



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Informática  
Maestría en Ciencias de la Computación

**MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN DE UN ROBOT  
HEXÁPODO**

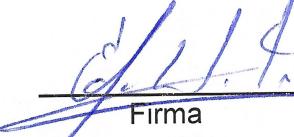
Opción de titulación  
**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestra en Ciencias de la Computación

**Presenta:**  
Ing. María del Carmen García López

**Dirigida por:**  
Dr. Efrén Gorrostieta Hurtado

Dr. Efrén Gorrostieta Hurtado  
Presidente



Firma

Dr. Saúl Tovar Arriaga  
Secretario



Firma

Dr. José Emilio Vargas Soto  
Vocal



Firma

Dr. Jesús Carlos Pedraza Ortega  
Suplente



Firma

Dr. Juan Manuel Ramos Arreguín  
Suplente



Firma

M.I.S.D Juan Salvador Hernández Valerio  
Director de la Facultad



Dra. en C. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Octubre del 2018  
México

## **RESUMEN**

El movimiento de las patas en robots caminantes ha sido objeto de diferentes estudios para resolver el problema de la movilidad de dichos robots. Estos estudios analizan los movimientos realizados por algunos animales, tanto mamíferos, insectos o reptiles, los cuales se reproducen en sistemas mecánicos.

En este trabajo se presenta el desarrollo cinemático de la pata de un robot hexápodo y se implementara la generación de trayectorias. Para la evaluación del desempeño del movimiento de la pata, se realizó un simulador que permite analizar el desplazamiento de dicha extremidad.

La generación de trayectoria es parte fundamental en el estudio del modelado cinemático y dinámico del hexápodo, así como en el desarrollo de la locomoción libre o fija del mismo. Ya que si no se cuenta con la relación adecuada de los ángulos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$  y aun tomando en cuenta la disposición geométrica de las patas, no se podrá lograr que el sistema se mueva adecuadamente y en consecuencia se puede ver afectada la estabilidad del robot, debido a que no se tiene una relación en los ángulos de la pata, es decir si cada ángulo toma valores que no son adecuados al hacer el movimiento consecutivo de tripie que requiere el robot, este podría llegar a caerse.

La simulación de pata en OpenGL, es una aproximación del cómo serán el movimiento de la trayectoria que generara la pata del robot en un mecanismo real. El trabajo futuro que se propone es un simulador de un robot hexápodo, que permita analizar los diferentes parámetros de estabilidad, locomoción, planeación de trayectorias y la aplicación de algoritmos como redes neuronales, que permita el desarrollo de movimientos del robot semejantes a los naturales.

(**Palabras clave:** Cinemática, Robot caminante, Trayectoria, locomoción por patas)

## SUMARRY

The legs movement of a walking robot has been widely studied to solve the mobility problems on such robots. The studies mainly analyze the movement performed by certain animals like mammals, insects, or reptiles, and the movements are performed by mechanical systems.

In the present work, a kinematic analysis of a single leg of a hexapod robot is introduced and the trajectory generation is implemented. In order to evaluate the performance of the leg movement, a simulator was developed and it let to analyze the displacement of the leg.

The trajectory generation is a fundamental step in the kinematic and dynamic study of a hexapod robot, as well as the development of the fix or free locomotion of the robot. Here, if there is an inadequate relationship of the angles  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  and  $\theta_3$ , and considering the geometric arrangement of the legs, we could not achieve the correct system's movement, and consequently the robot stability could be affected, due to the fact that it doesn't exist a relationship in the angles of the leg, because if every angle have values which are not proper and performing the tripod movement, then the robot could fall down.

The leg simulation was developed in C++ with OpenGL libraries, and it is an approach of the trajectory movement of the robot's leg in a real mechanism. As a future work, a simulator of the whole hexapod robot will be developed, including some algorithms that allow analyzing different stability parameters, locomotion, trajectory planning and some artificial intelligence algorithms like neural networks for the development of movements similar to the animals.

*(Key words: Kinematics, walking robot, trajectory, legend locomotion)*

## **Dedicatorias**

**El presente trabajo está dedicado a mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría agradecer en estas líneas la ayuda que muchas personas y colegas, me han prestado durante el proceso de investigación y redacción de este trabajo.

En primer lugar, a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida y a mi familia por estar siempre presentes. A mi mamá Juana L. que en todo momento y a cada paso que doy se encuentra a mi lado, brindándome su apoyo y confianza entera en todo momento. A mi papá José G. quien dejó diversas enseñanzas y a quien recuerdo con mucho amor. A mi compañero, amigo y novio Edgar T. Ferrusca quien nunca me deja rendir.

Mi profundo agradecimiento a mis maestros Dr. Juan C. Pedraza, Dr. Juan M. Ramos., Dr. Emilio Vargas, Dr. Marco Aceves. y Dr. Saúl Tovar; quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo y amistad.

A mis compañeros de maestría por confiar en mí, por su apoyo y por su incondicional amistad durante el proceso de estudio e investigación de este trabajo.

Quiero agradecer también a la Universidad Autónoma de Querétaro y CONACYT por el apoyo brindado durante el proceso de obtención de grado.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Dr. Efrén Gorrostieta, principal colaborador durante todo este proceso, quien, con su dirección, conocimiento, paciencia y consejos permitió el desarrollo de este trabajo.

# ÍNDICE

RESUMEN .....	I
SUMARRY .....	II
DEDICATORIAS .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
ÍNDICE .....	V
ÍNDICE DE CUADROS .....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 DEFINICIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	4
1.2 ESTADO DEL ARTE .....	4
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.4 OBJETIVOS .....	16
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES. ....	17
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	18
2.1 HEXÁPODOS. ....	24
2.2 INSPIRACIÓN BILÓGICA.....	27
2.3 METODOLOGÍAS DE MODELACIÓN DE HEXÁPODOS.....	29
2.4 LOCOMOCIÓN DE ROBOTS. ....	35
2.5 MARGEN DE ESTABILIDAD.....	39
CAPÍTULO III. MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN ROBOT HEXÁPODO. ....	41
3.1 DESARROLLO DEL MODELADO MATEMÁTICO DE UN ROBOT HEXÁPODO. ....	41
3.2 GENERACIÓN DE TRAYECTORIA DE LA PATA.....	50
3.3 ALGORITMOS DE LOCOMOCIÓN DEL ROBOT.....	51
3.4 SIMULACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE LOCOMOCIÓN. ....	56
CAPÍTULO IV. PRUEBAS Y RESULTADOS. ....	59
4.1 VALORACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO MEDIANTE LA SIMULACIÓN.....	59
4.2 VALORACIÓN DE ALGORITMOS DE LOCOMOCIÓN. ....	60
4.3 RESULTADOS.....	61
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	69
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS .....	71
PUBLICACIONES Y ANEXOS .....	72

## **ÍNDICE DE CUADROS**

CUADRO 1. ESTADO DEL ARTE DE ROBOTS CAMINANTES.....	8
CUADRO 2. TIPOS DE ROBOTS.....	18
CUADRO 3. CLASIFICACIÓN DE ROBOTS CON PATAS. ....	25
CUADRO 4. INVESTIGACIONES DE ROBOTS HEXÁPODOS. ....	25
CUADRO 6. PARÁMETROS D-H DE LA PATA DEL ROBOT HEXÁPODO.....	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. MECANISMO DE CHEBYSHEV .....	6
FIGURA 2. MECANISMO LÍNEA RECTA DE CHEBYSHEV .....	6
FIGURA 3. ROBOT INDUSTRIAL KUKA .....	19
FIGURA 4. ROBOT EXPLORADOR CURIOSITY .....	21
FIGURA 5. ROBOT AUTONOMOUS LIGHT AIR VEHICLES (ALAVs) 2.0 .....	21
FIGURA 6. CUADRÚPEDO DE GENERAL ELECTRIC.....	22
FIGURA 7. HRP-4c .....	23
FIGURA 8. ASIMO DE TOYOTA .....	24
FIGURA 9. DISPOSICIÓN DE LAS PATAS .....	28
FIGURA 10. ORIENTACIÓN DE LAS RODILLAS .....	28
FIGURA 11. CONFIGURACIÓN DEL HEXÁPODO.....	29
FIGURA 12. SISTEMA DE COORDENADAS DE UN ROBOT DE DOS ESLABONES.....	30
FIGURA 13. CONVENCIÓN DENAVIT-HARTENBERG (BRUNO SICILIANO, 2009).....	32
FIGURA 14. ROBOT PLANAR DE DOS GRADOS DE LIBERTAD .....	34
FIGURA 15. CONFIGURACIÓN DE UN ROBOT HEXÁPODO .....	36
FIGURA 16. DISTRIBUCIÓN DE LAS PATAS DEL ROBOT HEXÁPODO.....	37
FIGURA 17. DIAGRAMA DE MOVIMIENTOS DE LA LOCOMOCIÓN DEL ROBOT HEXÁPODO..	38
FIGURA 18. POLÍGONO DE APOYO DEL ROBOT HEXÁPODO .....	39
FIGURA 19. ESTABILIDAD ESTÁTICA.....	40
FIGURA 20. POLÍGONO DE APOYO .....	40
FIGURA 21. DISPOSICIÓN GEOMÉTRICA .....	42
FIGURA 22. DISPOSICIÓN GEOMÉTRICA DE LA PATA .....	42
FIGURA 23. PATA EN OPENGL .....	42
FIGURA 24. TRAYECTORIA.....	50
FIGURA 25. ALGORITMO DIFUSO DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN DE UNA PATA .....	55
FIGURA 26. DIAGRAMA A BLOQUES DEL DISEÑO DEL SIMULADOR.....	56
FIGURA 27. POSICIÓN INICIAL DE UNA DE LAS PATAS DEL ROBOT HEXÁPODO EN OPENGL.	58
FIGURA 28. SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DE TRIPIE DE UN ROBOT HEXÁPODO EN UN ENTORNO DE MATLAB .....	60
FIGURA 29. SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DE LOCOMOCIÓN LIBRE DE UN ROBOT HEXÁPODO EN UN ENTORNO DE OPENGL.....	61
FIGURA 30. TRAYECTORIA DE $\theta_1$ .....	62
FIGURA 31. TRAYECTORIA DE $\theta_2$ .....	62
FIGURA 32. TRAYECTORIA DE $\theta_3$ .....	63
FIGURA 33. GENERACIÓN DE TRAYECTORIA DE EN CONJUNTO $\theta_1$ , $\theta_2$ , $\theta_3$ .....	63
FIGURA 34. MOVIMIENTO DE UNA PATAS DEL ROBOT HEXÁPODO EN OPENGL .....	64
FIGURA 35. SIMULACIÓN DE LA LOCOMOCIÓN FIJA DE UN ROBOT HEXÁPODO EN UN ENTORNO DE MATLAB .....	65
FIGURA 36. SIMULACIÓN DE LA LOCOMOCIÓN DE UN ROBOT HEXÁPODO EN UN ENTORNO DE OPEN GL.....	67



## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

En las últimas tres décadas los robos caminantes han sido estudiados, con la finalidad de poder aprender y reproducir habilidades naturales; debido que para algunas aplicaciones (Erden M. S., 2011) se requiere de una considerable movilidad como la que se encuentra en los seres vivos, especialmente cuando se requiere una locomoción en terrenos irregulares (Manuel F. Silva, 2007) (Santos, 2005). La locomoción en base a patas permite el tener una coordinación en los movimientos del mecanismo para no perder el equilibrio al desplazarse por terrenos rocosos, irregulares, planos entre otros (E. Calle, 2007). Así también, se busca que este tipo de máquinas sean independientes o autónomas, dicho de otra forma, que no requieran que el ser humano intervenga, se disminuyan algunas de las restricciones o tenga un aprendizaje propio y tome decisiones en base a este (Zu Guang Zhang, 2006).

Con la finalidad de desarrollar mecanismos con patas algunas comunidades científicas se han inspirado en investigaciones bilógicas de algunos animales (Kristi A. Morgansen, 2007) (Paolo Arena, 2002) (Uluc Saranli, 2001) (Jorge Cortes, 2001) (Emilio, 2006) en cierta medida en el diseño mecánico, control, navegación, entre otros (Hiroshi Kimura, 2007). Esto con el propósito de hacer una mejor aproximación artificial a criaturas que existen en la naturaleza. Las cuales han resuelto de una manera natural el desplazamiento por diferente tipo de superficies.

Estas investigaciones han despertado inquietudes en cuanto al uso de patas y el uso de ruedas para el desplazamiento, donde sobresale como una mejor opción el uso de patas para el desplazamiento o adaptación a suelos con irregularidades, por su estructura el acceso en áreas reducidas y la movilidad que estos presentan a diferencia de la movilidad limitada que se ve en robots con ruedas (Stanley Kwok-Kei Chu and Grantham Kwok-Hung Pang, 2002) (Zhiying Wang, 2011). Así también en donde se busca la explicación y entendimiento del comportamiento de la locomoción animal.

Uno de los principales retos en el desarrollo de robots es el diseño de sistemas de locomoción artificial, pues involucran la interacción de estructuras compuestas por uniones prismáticas o rotacionales que permiten emular las funciones motrices preexistentes en la naturaleza, permitiendo adaptarse a terrenos irregulares (J. P. Flores Fernandes). Así mismo se requiere enfrentar problemas como la complejidad mecánica que puede existir en las piernas, la estabilidad del mecanismo, el consumo de energía, la sincronía de los eslabones de cada una de las articulaciones del robot, debido a que de esto dependerán los grados de libertad que se requieran. Para el caso de un robot cuadrúpedo de tres grados de libertad por pata, se requiere sincronizar doce grados de libertad en total y para un robot hexápodo dieciocho ángulos en total.

Las patas forman parte importante en la estabilidad del robot, así como el observar el centro de gravedad del mismo, ya que, si estas no cuentan con una sincronía adecuada y no brindan el soporte necesario a la base del sistema, este perderá el equilibrio y caerá o se desplazará de una forma ineficiente provocando quizás un

consumo de energía mayor (Jing Liu, 2007). Esta sincronía dependerá del control de la movilidad de las patas para su desplazamiento. El tratar que se muevan dentro de los límites que se establezcan, así como el evitar colisiones entre las extremidades del robot, evitarán el que el sistema sufra daños.

El largo y el diseño de las patas es parte esencial en la locomoción del mecanismo, debido a que de esto dependerá la trayectoria que se implemente en cada una de las extremidades. Si contamos con una trayectoria que permita un movimiento suave, no veremos afectada la estabilidad de nuestro robot por algún movimiento rudo de las extremidades del mecanismo (Efrén Gorrostieta-Hurtado) y podremos determinar el avance del desplazamiento en un tiempo determinado.

Para la experimentación de soluciones a los problemas antes mencionados en años pasados se requerían de modelos físicos para comprobar el óptimo funcionamiento de los planteamientos que se proponía, con esto se perdían recursos y se invertía mayor tiempo en la construcción de uno o más mecanismos de prueba, hasta llegar al modelo que mejor cumplía con las expectativas requeridas. Actualmente el avance en programas dedicados a la programación y entornos gráficos, permiten el desarrollo de herramientas como simuladores, en los que se puede realizar una validación del diseño del sistema físico, la estabilidad del proceso de locomoción, y donde se pueden efectuar pruebas de trayectorias y algoritmos de control. Con esto se pretende elevar el porcentaje de acertamiento en el desarrollo o modelo físico del robot (Kris Hauser T. B.-C., 2008) (Kris Hauser J.-C. L., 2009).

## **1.1 Definición del proyecto de investigación.**

El principal objetivo de este trabajo es el desarrollo de la simulación de un robot de seis patas, con base en diferentes métodos que permitan describir su comportamiento dinámico para evaluar los movimientos de posición y estabilidad del hexápedo. Para esto, es necesario el uso de métodos formales de mecánica, que permiten evaluar los esquemas de control y locomoción del robot, definiendo el mejor método para cumplir con el objetivo general. El simulador es desarrollado bajo una plataforma de programación que permita el manejo de gráficos, considerando características de diversas plataformas, como Matlab, C++ con librerías de OpenGL y 3D Studio. Bajo estas plataformas se desarrolla el software para simular los movimientos del robot de seis patas de la locomoción del robot y conocer de esta forma su comportamiento.

La principal aportación científica de este trabajo es el desarrollo de un sistema que permite evaluar los algoritmos de locomoción de un robot de seis patas, basado en métodos formales que permitan evaluar la locomoción del robot.

## **1.2 Estado del arte.**

El término robot viene de la Obra teatral checoslovaca R.U.R., que tocaba el tema de esclavos humanoides usados en las fábricas (el término Robota significa esclavo de trabajo). Basados en este término, los robots han sido parte fundamental en el desarrollo de investigaciones para las áreas comerciales, industriales y de entretenimiento.

El análisis de este tipo de sistemas no es una tarea sencilla, debido a que se basa en la observación de los movimientos de los animales y de la interacción con su entorno, que, aunque a simple vista parecen ser movimientos simples, implican la interacción de varios nervios, músculos y huesos. Ejemplo de ello son: los movimientos de un ave al cazar en el mar, el movimiento de una serpiente al desplazarse sobre la arena del desierto, los peces al nadar, el galope de un caballo, entre otros (Philip Holmes, 2006).

Los sistemas biológicos cuentan con un conjunto de sensores con los que determinan en qué momento realizar los movimientos propios de su especie; sin embargo, los sensores requieren de procesos que coordinen su interacción con el medio. El sistema nervioso central es el responsable de realizar esta tarea. Dada la interacción entre los sensores y el sistema nervioso, se produce una interpretación y respuesta elaborada, como el movimiento que es llevado a cabo por el aparato locomotor que está compuesto por el sistema muscular y esquelético (Manuel f. Silva, 2006).

Con la evolución de nuevas capacidades en los animales, las cuales han cautivado el interés de reconstruir su mecanismo de destreza y el control que estos presentan. Actualmente la investigación y desarrollo de las tecnologías basadas en mecanismos animales ha evolucionado y mejorado atreves de la historia y se refleja en los cambios presentes en los métodos, técnicas e implementaciones en distintos tipos de robots.

El poder recrear su comportamiento en ambientes similares en los cuales se desarrollan ayuda a fundamentar el estudio de la locomoción de los sistemas y del cómo se desenvuelven en un ambiente real (Philip Holmes, 2006).

