

## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MECANISMO ESPACIAL CAMINADOR DE UN GRADO DE LIBERTAD**

José A. Loredo Ramírez, Ernesto Cruz Rivera, Hugo I. Medellín Castillo.  
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Av. Dr. Manuel Nava 8, CP 78290, San Luis Potosí, S.L.P., México  
[lordram83@hotmail.com](mailto:lordram83@hotmail.com), [ernesto\\_cruz\\_r2000@yahoo.com.mx](mailto:ernesto_cruz_r2000@yahoo.com.mx), [hugoivanmc@uaslp.mx](mailto:hugoivanmc@uaslp.mx)

### **RESUMEN**

En base en algunos trabajos reportados en la literatura, en donde se pretende realizar imitación fiel del movimiento de algunos insectos de 6 patas o de mayor capacidad de desplazamiento, en este trabajo se presenta el diseño y construcción de un mecanismo espacial caminador de 6 extremidades y un grado de libertad. Al reducir el número de grados de libertad del mecanismo, su sistema de control resulta más simple. El mecanismo propuesto consiste de 6 cadenas cinemáticas de cuatro eslabones cada una acopladas entre sí para permitir ser controladas con solamente un motor. El análisis cinemático y la síntesis del mecanismo, así como la simulación del movimiento del mecanismo, se presentan en este trabajo. Finalmente basado en estos análisis se realizaron las simulaciones en CAE y la construcción del prototipo.

### **ABSTRACT**

Based on some research works reported in the literature, where the aim it to imitate the movement of some insects with six legs or greater capacity of displacement, this work presents the design and construction of a walker spatial mechanism with six limbs and one degree of freedom. By reducing the number of degrees of freedom of the mechanism, its control system is simpler. The proposed mechanism consists of six kinematics chains of four links which are coupled to allow be controlled with only one motor. The kinematics analysis and synthesis of the mechanism, together with the motion simulation, are presented in this paper. Finally, the dynamics simulation in CAE and the construction of the prototype is presented in this paper.

### **INTRODUCCIÓN**

Desde hace muchos siglos el hombre ha tratado de construir objetos animados tomando como modelo a los animales, ya que considera que no existen modelos más perfectos que los de la naturaleza. Uno de los registros más antiguos data del siglo XVIII, de donde constan algunos esquemas originales de distintos mecanismos tratando de aplicar un modelo mecánico ya diseñado por la naturaleza. Para el desarrollo del movimiento, es fácil identificar lo versátil y útil que es la postura bípeda que posee el hombre, y por esta razón es que se ha tratado de imitar, pero, después de analizar profundamente la marcha y observar todos los factores que en ella intervienen, es fácil percatarse de lo difícil que es lograr esto, razón por la cual desde un principio, se decidió que el mecanismo sería de 6 extremidades, lo que obliga a enfocarse en otros modelos naturales como los insectos, que utilizan 6 u 8 extremidades para su marcha, y la coordinación de los movimientos. Aunque poseen mayor cantidad de extremidades, su control es más sencillo gracias a que poseen cuando menos 4 puntos de apoyo.

Algunos mecanismos desarrollados por otros autores, [1]-[5], pretenden imitar el movimiento de algunos insectos. Como ejemplo se tiene el TITAN III (figura 1), construido en 1984, el cual cuenta con avances que le permiten saber si las extremidades están apoyadas o no, además está equipado con un sensor de postura y un sistema de control inteligente llamado PEGASUS, que realiza la función de toma de decisiones en base a la información obtenida de los sensores lo que le permite adaptarse al terreno [2].



Figura 1. TITAN III.

El robot TITAN IV (figura 2) mostrado en el año de 1985, logro caminar por 40 kilómetros e incluso, subir escalones, posteriormente, fue modificado, para lograr adoptar diferentes posturas que le permitieron desplazarse a diferentes velocidades, e incluso trotar [2].

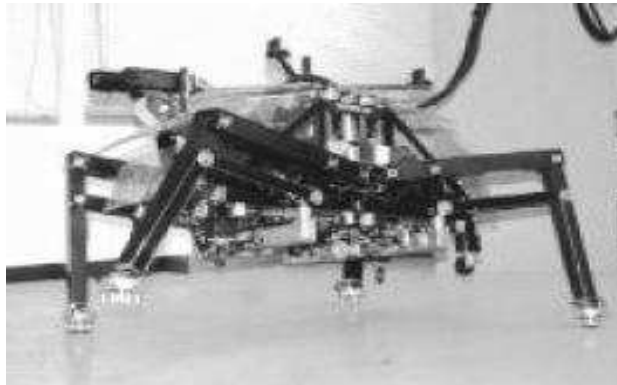


Figura 2. TITAN IV.

