IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Mecanismo articulado de barras para desplazamiento lineal inspirado en la marcha de un pereiópodo de *Gecarcinus*

Linkage mechanism for linear displacement inspired by the march of a pereiopod of *Gecarcinus*

G. Castro-Daza[1] *, Á. Anzueto-Ríos[1], A. A. Sánchez-Ramírez[1], J. G. Solís-Villela[1]
(*guillermocastrodza@outlook.es)

Recibido: 29 de mayo de 2026 Aceptado: 20 de julio de 2026

Resumen

En este trabajo se analiza cinemáticamente el pereiópodo del cangrejo terrestre *Gecarcinus lateralis* para obtener los parámetros que describen su marcha. A partir de estos datos se construye un modelo matemático del ciclo de marcha promedio mediante una red neuronal multicapa, el cual se emplea para el diseño y construcción de un mecanismo de barras tipo Klann capaz de imitar su desplazamiento lineal. Finalmente, se compara el comportamiento del sistema mecánico con el del organismo biológico mediante métricas espaciales y angulares. Los resultados muestran una semejanza global del 73 % y del 65 % en condiciones de terreno irregular.

Palabras clave: Diseño biónico, Cinemática, Mecanismo de barras, Gecarcinus, Ciclo de marcha

Abstract

In this work, a kinematic analysis of the terrestrial crab *Gecarcinus lateralis* pereiopod is performed to obtain the parameters that describe its gait. Based on these data, a mathematical model of the average gait cycle is developed using a multilayer neural network, which is used to design and build a Klann-type linkage mechanism capable of reproducing its linear locomotion. The behavior of the mechanical system is then compared with the biological organism using spatial and angular metrics. The results show a global similarity of 73 % and 65 % under irregular terrain conditions.

Keywords: Bionic design, Kinematics, Linkage mechanism, Gecarcinus, gait cycle

[1] Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas (UPIITA), Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.

INTRODUCCIÓN

La locomoción bioinspirada ha impulsado el desarrollo de mecanismos capaces de reproducir patrones de movimiento presentes en la naturaleza. En particular, los mecanismos de barras accionados por un único actuador han demostrado ser una alternativa eficiente para generar trayectorias de marcha en robots caminantes [1]. Asimismo, el análisis cinemático de organismos biológicos permite obtener trayectorias articulares, rangos angulares y relaciones geométricas que sirven como base para el diseño de mecanismos bioinspirados.

Los estudios sobre locomoción en crustáceos han mostrado que la coordinación de las articulaciones del pereiópodo les permite desplazarse eficientemente sobre distintos terrenos [2–4]. Estos resultados han motivado el desarrollo de robots inspirados en cangrejos y la optimización de sus mecanismos de locomoción [5–10].

Sin embargo, la aplicación de modelos matemáticos obtenidos a partir del análisis cinemático de crustáceos terrestres para el diseño de mecanismos de barras accionados por un único actuador sigue siendo limitada. En este trabajo se realiza el análisis cinemático de un pereiópodo de *Gecarcinus lateralis*, se obtiene un modelo matemático de su ciclo de marcha promedio mediante una red neuronal multicapa y se diseña un mecanismo con el propósito de utilizar un único actuador para todo el sistema, cuya semejanza con el sistema biológico se evalúa cuantitativamente.

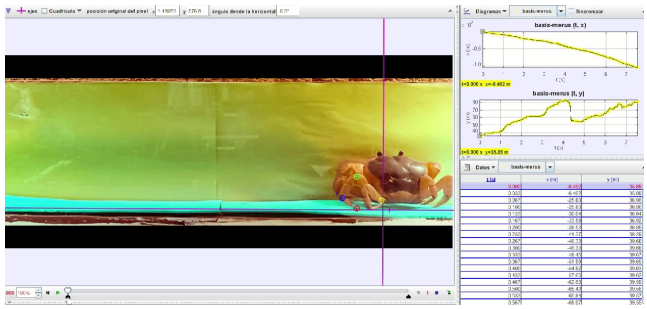
METODOLOGÍA

Análisis cinemático de cangrejo terrestre

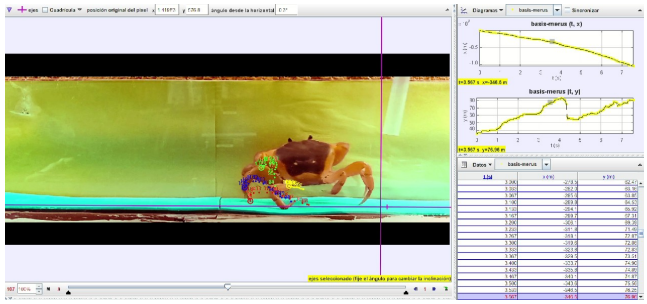
Como primera etapa del trabajo se realiza el análisis cinemático de la marcha de un ejemplar de *Gecarcinus lateralis*. Para ello se registran 12 videos del desplazamiento del organismo sobre una pista que restringe el movimiento lateral, obteniéndose 37 ciclos de marcha con una resolución de 1680×720 píxeles a 60 fps. El seguimiento se realiza sobre un pereiópodo izquierdo, considerando las articulaciones basis–merus, merus–carpus, propus–dactyl y la punta del dactyl, por ser las principales responsables del movimiento durante la marcha. La articulación carpus–propus se establece como un segmento rígido debido a que ambas estructuras se encuentran prácticamente fusionadas en el pereiópodo natural [11].

Posteriormente, los videos son procesados utilizando el software Tracker para obtener los datos de posición en el plano XY de las articulaciones basis–merus, merus–carpus, propus–dactyl y la punta del dactyl. El seguimiento se realiza fotograma por fotograma como lo mostrado en la Figura 1, generando trayectorias de cada articulación durante la marcha. Finalmente, los datos obtenidos se exportan en archivos .csv para su posterior procesamiento y análisis cinemático.

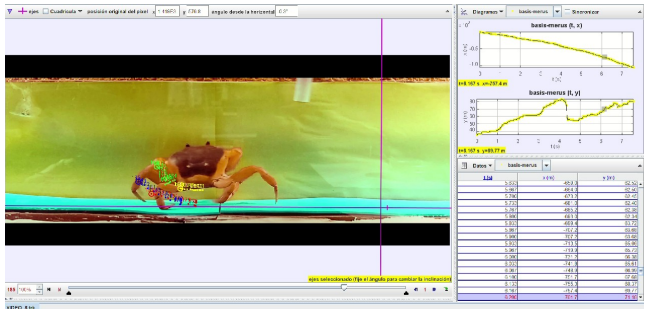
https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47



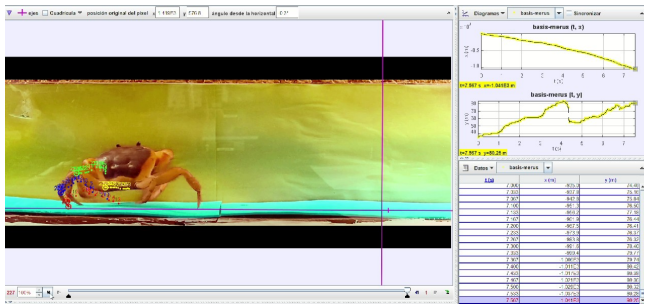
(a) Fotograma de ejemplo 1



(b) Fotograma de ejemplo 2



(c) Fotograma de ejemplo 3



(d) Fotograma de ejemplo 4

FIGURA 1. Secuencias de fotogramas de ejemplo correspondientes a una muestra de video de la marcha del ejemplar, la cual incluye varios ciclos de marcha.

Obtención de modelo matemático

Los datos de posición obtenidos del análisis cinemático son procesados mediante programas desarrollados en Python. Inicialmente, los archivos `.csv` son interpolados y filtrados para completar regiones sin datos y suavizar las trayectorias. Posteriormente, se segmentan los ciclos de marcha a partir del contacto de la punta del dactyl con el suelo, y cada ciclo es normalizado y escalado para obtener conjuntos de datos homogéneos. Finalmente, las trayectorias articulares se promedian, manteniendo constantes las longitudes entre segmentos y fijando la articulación basis–merus, con el fin de obtener un ciclo de marcha promedio cerrado y repetitivo.