En 1870 con el objetivo de imitar el movimiento de un animal, se presenta el primer documento del matemático Pafnuti Lvovich Chebyshev (Luis Ignacio Díaz del Dedo, 2007) donde se presenta una estructura de tres barras articuladas AB, BC, AD cuyo punto de trazado P se aproxima al movimiento rectilíneo.

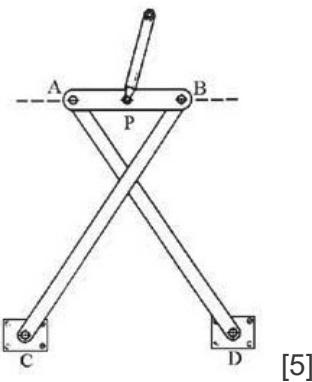


FIGURA 1. Mecanismo de Chebyshev.

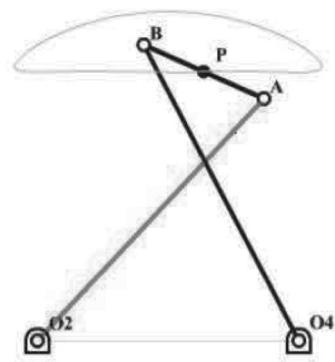


FIGURA 2. Mecanismo línea recta de Chebyshev.

Las investigaciones posteriores tuvieron un enfoque militar. En el que estuvieron involucrados Inglaterra y Estados Unidos, financiando proyectos de andantes como máquinas de guerra (Luis Ignacio Díaz del Dedo, 2007), con el propósito de mejorar el acceso a zonas en donde por su estructura un robot con ruedas no pueda acceder. Esta característica es una de las razones por lo que ha ido en aumento el número de investigaciones sobre los robots caminantes.

Hoy en día la evolución del hardware ha permitido dotar a los robots con sensores y actuadores que les permiten imitar funciones humanas y de animales en términos de movimiento. En el campo del software los desarrollos actuales otorgan a las maquinas la capacidad de aprender e imitar la capacidad de razonamiento humano.

Del análisis de la locomoción biológica de algunos animales y la evolución de herramientas de hardware surgieron investigaciones destacadas como la de 1999, de James P. Ostrowski, que presenta una simplificación de las condiciones necesarias para un óptimo control de la cinemática de sistemas basados en “Abelian Lie Groups”. Este tipo de sistemas son particularmente significativos por su tipo de locomoción. Ejemplo de ello es la cinemática de las hormigas, carros móviles, entre otros (Ostrowski, 1999).

Otro de los trabajos importantes de Ostrowski, fue en el 2001 con la colaboración de Jorge Cortés y Sonia Martínez, en el cual se describe un algoritmo con soluciones numéricas para generar las trayectorias de una serpiente (Jorge Cortes, 2001 ).

A continuación, se presenta una breve revisión de trabajos destacados en el área de robots caminantes.

CUADRO 1. Estado del arte de robots caminantes.

Fecha	2006
Autor	Philip Holmes, Robert J. Full, Dan Koditschek, John Guckenheimer.
Trabajo	The Dynamics of Legged Locomotion: Models, Analyses, and Challenges.
Descripción	Describe modelos matemáticos de locomoción de patas de animales, enfocándose en el funcionamiento de los insectos describe modelos de diversa complejidad, analiza los esquemas de su comportamiento, compara sus predicciones con datos experimentales e identifica un número de preguntas y desafíos matemáticos específicos (Philip Holmes, 2006).
Fecha	2006
Autor	Zu Guang Zhang, Hiroshi Kimura, Kunikatsu Takase.
Trabajo	Adaptive Running of a Quadruped Robot Using Forced Vibration and Synchronization.
Descripción	Propone conceptos de control para funcionamientos adaptables en general y presenta un estudio teórico de la locomoción limitada de un robot cuadrúpedo acorde con el método de control que propone. El control involucra vibración forzada con una función de sincronización, que es construida usando un generador de ritmo y un generador de esfuerzo de torsión. Tal regeneración sensorial hace el sistema adaptable a los cambios físicos y en terreno (Zu Guang Zhang, 2006).

Fecha	2006
Autor	Manuel F. Silva, J. A. Tenreiro Machado.
Trabajo	Fractional Order PDJoint Control of Legged Robots.
Descripción	<p>Estudia un control Proporcional Derivativo para un robot hexápedo. Las patas del robot cuentan con tres DoF y actuadores con saturación; cuando camina sobre la tierra variando algunas propiedades. Se desarrollo una simulación del modelo y el movimiento robot es caracterizado en términos de las variables de la locomoción (Manuel f. Silva, 2006).</p>
Fecha	2006
Autor	Yanto Go, Xiaolei Yin, Alan Bowling.
Trabajo	Navigability of Multi-Legged Robots.
Descripción	<p>Trata la mejora de navegabilidad de un robot de seis patas con el desarrollo de un método simple de navegación que utiliza un compás magnético y la señal de navegación para corregir estos errores con cada paso, por lo que se tiene una límite en la propagación de error (Yanto Go, 2006).</p>
Fecha	2006
Autor	Chandana Paul Francisco J. Valero-Cuevas, Hod Lipson.
Trabajo	Design and Control of Tensegrity Robots for Locomotion.

Descripción	<p>Se presentan dos robots del tensegrity: TR3, basado en un prisma triangular del tensegrity con tres puntas y TR4, basado en a prisma cuadrilátera del tensegrity con cuatro puntas.</p> <p>Se desarrollan controles para la locomoción delantera usando algoritmos evolutivos, para poder reproducir pasos estáticos y dinámicos en ambos robots (Chandana Paul (Member, 2006).</p>
Fecha	2007
Autor	Jing Liu, Min Tan, Xiaoguang Zhao.
Trabajo	Legged robots - an overview.
Descripción	Propone los problemas que se solucionaran con el desarrollo de robos con patas; mencionando algunos de los sectores en los que se emplearían y toma a tema de discusión el desarrollo a futuro que tendrán estos robots; así como la importancia que está tomando investigaciones relacionadas en el tema (Jing Liu, 2007).
Fecha	2007
Autor	Manuel F. Silva, J.A. Tenreiro Machado.
Trabajo	A Historical Perspective of Legged Robots.
Descripción	Presenta la evolución y el estado de los sistemas de locomoción por patas, hasta la actualidad. Aborda algunos problemas sin resolver y desafíos en la investigación de la robótica (Manuel F. Silva, 2007).
Fecha	2007

Autor	Hiroshi Kimura, Yasuhiro Fukuoka, Avis H. Cohen.
Trabajo	Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Natural Ground Based on Biological Concepts.
Descripción	Presenta los resultados de la construcción de un robot cuadrúpedo, que camina con tracción delantera en un terreno irregular al aire libre; usando un modelo basado en el sistema nervioso, consiste en un CPG (generador de patrón central), respuesta y reflejos (Hiroshi Kimura, 2007).
Fecha	2007
Autor	E. Calle, I. Ávila, J. Zambrano.
Trabajo	“Diseño e Implementación de un Robot Móvil Cuadrúpedo”
Descripción	Expone ideas generales del diseño e implementación de un robot cuadrúpedo, destinado al estudio de los métodos de locomoción en máquinas caminantes.  Se presenta el diseño mecánico de un robot cuadrúpedo (CAD), se estudia el análisis cinemático y dinámico, se realiza un ajuste al diseño original y se obtienen los planos finales para la arquitectura física y lógica del sistema de control (E. Calle, 2007).
Fecha	2007
Autor	Kristi A. Morgansen (Senior Member, IEEE), Benjamin I. Triplett, Daniel J. Klein.

Trabajo	Geometric Methods for Modeling and Control of Free-Swimming Fin-Actuated Underwater Vehicles.
Descripción	Se aplican técnicas de mecánicos geométricos, teoría de control no lineal geométrica y se realizan algoritmos de seguimiento de trayectoria para un vehículo subacuático “freeswimming” que cuenta con dos-articulaciones “cola actuada” y “aleta pectoral”; actuando independientemente (Kristi A. Morgansen, 2007).
Fecha	2008
Autor	Efrén Gorrostieta, Emilio Vargas Soto.
Trabajo	Algoritmo Difuso de Locomoción Libre para un Robot Caminante de Seis Patas
Descripción	Muestra un conjunto de algoritmos que permiten a un robot de seis patas desplazarse mediante acciones no establecidas ni periódicas (locomoción libre). Estos algoritmos utilizan técnicas de lógica difusa para la toma de decisiones.  Se valoran los algoritmos mediante una simulación del proceso de locomoción del robot. También se muestra un algoritmo de control neuronal utilizado para dirigir adecuadamente la ejecución de la locomoción del robot (Efrén Gorrostieta, 2008).
Fecha	2008
Autor	Kris Hauser, Timothy Bretl, Jean-Claude Latombe, Kensuke Harada and Brian Wilcox.

Trabajo	Motion Planning for Legged Robots on Varied Terrain.
Descripción	<p>Se estudia el movimiento cuasi-estático de piernas largas de robots con muchos grados de libertad. Se presenta un planificador basado en la probabilidad (muestra-base) para que compute los movimientos en distintos terrenos y genere una secuencia de pasos para la generación de movimientos continuos del robot. Se muestra una simulación de un vehículo lunar seis-patas ATLETA y el humanoide HRP-2 en varios terrenos (Kris Hauser T. B.-C., 2008).</p>
Fecha	2009
Autor	Naoki Motoi, Tomoyuki Suzuki, and Kouhei Ohnishi.
Trabajo	<p>A Bipedal Locomotion Planning Based on Virtual Linear Inverted Pendulum Mode.</p>
Descripción	<p>Se plantea una locomoción bípeda basada en el péndulo invertido (VLIPM). Donde la posición deseada y la velocidad se alcanzan mientras se coloca la pata en el siguiente punto.</p> <p>En el método propuesto, la colocación virtual modificada del pie y el planeamiento de la trayectoria se calcula por separado.</p> <p>El VLIPM se aplica al cálculo de la colocación virtual modificada del pie. Usando el punto de apoyo virtual (VSP), la diferencia entre las colocaciones virtuales modificadas y deseadas del pie se compensa.</p> <p>La estabilidad al caminar del método propuesto es equivalente a la del método convencional. La eficacia del método propuesto es</p>

	confirmada por una simulación y un experimento (Naoki Motoi (Member).
Fecha	2009
Autor	Kris Hauser and Jean-Claude Latombe.
Trabajo	Muti-modal Motion Planning in Non-expansive Spaces.
Descripción	En este papel presentamos un nuevo planificador (multi-modal-PRM), algoritmo para los problemas de múltiples de intersecciones finitas. Se analizan las características de este algoritmo. Mostramos la rápida convergencia cuando cada submanifold es individualmente expansivo y establezca un límite de tiempo en la marcha. Estos algoritmos se demuestran en ejemplos geométricos y en un planificador locomoción de piernas (Kris Hauser J.-C. L., 2009).
Fecha	2010
Autor	Anthony M. Bloch, Melvin Leok, Jerrold E. Marsden, Dmitry V. Zenkov.
Trabajo	Controlled Lagrangians and stabilization of Discrete Mechanical Systems.
Descripción	Presenta las técnicas de Lagrange para sistemas mecánicos discretos. La teoría se ilustra con el problema de la estabilización del sistema del carro-péndulo en una pendiente, y el uso de la teoría a la construcción de los reguladores digitales de la regeneración (Anthony M. Bloch, 2010).

### **1.3 Justificación.**

Uno de los principales retos en el desarrollo de robots es el diseño de sistemas de locomoción artificial, pues involucran la interacción de estructuras compuestas por uniones prismáticas o rotacionales que permiten emular las funciones motrices preexistentes en la naturaleza, permitiendo adaptarse a terrenos irregulares. Sin embargo, estas máquinas presentan un excepcional reto al momento de analizarlas y controlarlas, por ello se tiene interés en el desarrollo de los modelos basados en los sistemas naturales para facilitar el desarrollo dinámico y cinemática de los robots (Zu Guang Zhang, 2006).

En la actualidad investigaciones y desarrollos en robótica se han enfocado en el área de robots caminantes, ya que el requerimiento de aplicaciones con movilidad y locomoción en terrenos irregulares va en aumento (Yanto Go, 2006). Los robots con patas permiten una coordinación de movimientos para aislar las irregularidades del terreno. Es por ello que se busca desarrollar máquinas que requieran poca intervención humana o la disminución de algunas restricciones, para tener un robot que sea independiente y autónomo.

El análisis de este tipo de robots se basa en ecuaciones diferenciales, sistemas dinámicos tanto lineales como no lineales, que en la mayoría de los casos se simplifican mediante un tratamiento matemático para describir el comportamiento en formas de modelos lineales, los cuales facilitan el estudio y presentan restricciones debido a que al linealizar los sistemas acotamos considerablemente

su comportamiento, debido a que robot presentan componentes altamente no lineales, lo cual dificulta su estudio y el desarrollo de las leyes de control de dichos mecanismos.

En caso particular de esta investigación el robot propuesto presenta a su vez una restricción, no lineal y redundante, lo cual agrega un grado de dificultad en el desarrollo del modelo matemático. Por otro lado, algunos diseñadores de robots patones intentan crear sistemas mecánicos que imiten a las criaturas de la naturaleza con múltiples patas, con lo que se busca hacer una mejor aproximación a ellas. Como un ejemplo, están la hormiga y la araña, que son insectos de seis patas (hexápodos), los cuales presenta esta metodología y locomoción de manera natural (Jing Liu, 2007).

En este trabajo se incluirá un enfoque que integre el modelo matemático de la cinemática y dinámica del hexápodo en conjunto con un simulador, que permita analizar el comportamiento del robot y su estabilidad dentro de un proceso de locomoción (Kris Hauser T. B.-C., 2008).

#### **1.4 Objetivos.**

Utilizar los métodos formales de mecánica, que permitirá evaluar los esquemas de locomoción del robot, para definir el mejor método para cumplir con el objetivo general.

Seleccionar una plataforma de programación para desarrollar un programa de simulación del robot de seis patas, considerando características de diversas plataformas, como pudieran ser Matlab, C++, librerías de OpenGL y 3D Studio, este último para el manejo de gráficos.

Desarrollar un software que permita simular los movimientos del robot de seis patas, utilizando la plataforma elegida, para conocer de esta forma su comportamiento.

### **1.5 Alcances y limitaciones.**

Este estudio, se limitó al desarrollo de un simulador donde se probaron y observaron los sistemas de locomoción de un robot hexápedo. En este simulador se observaron los diferentes movimientos de las patas a lo largo del desarrollo de las etapas de los algoritmos propuestos. Por otro lado, se puede analizar también el comportamiento de la estabilidad que presenta el robot hexápedo y la evolución del mismo al realizar una trayectoria deseada.

El sistema que se presenta se limita principalmente a la morfología del robot, que presenta solo seis patas de las mismas dimensiones y longitudes. No se realizó un análisis del sistema de locomoción, donde se genere un polígono de apoyo.

La superficie en la cual se desplaza el robot en el simulador no presenta cambios en su morfología y textura. No se consideró el movimiento del hexápedo con una carga o tipo de material en especial.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

El desarrollo de diversos robots va en aumento y lo que solo era una idea plasmada en una novela de ciencia ficción, poco a poco se va desarrollando en el mundo real. Consecuencia de esto es el auge que en la actualidad se muestra en la creación de robots con numerosas estructuras geométricas y mecánicas que definen su funcionalidad y aplicación. En el siguiente cuadro (CUADRO 2) se presenta una clasificación de forma general de lo anterior. (Cortés, 2011)

CUADRO 2. Tipos de robots.

Industriales	Brazos mecánicos	Robots Manipuladores
Móviles	Terrestres: Ruedas y Patas	
	Submarinos, aéreo-espaciales	
Humanoides	Diseño complejo	

El desarrollo en investigación en máquinas con capacidades de trasladar objetos de un lugar a otro, realizar movimientos de desplazamiento o semejantes a las articulaciones similares a la de los algunos seres vivos, tiene como objetivo en la mayoría de los casos el poder comprender y reproducir o imitar dichos movimientos o estructuras. Este proceso ha tomado su tiempo y no fue hasta unos cuantos años que han surgido tecnologías que han permitido mejorar el desempeño en la evolución de la robótica; con creaciones tecnológicas como: robots manipuladores, con ruedas, con patas, híbridos y algunos robots voladores (Luis Ignacio Díaz del Dedo, 2007), los cuales se describen brevemente en los siguientes párrafos.

**Robot manipulador:** mecanismo automático, reprogramable o multifuncional con estructura semejante a la de un brazo humano, capaz de posicionar u orientar objetos, dependiendo de la trayectoria, ruta o coordenadas programadas. Esto con la finalidad de obtener una mayor precisión, rapidez y fuerza, es por ello que este tipo de robot se utilizan en el área industrial y con un mayor impacto en el área automotriz, donde se realizan trabajos que requieren de un mayor esfuerzo físico, precisión al manipular, cortar, soldar o pintar piezas u objetos de pequeño o gran volumen (FIGURA 3).

La Asociación Internacional de Estándares ISO define al robot manipulador industrial como: “manipulador de 3 o más ejes, con control automático, reprogramable, multiplicación, móvil o no, destinado a ser utilizado en aplicaciones de automatización industrial. Incluye al manipulador (Sistema mecánico y accionadores) y al sistema de control (software y hardware de control y potencia)”.



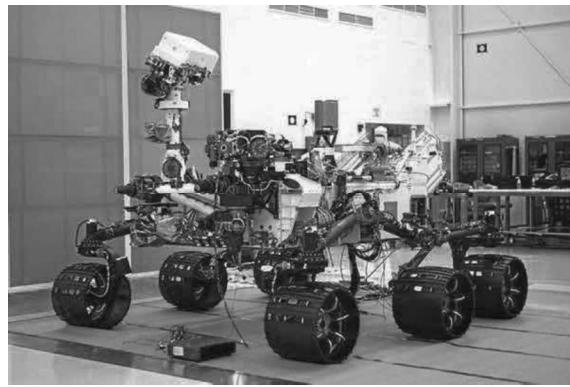
[1]

FIGURA 3. Robot industrial kuka.