A todo esto, se une el prototipo mas reciente creado por el MIT llamado robot III (figura 3) que pretende ser una copia fiel de una cucaracha, este cuenta hasta el momento, con 14 grados de libertad y es financiado por la oficina de investigación naval [2].

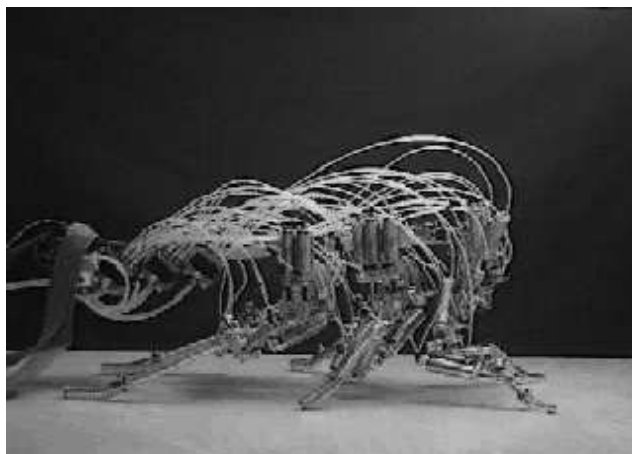


Figura 3. Robot III.

Como se puede observar, estos mecanismos de 6 extremidades ofrecen grandes avances, sin embargo, el objetivo del presente trabajo es el desarrollo de un mecanismo simple que permita una marcha sin necesidad de un control complicado. Para lograr este objetivo, en este trabajo se presenta el diseño preliminar propuesto para generar la marcha mediante un mecanismo de 6 extremidades, así como las modificaciones hechas a lo largo del desarrollo con el objetivo de mejorar el desempeño cinemático del mecanismo, para lograr que este se mueva con el mínimo número de grados de libertad. En lo sucesivo, se muestran diseños básicos previos al mecanismo seleccionado, mostrando o explicando las razones por las que no fueron escogidos para el desarrollo. También se explica la cinemática del mecanismo analizado mediante cinemática específica para el punto de contacto de las extremidades, las simulaciones numéricas y de CAE. Finalmente se muestran los resultados obtenidos del análisis, diseño y la construcción del mecanismo.

## DISEÑO DEL MECANISMO

### Evaluación de opciones.

Teniendo como objetivo el desarrollo y análisis de mecanismos simples de 6 extremidades, se analizaron los mecanismos más simples para lograrlo, sin necesidad de sistemas complicados de control o imitaciones fieles a las de la naturaleza. La primera propuesta es tan simple como el controlar extremidades por pares mediante actuadores lineales en el cual se desplazan dos extremidades cuando las otras cuatro se encuentran apoyadas. Sin embargo, este método, no presenta ninguna ventaja cinemática y si requiere de un control medianamente complicado, ya que requiere de un mínimo de dos grados de libertad, por cada extremidad, y una unidad de potencia neumática [3].

Con el afán de simplificar los grados de libertad del mecanismo, se propone un modelo en el que únicamente se requiere del uso de dos motores para la marcha, y se logra un avance igual al mecanismo anterior, pero con un menor número de grados de libertad.

Como última propuesta y definitiva, se selecciona un mecanismo sencillo que requiere únicamente un motor para la marcha, reduciendo los grados de libertad a tan solo uno o dos motores para el caso en que se desee que de vuelta o gire sobre su propio eje, aunque esto requiere del control en la coordinación de los movimientos, además de que resulta más completo para el propósito de análisis de mecanismos.