Para representar matemáticamente las trayectorias del pereiópodo se implementa una red neuronal multicapa, capaz de aproximar funciones no lineales continuas a partir de datos experimentales sin imponer una forma funcional predeterminada para las trayectorias. El modelo utiliza como parámetro de entrada el porcentaje del ciclo de marcha $t \in [0, 100]$, normalizado como:

$$t' = \frac{t}{100} \in [0, 1]. \tag{1}$$

Debido a que la articulación basis–merus se mantiene fija en el origen, sus coordenadas se consideran constantes y no forman parte de las variables de salida del modelo. Por lo tanto, la red neuronal define una función:

$$f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^6, \tag{2}$$

cuyas salidas corresponden a las coordenadas $(x_i(t'), y_i(t'))$ de las articulaciones merus–carpus, propus–dactyl y la punta del dactyl.

La función se aproxima mediante una red neuronal conectada con tres capas ocultas de 128, 128 y 64 neuronas y funciones de activación tangente hiperbólica:

$$f(t') = W_4 \tanh\Big(W_3 \tanh\big(W_2 \tanh(W_1 t' + b_1) + b_2\big) + b_3\Big) + b_4. \tag{3}$$

El modelo se entrena mediante retropropagación utilizando el optimizador Adam con una tasa de aprendizaje de 10^{-3}. La función objetivo combina el error cuadrático medio (MSE) entre las coordenadas predichas y las experimentales con un término de cierre cíclico que fuerza la coincidencia entre el inicio y el final del ciclo de marcha. El entrenamiento se realiza durante 3000 épocas sobre los datos previamente normalizados. Se selecciona una red neuronal multicapa debido a que a diferencia de aproximaciones basadas en polinomios, splines o series de Fourier, la red neuronal permite aproximar directamente la función que relaciona el porcentaje del ciclo de marcha con la posición de las articulaciones sin imponer una forma funcional predefinida [12]. Además, una vez entrenado, el modelo genera de manera continua las coordenadas articulares a partir de un único parámetro de entrada, facilitando su implementación en el cálculo cinemático y en el diseño posterior del mecanismo.

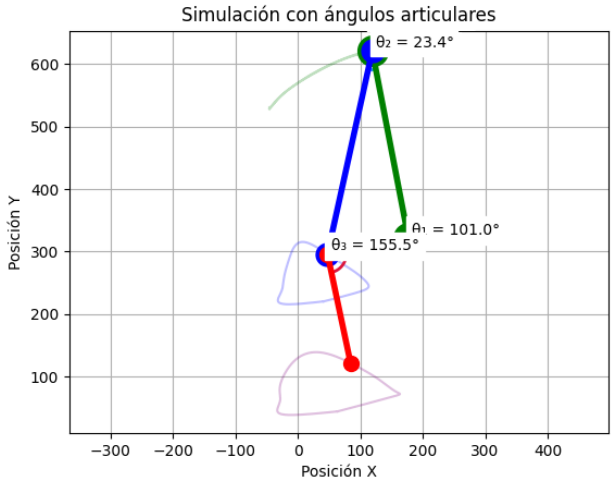
Obtención de ángulos de articulación y longitud de segmentos

Una vez entrenada la red neuronal, se emplea un programa desarrollado en Python para calcular los rangos articulares y las longitudes de los segmentos del pereiópodo mediante la formación de vectores entre articulaciones consecutivas. A partir de estos vectores se obtiene la variación de los ángulos del segmento merus respecto a la horizontal, de la articulación merus-carpus y de la articulación propus-dactyl durante el ciclo de marcha. Posteriormente, el modelo se representa gráficamente mediante una simulación desarrollada en Matplotlib (Figura 2), donde los segmentos merus, carpus-propus y dactyl se muestran en colores verde, azul y rojo, respectivamente.

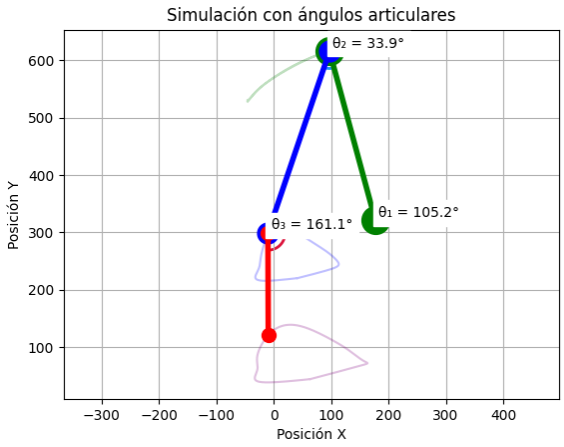
Diseño del mecanismo

Se propone una longitud de referencia de $L_{1prop} = 70$ mm para el segmento análogo al merus, a

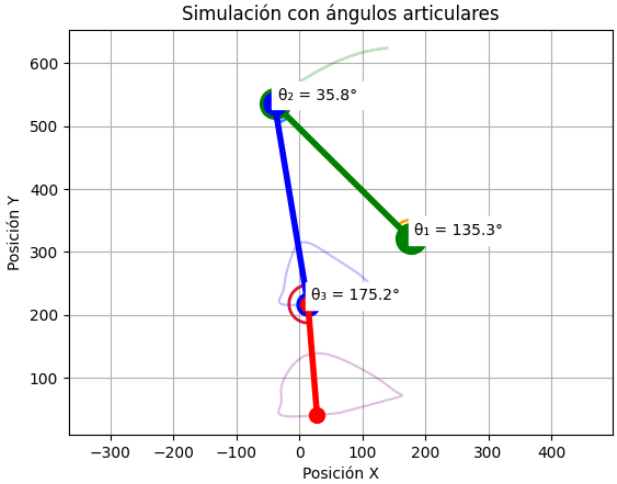
https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47