Robots móviles (ISO 8373): “Robot que contiene todo lo necesario para su pilotaje y movimiento (potencia, control y sistema de navegación)”. Dentro de este tipo de robots, tenemos a los:

**1.- Robots con ruedas:** Este robot por lo general cuenta con una estructura rígida como cuerpo que es soportado por ruedas que pueden estar en contacto directamente con el suelo o a través de unos rodillos con los que se puede realizar el desplazamiento de un lugar a otro. Existen diferentes tipos de ruedas para este tipo de robots, así como diferentes configuraciones de sus ruedas según los movimientos que se requieran generar en base al terreno en que se desea desplazar el móvil; algunas configuraciones son: diferencial, triciclo, ackerman, síncrona, omnidireccional y por cintas de desplazamiento. Este tipo de robot por lo general se utiliza en exploraciones en terrenos no conocidos o en situaciones peligrosas, ejemplo de ello actividades militares (Calandín, 2006).

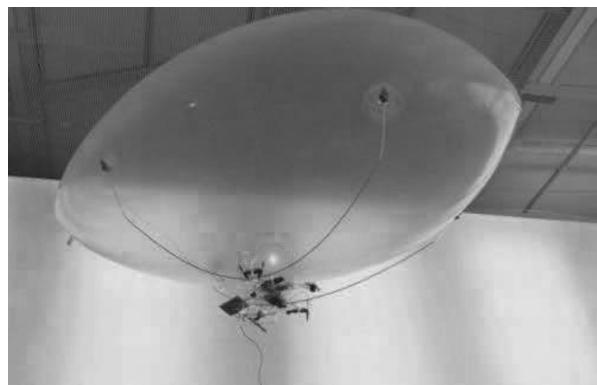
**2.- Robots híbridos:** Algunas investigaciones requieren de robots que involucren ruedas y patas o en ocasiones se requiere de realizar combinaciones convenientes para evaluar el mejor desempeño logrado con los diferentes tipos de estructuras creadas. Con el objetivo de tener mejores alternativas para el desempeño en diferentes terrenos o aplicaciones (Luis Ignacio Díaz del Dedo, 2007), ejemplo de ello es curiosity (FIGURA 4), la última creación de la NASA que cuenta con ruedas al final de cada una de sus extremidades para un mejor movilidad y estabilidad al realizar exploraciones en Marte.



[2]

FIGURA 4. Robot explorador Curiosity.

**3.- Robots voladores:** La incursión en el desarrollo de este tipo de robots va en aumento debido al auge que actualmente se presenta en el área de la aeronáutica. Por otro lado, también destacan en esta clasificación los robots teleoperados, que requieren de un operador humano en la mayoría de los casos para ser ubicados o manipulados en el espacio o área que se requiera. En estos casos la responsabilidad de la percepción del entorno, planificación y manipulación recae en el o los operadores humanos, en caso de que el robot no tenga algún grado de autonomía, ejemplo de ellos los Autonomous Light Air Vehicles (ALAVs) 2.0 del artista norteamericano Jed Berk (FIGURA 5).



[3]

FIGURA 5. Robot Autonomous Light Air Vehicles (ALAVs) 2.0.

**4.- Robots con patas:** Este tipo de mecanismos surgieron en base a la observación de mecanismos andadores en la naturaleza. Su estructura física dependerá de la actividad o tarea para la que se requiera emplear, así como el número de las extremidades (Manuel F. Silva, 2007). Algunas investigaciones se centran en este tipo de mecanismo caminantes dado que son aptos para entornos complejos en donde a los robots con ruedas se les dificulta desplazarse o acceder (Zhiying Wang, 2011).

En la (FIGURA 6) se muestra uno de los primeros proyectos de robots caminantes desarrollado por R. Mosher, que fue capaz de adoptar diferentes posturas. El vehículo se controlaba por medio de un joystick y depende totalmente de un operador humano para su funcionamiento.

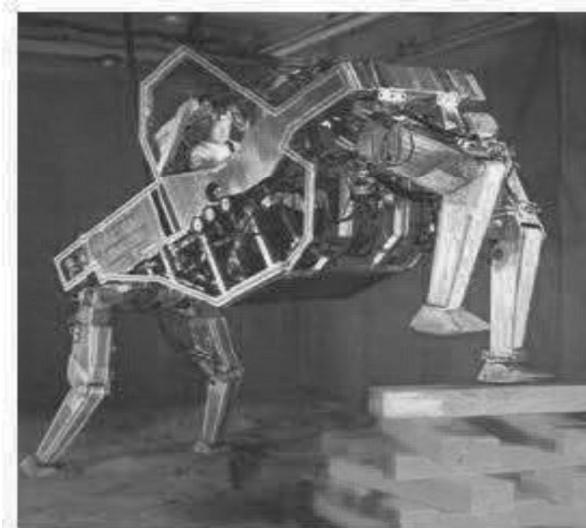


FIGURA 6. Cuadrúpedo de General Electric.

**5. Robots humanoides:** También conocidos como androides son maquinas antropomórficas capaces de imitar funciones básicas que el ser humano realiza cotidianamente, tales como caminar, ver, subir escaleras, poder imitar el proceso

de servir café, limpiar y trasladar objetos. Por otro lado, se algunos de los androides actuales son capaces de ejecutar actividades como: ejecutar actividades de baile, saltar sobre un solo pie, tocar instrumentos musicales o rescatar a personas que se encuentren atrapadas en derrumbes.

La apariencia de estos humanoides juega un papel importante ya que permite que la interacción con el ser humano sea más amigable, como la que se muestra en la (FIGURA 7) a HRP-4C un robot humanoide creado por el Instituto Nacional de Tecnología y Ciencia Industrial Avanzada. Este robot cuenta con inteligencia artificial que le permite tener un reconocimiento del habla y cuenta con ocho motores en el rostro que le permiten expresar gestos humanos complementados con la habilidad de caminar y mover brazos.



FIGURA 7. HRP-4c

Asimo (FIGURA 8) por otro lado es una de las creaciones de HONDA, posee una avanzada tecnología y años de experiencia que lo han llevado a posicionarse como el humanoide con mayor habilidad para igualar la complejidad de movimientos del

ser humano. Cuenta con la habilidad de adaptarse a su entorno, equilibrio en su postura, equilibrio con rapidez, agilidad, balance y reconocimiento de objetos.

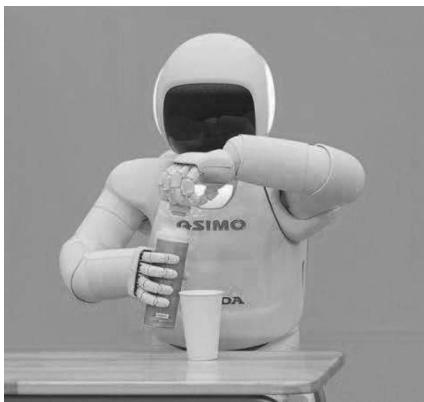


FIGURA 8. ASIMO de TOYOTA

## 2.1 Hexápodos.

Los robots son clasificados en dependiendo de algunas características que posean o atendiendo diferentes criterios. Dentro de las que destacan su estructura física o tareas que pueda realizar.

En caso particular de la clasificación de los robots con patas toma como referencia la tipificación que se emplea en los animales con patas; que como forma conveniente se clasifican en base al número de extremidades que presentan.

En el siguiente cuadro (CUADRO 3) se puede observar la agrupación de los robots con patas en base al criterio anterior, al igual que la inspiración natural de cada uno de los grupos clasificados.

CUADRO 3. Clasificación de robots con patas.

Locomoción natural	Clasificación de animales y Robots con patas
Orugas, ciempiés, milpiés	Polipodos
Cangrejos	Decápodos
Arácnidos	Octópodos
Insectos (hormigas, arañas)	Hexápodos
Mamíferos y reptiles	Cuadrúpedos
Humanos y aves	Bípedos

Diversas investigaciones acerca de este tipo de mecanismos naturales (CUADRO 4) han surgido, debido a que se pretende el desarrollo de mecanismo que imite la conducta y forma de reaccionar que han desarrollado los sistemas naturales.

A continuación, se presenta un cuadro que contiene algunas de estas investigaciones, mostrando principalmente los trabajos en robots con seis extremidades.

CUADRO 4. Investigaciones de robots hexápodos.

Año	Autor	Investigación
2001	Uluc Saranli, Martin Buehler, Daniel E. Koditschek.	Se describe el diseño y el control del robot RHex, un poder autónomo que se desplaza por terrenos que se asemejan a la complejidad y diversidad del paisaje natural (Uluc Saranli, 2001).

2002	Emilio Vargas, Efrén Gorrostieta, Alejandro Pérez.	Se muestra el trabajo del diseño del robot de seis patas ROSEP-1 (Emilio Vargas, 2002).
2002	Paolo Arena, Luigi Fortuna.	Procesamiento analógico neuronal de locomoción artificial en mecanismos mecatrónicos. Aplicado a un robot experimental hexápodo (Paolo Arena, 2002).
2006	Pei-Chun Lin, Haldun Komsuoglu, Daniel E. Koditschek.	Se presenta un híbrido 12-dimensional para estimar el estado para la ejecución de movimientos en terrenos planos de un robot hexápodo (Pei-Chun Lin, 2006).
2008	Gorrostieta Efrén, Vargas Emilio.	Locomoción libre de un robot hexápodo basado en un algoritmo difuso (Efrén Gorrostieta, 2008).
2009	Shibendu Shekhar Roy, Ajay Kumar Singh, Dilip Kumar Pratihar.	Se utiliza Euler-Lagrange para resolver el problema de la generación de trayectoria para un robot de seis patas (Shibendu Shekhar Roy, 2009).
2011	Krzysztof Walas, Dominik Belter.	Se presenta un método para construir un punto de apoyo, así como métodos para la comparación de la estabilidad de un robot de seis patas (Krzysztof Walas, 2011).

2011	Zhiying Wan, Xilun Ding, Alberto Rovetta, Alessano Giusti.	Se calcula la energía cinemática y se construye un modelo dinámico, usando el método de Euler-Lagrange (Zhiying Wang, 2011).
2011	Mustafa Suphi Erden.	Optimización de trayectorias, usando una función de base radial (RBFNN) para interpolar en regiones en donde no fue entrenado. Se demuestra un ejemplo en una pierna del robot Robot-EA308 (Erden M. S., 2011).

## 2.2 Inspiración bilógica.

La disposición de las patas está dada principalmente por la observación en los movimientos de los animales al caminar. Ejemplo de ello son las patas de un reptil que le permiten tener una base o cuerpo estable, adecuado para poderse moverse en los pantanos y terrenos lodosos (Manuel f. Silva, 2006). A diferencia de los mamíferos o disposición frontal, sagital o circular. Estas ponen el cuerpo por encima de las patas, teniendo una menor base de apoyo. Dado lo anterior se tiene que se requiere una mayor estabilidad y un menor consumo de potencia para soportar el cuerpo, permitiéndoles desplazarse en terrenos llanos con una velocidad mayor que los reptiles (M., 1986).

La clasificación de los robots caminatas puede ser por el número de patas, ya que se tiene robots que poseen dos, cuatro, seis u ocho extremidades (Philip Holmes,

2006). Una clasificación más puede ser por la disposición o puntos de fijación que presentan con respecto al cuerpo (FIGURA 9), así como la orientación a la base que estas tienen.

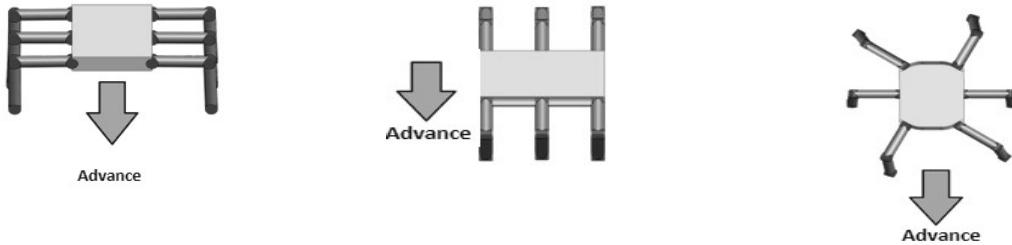


FIGURA 9. Disposición de las patas.

(a) Disposición frontal      (b) Disposición Sagital;      (c) Disposición Circular.

En cada una de las categorías mostradas en la (FIGURA 10), y a la fijación en la que se presentan las patas al cuerpo, pueden encontrarse entre otras las siguientes configuraciones como las de tipo mamífero:



FIGURA 10. Orientación de las rodillas.

(a) Rodillas hacia afuera;      (b) Rodillas con la misma orientación;      (c) Rodillas hacia adentro.

Las configuraciones de tipo reptil (FIGURA 11) se caracterizan por que las patas se encuentran colocadas en ambos extremos del cuerpo, a este sobresalen las rodillas al costado de la base. Las configuraciones de tipo arácnido, se caracterizan por que

sus extremidades están situadas en ambos lados del cuerpo, sobresaliendo las rodillas por la parte superior de cuerpo del arácnido (Emilio, 2006).



FIGURA 11. Configuración del hexápodo.

(a) Configuración reptil;

(b) Configuración tipo arácnido

### 2.3 Metodologías de modelación de hexápodos.

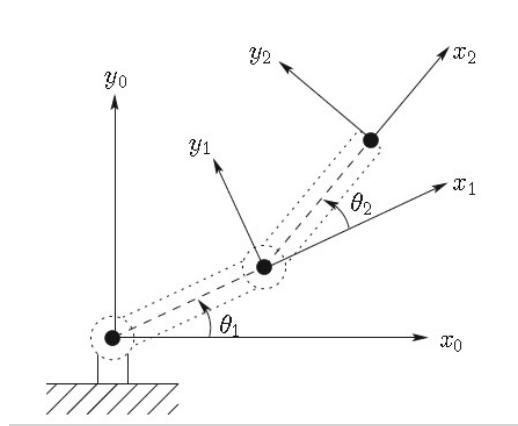
En una tarea genérica, el movimiento de un robot requiere de la ejecución de un movimiento específico prescrito para cumplir con el objetivo para el cual se desarrolló. El sistema de control juega un papel muy importante en esta parte, ya que de él depende que se ejecute correctamente dicho movimiento que el robot realice. Para ello se realiza un análisis preciso de las características de la estructura, de los actuadores y sensores que forman parte del robot, que permite obtener un modelo matemático que describe la relación de entrada-salida de los componentes del robot. El modelo matemático es una parte fundamental ya que en base a él se pueden buscar estrategias de control para el o los movimientos de dicho mecanismo robótico. (Bruno Siciliano, 2009)

En mecanismo con patas el objetivo es reproducir o imitar los movimientos de seres biológicos, en base a lo anterior también se requiere de ejecutar movimientos

preestablecidos al momento de realizar desplazamientos. Por ello se basa la búsqueda de estrategias de control o movimiento en el modelo matemático.

El análisis cinemático de la estructura mecánica de un robot, se refiere a describir de forma geométrica el movimiento en base a un plano cartesiano fijo, donde se omiten las fuerzas y los momentos que pueden causar el movimiento de la estructura que se analiza (Bruno Siciliano, 2009). Este análisis cinemático se puede dividir en cinemática directa y cinemática inversa. Se realizará una descripción de lo anterior en base a robot manipulador.

La cinemática directa se refiere al estudio analítico del movimiento del robot, sin tomar en cuenta las fuerzas que lo originan. Es una función vectorial que relaciona la dependencia que existe entre las coordenadas de las articulaciones con las coordenadas cartesianas del robot, así como de la orientación de la herramienta o efecto final del robot (Cortés, 2011).



(Mark W. Spong, 2005).

FIGURA 12. Sistema de coordenadas de un robot de dos eslabones.

Las coordenadas (x,y) del manipulador (FIGURA 12) están expresadas por:

$$x_3 = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad \text{EC. 1}$$

$$y_3 = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad \text{EC. 2}$$

En donde  $l_1$  y  $l_2$  representa la longitud de los eslabones, respectivamente, así como

la orientación del efecto final con relación a la base:

$$(x_3)(x_1) = \cos(\theta_1 + \theta_2); \quad (x_3)(y_1) = -\sin(\theta_1 + \theta_2); \quad \text{EC. 3}$$

$$(y_3)(x_1) = \sin(\theta_1 + \theta_2); \quad (y_3)(y_1) = \cos(\theta_1 + \theta_2); \quad \text{EC. 4}$$

Lo anterior representado en una matriz de orientación, quedaría como:

$$\begin{bmatrix} (x_3)(x_1) & (x_3)(y_1) \\ (x_3)(y_1) & (y_3)(y_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad \text{EC. 5}$$

Las ecuaciones anteriores EC. 1, EC. 2 y EC. 5 describen la cinemática del manipulador (FIGURA 12). El desarrollar este tipo de ecuaciones para un robot de seis grados de libertad son complejas y no se pueden escribir con facilidad con lo que fue en este caso para los dos eslabones del manipulador (Mark W. Spong, 2005).

Otra metodología que existe es la de Denavit-Hartenberg, la cual mediante un proceso sencillo se puede obtener el modelo cinemático directo (Cortés, 2011).

Después se usan las transformaciones homogéneas para simplificar la transformación entre las coordenadas de los eslabones (Mark W. Spong, 2005).

La convención de Denavit-Hartenberg consiste en generar una tabla de parámetros que están relacionados con los eslabones del robot, que toma como referencia el diagrama de la (FIGURA 13), en donde se muestra una cadena de cinemática

abierta a un sistema de referencia cartesiano fijo  $\Sigma_0, x_0, y_0, z_0$  y la asignación de sistema de referencia para las articulaciones  $i - 1$ -  $i$ -ésima,  $i$ -esima e  $i + 1$  de un robot manipulador.

Las variables articulares que se utilizan son denotadas por  $\theta_i$  para el tipo rotacional, prismática o lineal por  $d_i$ , la longitud del eslabón está representada por  $l_i$  y el ángulo de separación entre los ejes  $z_i$  y  $z_{i-1}$  que es denotado por  $\alpha_i$  (Cortés, 2011).

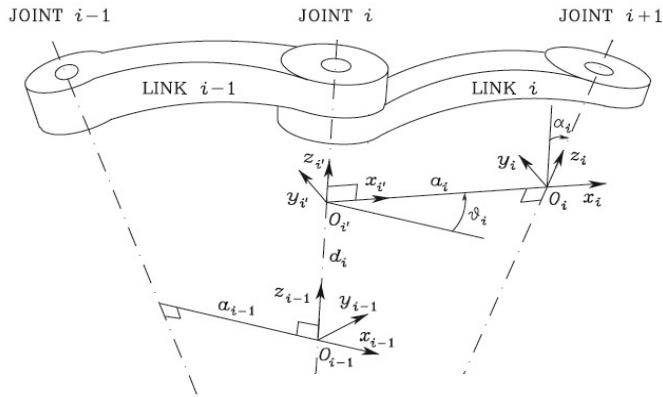


FIGURA 13. Convención Denavit-Hartenberg (Bruno Siciliano, 2009).