### Ritmos de movimiento de las extremidades

En todos los insectos las extremidades son levantadas en una secuencia ordenada que se mantiene relativamente constante aún a distintas velocidades, de hecho, las variaciones ocurren ciertamente en el ritmo, cuando el insecto se mueve más rápido. En el año de 1680, Borelli [6] sugirió que la forma más ventajosa de caminar de los insectos era levantar una extremidad trasera seguida de la extremidad lateral media y finalmente la extremidad delantera también del mismo lado. Demore en el año de 1890 [7] sostuvo que la extremidad delantera de un lado debe levantarse simultáneamente con la extremidad media de lado contrario, mientras que la extremidad trasera lateral era levantada un poco después, pero las tres extremidades del triángulo eran colocadas en la tierra al mismo instante. Paúl Bert en 1866 [2] consideró que las extremidades de los insectos eran levantadas en el orden R3 y L2; R1; L2 y R3; L1; L3 y L2; etc., donde L significa izquierda y R significa derecha; y el orden uno, dos, tres se refieren a las extremidades delantera, media y trasera, respectivamente. Este ritmo concuerda con el principio de Borelli, pero un estudio más detallado de la marcha de los insectos ha mostrado que un pequeño pero definitivo retraso entre levantamiento de la extremidad media y la contra lateral trasera resulta en un mejor desempeño.

En lo que todos están de acuerdo es en la consideración de que las extremidades delanteras tenían una función de tracción, el par trasero tenía función de empuje mientras que las piernas medias actúan como pivote. Para el año de 1935, Von Holst [2] formuló las siguientes reglas en base a los análisis y observaciones que había hecho:

- a) Las extremidades adyacentes de un lado se van alternando;
- b) Las extremidades en diagonal trabajan sincrónicamente.

Al analizar las grabaciones de la marcha de los insectos y observar detalladamente las imágenes tomadas se ha mostrado que estas reglas no son del todo correctas. La primera regla es verdad en principio, pero una relación aún más importante es que la onda de protacción se dirige hacia adelante a través de las extremidades de cada lado, y en los insectos, ninguna extremidad es protaída hasta que la extremidad trasera haya tomado su posición de apoyo. La segunda regla es completamente falsa, al menos para los insectos y los arácnidos. Por tanto, Huges en el año de 1965 [8] concluyó en las siguientes reglas que obedecen la marcha de los insectos:

- 1) Ninguna extremidad delantera media es protaída hasta que la extremidad trasera haya tomado su posición de apoyo. En otras palabras, existe una onda de protacciones posterior-anterior en cada lado.
- 2) Cada extremidad se alterna con extremidad contralateral del mismo segmento, con un valor de fase resultante igual a 0.5; donde un segmento de la parte del cuerpo une a un par de extremidades delanteras, traseras o medias.

Aún a pesar de la formulación de estas reglas, no parece que fuera suficiente para explicar los diversos tipos de marcha que poseen los hexápodos en general. Wilson, en 1966 [2] retomó el trabajo, y usando sus reglas, formuló otros tres criterios que produjeron un modelo suficientemente capaz de explicar las distintas marchas mostradas por los insectos. Estos criterios adicionales fueron:

- 3) El tiempo de protacción permanece constante a todas las frecuencias de paso.
- 4) El tiempo de retracción decrece con el incremento en la frecuencia de paso.
- 5) El intervalo de paso entre la extremidad trasera y media, y entre la media en la anterior de cada lado permanecen constantes a todas las frecuencias mientras que el intervalo entre la extremidad delantera y trasera decrece con el incremento en la frecuencia.

En la Fig. 4 se muestran las fases relativas de las extremidades con respecto al tiempo y se muestra el grado de solapamiento hasta llegar al tripié mostrado en dicha figura. Una forma alternativa de representar y producir los cambios en los patrones de marcha, fue propuesta por Hughes en 1952, mostrando que las variaciones en la relación de protacción /retracción, automáticamente conllevarían a los cambios en el ritmo de los movimientos de las extremidades, obedeciendo las reglas uno y dos que son las reglas básicas.

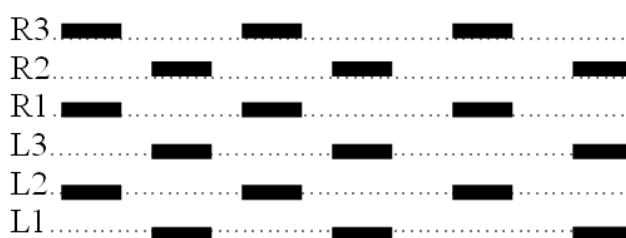


Fig. 4. Movimiento de las fases respecto al tiempo.}

Con base en el movimiento de las fases que se muestran en la figura 4, se seleccionó un mecanismo de 6 cadenas cinemáticas de cuatro eslabones cada una, correspondiendo a cada una de las 6 extremidades. Estas cadenas cinemáticas se acoplaron para lograr un movimiento sincronizado (figura 5).