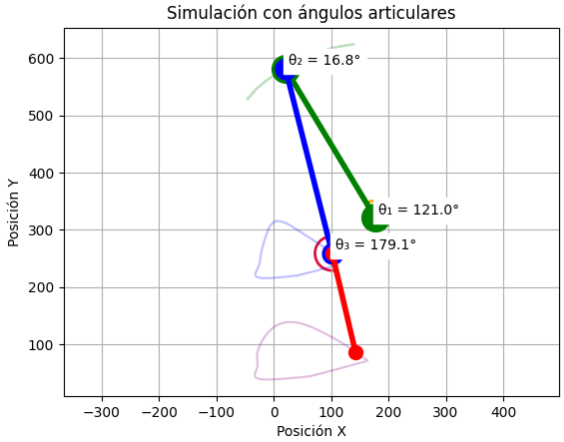
(a) Instante de ciclo de marcha 1



(b) Instante de ciclo de marcha 2



(c) Instante de ciclo de marcha 3

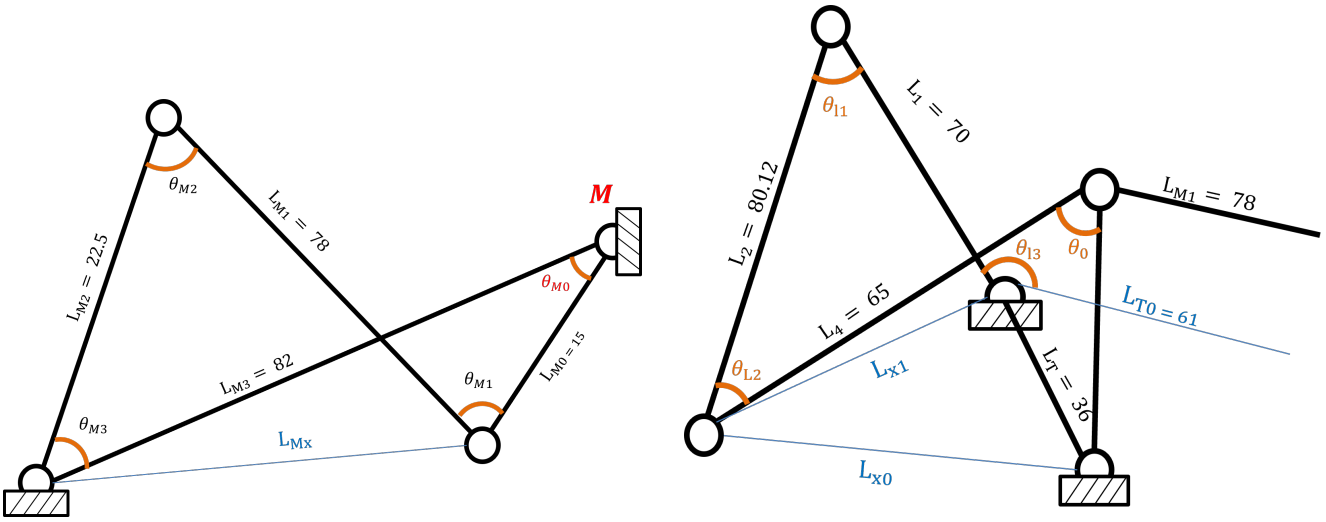


(d) Instante de ciclo de marcha 4

FIGURA 2. Secuencias de representación gráfica de la simulación del ciclo de marcha del ejemplar, modelado mediante la red neuronal entrenada con los datos promedio.

partir de la cual se calcula el factor de escala que determina las dimensiones finales del mecanismo. El diseño se sintetiza y ajusta en MotionGen utilizando como base un mecanismo de Klann modificado mediante la incorporación de una articulación móvil en el dactyl para imitar el rango articular observado experimentalmente. El mecanismo resultante está compuesto por un mecanismo de cuatro barras acoplado a un mecanismo de cinco barras (Figura 3).

El comportamiento cinemático del mecanismo se describe en función del ángulo de entrada del motor θ_{M0}.



(a) Primer mecanismo de cuatro barras (b) Mecanismo de cinco barras

FIGURA 3. Esquema dividido en dos partes del mecanismo planteado para el diseño del pereiópodo. A la izquierda se muestra el mecanismo de cuatro barras y a la derecha el mecanismo de cinco barras.

Mecanismo de cuatro barras

A partir del ángulo de entrada θ_{M0}, se define la longitud intermedia L_{Mx} como:

$$L_{Mx} = \sqrt{74{,}5 - 25{,}5\cos(\theta_{M0})} \tag{4}$$

Los ángulos internos del mecanismo se obtienen mediante:

$$\theta_{M1} = \arccos\left(\frac{L_{Mx}^2 - 64{,}99}{3L_{Mx}}\right) - \arccos\left(\frac{56 + L_{Mx}^2}{15{,}6L_{Mx}}\right) \tag{5}$$

$$\theta_{M2} = \arccos\left(\frac{65{,}68 - L_{Mx}^2}{34{,}32}\right) \tag{6}$$

$$\theta_{M3} = \arccos\left(\frac{L_{Mx}^2 - 56}{4{,}4L_{Mx}}\right) - \arccos\left(\frac{64{,}99 + L_{Mx}^2}{16{,}4L_{Mx}}\right) \tag{7}$$

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47

Mecanismo de cinco barras

El mecanismo de cinco barras se define a partir de θ_{M2}, cuyo ángulo de entrada es:

$$\theta_0 = 215^\circ - \theta_{M2} \tag{8}$$

La longitud auxiliar L_{x0} se calcula mediante:

$$L_{x0} = \sqrt{47{,}09 - 28{,}6\cos(\theta_0)} \tag{9}$$

El ángulo auxiliar σ_2 se calcula como:

$$\sigma_2 = \arccos\left(\frac{L_{x0}^2 - 37{,}41}{4{,}4L_{x0}}\right) \tag{10}$$

Posteriormente, se define el ángulo:

$$\sigma_{x1} = \sigma_2 - 42{,}54^\circ + \theta_{M3} \tag{11}$$

La segunda longitud auxiliar L_{x1} se calcula mediante:

$$L_{x1} = \sqrt{12{,}96 + L_{x0}^2 - 7{,}2L_{x0}\cos(\sigma_{x1})} \tag{12}$$

Finalmente, los ángulos del mecanismo quedan definidos como:

$$\theta_{11} = \arccos\left(\frac{113{,}16 - L_{x1}^2}{112{,}14}\right) \tag{13}$$

$$\theta_{12} = \arccos\left(\frac{15{,}16 - L_{x1}^2}{16{,}02L_{x1}}\right) - \arccos\left(\frac{37{,}41 + L_{x0}^2}{13L_{x0}}\right) + \arccos\left(\frac{L_{x1}^2 + L_{x0}^2 - 12{,}96}{2L_{x0}L_{x1}}\right) \tag{14}$$

$$\theta_{13} = 246{,}1^\circ - \arccos\left(\frac{L_{x1}^2 - 15{,}16}{14L_{x1}}\right) - \arccos\left(\frac{12{,}96 - L_{x0}^2 + L_{x1}^2}{7{,}2L_{x1}}\right) \tag{15}$$

Se verifica además el cumplimiento de la ley de Grashof para el mecanismo principal de cuatro barras,

empleando las longitudes $S = 1{,}5$, $L = 8{,}5$, $P = 7{,}8$ y $Q = 8{,}06$ unidades. Como se satisface la condición

$$S + L \leq P + Q,$$

es decir,

$$10{,}0 \leq 15{,}86,$$

el eslabón de entrada puede realizar una rotación completa, garantizando un ciclo continuo de marcha.

El mecanismo posee un único grado de libertad, ya que el movimiento de todas las barras depende únicamente del ángulo de entrada del motor. En consecuencia, el estudio se centra en el análisis cinemático del sistema para reproducir la trayectoria del pereiópodo, mientras que los efectos dinámicos quedan fuera del alcance de este trabajo. La resistencia estructural se verifica posteriormente mediante simulaciones por elementos finitos.

Con el modelo cinemático definido, el sistema se diseña en CAD para establecer sus dimensiones, tolerancias y condiciones de ensamblaje, integrando cuatro mecanismos tipo pereiópodo en una misma estructura para evaluar la marcha lineal del prototipo.

Selección de componentes y materiales

Se seleccionan los componentes de accionamiento y control del sistema con base en criterios de compatibilidad geométrica, capacidad de control, disponibilidad y portabilidad. Su integración se define desde el modelo CAD en *SolidWorks*, donde el motor se fija mediante un soporte simétrico y la batería se ubica debajo de éste para optimizar el espacio destinado a los elementos de control.

El comportamiento estructural se evalúa mediante un análisis estático por elementos finitos utilizando *SolidWorks Simulation*. Todas las piezas se modelan con las propiedades mecánicas del PET-G, restringiendo las superficies de fijación del soporte principal y aplicando una carga de $9{,}81$ N sobre el eje de accionamiento para representar una condición estática de operación. El análisis permite obtener los esfuerzos equivalentes de von Mises, desplazamientos y deformaciones del mecanismo. Finalmente, se realiza un estudio de movimiento (CAE) para verificar el funcionamiento continuo del sistema sin colisiones empleando un único actuador.

Manufactura y ensamblaje

Las piezas del sistema se fabrican mediante impresión 3D en PET-G a partir de modelos CAD

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47

exportados en formato STL y convertidos a código G. Posteriormente, se ensamblan junto con los componentes mecánicos y electrónicos, integrando el motor, los eslabones, elementos de separación y un tope mecánico para garantizar el movimiento del sistema y limitar su rango de operación. Finalmente, el mecanismo se controla mediante un programa desarrollado en Arduino, el cual acciona continuamente el motor para reproducir el ciclo de marcha.