En caso de tener articulaciones rotacionales  $di$  es un parámetro constante y representa el offset o espesor del servomotor. Por otro lado, existen dos parámetros constantes, aparte de las variables articulares  $\theta_1$  y  $di$ , que describen las características específicas del eslabón  $i$ -ésimo. Los parámetros adicionales son  $li$ , que se define como la distancia a lo larfo del eje  $xi$  desde el origen del sistema referenciado  $i - 1$  hasta la intersección del eje  $z_{i-1}$  con el eje  $xi$ . El ángulo que se tiene entre los ejes  $z_i$  y  $z_{i-1}$  se expresa por  $\alpha_1$ ; la medición se toma con respecto al plano normal a  $xi$ . Una medición de ángulo positivo para  $\alpha_1$  se toma en dirección del eje  $z_{i-1}$  hacia  $z_i$ . Ejemplo de ello se tiene que para un robot que cuente con un

total de seis articulaciones, se tendrían que tener 18 elementos para poder describir completamente un modelo cinemático de este robot (Cortés, 2011) (Bruno Siciliano, 2009).

Hasta este punto podemos resaltar que la convención de Denavit-Hartenberg depende los sistemas de referencia cartesianos en las articulaciones y eslabones, así también como en sus eslabones adyacentes. Por ello la representación de Denavit-Hartenberg de cada transformación homogénea  $H_i$  EC. 6 se representa por el producto de cuatro transformaciones básicas (Cortés, 2011):

$$H_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

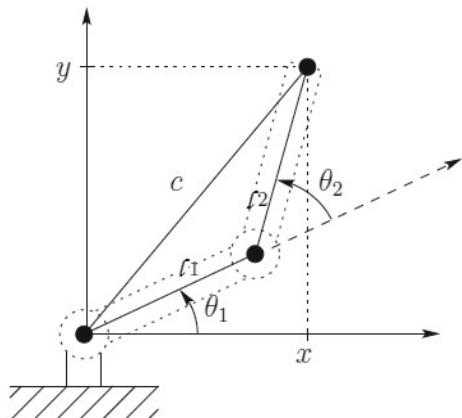
$$\therefore \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \cos\alpha_i & l_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & \cos\theta_i \sin\alpha_i & l_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

EC. 6

Hasta este punto la cinemática directa fue la herramienta que nos permite saber la posición y orientación del extremo final del robot manipulador para este caso como una función de las variables articulares. Por otro lado, si se desea que el robot se posicione en cualquier configuración la cinemática directa no nos es suficiente para resolver este problema. Por ello se recurre a la cinemática inversa, aun que involucra mayor complejidad para su resolución que la cinemática directa (Cortés, 2011) (Mark W. Spong, 2005).

En la cinemática inversa se pueden encontrar diversos escenarios, un ejemplo de ello es que pueden existir diversas soluciones o no existir alguna solución analítica, en caso de ser este el problema, se pueden proponer métodos numéricos, iterativos, geométricos, entre otro como una solución al problema que se presenta. Esta herramienta de la cinemática inversa se puede decir que es un problema no lineal que relaciona las coordenadas articulares en una función de coordenadas cartesianas. En otras palabras, para el caso del robot manipulador, se busca el obtener los ángulos de las articulaciones, tomando en consideración la posición cartesiana y la orientación de la herramienta que se encuentra en el extremo final del robot.

Como ejemplo se presentará el método geométrico para obtener la cinemática inversa de un robot manipulador de dos grados de libertad (FIGURA 14).



(Mark W. Spong, 2005)

FIGURA 14. Robot planar de dos grados de libertad.

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right) \quad \text{EC. 7}$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \arctan\left(\frac{l_2 \sin(q_2)}{l_1 + l_2 \cos(q_2)}\right) \quad \text{EC. 8}$$

## **2.4 Locomoción de robots.**

La locomoción esta descrita por los movimientos que realiza una persona, un animal, máquina o en este caso un robo, que, al realizar un desplazamiento, genera un cambio en el espacio o dicho de otra forma se tiene un cambio de posición (Richard Altendorfer, 2002).

En épocas pasadas los únicos con la posibilidad y capacidad para realizar este proceso de locomoción eran los seres vivos, pero la necesidad e inquietud de desarrollar seres mecánicos semejantes a sistemas naturales; en cuanto a imagen, forma y habilidades dio surgimiento a un nuevo tipo de locomoción. Esta locomoción a diferencia de los sistemas biológicos, depende de mecanismos como motores, sensores, una fuente de energía artificial entre otros, como herramientas para poder realizar los movimientos que se le establezcan (Chandana Paul (Member, 2006).

La locomoción se modifica dependiendo de quién la realice, ya que mientras el ser humano se desplaza de forma bípeda, algunos de los animales para transportarse de un lugar a otro, necesitan volar, arrastrarse, caminar sobre cuatro, seis u ocho patas, dependiendo de la estructura física que posean (Ravi Balasubramanian, 2008).

Por otro lado el desarrollo de locomoción artificial permite que el diseño de los mecanismos, así como de su estructura, se modifiquen dependiendo de la tarea que realicen, en otras palabras, que se desarrollen estructuras más fuertes en comparación con las de los seres vivos y el resaltar en ellos habilidades que permitan su desplazamiento a una mayor velocidad o el que puedan recorrer

grandes distancias con una carga pesada o simplemente el que puedan moverse en terrenos que para un ser humano sean peligrosos o difíciles de explorar (Manuel f. Silva, 2006).

Con base en lo anterior y en una inspiración bíológica es el auge que se tiene en el desarrollo e investigación de mecanismos con patas, que tiene como fin el imitar la locomoción de algunos animales con extremidades (Jing Liu, 2007).

En este caso el desarrollo de locomoción artificial en base a patas, se puede tornar complicado dependiendo de número de patas y la configuración del robot que se requiera diseñar. En este trabajo se tomará como objeto de estudio la configuración de un robot hexápodo (FIGURA 15).

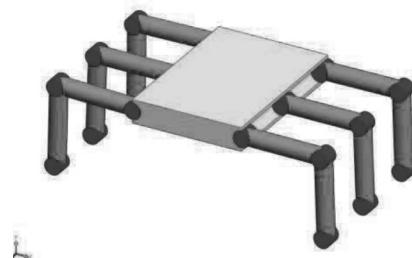


FIGURA 15. Configuración de un robot hexápodo.

Una forma de realizar el desplazamiento para un robot caminante es mediante la locomoción fija que se basa en movimientos continuos o secuenciales establecidos de sus patas, donde se tienen parámetros y variables del sistema de locomoción son totalmente conocidos y previamente determinados, ya que estos siguen un patrón previamente establecido. Para el caso del robot hexápodo, los algoritmos de locomoción fija residen en realizar movimientos de tres patas a la vez. El primer

movimiento para que el robot de un paso a la vez, consiste en que el robot mueva tres patas y las posicione en la superficie en la que se está desplazando, de tal forma que se forme un soporte para el robot, una vez posicionadas estas tres patas se pueden mover las tres patas restantes hasta que los puntos de apoyo de estas tres se posicen en el superficie cada vez que el robot requiera realizar desplazamientos (Gorrostieta Efrén, 2002).

En la Figura 2.4.2 se muestra la distribución de cada una de las patas del robot hexápedo; representadas por P1, P2, P3, P4, P5 y P6, también se muestra el centro de gravedad del robot, que se identifica como C.G en la (FIGURA 16).

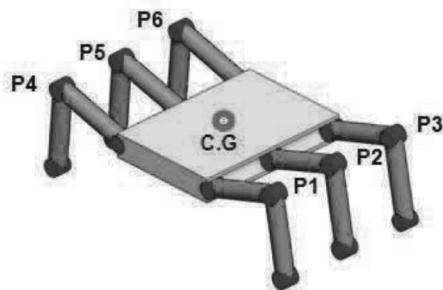


FIGURA 16. Distribución de las patas del robot hexápedo.

La locomoción descrita en el párrafo anterior se muestra gráficamente en la (FIGURA 17), basado en los diagramas de Hildenbrand. En estos diagramas se asigna una línea horizontal a cada una de las patas, en este caso, seis para cada una de las extremidades. Cuando una de las líneas muestra un levantamiento de la línea de inicio, es la representación del movimiento ascendente de la pata que se representa en el diagrama (Gorrostieta Efrén, 2002).

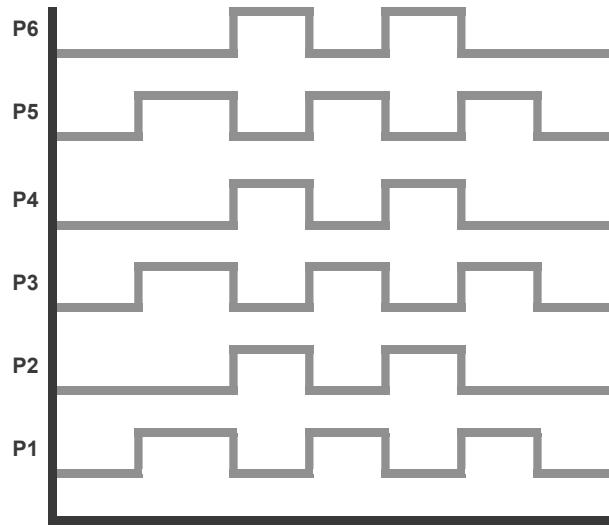


FIGURA 17. Diagrama de movimientos de la locomoción del robot hexápodo.

En el diagrama de la Figura 2.4.3 se puede observar los movimientos de las extremidades de un robot de seis patas, para un sistema de locomoción fija. Se aprecia la regularidad de cada uno de los movimientos de las extremidades, en este caso siempre se moverán las patas alternas de tal forma que el robot siempre quede soportado en tres de sus patas, para no perder la estabilidad del mecanismo (Gorrostieta Efrén, 2002).

En otro orden de ideas, la estabilidad juega un papel muy importante, ya que, si se pierde la estabilidad entre sus extremidades, el robot podría caer. Es por ello que se proyecta el centro de gravedad del robot en un polígono de apoyo como el que se muestra en la (FIGURA 18).

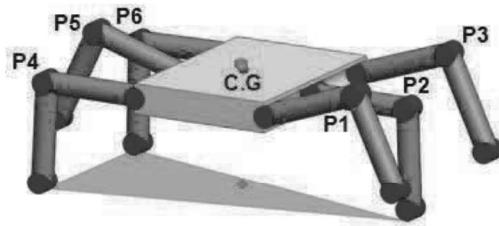


FIGURA 18. Polígono de apoyo del robot hexápodo.

Por contraste, en caso de querer realizar una locomoción libre, se requiere tomar en cuenta el centro de gravedad del robot, para esto el margen de estabilidad juega un papel muy importante para poder desplazar al robot.

## 2.5 Margen de estabilidad.

La estabilidad es parte fundamental ya que si esta no se presenta el hexápodo no se podrá poner en pie. Esta se agrupa en estabilidad estática y dinámica (Manuel f. Silva, 2006). La estabilidad estática se presenta cuando el robot se mantiene estable, esto quiere decir que el robot no necesariamente presentara cambios en sus movimientos con respecto al tiempo (Yanto Go, 2006). Ejemplo de ello es el hexápodo que se muestra en la ( FIGURA 19), donde el equilibrio se mantiene siempre y cuando el centro de gravedad (CG) esté totalmente dentro del triángulo verde, que es fijado por el contacto puntual de tres patas del robot.

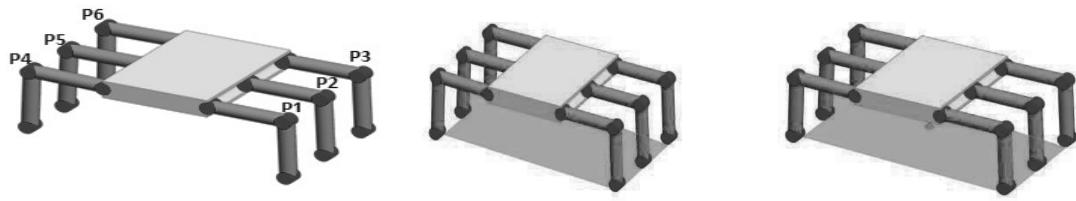


FIGURA 19. Estabilidad estática.

(a) Robot hexápodo; (b) Polígono de apoyo; (c) Centro de masa (CG).

El triángulo formado es conocido como polígono de apoyo ( FIGURA 20), este polígono se forma dependiendo la posición que se tenga de las patas con respecto al suelo, de esto dependerá la estabilidad estática ya que teniendo un área de polígono mayor que cero y como mínimo tres patas de robot situadas al suelo en forma de tripie, se asegura que el robot no se caiga (Erden M. S., 2006) (Emilio, 2006) En caso de tener más puntos fijos o patas en el suelo el polígono puede cambiar su forma a cuadrado, pentágono o una figura geométrica distinta.

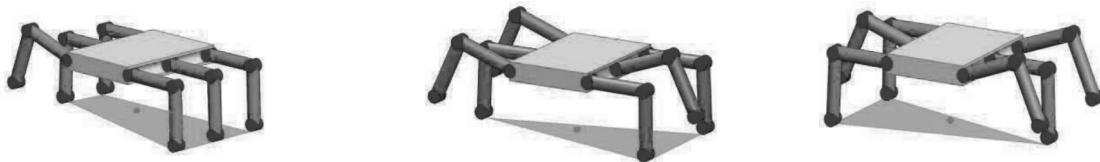


FIGURA 20. Polígono de apoyo.

(a) Con cinco puntos fijos; (b) tripie; (c) Con tres patas.

## **Capítulo III. Modelado y simulación de un robot hexápodo.**

### **3.1 Desarrollo del modelado matemático de un robot hexápodo.**

Las características de las extremidades, dependen de factores relacionados con la aplicación para la que se requiera el robot, la forma del terreno en donde se desplazara, el espacio de trabajo de las patas, la energía que se requiera para la locomoción del mecanismo, el peso que soportara su cuerpo y patas, se tendrán que valorar para poder definir el diseño físico y final de estas extremidades.

Para lograr el máximo volumen de trabajo de la pata con una estructura mínima, existen dos tipos de disposiciones que se utilizan para el diseño de esta. Estimando tres grados de libertad para cada una de las extremidades y dos tipos de configuraciones geométricas (Paolo Arena, 2002).

La configuración de tipo uno (FIGURA 21(a)) se caracteriza por que su primer eje es paralelo al eje vertical del cuerpo del robot, mientras que el segundo y tercer eje son paralelos al plano transversal de la base. Esta configuración ha sido utilizada en investigaciones como la del robot “LittleDog”.

En la configuración de tipo dos (FIGURA 21 (b)) los ejes del segundo y tercer eje son paralelos entre sí y perpendiculares al primer eje de este tipo de configuración, un ejemplo es el robot SILO4 (Gonzalez De Santos, Gálvez, & García, 2003).

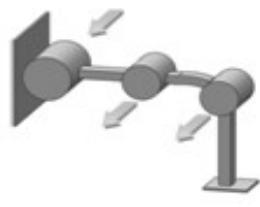


FIGURA 21. Disposición geométrica.

(a) Tipo uno



(b) Tipo dos.

Con la finalidad de tener una estructura mínima, aprovechar el espacio de trabajo y que el impulso para el movimiento del cuerpo sea realizado por una sola pata, mientras que los desplazamientos de las demás articulaciones sean cortos (Jing Liu, 2007) . El diseño que se utiliza está basado en la disposición geométrica de tipo dos (FIGURA 22), que cuenta con tres grados de libertad. El primer ángulo  $\theta_1$  gira  $180^\circ$  sobre su eje perpendicular a los ejes de  $\theta_2$  y  $\theta_3$ , estos últimos giran  $90^\circ$  y  $180^\circ$  respectivamente sobre sus ejes paralelos entre sí.

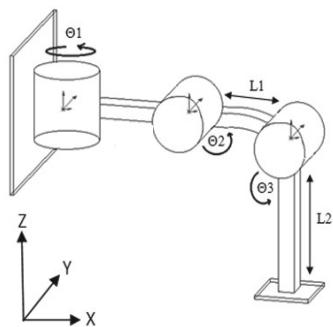


FIGURA 22. Disposición geométrica de la pata.

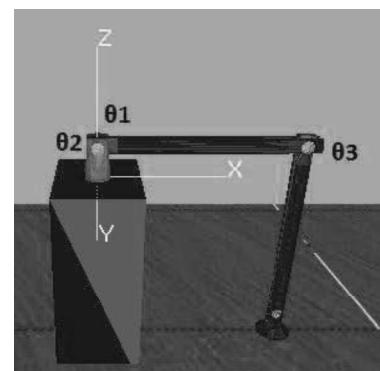


FIGURA 23. Pata en OpenGL.

Una vez establecidos los parámetros geométricos de la pata, la coordinación de los tres grados de libertad (FIGURA 22) es crucial para poder generar la locomoción de esta. Para esto se requiere describir de forma matemática la relación entre las variables articulares, de posición y orientación de la pata (Calandín, 2006). Esto está dado por la cinemática ya que para esta solo se consideran los movimientos sin dar importancia a las funciones que los producen, involucra también la relación que existe entre el espacio de las variables articulares y el espacio de trabajo donde se moverá la pata del robot.