Una vez que se seleccionó el mecanismo para lograr la marcha de las seis extremidades con un solo motor, se realizó el análisis cinemático del mecanismo, con el objetivo de obtener las dimensiones relativas apropiadas y la optimización del movimiento.

Para lograr lo anterior, se han realizado diversos trabajos que utilizando técnicas numéricas [9] o de programación con redes neuronales [10], logran obtener una aproximación bastante buena del mecanismo idealizado. Sin embargo, para efectos de análisis cinemático y no de técnicas de programación, se decidió realizar este análisis y su optimización, a partir de las técnicas ordinarias para optimizar mecanismos [11], tomando como ejemplo el análisis que hace Sai K. Banala, [12] para diseñar y optimizar un mecanismo basado en cadenas cinemáticas simples que imita el movimiento de las alas de un insecto.

### Cinemática del mecanismo de cuatro barras

Para poder realizar los movimientos correspondientes al avance, se requirió de la aplicación de mecanismos 4R conocidos como manivela oscilador [13], donde el eslabón acoplador para el caso de la extremidad 2, es el encargado de hacer el pivote durante el avance con el punto trazador de trayectoria en G, mientras que las extremidades 1 y 3, generan el avance en los puntos F y H en los eslabones seguidores en las cadenas cinemáticas 1 y 3, ver figura 5.

Para realizar el análisis cinemático del mecanismo, es necesario tener una expresión analítica que relacione las posiciones angulares de los eslabones. Para ello, la forma más usada para obtener esta expresión es la cinemática analítica. Para efecto de este trabajo, se eligieron modelos ya probados de mecanismos caminadores, la mayoría de ellos con demasiados grados de libertad, sin embargo, se seleccionó el mecanismo que se muestra en la Fig. 5 ya que cumple de manera más óptima el objetivo del análisis. Este mecanismo se encuentra compuesto por cadenas cinemáticas cerradas para cada extremidad que funcionan en conjunto utilizando como única variable de entrada el ángulo  $\theta$ . En la Fig. 5 solo se muestra la parte correspondiente a tres de las extremidades de un solo lado, el análisis completo de las seis extremidades no es necesario, puesto que el lado opuesto se comporta exactamente igual, pero con un desfase de  $180^\circ$ .

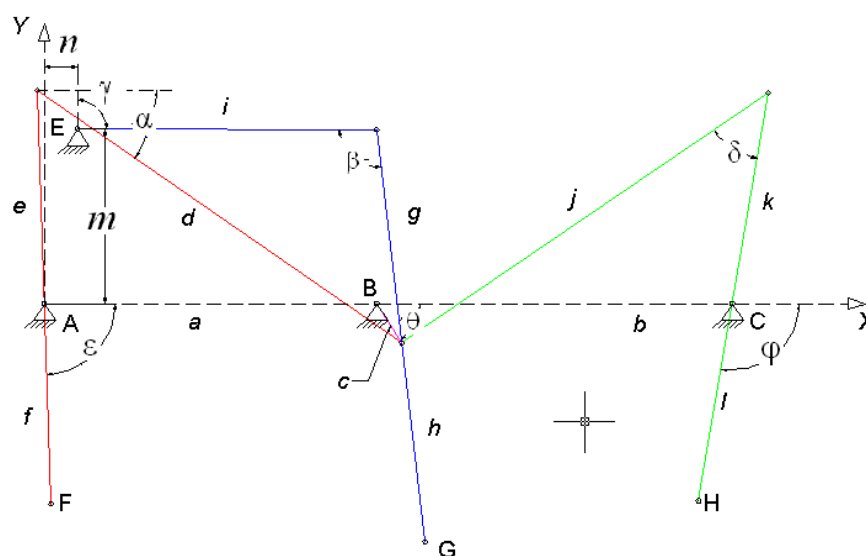


Fig. 5. Mecanismo plano 4R propuesto para el robot caminador.

Con el objetivo de simplificar el análisis, se realiza el análisis cinemático específico para los puntos F, G y H, correspondientes a los puntos de contacto de las extremidades, separándolas cada extremidad para su análisis, por convenir a la obtención de las ecuaciones. Pero debido a que es importante describir la cinemática completa del mecanismo, se realiza la cinemática articular con el propósito de eficientizar el mecanismo, así como comprobar el buen funcionamiento del mismo, en cumplimiento con los criterios de Grashof, que permita la rotación completa del eslabón C para que se comporte como un mecanismo manivela-oscilador.