Pruebas de funcionamiento y comparación de curvas

Se realizan pruebas experimentales para evaluar la capacidad del mecanismo de reproducir el ciclo de marcha del pereiópodo sobre seis superficies: loseta, césped, asfalto, tezontle, piedras y grava. En cada terreno se efectúan tres recorridos lineales independientes de aproximadamente 60 cm, clasificando el desempeño como *bueno*, *regular* o *no camina*. Para las superficies de loseta y grava se realiza un análisis cinemático mediante videos procesados con Tracker, obteniendo las coordenadas articulares del mecanismo. Los datos se segmentan, normalizan y promedian para construir un ciclo de marcha promedio experimental.

Para calcular la semejanza de las trayectorias espaciales se inicia calculando el RMSE, donde (x_i^{ref}, y_i^{ref}) es la trayectoria del pereiópodo y (x_i^{cmp}, y_i^{cmp}) la trayectoria del mecanismo, ambas muestreadas en N puntos igualmente distribuidos a lo largo del ciclo de marcha. El error cuadrático medio entre ambas trayectorias se calcula mediante

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[(x_i^{ref} - x_i^{cmp})^2 + (y_i^{ref} - y_i^{cmp})^2\right]}. \tag{16}$$

La semejanza espacial se calcula a partir del error cuadrático medio (RMSE) entre las trayectorias previamente alineadas en el plano XY, transformándolo posteriormente en un porcentaje mediante

$$S_{XY} = 100e^{-RMSE/k}, \tag{17}$$

donde $RMSE$ representa el error cuadrático medio entre ambas trayectorias y $k = 0{,}10\ \max(\Delta x, \Delta y)$ es un factor de normalización calculado a partir del mayor rango espacial de las trayectorias. Esta expresión produce una semejanza del $100\,\%$ cuando el error es nulo y disminuye exponencialmente conforme aumenta la diferencia entre ambas trayectorias.

La semejanza angular se determina comparando la tendencia de variación de cada ángulo articular durante el ciclo de marcha. Para ello se calcula

$$S_\theta = 100\left(\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1} I(s_i^{ref} = s_i^{cmp})\right), \tag{18}$$

donde N es el número de muestras del ciclo de marcha, s_i^{ref} y s_i^{cmp} representan el signo de la variación angular entre dos muestras consecutivas para el pereiópodo y el mecanismo, respectivamente, e $I(\cdot)$ es una función indicadora que toma el valor de 1 cuando ambos signos coinciden y 0 en caso contrario.

Finalmente, la semejanza global se obtiene como el promedio aritmético de ambas métricas,

$$S_{global} = \frac{S_{XY} + S_\theta}{2}, \tag{19}$$

RESULTADOS

Obtención de parámetros de marcha

A partir del análisis de videos mediante el software Tracker se obtuvieron las trayectorias de las articulaciones del pereiópodo en el plano XY durante la marcha. Estas trayectorias permiten identificar los ciclos de marcha, definidos por el movimiento de la punta del dactyl, la cual establece el inicio y el fin de cada ciclo. En la Figura 4, se muestra una gráfica de datos de posición obtenida a partir de la captura de los datos del video, donde se ven reflejados cinco ciclos de marcha para dicha captura.

Los datos de posición obtenidos constituyen la base para la formulación del modelo matemático del ciclo de marcha promedio, permitiendo identificar patrones repetitivos y zonas de contacto con el suelo.

Modelo matemático del ciclo de marcha

A partir del procesamiento de los datos de posición se obtuvo un ciclo de marcha promedio que describe el patrón de movimiento del pereiópodo. Este ciclo se utilizó para entrenar una red neuronal multicapa que modela las trayectorias articulares en función del porcentaje del ciclo de marcha. En la Figura 5, se muestra la trayectoria predicha por la red neuronal después de su entrenamiento con la trayectoria promedio de ciclo de marcha.

La función objetivo combinó el error cuadrático medio de los datos con un término de cierre cíclico ponderado por $\lambda_{cyc} = 0{,}5$. Durante el entrenamiento, la pérdida total disminuyó de $0{,}2832$ en la época inicial a $8{,}58 \times 10^{-5}$ en la época 2500, mostrando convergencia del modelo.

El error final se evaluó mediante el RMSE por coordenada, obteniendo valores de $0{,}0014$, $0{,}0022$, $0{,}7386$, $0{,}4195$, $3{,}1896$, $0{,}9054$, $3{,}4512$ y $0{,}9423$ para las variables x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4 y y_4, respectivamente. El RMSE combinado fue de $4{,}9511$. Estos valores indican que el modelo reproduce la

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47

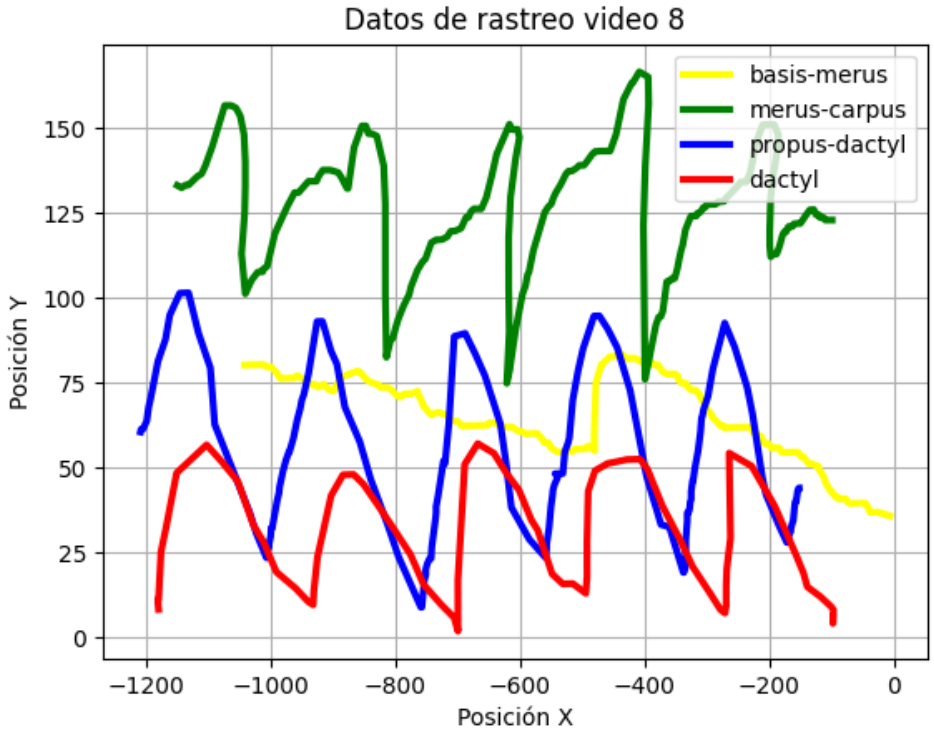


FIGURA 4. Gráfica de posiciones en el plano XY de video de muestra de marcha del pereiópodo del ejemplar.

trayectoria promedio del ciclo de marcha, especialmente considerando que las coordenadas se encuentran expresadas en unidades espaciales del sistema de análisis. En la Figura 6 se muestra el comportamiento del error durante el entrenamiento.

Simulación y obtención de parámetros geométricos

A partir del modelo matemático y de simulaciones cinemáticas se obtuvieron los rangos angulares de las articulaciones en función del porcentaje del ciclo de marcha. La Figura 7 muestra la variación de los ángulos articulares del pereiópodo durante un ciclo de marcha promedio. Se observa que cada articulación presenta un comportamiento periódico asociado a las fases de apoyo y oscilación del ciclo. La articulación *basis–merus* presenta la mayor amplitud de variación, alcanzando valores comprendidos entre $96{,}95°$ y $137{,}12°$. Por su parte, la articulación *merus–carpus* presenta un intervalo más reducido ($16{,}63°$–$42{,}09°$). Finalmente, la articulación *propus–dactyl* permanece cercana a la extensión completa durante la mayor parte del ciclo ($150{,}06°$–$179{,}96°$).