En caso particular de esta pata (FIGURA 23), se describirá definiendo cuatro magnitudes que se asocian a cada articulación. Una de las magnitudes es la variable de la articulación y los tres restantes son parámetros fijos. Con estos parámetros se definirá una representación de Denavit-Hartenberg que involucra la relación entre traslación y rotación de los eslabones adyacentes (Shibendu Shekhar Roy, 2009). En esta se involucra una transformación compuesta por cuatro transformaciones elementales de las que se obtiene la forma general que se asocia a cada articulación (1).

$${}_{i-1}{}^iT = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} d_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & -\cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{EC. 9})$$

Determinando los parámetros de transformación de cada articulación se puede determinar la transformación compuesta  ${}^0{}_nT$  que relaciona las variables de las

articulaciones q1, q2 y q3, con estos se puede calcular la posición y orientación cartesiana (p) de la última articulación (2), parte que hace el contacto puntual con el suelo, siendo  $\varphi$  un conjunto de funciones no lineales (Shibendu Shekhar Roy, 2009).

$$p = \varphi(q) = {}^0T_1{}^1T_2 \dots {}^{n-1}T_n{}^0T \quad \text{EC. 10}$$

En base a lo anterior se determinó la cinemática de la pata de un robot hexápodo, que cuenta con tres articulaciones de rotación (FIGURA 22). En el siguiente cuadro, se muestran los parámetros Denavit-Hartenberg (D-H) que describen las articulaciones de la pata (CUADRO 5). Donde se define la longitud entre los ejes ( $a_{i-1}$ ), los grados de giro ( $\alpha_{i-1}$ ), en caso de articulaciones prismáticas es la variable de desplazamiento ( $d_i$ ) y el ángulo ( $\theta_i$ ) de cada uno de los eslabones de la extremidad que tendrá el robot.

CUADRO 5. Parámetros D-H de la pata del robot hexápodo.

i	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	L1	0°	0	$\theta_1$
2	L2	180°	0	$\theta_2$
3	L3	90°	0	$\theta_3$

Las matrices de transformación de los tres eslabones, se presentan a continuación.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{EC. 11}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & L_1 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{EC. 12}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & L_2 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{EC. 13}$$

El resultado de la matriz de transformación, para determinar la posición desde el eslabón que hace contacto con el suelo, hasta el cuerpo del mismo, esta descrito por la siguiente ecuación.

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cos\theta_2 \cos\theta_3 & -\sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 & 0 & (L_1 \cos\theta_1) + (L_2 \cos\theta_1 \cos\theta_3) \\ \sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 & \cos\theta_1 \cos\theta_2 \cos\theta_3 & 0 & (L_1 \sin\theta_1) + (L_2 \sin\theta_1 \sin\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{EC. 14}$$

Con la matriz de transformación (EC. 14) se obtuvo la cinemática directa del robot, con la que podemos determinar la orientación y posición del punto de fijación de la pata.

Para la cinemática de robot hexápedo, se tomó como base la investigación de Zhiyin Wang (Zhiying Wang, 2011). Tomando de su investigación, la parte cinemática que implemente él un robot hexápedo, para realizar pruebas en el simulador, la descripción de la cinemática es la siguiente.

Cinco articulaciones son definidas como  $J_{sf1}, J_{sf2}, J_{sf3}, J_{sf4}$  y  $J_{sf5}$  el centro del pie, la rodilla, muslo, la cintura y el cuerpo, girar en torno a  $Y_{F1}, Z_{F1}$ , la articulación de la

rodilla, la articulación de muslo, la articulación de la cintura y  $Z_{bi}$  son el conjunto de apoyo de la pata i.  $\theta_{sfi1} = \theta_{i2} + \theta_{i3}; \theta_{sfi2} = \theta_{i1} + \theta_{oi}; \theta_{sfi3} = -\theta_{i3}; \theta_{sfi4} = -\theta_{i2}; \theta_{sfi5} = -\theta_{i1}$  y  $\theta_{oi} = 0$  son un vector unitario del eje de rotación;  $\omega_{sfi1} = [0 \ 1 \ 0], \omega_{sfi2} = [0 \ 0 \ 1], \omega_{sfi3} = [0 \ 1 \ 0], \omega_{sfi4} = [0 \ 1 \ 0]$  y  $\omega_{sfi5} = [0 \ 0 \ 1]$ . Si la configuración inicial de todas las patas es la configuración donde todas están a un ángulo de cinco por encima igual a cero, el eslabón  $W_{Fi}$  es donde  $W_o$  se mueve a lo largo de  $X_o$  con la distancia  $R + l_1 + l_2$ .  $R, l_1$  y  $l_2$  son el radio del cuerpo, la longitud de la cadera y el muslo, respectivamente. Acorde con la teoría del tornillo, la cinemática está dada por lo tanto por la ecuación (1).

$$g_{bfi}(\theta) = \begin{bmatrix} R_{bfi} & r_{bfi} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = e^{\xi_{sfi1} \theta_{sfi1}} e^{\xi_{sfi2} \theta_{sfi2}} e^{\xi_{sfi3} \theta_{sfi3}} e^{\xi_{sfi4} \theta_{sfi4}} e^{\xi_{sfi5} \theta_{sfi5}} g_{b,f1}(0) \quad \text{EC. 15}$$

$$g_{b,o}(\theta) = \begin{bmatrix} R_{b,0} & r_{b,0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = g_{b,f1}(\theta) + {}^b_T(0) \quad \text{EC. 16}$$

Donde  $g_{b,f1}(0)$  y  $g_{b,f1}(\theta)$  es la configuración inicial y recurrente de la referencia del cuerpo  $W_{F1}$ ;  $i$  es el soporte inicial de la pierna  $i$ ;  $\xi$  denota el tornillo de cada articulación y

$${}^b_T(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R + l_1 + l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{EC. 17}$$

Es la matriz de transformación de  $W_{F1}$  y  $W_b$ .

Si el número de piernas de soporte es  $n_s$ , se puede obtener:

$$n_s \cdot g_{b,o}(\theta) = \sum g_{b,fi}(\theta) + n_s \cdot {}^b_{fi}T \quad \text{EC. 18}$$

$$g_{b,o}(\theta) = \frac{\sum g_{b,fi}(\theta)}{n_s} + {}^b_{fi}T(\theta) \quad \text{EC. 19}$$

Donde  $i$  es la pierna de soporte.

La posición de la pierna en una referencia global esta descrita por la ecuación:

$$r_{fi,o} = r_{b,o} + R_{b,o} \cdot {}^b_iR(r_{fi,i} + r') \quad \text{EC. 20}$$

Donde  ${}^b_iR$  es la matriz de transferencia de la pata  $i$  con referencia  $W_{Li}$  de la referencia del cuerpo  $W_b$ ;  $r' = [r_b \ 0 \ 0]^T$  y de  $r_b$  que denota el radio del cuerpo.

Donde  $r_{fi,o}$  es cero para soportar la pierna  $i$ , la velocidad lineal del cuerpo es:

$$\dot{r}_b = -R_{b,o} \cdot {}^b_iR \dot{r}_{fi,i} \quad \text{EC. 21}$$

Una vez obtenido el soporte de las piernas y el cuerpo, se procede a obtener los movimientos de las piernas, que se basa en el soporte de la pierna, cuando la configuración de transferencia de la pierna  $j$  en  $W_{F1}$  es:

$$g_{fj,fi}(\theta) = e^{\xi_{sf1} \theta_{sf1}} e^{\xi_{sf2} \theta_{sf2}} e^{\xi_{sf3} \theta_{sf3}} e^{\xi_{sf4} \theta_{sf4}} e^{\xi_{sf5} \theta_{sf5}} e^{\xi_{sf6} \theta_{sf6}} e^{\xi_{sf7} \theta_{sf7}} e^{\xi_{sf8} \theta_{sf8}} e^{\xi_{sf9} \theta_{sf9}} g_{fj,fi}(\theta)$$

EC. 22

Para ese soporte de la pierna  $n_s$ , la configuración de transferencia del pie  $j$  en  $W_o$  es:

$$g_{fi,o}(\theta) = \frac{1}{n_S} \sum_i \left( e^{\xi_{sfi1} \theta_{sfi1}} e^{\xi_{sfi2} \theta_{sfi2}} e^{\xi_{sfi3} \theta_{sfi3}} e^{\xi_{sfi4} \theta_{sfi4}} e^{\xi_{sfi5} \theta_{sfi5}} e^{\xi_{sfi6} \theta_{sfi6}} e^{\xi_{sfi7} \theta_{sfi7}} e^{\xi_{sfi8} \theta_{sfi8}} e^{\xi_{sfi9} \theta_{sfi9}} g_{fi,i}(\theta) + {}^b T(\theta) \right)$$

EC. 23

Donde los subíndices  $i$  y  $j$  son el inicio del soporte y el movimiento de las patas

$\theta_{sfi6}=\theta_{oj}; \theta_{sfi7}=\theta_{j1}; \theta_{sfi8}=\theta_{j2}$  y  $\theta_{sfi9}=\theta_{j3}$ . El vector unitario de rotación del eje esta descrito

por  $\omega_{sfi6}=[0 \ 0 \ 1]$ ,  $\omega_{sfi7}=[0 \ 1 \ 0]$ ,  $\omega_{sfi8}=[0 \ 1 \ 0]$ ,  $\omega_{sfi9}=[0 \ 1 \ 0]$ .

La ecuación de transferencia la velocidad lineal de la pata  $i$  es la ecuación (EC. 24)

es:

$$\dot{r}_{fi,o} = \dot{r}_{b,o} + R_{b,o} \cdot {}^b R \dot{r}_{fi,i} \quad \text{EC. 24}$$

La cinemática inversa dada la trayectoria del cuerpo  $(r_{b,o}, \dot{r}_{b,o}, \ddot{r}_{b,o})$  y el punto de apoyo

del final de la pierna  $k_{th}$  levantando la pierna  $(r_{fk,o}, \dot{r}_{fk,o}, \ddot{r}_{fk,o}, R_{fk,o}, \dot{R}_{fk,o}, \ddot{R}_{fk,o})$  se obtiene

el movimiento del eslabón de la pierna, por la ecuación de la cinemática inversa. En

la pierna  $i$  con referencia al sistema  $W_h$ , el valor del ángulo puede ser resuelto

independientemente. En  $W_h$  la posición del pie es seguida por la ecuación (EC. 25).

$$r_{fi,i} = \begin{bmatrix} x_{fi,i} \\ y_{fi,i} \\ z_{fi,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (l_1 + l_2 c_{i2} - l_3 s_{i23}) C_{i1} \\ (l_1 + l_2 c_{i2} - l_3 s_{i23}) S_{i1} \\ -(l_2 s_{i2} - l_3 c_{i23}) \end{bmatrix} \quad \text{EC. 25}$$

Donde  $c_{i1}, c_{i2}$  y  $c_{i23}$  están denotados por  $\cos(\theta_{i1}), \cos(\theta_{i2})$  y  $\cos(\theta_{i2} + \theta_{i3})$

respectivamente y  $s_{i1}, s_{i2}$  y  $s_{i23}$  esta denotado por  $\sin(\theta_{i1}), \sin(\theta_{i2})$  y  $\sin(\theta_{i2} + \theta_{i3})$

respectivamente. El  $\theta_{i1}, \theta_{i2}$  y  $\theta_{i3} \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ , por lo tanto, la cinemática inversa de la

trayectoria de los ángulos de los eslabones es calculada mediante el siguiente proceso.

El primer paso es calcular  $\theta_{i1}$  usando la ecuación (EC. 26) y la ecuación (EC. 25),

donde la solución de  $\theta_{i1}$  puede ser obtenida a través de:

$$\theta_{i1} = \arctan\left(\frac{z_{fi,i}}{x_{fi,i}}\right) \quad \text{EC. 26}$$

El segundo paso es calcular  $\theta_{i3}$ . Estableciendo:

$$a_x = \begin{cases} \frac{x_{fi,i}}{\cos(\theta_{i1})} - l_1 & \theta_{i1} \neq \pm \frac{\pi}{2} \\ \frac{x_{fi,i}}{\sin(\theta_{i1})} - l_1 & \theta_{i1} \neq 0 \end{cases} \quad \text{EC. 27}$$

Después la ecuación (EC. 26) y (EC. 28) pueden ser escritas como:

$$a_x = l_2 \cos(\theta_{i2}) - l_3 \sin(\theta_{i2} + \theta_{i3}) \quad \text{EC. 28}$$

Así obtenemos:

$$\theta_{i3} = \arcsin\left(\frac{l_3^2 + l_2^2 - a_x^2 - z_{Mi}^2}{2l_2l_3}\right) \quad \text{EC. 29}$$

Entonces  $\theta_{i2}$  puede ser calculada, por:

$$\theta_{i2} = \arcsin\left(\frac{-a_x \cos(\theta_{i3})l_3 - z_{Mi}(l_2 - \sin(\theta_{i3})l_3)}{(l_2 - \sin(\theta_{i3})l_3)^2 + (\cos(\theta_{i3})l_3)^2}\right) \quad \text{EC. 30}$$

Resolviendo la ecuación (EC. 29) y la ecuación (EC. 30) y la diferencia de la ecuación (EC. 27), la velocidad angular de esta pierna puede ser fácilmente

calculada. La aceleración angular de los eslabones que soportan el movimiento de la pierna al levantarse, puede ser obtenida por la diferencia de la ecuación (EC. 23) y (EC. 28) y la diferencia de la ecuación (EC. 27) respectivamente.

### 3.2 Generación de trayectoria de la pata.

El movimiento de la pata del robot está determinado por dos factores, las trayectorias del movimiento de la extremidad y la geometría de la articulación. La trayectoria está definida previamente por el control cinemático y pueden cambiar dependiendo del terreno en el que se desplace el robot y el tipo de aplicación en la que se desenvuelva el mismo (Anthony M. Bloch, 2010). Ejemplo de ello las trayectorias de tipo parabólico y de tipo triangular (FIGURA 24). En la primera como su nombre lo indica, es una trayectoria en la que la pata simulará un movimiento parabólico esto se puede observar en una proyección en el plano x, y (Emilio Vargas, 2002).

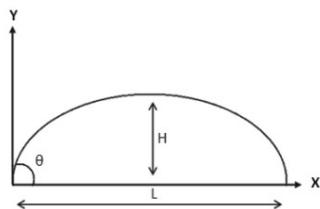
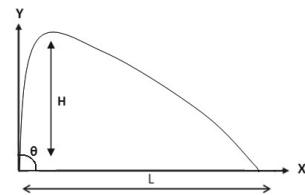


FIGURA 24. Trayectoria.

Tipo parabólico.



Tipo triangular.

En la ecuación (EC. 31) se describe el comportamiento de la trayectoria de tipo parabólico. En esta ecuación se construye la posición inicial de la pata del hexápedo.

$$\begin{aligned}\theta_1 &= d\gamma - A\gamma(\cos\xi - 1) \\ \theta_2 &= d\beta - A\beta(\cos\xi - 1) \\ \theta_3 &= d\chi - A\chi(\cos\xi - 1)\end{aligned}\quad \text{EC. 31}$$

Donde  $d\gamma$ ,  $d\beta$ ,  $d\chi$  están dados por los ángulos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  respectivamente, la variable  $A\gamma$  define la longitud que tendrá el paso del hexápodo y  $A\beta$ ,  $A\chi$ , definirán la altura del paso. El efecto final presentará una función del tiempo en el sistema de coordenadas local de la pierna. Por lo tanto, otro factor que se requiere es tener el un ángulo de movilidad ( $\xi$ ) para el robot (Anthony M. Bloch, 2010).

El comportamiento de la trayectoria triangular esta descrita por la ecuación (EC. 32), donde la constante  $k_1$  es la variable de la pendiente al final del paso (Anthony M. Bloch, 2010).

$$\begin{aligned}\theta_1 &= d\gamma - A\gamma(\cos\xi - 1) \\ \theta_2 &= d\beta - A\beta(\cos\xi - 1)e^{k_1\xi} \\ \theta_3 &= d\chi - A\chi(\cos\xi - 1)e^{k_1\xi}\end{aligned}\quad \text{EC. 32}$$

### **3.3 Algoritmos de locomoción del robot.**

Se presenta un algoritmo libre de la investigación de Efrén Gorostieta (Efrén Gorrostieta, 2008), en este algoritmo se construye de forma no repetitiva, ni predeterminada, la decisión respecto a qué número de patas va a mover el robot.

Se evaluaron tres posibilidades: el movimiento, de una pata, de dos patas y tres patas. Estas posibilidades se presentaron en los algoritmos anteriores. En lo que respecta a las primeras cuatro acciones, la misma situación que en los algoritmos

anteriores, es decir se calcula la dirección, la posición actual de las patas los vectores de movilidad para el cuerpo y las patas, posteriormente se proyecta el centro de gravedad.

El algoritmo libre de la investigación de Efrén Gorrostieta (Efrén Gorrostieta, 2008) que dice que, es indispensable el cálculo del margen de estabilidad. Este parámetro se utiliza para decidir cuántas patas se van a mover en el futuro desplazamiento del robot. Para calcular en este punto el margen de estabilidad, se determinan las distancias del centro de gravedad proyectado a los límites del área que describirá posteriormente el polígono de apoyo. Esta variante del cálculo del margen de estabilidad permitirá tener información antes de llegar al algoritmo de decisión.

La salida de este algoritmo permitirá mover entre una y tres patas, dependiendo de las condiciones de entrada y el cálculo de la estabilidad actual del robot. Por lo que se requiere introducir en el algoritmo una variable difusa perteneciente al margen de estabilidad. Como se muestra en los siguientes pasos, donde se consideran tres funciones de membresía para el margen de estabilidad.