**Cadena cinemática de la extremidad 1**

Para definir la posición del punto F en función del ángulo de entrada  $\theta$ , se obtiene la ecuación 1 de la cinemática específica en forma vectorial tomando el origen en el punto A (figura 6). Sin embargo, para obtener la posición de F respecto al tiempo, se desarrollan las ecuaciones 2 y 3 de la cinemática articular para la cadena cinemática 1 quedando como siguen.

$$\vec{r}_F = (f \cos \varepsilon)i - (f \sin \varepsilon)j \tag{1}$$

$$-e \cos \varepsilon + d \cos \alpha - c \cos \theta - a = 0 \tag{2}$$

$$e \sin \varepsilon - d \sin \alpha + c \sin \theta = 0 \tag{3}$$

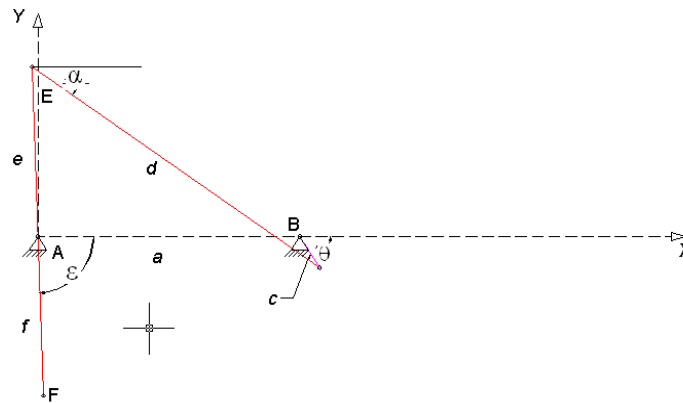


Fig. 6. Diagrama cinemático para la cadena 1.

**Cadena cinemática de la extremidad 2**

Se siguió el mismo procedimiento para la obtención de la posición del punto G, correspondiente al punto de contacto de la extremidad 2 ecuaciones 4, 5 y 6, tomando como origen el punto A que resulta cómodo al momento de ensamblar la solución de la cinemática de cada extremidad en la cinemática total del mecanismo, ver figura 7.

$$\vec{r}_G = (n + i \sin \gamma + (g + h) \cos \beta)i + (m + i \cos \gamma - (g + h) \sin \beta)j \tag{4}$$

$$n + i \sin \gamma + g \cos \beta - c \cos \theta - a = 0 \tag{5}$$

$$m + i \cos \gamma - g \sin \beta + c \sin \theta = 0 \tag{6}$$

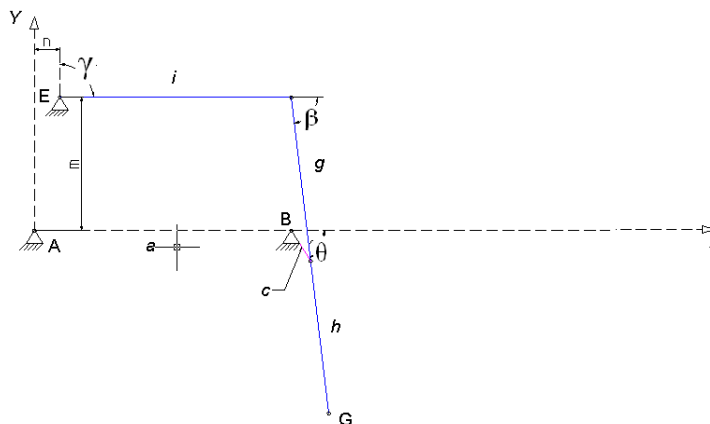


Fig. 7. Diagrama cinemático para la cadena 2.

**Cadena cinemática para la extremidad 3.**

Obteniendo de la misma forma la ecuación de posición para el punto de contacto H en la extremidad tres y respetando como origen el punto A se obtienen las ecuaciones 7, 8 y 9, figura 8.