La separación observada entre las curvas se debe a que cada una representa una articulación diferente

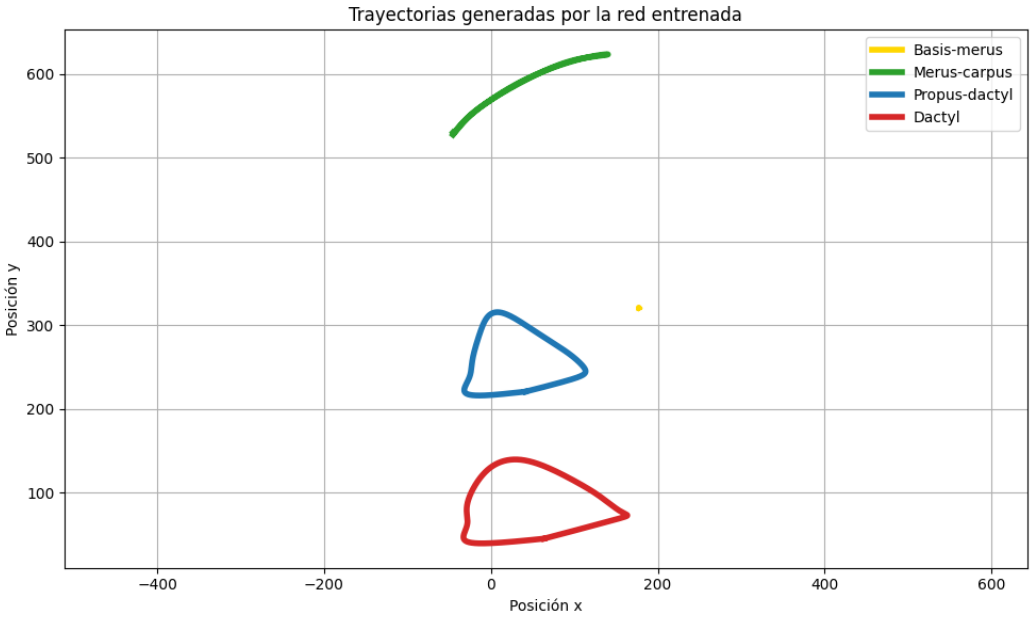


FIGURA 5. Ciclo de marcha proporcionado por la red neuronal entrenada.

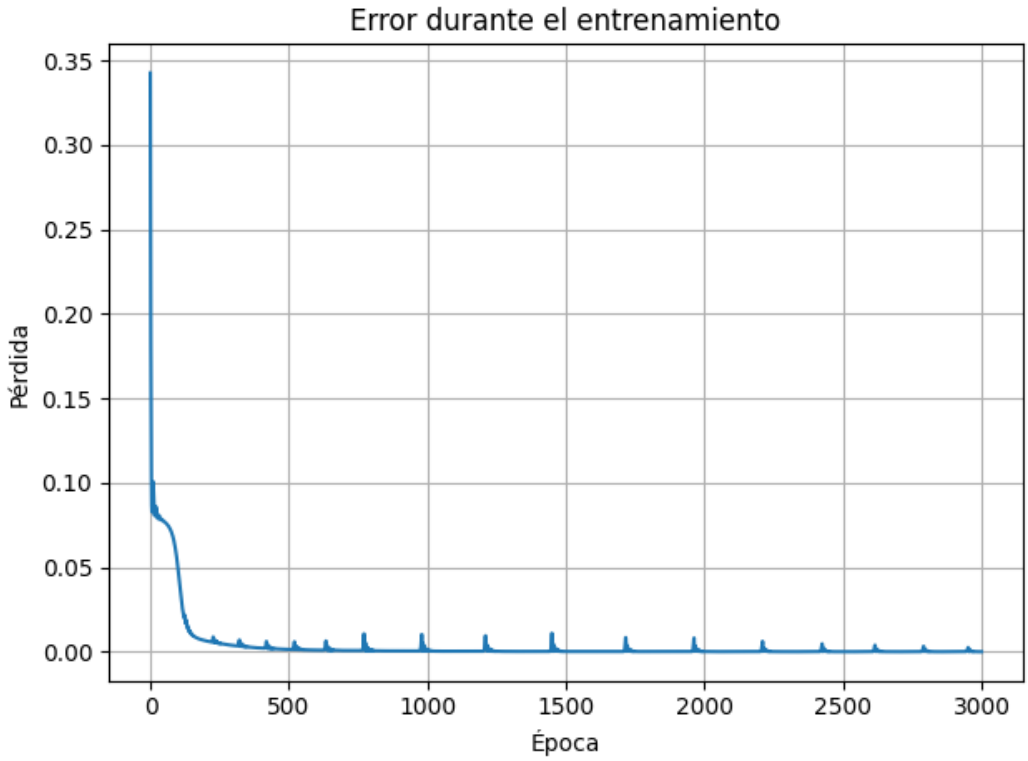


FIGURA 6. Error durante el entrenamiento de la red neuronal.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47

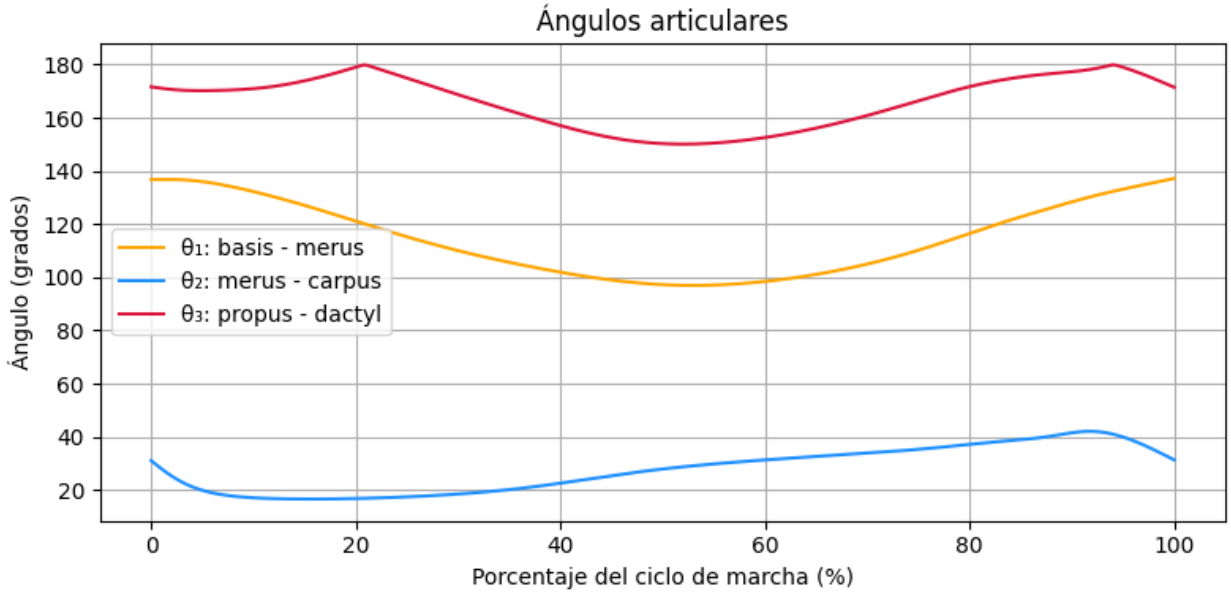


FIGURA 7. Cambio en amplitud angular de los segmentos del pereiópodo en función del porcentaje de ciclo de marcha.