1. Punto destino:

$$Pd = (xd, yd) \quad \text{EC. 33}$$

2. Posición actual de las patas

$$C_1(x_{c1}), (y_{c1}) \quad C_2(x_{c2}), (y_{c2}) \quad C_3(x_{c3}), (y_{c3}) \quad \text{EC. 34}$$

$$C_4(x_{c4}), (y_{c4}) \quad C_5(x_{c5}), (y_{c5}) \quad C_6(x_{c6}), (y_{c6})$$

3. Calculo de los límites del espacio.

$$l_1(x_{i1}), (y_{i1}) \quad l_2(x_{i2}), (y_{i2}) \quad l_3(x_{i3}), (y_{i3}) \quad \text{EC. 35}$$

$$l_4(x_{i4}), (y_{i4}) \quad l_5(x_{i5}), (y_{i5}) \quad l(x_{i6}), (y_{i6})$$

4. Calculo de los vectores de movimiento de las patas y cuerpo:

$$\vec{V}_{C_1}(x_{i1} - x_{c1})\hat{i} + (y_{i1} - y_{c1})\hat{j} \quad \vec{V}_{p_1}(x_{i1} - x_1)\hat{i} + (y_{i1} - y_1)\hat{j} \quad \text{EC. 36}$$

$$\vec{V}_{C_2}(x_{i2} - x_{c2})\hat{i} + (y_{i2} - y_{c2})\hat{j} \quad \vec{V}_{p_2}(x_{i2} - x_2)\hat{i} + (y_{i2} - y_2)\hat{j}$$

$$\vec{V}_{C_3}(x_{i3} - x_{c3})\hat{i} + (y_{i3} - y_{c3})\hat{j} \quad \vec{V}_{p_3}(x_{i3} - x_3)\hat{i} + (y_{i3} - y_3)\hat{j}$$

5. Calculo de desplazamiento de cada una de las patas y cuerpo:

$$\begin{aligned} dez_1 &= \delta \sqrt{(x_{i1} - x_1)^2 + (y_{i1} - y_1)^2} \\ dez_2 &= \delta \sqrt{(x_{i2} - x_2)^2 + (y_{i2} - y_2)^2} \\ dez_3 &= \delta \sqrt{(x_{i3} - x_3)^2 + (y_{i3} - y_3)^2} \end{aligned} \quad \delta = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ \delta_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\gamma_1} \\ e^{-\gamma_2} \\ e^{-\gamma_3} \\ e^{-\gamma_4} \\ e^{-\gamma_5} \\ e^{-\gamma_6} \end{bmatrix} \quad \gamma = [\gamma^1 \quad \gamma^2 \quad \gamma^3 \quad \gamma^4 \quad \gamma^5 \quad \gamma^6]$$

EC. 37

6. Calculo de las movilidades de cada una de las patas y cuerpo:

$$\begin{aligned} MP &= (V_{P1} \ V_{P2} \ V_{P3} \ V_{P4} \ V_{P5} \ V_{P6}) \quad MP \\ &= (V_{C1} \ V_{C2} \ V_{C3} \ V_{C4} \ V_{C5} \ V_{C6}) \end{aligned} \quad \text{EC. 38}$$

7. Calculo de las líneas rectas entre cada una de las patas para definir las áreas A, B,C,D,E,F,G y calcular donde está la proyección del centro de gravedad y margen de estabilidad:

$$Sm = \min(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6) \quad \text{EC. 39}$$

8. Ajuste de la función de membresía:

$$A^\alpha = \{dn | \mu(d) < \alpha\} \quad \mu_A(d) = \nu [\alpha \bullet \mu_{Aa}(d)] \quad d \in D \quad \text{EC. 40}$$

9. Aplicación de las reglas de membresía a cada una de las patas:

$$P_a = \{(dn, \mu_A(dn))\} \quad dn \in D \quad \text{EC. 41}$$

$$P_b = \{(dn, \mu_B(dn))\} \quad dn \in D$$

10. Calculo de las salidas por el algoritmo difuso para el movimiento de una, dos o tres patas:

$$S0 =$$

$$\frac{\sum_1^N S1d\mu_n(d) + \sum_1^N S2d\mu_n(d) + \sum_1^N S3d\mu_n(d) + \sum_1^N S4d\mu_n(d) + \sum_1^N S5d\mu_n(d) + \sum_1^N S6d\mu_n(d)}{\sum_1^N \mu_n(d)}$$

$$\text{EC. 42}$$

11. Si no hay posibilidad de movimiento de las patas se mueve el cuerpo e ir al paso dos.

12. Calculo de la posición final de las patas y determinar los ángulos de cada una de ellas:

$$\theta_1 = d\gamma - A\gamma(\cos \xi - 1) \quad \text{EC. 43}$$

$$\theta_2 = d\beta - A\beta(\cos \xi - 1)$$

$$\theta_3 = d\chi - A\chi(\cos \xi - 1)$$

13. Desarrollo de los movimientos a cargo del control neuronal.

14. Si no se ha llegado al punto final ir al paso dos, en caso contrario finalizar.

En este esquema de la Figura 3.3.1 (Efrén Gorrostieta, 2008), se puede observar el sistema difuso que se tiene una primera etapa conocida como fuzzificación, término utilizado para la conversión de las variables de entrada en variables difusas, el

segundo bloque es el que se conoce como inferencia o reglas fuzzy, y el tercer bloque conocido como defuzzificación. Es en este último bloque donde se determinan los resultados que serán las salidas del sistema.

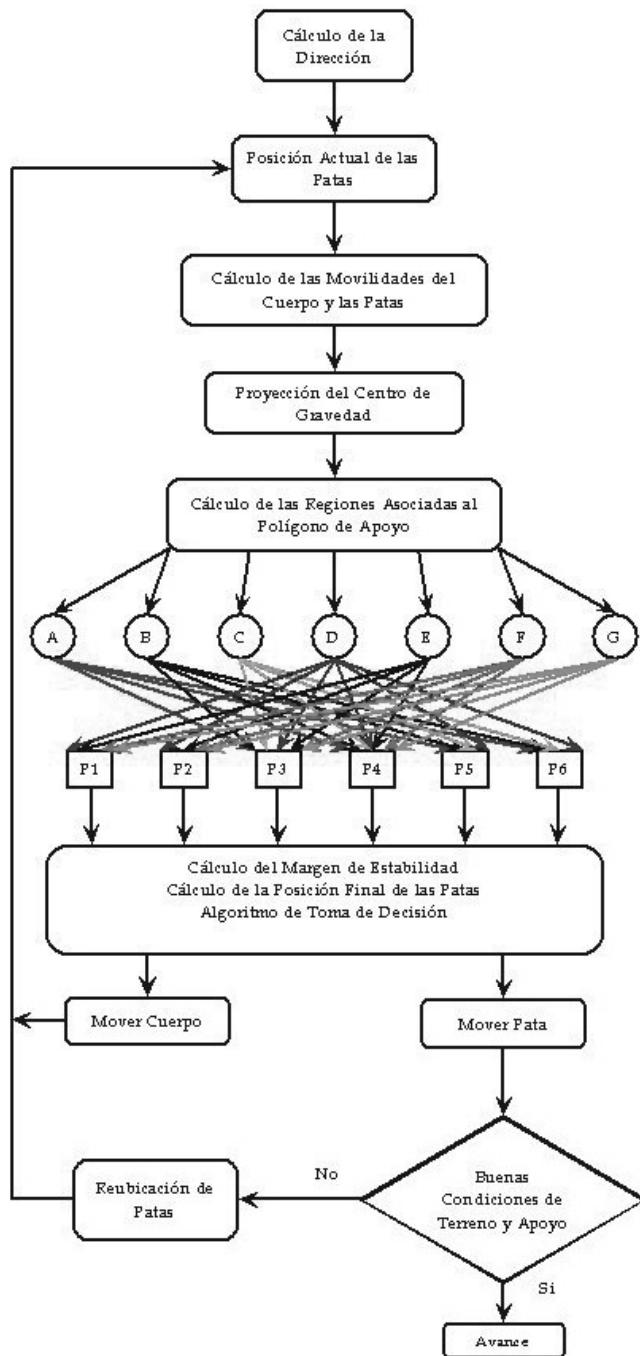


FIGURA 25. Algoritmo difuso del sistema de locomoción de una pata.

### **3.4 Simulación de los algoritmos de locomoción.**

Actualmente el avance en programas dedicados a la programación y entornos gráficos, permiten el desarrollo de herramientas como simuladores, que nos permiten realizar una validación del sistema físico, y la estabilidad de mecanismos propuestos, sin necesidad de gastar recursos físicos cuando no se tenga la certeza de que funcionen (J. A. Soto Cajiga, 2006). En base a esto se desarrolló un simulador el cual permite visualizar el desempeño de los diferentes pasos implementados por los mecanismos articulados que conforman cada una de las patas del robot. Se muestra en bloques el proceso que se llevó a cabo para el desarrollo del simulador (FIGURA 26).



FIGURA 26. Diagrama a bloques del diseño del simulador.

#### **Configuración geométrica:**

Parte importante para el desarrollo del simulador es determinar el tipo de articulación que se utilizará en el robot caminante. La configuración que se implementó fue la que se muestra en la (FIGURA 22). Una vez definida esta se requirió del diseño mecánico, el cual se desarrolló en un software CAD.

#### **Diseño del CAD:**

Este software facilitará el diseño 3D, ya que tiene herramientas que permiten la generación y manejo de objetos geométricos, así como el ensamblaje de los mismos. Donde se determina el movimiento que tendrá cada una de las piezas, así como el

poder visualizar el diseño completo del mecanismo con que las medidas y proporciones establecidas. Por otro lado, facilita el exportar diferentes formatos para guardar el archivo, en caso en particular se utilizó la extensión .wrl, para poder exportarlo al entorno de OpenGL.

### **VRML 2.0:**

El VRML 2.0 de cada una de las piezas contiene una serie de puntos que al unirse de forma gráfica construyen la articulación diseñada. Debido a que OpenGL no lee directamente archivos con extensión .wrl se utilizó un intérprete desarrollado en C++, que convierte de un archivo .wrl a un archivo de cabecera .h, para poder llamarlo en OpenGL.

### **Open GL:**

En el programa de OpenGL se llamaron los archivos .h de cada una de las piezas y se generó una lista de cada pieza respectivamente, esto ya que para trabajo futuro en el diseño del robot hexápedo nos serán de ayuda estas listas para poder reproducir varias veces una pieza, sin necesidad de saturar el programa, dicho de otra forma si se requiere dibujar en OpenGL dos piezas iguales llamadas pata, con la lista previamente definida, solo se llama el mismo archivo pata.h que contiene los puntos para dibujar esta pieza y para el duplicado de esta no se necesita crear un segundo archivo pata2.h con la misma serie de puntos, solo se llama la lista en la que se definió (FIGURA 23).

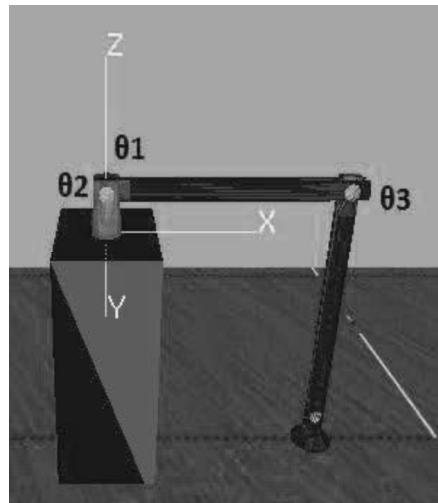


FIGURA 27. Posición inicial de una de las patas del robot hexápodo en OpenGL.

El programa cuenta también con un entorno en el que el usuario pudiera interactuar con el simulador. Para esto se realizaron funciones que permiten interactuar con el teclado y así poder mover de forma independiente cada uno de los ángulos.

Siguiendo con el diagrama de la anterior imagen (FIGURA 27), en el entorno de Matlab se realizaron los cálculos de la cinemática, la trayectoria y simulaciones graficas de los resultados que se obtuvieron, estos resultados se exportaron al programa de OpenGL ya antes mencionado y se realizó una simulación del sistema.

## **Capítulo IV. Pruebas y resultados.**

### **4.1 Valoración del modelo matemático mediante la simulación.**

Para la resolución de la trayectoria de la pata de un robot hexápodo, se implementaron las ecuaciones presentadas anteriormente y con  $\xi$  de 0 a  $\pi$ , se describen los valores de las variables que nos permiten calcular la trayectoria del comportamiento de la pata del hexápodo.

Esto permitió, el poder generar diversas pruebas de las trayectorias en cada una de las patas; para después evaluarlas en conjunto, permitiendo determinar qué tipo de trayectoria es la más conveniente implementar, cuando se trabajen las seis extremidades, ya que se involucra la distancia que existe entre ellas, para evitar que estas no choquen entre sí.

Una vez valorada una de las patas del robot, se implementaron las seis en lo que fue el robot hexápodo, cada una de ellas se valoró de forma independiente para verificar la congruencia de los ángulos con respecto a los eslabones y de las patas con respecto al cuerpo, esto con el fin de asegurar que, al momento de implementar la cinemática del robot, la congruencia de los ángulos no sea un problema al realizar movimientos sincronizados.

Una vez corroborado el buen funcionamiento de la estructura del hexápodo, se implementaron las ecuaciones del modelo cinemático de la investigación de Zhiying Wang (Zhiying Wang, 2011).

Las ecuaciones permitieron evaluar la locomoción fija del mecanismo de seis patas, en un terreno plano, así como de las trayectorias que previamente se generaron para cada una de las patas.

#### 4.2 Valoración de algoritmos de locomoción.

Los algoritmos de locomoción fija que se valoraron, fue el desplazamiento de tres de las extremidades del robot, en esta parte un robot de seis patas no corre riesgos de perder la estabilidad, debido a que siempre se forma un triángulo o un tripie al momento de posicionar el punto de contacto de cada una de las patas. Es por ello que este tipo de locomoción es perfecta desplazamientos en terrenos planos y que no tenga obstáculos en el camino (FIGURA 28).

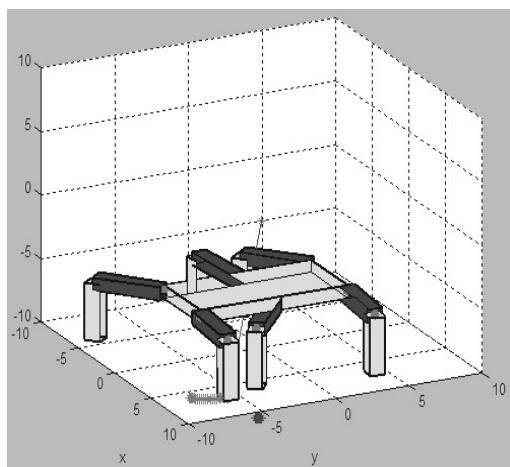


FIGURA 28. Simulación del movimiento de tripie de un robot hexápodo en un entorno de MATLAB.

En caso de que se requiera de realizar movimientos de las patas en diferentes formas o en diferentes tiempos, se requiere de una implementación de una locomoción libre, ya que permite que las patas se muevan de diferentes maneras y

no solo de una forma constante, pero se presenta el problema de perder el equilibrio o estabilidad del robot, es por ello que se implementó el algoritmo de locomoción, propuesto por Efrén Gorrostieta (Efrén Gorrostieta, 2008), con el cual se logró hasta cierto punto la estabilidad deseada, sin dejar de lado que el centro de gravedad pudiera verse comprometido al mover alguna de las extremidades (FIGURA 29).

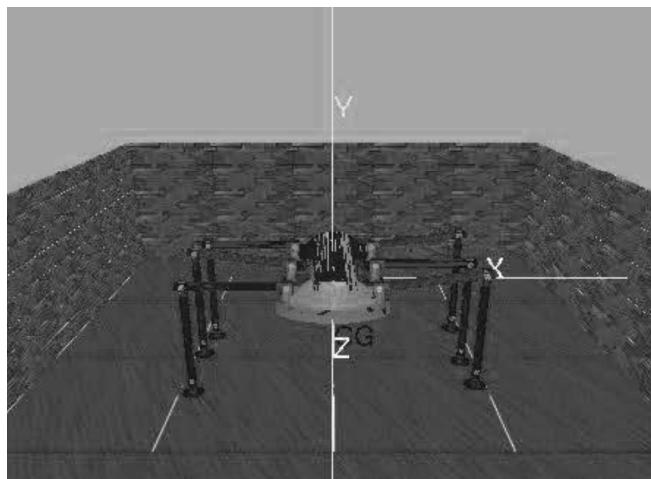


FIGURA 29. Simulación del movimiento de locomoción libre de un robot hexápedo en un entorno de OpenGL.

#### 4.3 Resultados.

Como se mostró en los capítulos anteriores, la trayectoria que se muestra del ángulo del primer eslabón presenta un movimiento suave y sin variaciones o saltos bruscos que rompan con el equilibrio del robot (FIGURA 30), que es parte importante de lo que se buscó en este trabajo.

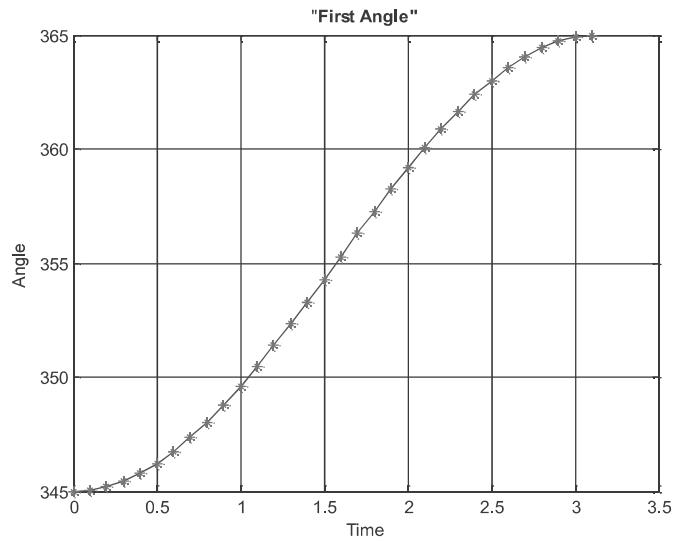


FIGURA 30. Trayectoria de  $\theta_1$ .

La grafica del segundo ángulo, que se muestra en el primer eslabón y del tercer ángulo vista en el segundo eslabón, presentan de igual forma un comportamiento suave, que permite que se tenga una trayectoria estable para cada una de las patas del hexapodo, ya que con ello aportara estabilidad a toda la estructura del mismo.

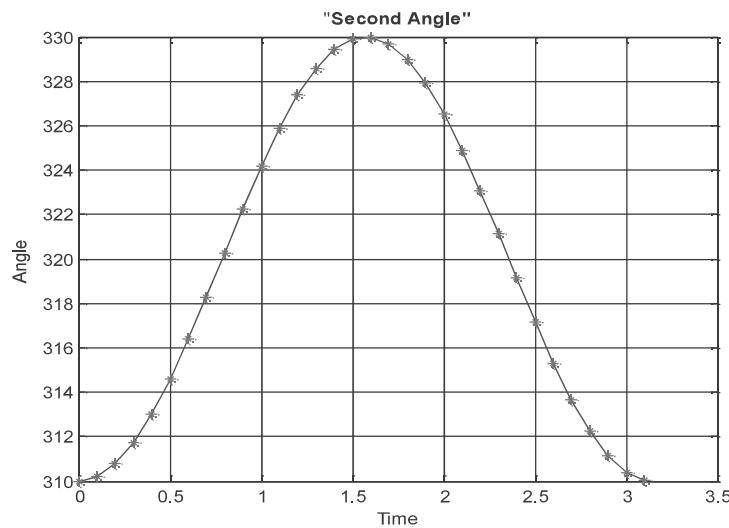


FIGURA 31. Trayectoria de  $\theta_2$ .