$$\vec{r}_H = (a + b + l \cos \phi) i - (l \sin \phi) j \tag{7}$$

$$c \cos \theta + j \cos \delta + k \cos \phi - b = 0 \tag{8}$$

$$-c \sin \theta + j \sin \delta - k \sin \phi = 0 \tag{9}$$

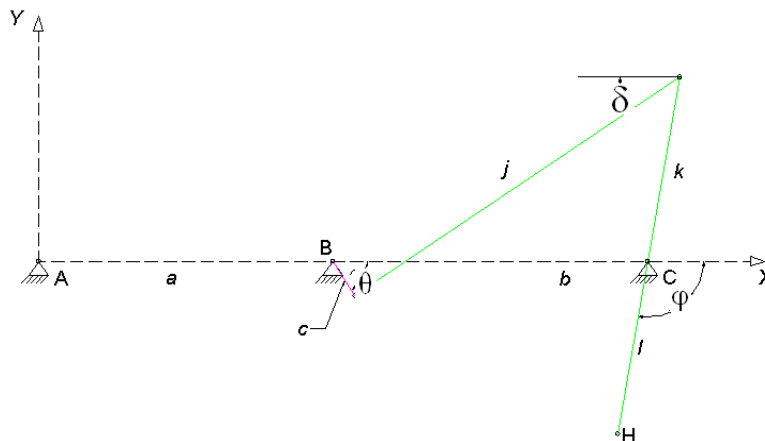


Fig. 8. Diagrama cinemático para la cadena 3.

Resolviendo las ecuaciones anteriores en un software de simulación matemática es posible obtener las trayectorias de desplazamiento para los puntos F, G, H, que representan las trayectorias de las extremidades 1, 2 y 3. Las extremidades 4, 5 y 6 se comportan exactamente como las extremidades 1, 2 y 3, excepto que tienen un desfase de 180 grados, es decir, las extremidades izquierdas se comportan opuestas a las analizadas, con lo que se cumple el objetivo de la marcha en 6 extremidades. Dichos resultados, se muestran en la siguiente grafica, Fig. 9.

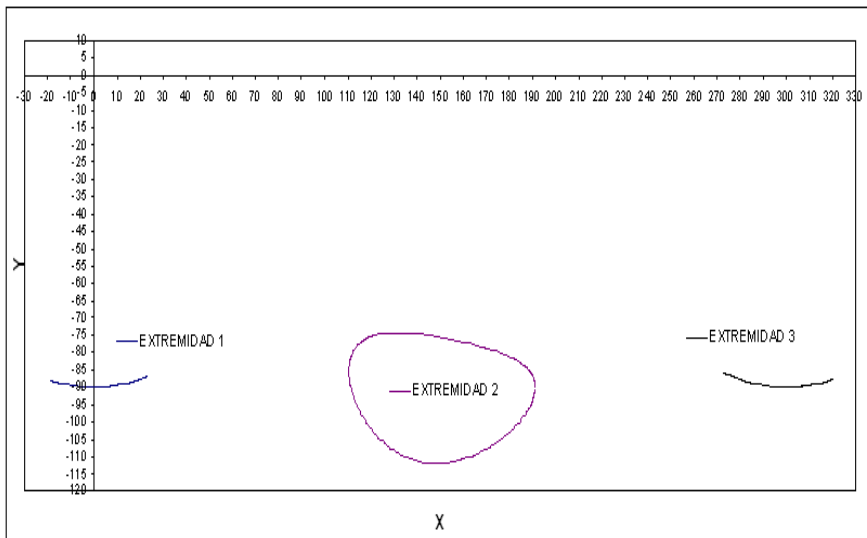


Fig. 9. Gráfica del movimiento de salida de las extremidades.

Con base en este análisis cinemático articular, se realizó el diseño de los eslabones tomando en consideración el movimiento disponible de entrada y el movimiento requerido en la salida, y en cumplimiento con el criterio de grasoft para mecanismos 4R manivela-oscilador de cada una de las articulaciones o extremidades. Los resultados óptimos para cada uno de los eslabones encontrados se muestran en la Tabla 1.

Dimensiones obtenidas (mm)			
a	150	i	135
b	150	j	200
c	21	k	96
d	180	l	90
e	96	m	78.5
f	90	n	15
g	96	p	135
h	90		

Tabla 1. Dimensiones calculadas de los eslabones.

### SIMULACIÓN CAE.

Con las dimensiones óptimas, se realizó la simulación del mecanismo en un software CAE, comprobando el correcto funcionamiento del mecanismo antes de su construcción. Posteriormente se realizó el diseño físico del mismo.