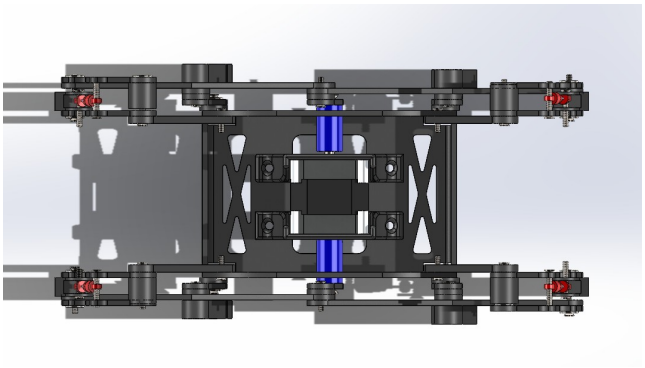
y, por tanto, un rango angular distinto determinado por la anatomía del pereiópodo. En consecuencia, los valores absolutos no son directamente comparables entre sí; sin embargo, la tendencia temporal de las tres curvas evidencia una coordinación entre las articulaciones durante el ciclo de marcha. Los máximos y mínimos de cada curva corresponden a los instantes de mayor extensión y mayor flexión de cada articulación, respectivamente, y constituyen los límites articulares empleados posteriormente para el diseño del mecanismo.

Asimismo, se obtuvieron longitudes de 314,21, 273,59 y 150,86 unidades para los segmentos carpus–propus, merus y dactyl, respectivamente. Estos parámetros definen las proporciones geométricas utilizadas en el diseño del mecanismo.

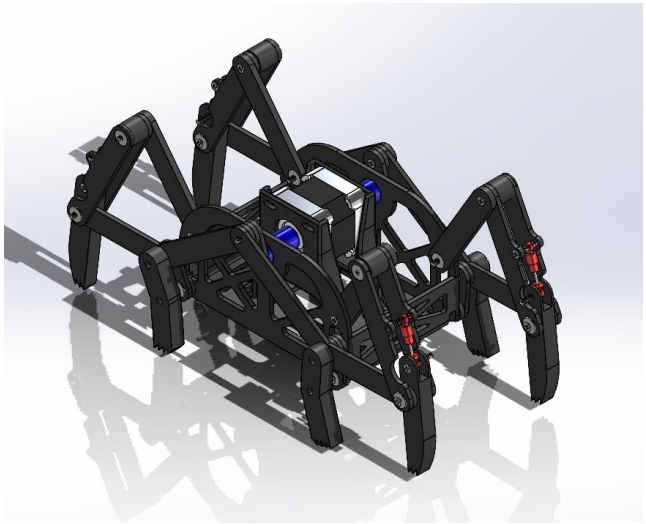
Diseño CAD y análisis estructural (CAE)

Con base en los parámetros obtenidos, se diseñó un mecanismo tipo Klann capaz de reproducir un movimiento cíclico mediante un único actuador. El sistema completo fue modelado y diseñado para que cuatro mecanismos de pereiópodos sean ensamblados y permitan la caminata de todo el sistema coordinándose entre sí. Este modelado se realizó en software CAD *Solidworks* integrando los componentes mecánicos y electrónicos, como se muestra en la Figura 8.

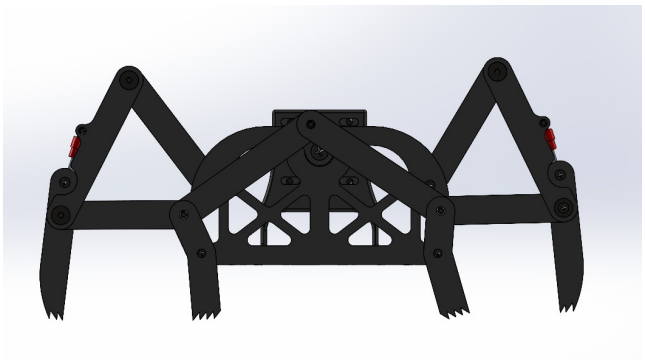
Los resultados del análisis estructural con software CAE *Solidworks* corresponden al caso de carga



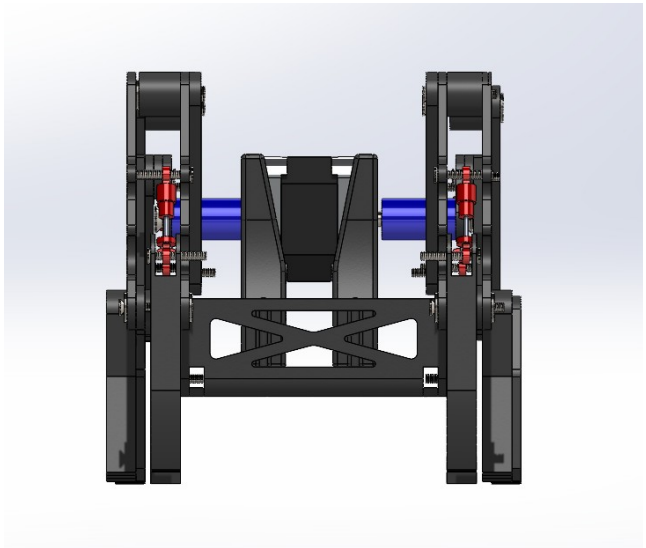
(a) Vista superior del sistema



(b) Vista en isométrico del sistema



(c) Vista frontal del sistema



(d) Vista lateral del sistema

FIGURA 8. Conjuntos de vistas del sistema diseñado en software CAD, incluyendo todas las barras y componentes mecánicos.

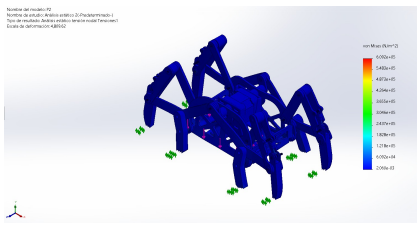
https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47

estática descrito en la metodología, en el cual se aplicó una fuerza de $9{,}81$ N sobre el eje de accionamiento mientras las superficies de fijación permanecieron completamente restringidas. Este escenario representa la condición de operación del mecanismo bajo el peso aproximado del sistema y permite evaluar su resistencia mecánica antes de la fabricación.

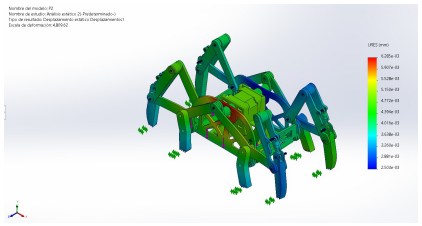
Los resultados del análisis de esfuerzos de von Mises muestran que el esfuerzo máximo obtenido fue de $\sigma_{vm} = 0{,}61$ MPa, localizado en la región cercana al eje de accionamiento, donde se concentran las mayores cargas transmitidas entre las barras del mecanismo. Este valor es inferior al esfuerzo de cedencia del PET-G (53 MPa) reportado por el fabricante [13], por lo que el mecanismo opera dentro del régimen elástico bajo las condiciones analizadas, sin riesgo de deformación permanente.

El análisis de desplazamientos indicó un valor máximo de $6{,}3 \times 10^{-3}$ mm, ubicado en los extremos libres de las barras del mecanismo. Debido a que este desplazamiento representa una fracción muy pequeña respecto a las dimensiones del sistema, no se esperan alteraciones apreciables en su comportamiento cinemático.

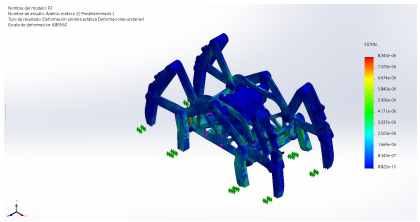
Las deformaciones unitarias máximas fueron del orden de $8{,}3 \times 10^{-6}$, concentrándose principalmente alrededor de las articulaciones y zonas de transmisión de carga. Estos valores son bajos y no indican la presencia de regiones críticas que comprometan la integridad estructural del mecanismo. En la Figura 9 se muestran los resultados gráficos de los estudios de anáisis de esfuerzos estáticos realizados en el sistema.