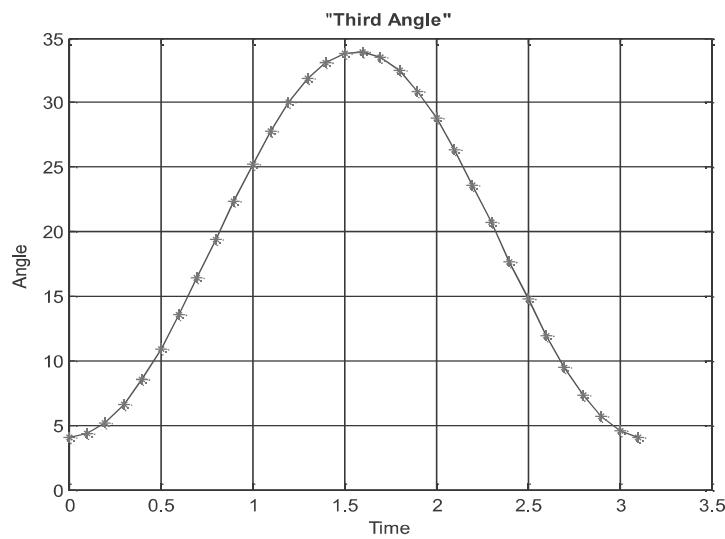


FIGURA 32. Trayectoria de  $\theta_3$ .

En la siguiente grafica (FIGURA 33), se muestra el resultado del la generación de trayectoria del conjunto de los tres grados de libertad una de las patas del hexapodo. En esta se puede apreciar la amornia del movimiento generado por dichos angulos antes mensionados.

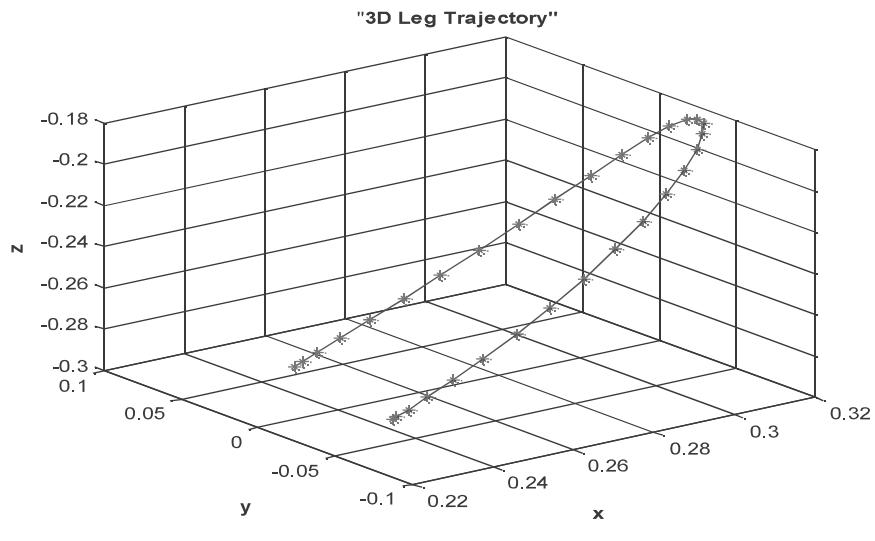


FIGURA 33. Generación de trayectoria de en conjunto  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ .

La trayectorias previamente obtenidas, se evaluaron tambien en el simulador desarrollado en OpenGL, que es la parte más importante y de aportación de este trabajo, debido a que con este simulador se puede observar el comportamiento general de cada una de las patas del hexapodo de forma individual y en conjunto. Asi mismo el poder evaluar el movimiento en conjunto del robot, sin perder de vista el centro de gravedad del mismo.

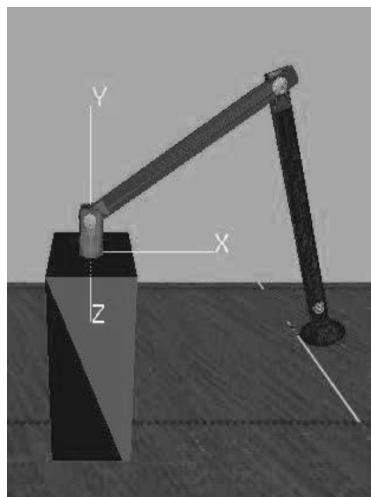


FIGURA 34. Movimiento de una patas del robot hexápodo en OpenGL.

Así mismo como en OpenGL, se generaro la evaluacion de trayectorias de las patas en un simulador generado en un entorno de Matlab. En esta parte se pudo analizar el comportamiento de locomoción semejante al que presentan algunos animales, los movimiento que a simple vista parecieran de más sencillo por la estructura física y adaptación al medio que poseen.

Siguiendo con el proposito y tendencia de la robotica que es asemejarse al comportamiento humano o animal, se requieren el analisis que permita la compresencion de los moviemitos que a simple vista parecieran ser sencillos.

Con el estudio de estos movimientos, se puede apreciar la complejidad que implica cada uno de los movimientos de un ser humano y en caso particular de esta tesis del movimiento generado por animales con seis patas.

En esta tesis se observó la complejidad que implica dichos movimientos y desplazamientos reproducidos en OpenGL y Matlab, como en el caso del robot hexápolo que para mover sus seis extremidades, requiere de mover 18 ángulos; a esto se suma, que se debe de analizar en qué momento cada uno de ellos debe desplazarse, en qué sentido o dirección, así como de la evaluación de la distancia que se desea recorrer.

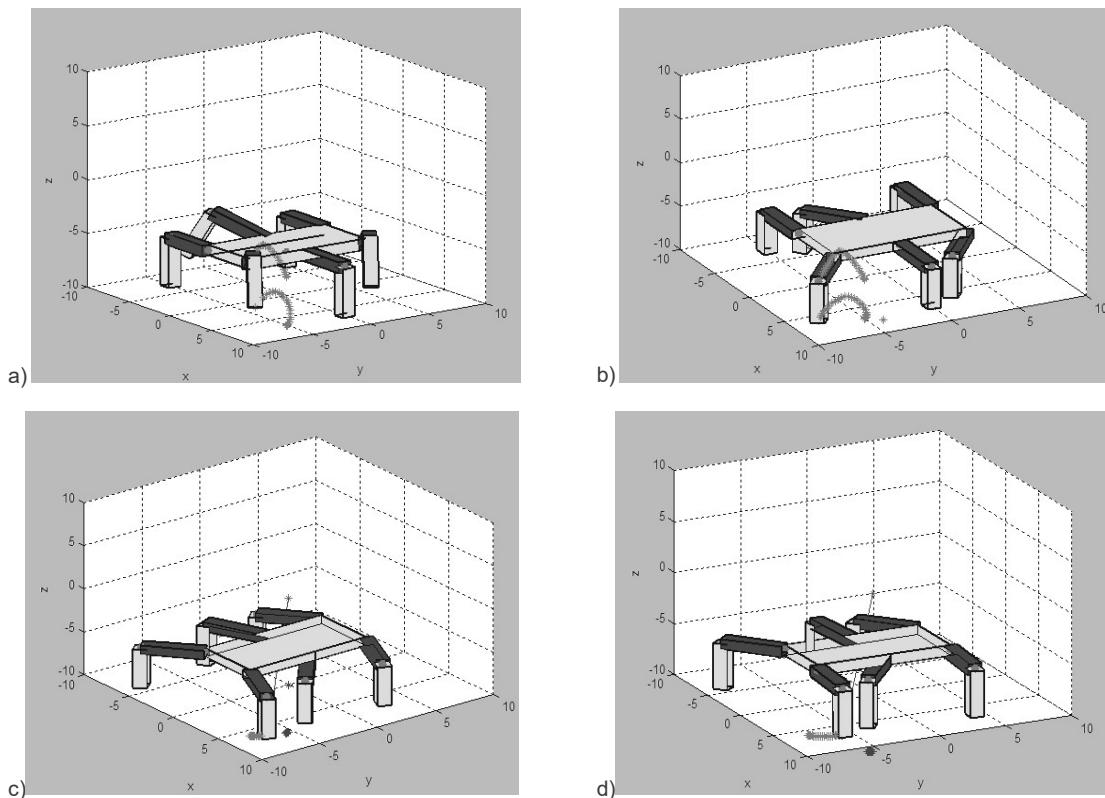


FIGURA 35. Simulación de la locomoción fija de un robot hexápolo en un entorno de MATLAB.

Ejemplo de ello es observar el movimiento de las patas de una hormiga. En esta observación requerimos de considerar la altura a la cual se moveran las patas para que estas no choquen entre sí. Para este caso, se necesita de un cálculo de la altura a la cual levantarán sus extremidades y la distancia que tienen que recorrer.

Con el aporte de la simulación se pueden realizar un análisis de trayectorias, desplazamientos, longitudes, estabilidad que mejor convenga y asemeje a la situación, donde se requiera.

El simulador permite que esta comprensión se pueda realizar en un entorno gráfico, permitiendo la evaluación de movimientos del robot. Por otra parte, aun cuando se tenga un error o se haga caer al robot; este no sufrirá daños físicos, que puedan limitar la investigación debido a la mala manipulación de los elementos físicos y en en muchos de los casos costos de un robot.

Por todo lo anterior, se tiene una optimización de tiempo, dinero y esfuerzo ya que antes de realizar un desarrollo físico, se puede evaluar el modelo matemático que se proponga, así como la locomoción de dicho robot, aun cuando estas se encuentren en un etapa de hipótesis.

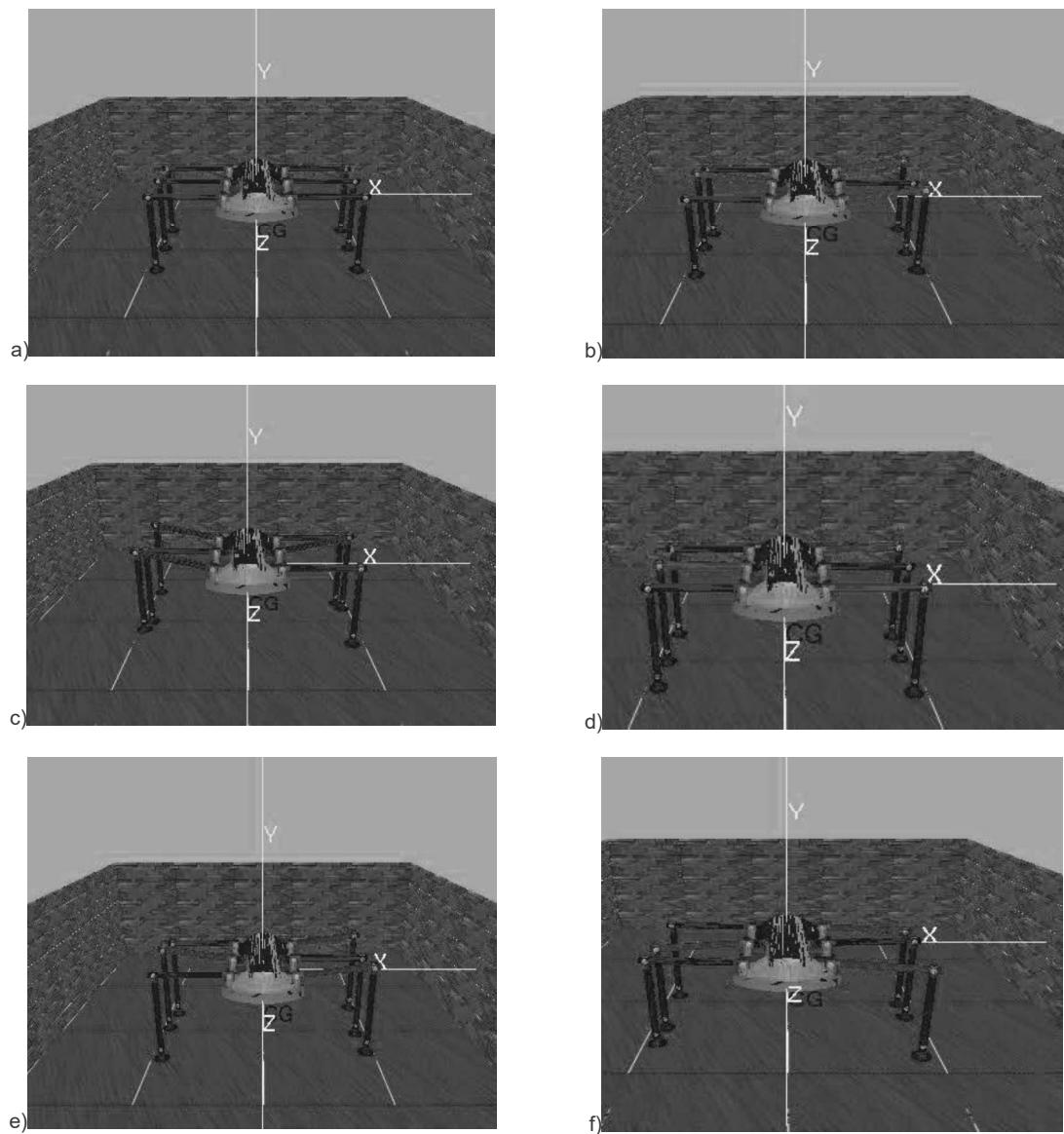


FIGURA 36. Simulación de la locomoción de un robot hexápodo en un entorno de OPEN GL.

## **Capítulo V. Conclusiones y trabajo futuro.**

La generación de trayectoria es parte fundamental en el estudio del modelado cinemático y dinámico del hexápedo, así como en el desarrollo de la locomoción libre o fija del mismo. Ya que si no se cuenta con la relación adecuada de los ángulos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$  y aun tomando en cuenta la disposición geométrica de las patas, no se podrá lograr que el sistema se mueva adecuadamente y en consecuencia se puede ver afectada la estabilidad del robot, debido a que no se tiene una relación en los ángulos de la pata, es decir si cada ángulo toma valores que no son adecuados al hacer el movimiento consecutivo de tripie que requiere el robot, este podría llegar a caerse.

La simulación del hexápedo en OpenGL y MATLAB, es una aproximación del cómo serán el movimiento de la trayectoria que se genere para cada una de las patas del robot en un mecanismo real y evaluación de la locomoción fija y libre que se requiera implementar.

Como trabajo futuro se propone el desarrollo del modelo cinemático, así como de la generación de un algoritmo de locomoción libre basado en redes neuronales, máquinas de soporte de vectores (SVM) o por estratos, que permitan el desarrollo de movimientos del robot semejantes a los naturales.

Lo anterior se pretende evaluar en el simulador que se trabajo en esta tesis y de igual forma se pretende el creceneto del mismo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anthony M. Bloch, M. L. (March de 2010). Controlled Lagrangians and stabilization of Discrete Mechanical Systems. *Proceedings of The Discrete and Continuous Dynamical Systems Series S*, 3(1), 19-36.
- Bruno Siciliano, L. S. (2009). *Robotics*. London: Springer-Verlag .
- Calandín, L. I. (2006). Modelado Cinemático y Control de Robots Móviles con Ruedas. *Universidad Politécnica de Valencia*.
- Chandana Paul (Member, I. F.-C. (October de 2006). Design and Control of Tensegrity Robots for Locomotion. *Proceedings of the IEEE Transactions on Robotics*, 22(5).
- Cortés, F. R. (2011). *Robótica*. México: Alfaomega Grupo Editor, S.A de C.V., México.
- E. Calle, I. Á. (Octubre de 2007). Diseño e Implementación de un Robot Móvil Cuadrúpedo. *Revista Tecnológica ESPOL*, 20(1).
- Efrén Gorrostieta, E. V. (2008). Algoritmo Difuso de Locomoción Libre para un Robot Caminante de Seis Patas. *Computación y Sistemas*, 11(3), 260-287.
- Efrén Gorrostieta-Hurtado, E. V.-S. (s.f.). Diseño de un Controlador Aplicado a la Generación de Pasos en un Robot Caminante.
- Emilio Vargas, E. G. (2002). Desarrollando una Pata para un Robot Hexápedo. *VII Reunión Internacional de Ingeniería Mecánica*.
- Emilio, V. S. (2006). Diseño un Robot Hexápedo Tipo Hormiga. *Congreso Mexicano de Robótica*(8vo.).
- Erden, M. S. (2006). *A thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of Middle East technical universit*.
- Erden, M. S. (2011). Optimal Protraction of a Biologically Inspired Robot Leg. *J Intell Robot Syst*, 64:301-322.
- Gorrostieta Efrén, V. E. (2002). SIMULADOR DE UN ROBOT CAMINANTE DE SEIS PATAS.
- Hiroshi Kimura, Y. F. (2007). Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Natural Ground Based on Biological Concepts. *The International Journal of Robotics Research*, 26: 475.
- J. P. Flores Fernandes, J. C. (s.f.). Design of a Hexapod Robotic System.
- Jing Liu, M. T. (2007). Legged robots – an overview. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 29: 185.
- Jorge Cortes, S. M. (Septembre de 2001 ). Optimal Gaits for Dynamic Robotic Locomotion.
- Kris Hauser, J.-C. L. (22 de October de 2009). Multi-modal Motion Planning in Non-expansive Spaces. *The International Journal of Robotics Research OnlineFirst*, 1325-1349.
- Kris Hauser, T. B.-C. (2008). Motion Planning for Legged Robots on Varied Terrain. *The International Journal of Robotics Research*, 27: 1325.
- Kristi A. Morgansen, B. I. (December de 2007). Geometric Methods for modeling a Control of Free-Swimming Fin-Actuated Underwater Vehicles. *SUBMITTED TO THE IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*.
- Krzysztof Walas, D. B. (2011). Supporting Locomotive Functions of a six-legged walking robot. *Int. J. Appl. Math Comput. Sci*.
- Luis Ignacio Díaz del Dedo, L. A. (2007). ESTADO DEL ARTE EN ROBOTICA CUADRÚPEDA SEMIAUTÓNOMA. *Universidad Europea de Madrid*.
- Luquin, F. (s.f.). Chebyshev, P. L. (1821-1894).
- M., R. (1986). Running on Four Legs As Though The Were One. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA2(2).
- Manuel f. Silva, j. A. (2006). Fractional Order PD\_ Joint Control of Legged Robots. *Journal of Vibration and Control*.
- Manuel F. Silva, J. A. (2007). A Historical Perspective of Legged Robots. *Journal of Vibration and Control*, 13: 1447.
- Mark W. Spong, S. H. (2005). *Robot Modeling and Control* . Wiley.
- Naoki Motoi (Member, I. T. (s.f.). A Bipedal Locomotion Planning Based on Virtual Linear Inverted Pendulum Mode. *Proceedings of the IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56.
- Ostrowski, J. P. (1999). Optimal Control for Principal Kinematic Systems on Lie Groups. *Proceedings of the Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics*.