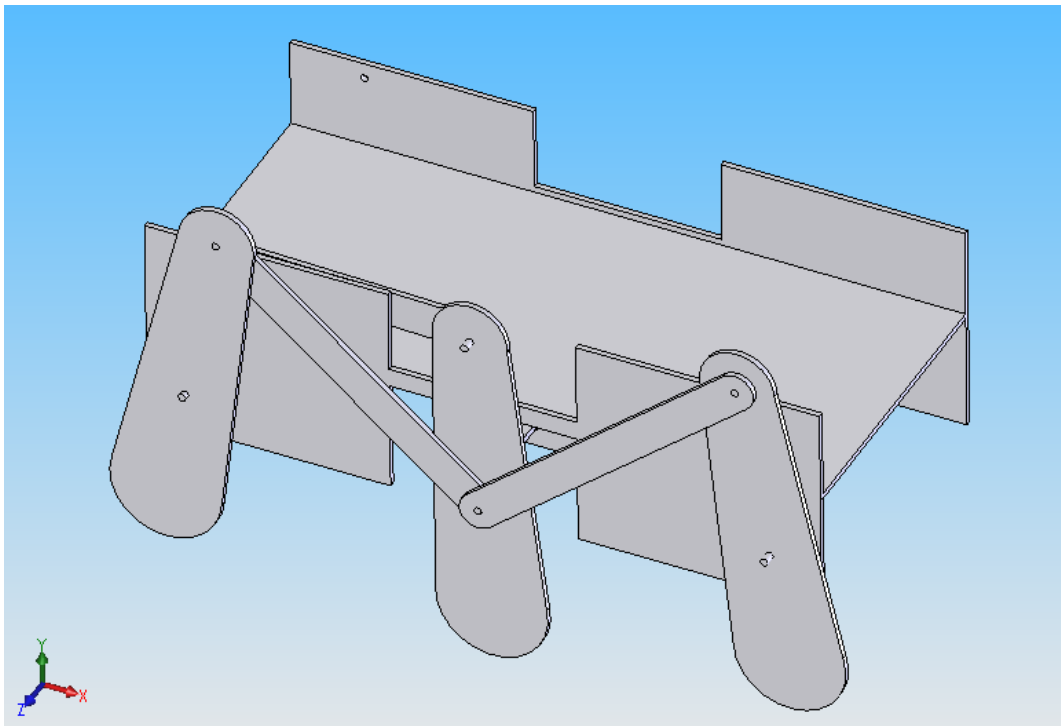


Figura 10. Mecanismo caminador simulado en un software CAE.



## IMPLEMENTACIÓN

Con base en los resultados obtenidos de la cinemática articular, se construyó el mecanismo caminador que se muestra en la Fig. 10, el cual está hecho principalmente de acrílico. Este robot caminador tiene un motor que gira exactamente a la mitad entre la distancia de los eslabones pivotes de las patas delanteras y traseras trazando un círculo de aproximadamente 21 mm de radio, movimiento transmitido a la extremidad media que se encarga de tomar dicho movimiento que transforma en dos acciones:

- a) Se toma el impulso del movimiento circular de la manivela del motor que genera un impulso de avance hacia adelante o hacia atrás según el sentido del giro del motor.
- b) Se transmite movimiento hacia las extremidades delantera y trasera por medio de dos eslabones idénticos de aproximadamente 18 cm de longitud entre sus puntos de unión con la parte superior de las extremidades trasera y delantera, que generan un movimiento angular que la permite avanzar al hexápodo.

Un eslabón de 13 cm entre pernos permite que la carrera de avance se aplique a la base del robot dándole estabilidad a las extremidades centrales por medio de un movimiento angular limitado.



Fig. 10. Robot caminador construido.

## DISCUSIÓN

La optimización del mecanismo mediante simulaciones de las ecuaciones que lo modelan, contribuye a hacer eficiente el proceso de diseño y ayuda en gran medida a detectar posibles fallas en la cinemática del mismo para casos simples como este, sin necesidad de programas complicados o métodos numéricos aproximados.

En el funcionamiento real del robot caminador, se observó la importancia del balanceo entre los diferentes eslabones tanto del lado izquierdo como del derecho y el balanceo natural que presentaba el robot, los cuales dependen en gran medida de la alineación y exactitud de los eslabones. Se observa que por mínimas diferencias en la construcción, el movimiento deja de ser suave y exacto para convertirse en un movimiento torpe o desbalanceado. Haciendo los ajustes pertinentes en la simulación de análisis cinemático articular y específico, casi se logra que el robot caminara siguiendo el modelo inicial. También influyeron los materiales utilizados como son el acrílico y los pernos en base a tornillos que se ajustaron a la longitud de las necesidades físicas, el acrílico presentó un defecto de rigidez que se observaba en el movimiento y balanceo natural del robot reduciéndose a un mínimo. Así mismo se observa que por el tipo de material, el mecanismo tendía a patinar en superficies lisas como mosaicos o superficies irregulares como pavimento no muy plano, por lo cual se añadieron unas tiras de caucho en la parte inferior de cada extremidad para aumentar el coeficiente de fricción con el piso.

