicionalmente, para el desarrollo de la prótesis biomecánica, se realizó un análisis y estudio de biomecanismos musculo-esqueléticos, y de la destreza en la manipulación de una mano antropomórfica. El diseño del mecanismo artificial de prótesis para sustitución de miembro superior capaz de emular más del 70% de los grados de libertad de una mano biológica. Se modelaron las funciones de posición, y análisis y simulación de las leyes de control cinemáticas que gobiernan a ambos: el sistema biomecánico; y el mecanismo artificial (figura 7).



**Figura 7.** Mano antropomórfica. Izquierda: aproximación cinemática artificial. Derecha: sistema de falanges real.

A partir del modelo de control dinámico con retroalimentación de señales electromiográficas, se obtuvieron los siguientes resultados de control mostrados en la figura 8.



**Figura 8.** Resultados de control variante en el tiempo y observaciones EMG.

## 4. RESULTADOS

En esta sección se describen los productos académicos obtenidos como resultados de las etapas desarrolladas del proyecto.

### Listado de proyectos de titulación generados

Estudiantes graduados del programa de ingeniería mecatrónica, cuyos proyectos de titulación (tesis) fueron parte del desarrollo del proyecto.

Fecha	Alumno Tesista	Proyecto de titulación
May/18	122308 Edgar Soto Tovar	Análisis Dinámico de un Mecanismo Bioinspirado en la Locomoción de un Cetáceo
Nov/17	120711 José Alfredo Aguilera	Diseño, Modelado y Control de un Bio-Robot Hexápodo Cuasi-Omnidireccional
May/18	131736 Joel Miranda	Modelo de Control Elástico de Bio-Extremidad de un Quilópodo
May/18	120818 Diego Santos	Modelo de Control de una Prótesis Transradial
May/18	Ricardo Rodríguez Baez	Modelo Bio-Mecánico de Ornitóptero Subactuado
Nov/18	105832 Cesar López Carrillo	Modelado y Control Cinemático de Vehículo Subacuático de Aletas Articuladas

### Revistas arbitradas ISI JCR

1) E. Soto-Tovar, E.A. Martinez-Garcia, R. Rodriguez-Jorge, J. Mizera-Pietraszko, Cetacean biomechanic modelling and control by a reduced musculoskeletal lumbar-caudal spine, J. Applied Mathematical Modelling, Elsevier (in review)

2) J. Miranda, E.A. Martinez-Garcia, Elastic control model of a chilopoda bio-extremity, J. Of Micro-Bio Robot, Springer (submitted)

### **Capítulos de libro internacionales**

- 1) J A Aguilera Jimenez, E A Martinez-Garcia, *Chapter: Dynamic Modelling and Control of an Underactuated Quasi-Omnidireccional Hexapod*, Handbook of Research on Advanced Mechatronic Systems and Intelligent Robotics, IGI Global, USA (in review)
  
- 2) L.E. Castro, E.A. Martinez-Garcia, Chapter: *Multisensor fusion for robotic search planning: Thermal vision and RGB-D*, Book: Top 5 Contributions in Sensor and Biosensor Technology: 3rd Edition, Avid Science, 2019.

### **Listado de videos científicos obtenidos**

- 1) Joel Miranda y Edgar A. Martinez-Garcia, *Elastic Control Model of a Chilopoda Bio-Extremity*, <https://www.youtube.com/watch?v=APAXgZcbLGs>
  
- 2) Cesar Lopez y E. A. Martinez-Garcia, *Swimming Oscillation Control of an Unmanned Underwater Vehicle with Articulated Fins*, <https://www.youtube.com/watch?v=e1JCRryTllo>
  
- 3) Edgar Soto y Edgar A. Martinez-Garcia, *Dynamic Biomechanical Modelling of a Cetacea's Fin for Controlled Caudal*, <https://www.youtube.com/watch?v=JjuyAcFHcP8>
  
- 4) Jose Aguilera y Edgar A. Martinez-Garcia, *Modelling and Control of an Underactuated Quasi-omnidirectional Hexapod*, <https://www.youtube.com/watch?v=vMZYBeeBYZw>

## 5. CONCLUSIONES

Se analizaron diferentes biomecanismos robóticos propuestos, y se obtuvieron modelos de locomoción bioinspirada de un robot nadador de aleta dorsal, y de un vehículo con aletas articuladas.

Se validó que el modelado obtenido de las funciones de posición, mediante análisis y simulación de las leyes de control cinemáticas que gobiernan al sistema biomecánico, emularon realísticamente a los mecanismos artificiales.

Los resultados sintetizados de simulación animada de los robots, y simulación parcial del entorno de trabajo. Se documentaron mediante vídeos experimentales y animaciones localizados en el portal de internet del laboratorio de robótica.

También se obtuvo un análisis y estudio de biomecanismos, y de la locomoción bioinspirada de un robot arácnido hexápodos, y de un robot tipo insecto trepador con análisis de destreza, estabilidad y maniobrabilidad. Se diseñaron los mecanismos artificiales que emulan a los organismos biomecánicos, con particular enfoque en la reducción del número de actuadores. El modelado de las funciones de posición, y análisis y simulación de las leyes de control cinemáticas que gobiernan al sistema biomecánico.