(a) Resultados de análisis de esfuerzos de Von Mises



(b) Resultados de análisis de esfuerzos de desplazamientos



(c) Resultados de análisis de esfuerzos de deformaciones unitarias

FIGURA 9. Resultados gráficos de los estudios de análisis de esfuerzos estáticos aplicados al sistema.

El prototipo construido integra cuatro mecanismos tipo pereiópodo montados sobre una carcasa central fabricada en PET-G mediante impresión 3D. El movimiento se transmite desde un motor NEMA 17 de doble eje hacia los mecanismos laterales, permitiendo accionar el sistema mediante un único actuador. La estructura incorpora separadores entre eslabones para evitar interferencias mecánicas, así como un tope en la articulación propus–dactyl para limitar el rango de movimiento y mejorar la estabilidad durante la marcha. El sistema electrónico se compone de una tarjeta Arduino Nano, un puente H L298N y una

batería de 12 V, integrados dentro de la carcasa. El sistema construído y ensamblado se muestra en la Figura10



FIGURA 10. Prototipo físico ensamblado, mostrando la carcasa central, los mecanismos tipo pereiópodo y los componentes de accionamiento.

Evaluación experimental del desempeño

Se realizaron pruebas experimentales del sistema en diferentes terrenos: superficie lisa, césped, asfalto, piedras, tezontle y grava.

Los resultados muestran que el sistema presenta un comportamiento estable en superficies rígidas como loseta, asfalto y piedras, mientras que en terrenos altamente deformables como arena o tezontle presenta limitaciones debido a la pérdida de soporte.

La Figura 11 presenta fotografías de algunas de las pruebas realizadas sobre diferentes superficies. En cada ensayo el prototipo recorrió una trayectoria rectilínea mientras se evaluó la continuidad del ciclo de marcha, la estabilidad del mecanismo y la capacidad de desplazamiento sobre el terreno correspondiente.

La comparación entre el mecanismo y el pereiópodo se realizó aplicando las métricas de semejanza espacial (S_{XY}), semejanza angular (S_θ) y semejanza global (S_{global}) definidas en la metodología. Para cada caso se calcularon las trayectorias y curvas angulares promedio correspondientes a un ciclo de marcha completo, obteniendo los porcentajes de semejanza presentados en la Tabla 3. La Figura 12 muestra la comparación del comportamiento angular utilizada para calcular la semejanza angular de cada articulación.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47

Tabla 1. Evaluación del desempeño del sistema en diferentes tipos de terreno

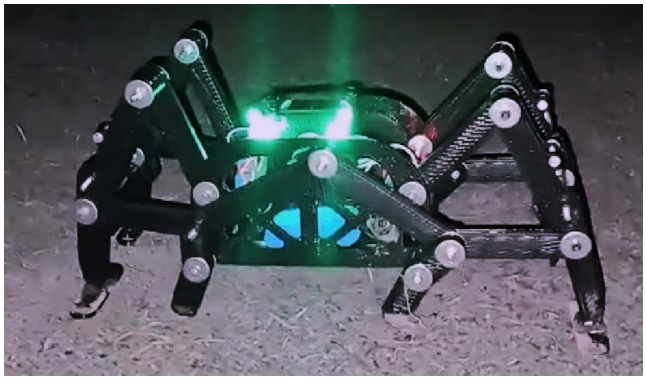
Terreno	**Desempeño**	**Comportamiento observado**	**Mejora propuesta**
Superficie lisa	Bueno	Marcha estable y continua.	Añadir material antideslizante en la punta del dactyl.
Césped	Bueno	Marcha estable y continua.	Evaluar el sistema sobre césped de mayor longitud.
Grava	Regular	Marcha funcional con interrupciones por atascamiento.	Modificar la geometría del dactyl para desplazar la grava.
Arena	No camina	Los pereiópodos se hunden e impiden completar el ciclo.	Aumentar el área de contacto con el terreno.
Piedras y concreto	Bueno	Marcha estable y continua.	Añadir material antideslizante en la punta del dactyl.
Asfalto	Bueno	Marcha estable y continua.	Añadir material antideslizante en la punta del dactyl.
Tezontle con piedras mayores a $1\,\mathrm{cm}^3$	No camina	El hundimiento y las piedras bloquean el movimiento.	Aumentar el área de contacto y adaptar el dactyl.

La Figura 12 muestra las curvas angulares empleadas para calcular la semejanza del comportamiento angular. La separación observada entre las curvas corresponde principalmente a diferencias en la amplitud de los ángulos, originadas por las restricciones geométricas del mecanismo de barras. No obstante, la tendencia general de incremento y decremento de los ángulos se conserva durante la mayor parte del ciclo de marcha, lo que explica los porcentajes de semejanza angular obtenidos.

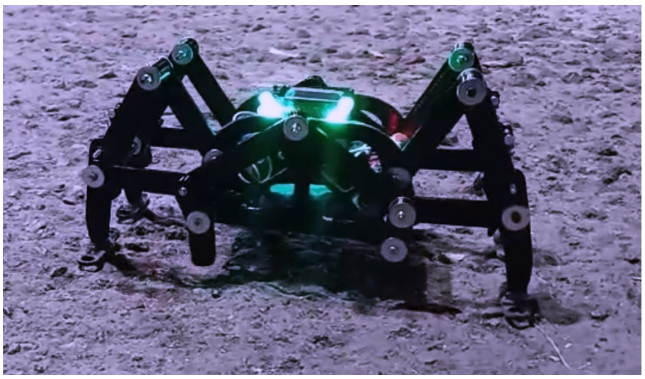
La aplicación de las métricas de semejanza mostró que el mecanismo imita las trayectorias del pereiópodo con una semejanza espacial del $75\,\%$ y un comportamiento angular del $71\,\%$, obteniéndose una semejanza global del $73\,\%$. Cuando el mecanismo se evaluó sobre grava, la semejanza espacial disminuyó al $50\,\%$, mientras que la semejanza angular aumentó al $80\,\%$, resultando en una semejanza global del $65\,\%$.



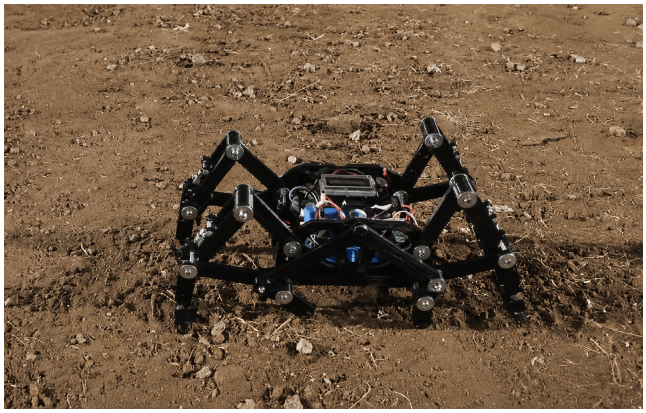
(a) Prueba sobre asfalto.



(b) Prueba sobre césped.

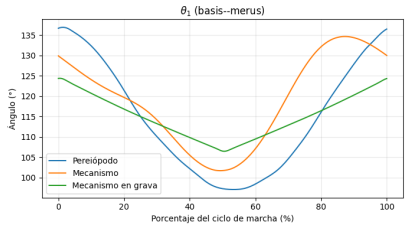


(c) Prueba sobre grava y piedras.

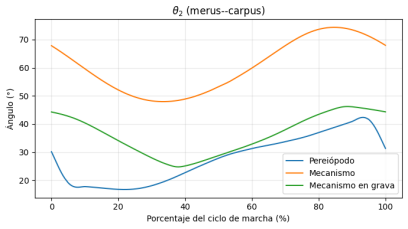


(d) Prueba sobre tezontle.