Por pequeñas diferencias en fase y longitud, un movimiento que debería ser suave y balanceado deja de serlo, y es evidente a simple vista. En un ser humano cuando duele algún hueso o esta mal la columna vertebral también es evidente el desbalanceo que se produce por este pequeño factor que puede llegar a ser grave a medida que se origina un incremento en este. Por lo tanto es recomendable en el diseño de mecanismos, no solamente poner atención a la cinemática del mecanismo, si no además a la correcta selección y aplicación de las juntas y eslabones.

### CONCLUSIONES.

Se desarrolló y construyó un robot caminador de seis extremidades y de un grado de libertad, el cual es accionado por un motor eléctrico. El proyecto se elaboró, tomando la consideración de un mecanismo compuesto de 6 cadenas cinemáticas de 4 eslabones cada una. Mediante el análisis cinemática del mecanismo se logró obtener las dimensiones apropiadas para cada una de las cadenas cinemáticas. Aplicando la dinámica de los mecanismos de cuatro barras se puede observar la dependencia de los diferentes eslabones con respecto al eslabón de entrada y permite tomar las consideraciones con la cinemática obtenida, cosa que no es visible en forma global con los diseños teóricos.

### RECONOCIMIENTOS.

Los autores desean agradecer el apoyo brindado del FAI de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Así mismo, se agradece el apoyo del programa PROMEP de la SEP; PROMEP/103.5/07/2574.

### REFERENCIAS

- [1] H. B. Gürocak, J. Peabody, Design of a robot that walks in any direction, Manufacturing Engineer Program, Washington State University, Vancouver.
- [2] Luis Alberto De León Melgarejo, diseño preliminar de un mecanismo para simular la marcha de una *Blaberus discoidalis*, México D. F., Junio del 2002.
- [3] Michael B. Binnard, Design of a Small Pneumatic Walking Robot, Massachusetts Institute of Technology, January, 1995.
- [4] Jadran Lenarčič, Bahram Ravani, Advances in robot kinematics and computational geometry Ed. Springer, 1994.
- [5] Quinn R.D.; Ritzmann R.E., Construction of a Hexapod Robot with Cockroach Kinematics Benefits both Robotics and Biology, Connection Science, Volume 10, Numbers 3-4, 1 December 1998, pp. 239-254(16).
- [6] De motu animalium, Borelli, A. 1680 ROMA.
- [7] Arch. Biol., Paris, 10, 567. Recherches sur le marche des insectes et des arachnides. Étude expérimentale d' anatomie et de physiologie compareés, Demor J. 1980
- [8] J. Exp. Biol. (In the press) and unpublished observations , Huges, G. M. 1950.
- [9] Ramón Sancibrian, Pable García, Fernando Viadero, Alfonso Fernandez, EXACT-GRADIENT Optimization Method for Rigid-Body Guidance Síntesis in Planar Mechanisms. ASME 2004 Desing Engeneering Technical Conferences and Computers and Information in Engeneering Conference. September 28, SALT Lake City, UTA, USA.
- [10] Adrian Vasiliu, Bernard Yannou, Dimensional Síntesis of planar mechanisms using neural networks: application to path generador linkages. Mechanism and Machina Theory 36(2001) 299-310.
- [11] Chun-Hung Chen Kumar, V. Yuh-Chyun Luo, Motion planning of walking robots using ordinal optimization, Robotics & Automation Magazine, IEEE, Jun 1998 Vol. 5, pp. 22-32 ISSN: 1070-9932.
- [12] Sai K. Banala, Yeliz Karakaya, Sean McIntosh, Zaeem Khan, Sunil K. Agrawal, Desing and Optimization Of a Mecanisim for out Plane Insect Wing Like Motion UIT Twist., ASME 2004 Desing Engeneering Technical Conferences and Computers and Information in Engeneering Conference. September 28, SALT Lake City, UTA, USA.
- [13]. Arthur G Erdman N. Sand, diseño de mecanismos, análisis y síntesis, 3ª edición, Prentice Hall, 1997.