Se obtuvo un análisis y estudio de biomecanismos musculo-esqueléticos, y de la destreza en la manipulación de una mano antropomórfica. Se concluye que el diseño del mecanismo artificial de prótesis para sustitución de miembro superior capaz de emular más del 70% de los grados de libertad de una mano biológica. Se estableció el modelado de las funciones de posición, y análisis y simulación de las leyes de control cinemáticas que gobiernan a ambos: el sistema biomecánico; y el mecanismo artificial.

## REFERENCIAS

- [1] E. A. Martinez-Garcia, Numerical Modelling in Robotics, OmniaScience, Spain, Oct. 2015.
- [2] M. Vega, E. Martinez-Garcia, R. Torres, E. Lopez, V. Carrillo, Euler-Lagrange-based holonomic dynamic control for multi-model trajectory, Algebra, Sistemas dinamicos y Matematicas Aplicadas 6, vol. 6, 2016.
- [3] S. Kumar, M.R. Elara, E.A. Martínez-García, R.C. Ambrosio-Lazaro, Towards bio-inspired chromatic behaviours in surveillance robots, Robotics, mdpi, 2016.
- [4] J.K. Sheba, R.E.Mohan, E.A. Martínez-García, L. Tan-Phuc, Trajectory Generation and Stability Analysis for Reconfigurable Klann Mechanismbased Walking Robot, Robotics, 5(3),13; pp. 1-20, mdpi, 2016.
- [5] J. Kulandaiaasan, R.E. Mohan, E.A. Martínez-García, Le Tan-Phuc, Synthesizing reconfigurable foot traces using a Klann mechanism, Robotica, Cambridge University Press, Vol.33, Mar 2015.
- [6] E. A. Martinez-Garcia, L.A. Torres-Mendez, R.E. Mohan, Multi-Legged Robot Dynamics Navigation Model with Optical Flow, Intl. J. of Intelligent Unmanned Systems, 2(2), pp. 121-139, Emerald 2014.
- [7] E. A. Martinez-Garcia, D. R. Uribe, R. E. Mohan, Kinematic Manipulability of Multi-Join Bio-Inspired Extremities, Journal of Procedia Engineering, Vol.64, pp.1533-1542, ScienceDirect, Elsevier 2013.
- [8] E. Martinez, J. Reyes, Patente MX/a/2016/003820, Aparato subactuado de reconfiguración mecanizada para caminata bípeda, Inst. Mexicano de la Propiedad Industrial, 2016.
- [9] P. Ramdya, R. Thandiackal, R. Cherney, T. Asselborn, R. Benton, A.J. Ijspeert, D. Floreano, Climbing favours the tripod gait over alternative faster insect gaits, Nature Communications, 2017.

- [10] E. Ferrante, A.E. Turgut, E. Duéñez-Guzmán, M. Dorigo, T. Wenseleers, Evolution of Self-Organized Task Specialization in Robot Swarms, *Plos Comp Biol*, 11(8), 2015.
- [11] E. Guizzo, E. Ackerman, Boston Dynamics Officially Unveils Its Wheel-Leg Robot: "Best of Both Worlds", *IEEE Spectrum*, Feb 2017.
- [12] Y. Asano, S. Nakashima, T. Kozuki, S. Ookubo, I. Yanokura, Y. Kakiuchi, K. Okada, M. Inaba, Human Mimetic Foot Structure With Multi-DOFs and Multi-Sensors for Musculoskeletal Humanoids,
- [13] S. Mao, E. Dong, H. Jin, M. Xu, K.H. Low, Locomotion and gait analysis of multi-limb soft robots driven by smart actuators, *IEEE/RSJ IROS 2016*
- [14] K. Or, M. Tomura, A. Schmitz, S. Sugano, Position-Force Combination Control with Passive Flexibility for Versatile In-Hand Manipulation Based on Posture Interpolation, *IEEE/RSJ IROS 2016*.
- [15] R.J. Full, M. S. Tu, Mechanics of six-legged runners. *J. Exp. Biol.* 148, 129–146, 1990.
- [16] Clerc, M. Particle Swarm Optimization, Wiley & Sons, 2010.
- [17] S. Daun-Gruhn, A. Buschges, From neuron to behavior: dynamic equation-based prediction of biological processes in motor control. *Biol.Cybernet.* 105, 71–88, 2011.
- [18] C.J. Dallmann, V. Durr, J. Schmitz, J. Joint torques in a freely walking insect reveal distinct functions of leg joints in propulsion and posture control. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 283, 1–9, 2016.
- [19] J. Schmitt, P. Holmes, Mechanical models for insect locomotion: active muscles and energy losses. *Biol. Cybernet.* 89, 43–55, 2003.
- [20] Y.C. Chou, W.S. Yu, K.J. Huang, P.C. Lin, Bio-inspired step-climbing in a hexapod robot. *Bioinspir. Biomim.* 7, 1–19, 2012.

# ANEXO 1