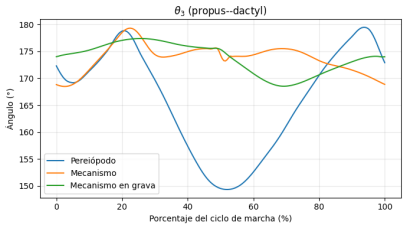
FIGURA 11. Fotografías del prototipo durante las pruebas de locomoción en diferentes superficies.



(a) Curva para articulación del basis-merus



(b) Curva para articulación del merus-carpus



(c) Curva para la articulación del propus-dactyl

FIGURA 12. Gráficas que muestran la comparación de las curvas del comportamiento angular del pereiópodo y del comportamiento angular del mecanismo.

La Tabla 3 muestra que la articulación *basis–merus* presenta la mayor semejanza angular, alcanzando

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47

hasta un $96\,\%$ durante la marcha sobre grava, mientras que la articulación *propus–dactyl* registra las mayores diferencias. En conjunto, estos resultados demuestran que el mecanismo es capaz de aproximar el comportamiento locomotor promedio del pereiópodo natural utilizando un único actuador.

Tabla 3. Semejanza por tendencia de los ángulos articulares respecto al pereiópodo natural

Comparación	**basis–merus**	**merus–carpus**	**propus–dactyl**	**Semejanza promedio**
Pereiópodo vs Mecanismo	82.0 %	77.5 %	53.5 %	71.0 %
Pereiópodo vs Mecanismo en grava	96.0 %	77.0 %	67.0 %	80.0 %

Conclusiones

El análisis cinemático del pereiópodo mediante rastreo de video permitió obtener las trayectorias articulares en el plano XY, a partir de las cuales se construyó un modelo matemático del ciclo de marcha promedio. Este modelo, implementado mediante una red neuronal, logró representar el comportamiento cinemático promedio del sistema, permitiendo la estimación continua de las posiciones articulares en función del porcentaje del ciclo de marcha.

A partir de este modelo se obtuvieron parámetros geométricos relevantes para el diseño del mecanismo, incluyendo rangos articulares de $96{,}95°$–$137{,}12°$ para basis–merus, $16{,}63°$–$42{,}09°$ para merus–carpus y $150{,}06°$–$179{,}96°$ para propus–dactyl, así como longitudes de $314{,}21$, $273{,}59$ y $150{,}86$ unidades para los segmentos carpus–propus, merus y dactyl, respectivamente. Estos parámetros permitieron establecer las proporciones y restricciones necesarias para el diseño del mecanismo de barras.

El sistema mecánico desarrollado, basado en un mecanismo tipo Klann accionado por un único actuador, fue evaluado mediante simulaciones CAD y CAE, donde se obtuvo un esfuerzo máximo de von Mises de $0{,}61$ MPa, valor inferior al límite de cedencia del material PET-G (53 MPa), confirmando la capacidad estructural del diseño bajo las condiciones evaluadas.

Las pruebas experimentales demostraron que el sistema es capaz de generar un desplazamiento funcional en distintas superficies, particularmente en terrenos rígidos, donde se observó una marcha

continua y estable.

La comparación entre el ciclo de marcha del pereiópodo natural y el del mecanismo mostró una semejanza del 75 % en las trayectorias espaciales y del 71 % en el comportamiento angular, obteniéndose una semejanza global del 73 %. Cuando el mecanismo se evaluó sobre grava, la semejanza global fue del 65 %, lo que demuestra que el sistema conserva una parte importante del patrón de locomoción aun bajo condiciones de terreno irregular.

Finalmente, la metodología propuesta constituye una herramienta para el desarrollo de sistemas de locomoción bioinspirados, ya que integra el análisis cinemático de un organismo biológico, su representación mediante un modelo matemático y la síntesis de un mecanismo articulado capaz de aproximar su movimiento. Esta metodología puede emplearse como base para el diseño de robots caminantes destinados a la exploración de terrenos irregulares, como alternativa al uso de ruedas, aplicaciones en la industria agrícola o investigación en robótica bioinspirada. De igual manera, el procedimiento desarrollado puede extenderse al estudio de otras especies y patrones de locomoción, permitiendo obtener mecanismos diseñados a partir de parámetros experimentales del sistema biológico en lugar de aproximaciones geométricas empíricas.

Los resultados de este trabajo demuestran que es posible aproximar el ciclo de marcha de un pereiópodo del género *Gecarcinus* mediante un mecanismo articulado de barras accionado por un único actuador.

Declaración de contribución de autores y colaboradores

Guillermo Castro Daza: Conceptualización, Metodología, Investigación, Curación de datos, evaluación, Análisis formal, Visualización, Redacción - Preparación del borrador original.

Dr. Álvaro Anzueto Ríos: Supervisión, Metodología, Validación, Redacción - Revisión y Edición.

M. en T.A. Alma Aidé Sánchez Ramírez: Supervisión, Metodología, Investigación, Validación, Redacción - Revisión y Edición.

Dr. José Gonzalo Solís Villela: Supervisión, Análisis formal, Validación, Redacción - Revisión y Edición.

Referencias

[1] J. K. Sheba, R. E. Mohan, E. Martínez-García, and L. Tan-Phuc, “Trajectory generation and stability analysis for reconfigurable klann mechanism based walking robot,” *Robotics*, vol. 5, p. 13, 2016. DOI: 10.3390/robotics5030013

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47

[2] C. A. Hui, "Walking of the shore crab pachygrapsus crassipes in its two natural environments," *The Journal of Experimental Biology*, vol. 165, pp. 213–227, 1992.

[3] M. M. Martinez, R. Full, and M. Koehl, "Underwater punting by an intertidal crab: a novel gait revealed by the kinematics of pedestrian locomotion in air versus water," *The Journal of experimental biology*, vol. 201 (Pt 18), pp. 2609–23, 1998.

[4] C. F. Herreid and R. Full, "Locomotion of hermit crabs (coenobita compressus) on beach and treadmill," *The Journal of Experimental Biology*, vol. 120, pp. 283–296, 1986.

[5] X. Chen *et al.*, "Prototype development and gait planning of biologically inspired multi-legged crab-like robot," *Mechatronics*, vol. 23, no. 4, pp. 429–444, 2013.

[6] C. Cui *et al.*, "Kinematic analysis and simulation of walking leg of bionic amphibious crab-like robot," in *IEEE International Conference on Control, Automation and Robotics*, 2020, pp. 762–767.

[7] S. Hu *et al.*, "Leg mechanism design and motion performance analysis for an amphibious crab-like robot," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 1, p. 10, 2023. DOI: 10.3390/jmse12010010

[8] J. Zhang *et al.*, "Crab-inspired compliant leg design method for adaptive locomotion of a multi-legged robot," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 17, no. 2, p. 025001, 2022. DOI: 10.1088/1748-3190/ac45e6

[9] Y. Chen *et al.*, "Optimal planar leg geometry in robots and crabs for idealized rocky terrain," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 17, no. 6, p. 066009, 2022.

[10] ——, "Sideways crab-walking is faster and more efficient than forward walking for a hexapod robot," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 17, no. 4, p. 046001, 2022. DOI: 10.1088/1748-3190/ac6847

[11] A. G. Vidal-Gadea and J. H. Belanger, "Muscular anatomy of the legs of the forward walking crab *Libinia emarginata*," *Arthropod Structure & Development*, vol. 38, no. 3, pp. 179–194, 2009. DOI: 10.1016/j.asd.2008.12.002

[12] J. S. Toquica, P. S. Oliveira, W. S. R. Souza, J. M. Motta, and D. Borges, "An analytical and a deep learning model for solving the inverse kinematic problem of an industrial parallel robot," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 151, p. 106682, 2020. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106682

[13] Eastman Chemical Company, "Petg copolyester technical data sheet," 2023, online. [Online]. Available: https://www.eastman.com