- Paolo Arena, H. C. (2002). Cellular Nonlinear Network-Based Bio-Inspired Decentralized Control of Locomotion for Hexapod Robots. *Adaptive Behavior*, 10: 97.
- Pei-Chun Lin, H. K. (2006). Sensor Data Fusion for Body State Estimation in a Hexapod Robot With Dynamical Gaits. *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*.
- Philip Holmes, R. J. (2006). The Dynamics of Legged Locomotion: Models, Analyses, and Challenges . *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 48(2), 207–304.
- Ravi Balasubramanian, A. A. (2008). Legless Locomotion: A Novel Locomotion Technique for Legged Robots. *The International Journal of Robotics Research*.
- Richard Altendorfer, D. E. (2002). Towards a factored analysis of legged locomotion models. *University of Michigan Technical Report CSE-TR-467-02*.
- Santos, J. E. (6 de December de 2005). Generating Continuous Free Crab Gaits for Quadruped Robots on Irregular Terrain. *IEEE Transactions on Robotics*, 21.
- Shibendu Shekhar Roy, A. K. (2009). Analysis of Six-legged Walking Robots. *14th National Conference on Machines and Mechanisms (NaCoMM09)*.
- Stanley Kwok-Kei Chu and Grantham Kwok-Hung Pang. ( NOVEMBER de 2002). Comparison Between Different Model of Hexapod Robot in Fault-Tolerant Gait. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS—PART A: SYSTEMS AND HUMANS*, 32(6).
- Uluc Saranli, M. B. ( July de 2001). RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot. *The International Journal of Robotics Research*, 20: 616.
- Yanto Go, X. Y. (February de 2006). Navigability of Multi-Legged Robots. *Proceeding of the IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 11(1).
- Zhiying Wang, X. D. (31 de May de 2011). Mobility analysis of the typical gait of a radial symmetrical six-legged robot. *Contents list available at Science Direct*.
- Zu Guang Zhang, H. K. (4 de May de 2006). Adaptive Running of a Quadruped Robot Using Forced Vibration and Synchronization. *Proceeding of the Journal of Vibration and Control/SAGE*, 1361–1383.

## REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- [1] TECHNICAL DATA.(s.f.).Recuperado el 15 de Enero del 2013, de <http://www.logismarket.es/ip/kuka-robots-iberica-robot-industrial-catalogo-general-robots-kuka-para-salas-blancas-506168.pdf>
- [2] AFP (16/07/2012 - 20:19). Robot explorador Curiosity llegará en dos semanas a Marte.(s.f.).Recuperado el 15 de Enero del 2013, de <http://www.latercera.com/noticia/tendencias/2012/07/659-472537-9-robot-explorador-curiosity-llegara-en-dos-semanas-a-marte.shtml>
- [3] <http://tecniarts.com/alavs-2-0-robots-voladores/> (24 de Enero del 2013)
- [4] [http://www.festo.com/cms/es\\_corp/9780.htm](http://www.festo.com/cms/es_corp/9780.htm)
- [5] [http://divulgamat2.ehu.es/divulgamat15/index.php?option=com\\_content&view=article&id=3332%3Achebyshev-p-l-1821-1894&catid=37%3Abiograf-de-matemcos-ilustres&directory=67&limitstart=2](http://divulgamat2.ehu.es/divulgamat15/index.php?option=com_content&view=article&id=3332%3Achebyshev-p-l-1821-1894&catid=37%3Abiograf-de-matemcos-ilustres&directory=67&limitstart=2) (27 de Enero del 2013)

## **PUBLICACIONES Y ANEXOS**



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

**SciVerse ScienceDirect**

Procedia Technology 00 (2012) 343-351

**Procedia  
Technology**

[www.elsevier.com/locate/procedia](http://www.elsevier.com/locate/procedia)

The 2012 Iberoamerican Conference on Electronics Engineering and Computer Science

## Kinematic analysis for trajectory generation in one leg of a hexapod robot.

García-López, M.C.<sup>a\*</sup>, Gorrostieta-Hurtado, E.<sup>a</sup>, Vargas-Soto, E.<sup>a</sup>, Ramos-Arreguín, J.M.<sup>a</sup>,  
Sotomayor-Olmedo,A.<sup>a</sup>, Moya Morales, J.C.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Informática-Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Informática. Av. de las Ciencias s/n Campus Juriquilla Juriquilla,  
Querétaro, Qro. C.P. 76230 México

---

### Abstract

The legs movement of a walking robot has been widely studied to solve mobility problems on such robots. These studies mainly analyze the movement performed by certain animals like mammals, insects, or reptiles, that later will be mimicked by mechanical systems. In the present work, a kinematic analysis of a single leg of a hexapod robot is introduced and the trajectory generation is implemented. To evaluate the leg movement performance, a simulator was developed in order to analyze the trajectory.

© 2012 Published by Elsevier Ltd.

Keywords: Kinematics, walking robot, trajectory.

---

### 1. Introduction

Walking robots have been studied in the last three decades in order to reproduce the natural abilities presented in some animals and insects.

Nevertheless, locomotion, in these applications [1] is especially challenging in irregular terrains [2][3]. Legged locomotion allows movement coordination of the mechanism to navigate safely across varied terrain [4]. In such cases it is intended that this type of machines can be independent and autonomous, in other words, do not require human intervention or reduce some restrictions [5].

The animals are naturally adapted to different types of surfaces and with the goal of developing a similar mechanism, scientific communities have been inspired in some natural elements present in animals [6][7][8][9][10][11] trying to imitate to some extent in mechanical design, control, navigation and so on [12].

---

\* Corresponding author. Tel.: 192 12 00 ext. 5941.

E-mail address: [macarmengl@ieee.org](mailto:macarmengl@ieee.org).

These investigations have generated interest about the use of legs or wheels for robot movement. The principal difference between them is that the use of legs is better for motion and adaptation to irregular terrains than wheels which have a limited movement in this type of environments [13][14]. Therefore, understanding of the behaviour of animal locomotion is of main concern for the research community.

One of the main challenges in the development of robots is the locomotion system design, which involves the interaction of structures composed of prismatic or rotational joints which emulates the motion functions existing in nature, allowing adapting to uneven terrain [15]. It also needs to deal with problems like the mechanical complexity existing in legs, the mechanism stability, power consumption, synchronization of the links in each of the robots joints and the control of number of degrees of freedom that is requiring. In case of a quadruped robot with three degrees of freedom per leg it is required to synchronize twelve degrees of freedom and for a hexapod robot eighteen angles in total.

The legs location regarding the displacement surface is important in the robot's stability, the same way as the observation of the center of gravity, owing to that if these do not have a proper synchronization and do not provide the necessary support to the system base, it will lose balance and will fall or its movements will be inefficient causing perhaps a greater energy consumption [16]. This synchronization will depend of the mobility control of the legs for its displacement, because if the robot moves within the established limits, collisions between the links will be avoided and therefore the system will not be affected [17]. The length and design of the legs is essential in robot locomotion, because the trajectory that is implemented in each of the articulation depend on them.

If we have the trajectory that allows a smooth movement, we will not see the robot stability affected by a hard movement and we can determine the progress of the movement in a given time. Also, if the robot moves within the established limits, the collision risk is avoided and the system will be safe.

The old tradition to solve the problems mentioned above and to test the hypotheses, a prototype has been developed, with the disadvantage of loss of time and resources. The currently progress in programming and graphical environments, allows the development of tools such as simulators, which provide a validation of the physical system for trajectory selection to get a successful behavior, as well as the control algorithms developed [18][19][20].

## 2. Leg configuration in walking robots.

Because a robot can have two, four, six or eight extremities, the classification of walking robots is carried out regarding its legs number [21]. Another classification takes into account the arrangement or disposal or fixation points respect to the body, as well as the orientation to the base.

The leg configuration is inspired primarily on animal gait, such as reptiles, which have legs and bodies planned to move over swamps and muddy terrains [22]. In contrast, mammals have the body above the legs, less support in the base, lower power consumption to support the body but need best stability than other types of animals [23].

The orientation of the legs respect to the body of the walking robot can be done with one of the three configurations: frontal, sagittal and circular (Fig. 1), the first two are characteristic of some animals. In the frontal configuration the directions are perpendicular to the advancement of the legs position, unlike the sagittal, which moves parallel to the robot legs, while in the circular arrangement, where the legs are positioned radially to the body of the system allowing the mechanism to move in any direction [24].

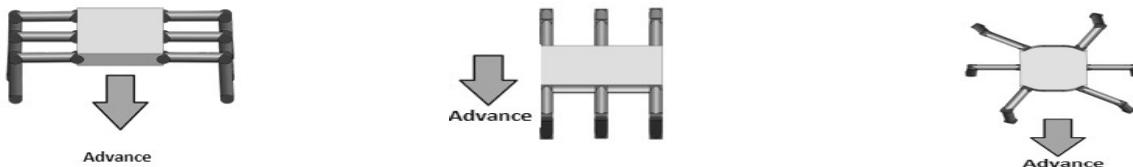


Fig. 1. (a) Front disposal; (b) Sagittal disposal; (c) Circular disposal.

In each of one the above classifications different types of joins points with respect the body of the mechanism can be present: some of these configurations are the mammalian, reptilian and arachnid type.

In the mammalian configuration (Fig. 2) the legs below the body and can position the knees in different positions, depending on the application it requires.



Fig. 2. (a) Knees outwards; (b) Knees with the same orientation; (c) Knees inwards.

The principal characteristic of the Reptilian type (Fig. 3(a)) is that the legs are placed on both ends of the protruding body and knees to the side of the base. On the other hand in the spider-like configuration (Fig. 3 (b)), is characterized in which their extremities are situated on both sides, sticking the knees at the top of the spider's body [10].



Fig. 3. (a) Reptile configuration; (b) Spider configuration.

### 3. Leg characteristics.

The legs characteristics depend on of the factors related to the application in which the robot is required, the terrain form, the legs work space, the required energy for the movement, the weight that can support, are to be valued in order to define the physical design and end of these extremities.

In order to obtain maximum leg work space with a minimal structure, there are two types of geometrical arrangements that are used for its design [25]. In this case, we consider three degrees of freedom, one for each foot and two types of geometry.

The configuration of type one (Fig. 4 (a)) is characterized by its first axis which is parallel to the vertical axis of the robot's body, while the second and third axis are parallel to the transverse plane of the base. This configuration has been used in investigations such as the robot "LittleDog" [26].

In the type two configuration (Fig. 4 (b)) the second and third axes are parallel with each other and perpendicular to the first axis of this configuration, an example is the robot Silo4 [27].



Fig. 4. (a) Geometric arrangement type one; (b) Geometric arrangement type two.

In order to have a minimal structure leverage, the work space and the momentum for the body movement is performed by one leg, while the movements of other joints are shorts [28][29]. The used design is based on the geometric arrangement of type two (Fig. 5), which has three degrees of freedom. The first angle  $\theta_1$  is rotated  $180^\circ$  about its axis, perpendicular to the axes of  $\theta_2$  and  $\theta_3$ ; the latter are rotated  $90^\circ$  and  $180^\circ$  respectively with their axes parallel to each other.



Fig. 5. (a) Leg disposition; (b) Leg build in OpenGL.

Having established the leg geometrical parameters, the coordination of its three degrees of freedom (Fig. 5 (b)) is crucial to generate locomotion. In such cases, it is needed to describe in mathematical form the relationship between the joint variables, position and orientation of the leg [30]. To determinate the kinematic in this case is a good solution because considering the movement without regard of the functions that produce them, also involves the relationship between the joint variable space and the workspace where the robot will move the leg of the hexapod robot.

In the particular case of the foot shown in Fig. 5(b), it will be described by defining four magnitudes that are associated with each joint. One of the magnitudes is the joint variable and the remaining three parameters are fixed. These parameters will define a Denavit-Hartenberg representation, which involves the link between rotation and translation of the adjacent links [25]. This representation implies a composite transformation by four elementary transformations, with which the general form for each joint will be obtained (1).

$${}_{i-1}^i T = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Determining the transformation parameters of each link will serve to determine the composite transformation which relates the link variables q1, q2 and q3. With these calculations, the position and Cartesian orientation (p) of the last joint (2) can be estimated. The part that makes the contact with the floor is the last joint, where  $\varphi$  is a non linear set of functions [30].

$$p = \varphi(q) = {}_1^0 T {}_2^1 T \dots {}_{n-1}^n T {}_n^0 T \quad (2)$$

Based on it, the kinematics of the leg of a hexapod robot was determined, which has three rotational joints (Fig. 7(a)). Table 1 shows the Denavit-Hartenberg (D-H) parameters that describe the joins leg: length, ( $a_{i-1}$ ), degree of rotation ( $\alpha_{i-1}$ ), in case of the prismatic joins this variable is the displacement ( $a_i$ ), the angle ( $\theta_i$ ) of each of this links of the robot.

Table 1. D-H parameters of the hexapod robot leg.

i	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	L1	0°	0	$\theta_1$
2	L2	180°	0	$\theta_2$
3	L3	90°	0	$\theta_3$

The transformation matrices of the three links can be described as:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & L_1 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

The result obtained from the transformation matrix is presented on equation (6), and it is used to determine the position from the link that touches the ground to the robot's body.

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 & -\sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 & 0 & (L_1 \cos \theta_1) + (L_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3) \\ \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 & 0 & (L_1 \sin \theta_1) + (L_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

The equation (6) is the direct kinematics of the robot, and it is used to determine the position and orientation of the fixing point of the leg.

#### 4. Path generation of the leg.

The leg's movement is determined by two factors: the extremity workspace with its movement paths and the joint geometry. The trajectory generation is based in the kinematics of the leg and can change depending on the terrain, or specific applications [17]. The trajectory shape characterizes it, example of this are the parabolic trajectories and triangular trajectories (Fig. 6) [28]. A parabolic trajectory can be simulated as a parabolic shot and observe the X-Y projection [28].



Fig. 6. (a) Parabolic path; (b) Triangular path.

Equation (7) describes a parabolic trajectory type and with this equation a starting position of the leg of the hexapod is constructed.

$$\begin{aligned} \theta_1 &= d\gamma - A\gamma(\cos \xi - 1) \\ \theta_2 &= d\beta - A\beta(\cos \xi - 1) \\ \theta_3 &= d\chi - A\chi(\cos \xi - 1) \end{aligned} \quad (7)$$

Where  $d\gamma$ ,  $d\beta$ ,  $d\chi$  is giving by the angles  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  respectively, the variable  $A\gamma$  defines the length of the step that has the leg of hexapod robot and the variables  $A\beta$ ,  $A\chi$ , defines the height of the step. The fixing point presents a function in the time; therefore another factor that is required is the mobility angle ( $\xi$ ) for the robot [17].

The behavior of this triangular trajectory is described by the equation (8), where the constant  $k_1$  is the variable of slope at the end of step [17].

$$\begin{aligned}\theta_1 &= d\gamma - A\gamma(\cos \xi - 1) \\ \theta_2 &= d\beta - A\beta(\cos \xi - 1)e^{k_1\xi} \\ \theta_3 &= d\chi - A\chi(\cos \xi - 1)e^{k_1\xi}\end{aligned}\quad (8)$$

## 5. Simulator.

The tools obtained in the research fields such as programming and simulation provide a solid framework to validate and corroborate physic systems, the stability degree in some mechanisms and reducing the construction of prototypes [31]. Based on it, this work develops a model and simulation of a robotic leg. Fig. 7 illustrates the process and technologies implemented in a leg model and simulation.



Fig. 7. Block diagram of the simulator design

**Geometric configuration:** A key feature in robot simulations is determining the accurate selection of link or joint to walk. The configuration used in this robot is shown in Fig. 5(b). Then a mechanic design implemented in CAD tools will be done.

**CAD Design:** The 3D design software provides a straightforward and semiautomatic way to generate and ensemble mechanic elements. It shall determine the movement range of each piece; moreover a complete preview of the full model would be shown. Finally this tool can export the generated model to a wide range of platforms, in this work the authors choose the extension .wrl to be integrated with OpenGL.

**VRML 2.0:** The VRML 2.0 of each mechanic piece contains a set of points that holds its geometric definition. The VRML cannot be directly integrated in OpenGL, the VRML files must be processed by a C++ interpreter which transforms the code into header C++ files or .h extension files, later on, the integration with OpenGL can be performed.

**Open GL:** The program, made in OpenGL, use the header files of each mechanic piece, for further works a hexapod robot will be developed by instancing the pre-existed leg models. The developed application provides a user interaction interface by using a keyboard which allows manipulating each angle independently.

The Fig. 7 shows the results of the kinematics and trajectory calculus solved in Matlab. Then, these results will be exported and integrated into an OpenGL simulation.

## 6. Results.

Considering the equations previously presented, and considering  $\xi$  from 0 to  $\pi$ , the values of the variables that let us calculate the trajectory and behavior of a single leg from a hexapod robot are described (9).

$$\begin{aligned}A\gamma &= 10 & d\gamma &= 345 \\ A\beta &= 15 & d\beta &= 4 \\ A\chi &= 10 & d\chi &= 310\end{aligned}\quad (9)$$

In Fig. 8, the trajectory of the angle  $\theta_1$  is shown, which corresponds to the first link. It can be appreciated that the movement that reaches is soft and without variations that affect the equilibrium of the robot.

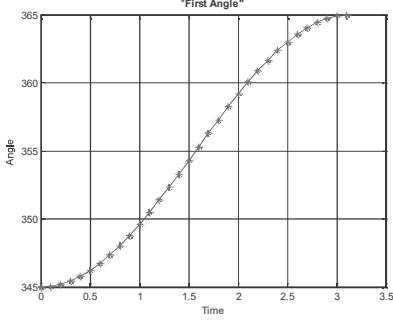


Fig. 8. (a) Angle  $\theta_1$  trajectory.

The plot in of the angle  $\theta_2$  in the first link and the angle  $\theta_3$  in the second link present a similar soft behavior that allows stability in the trajectory (Fig. 9).

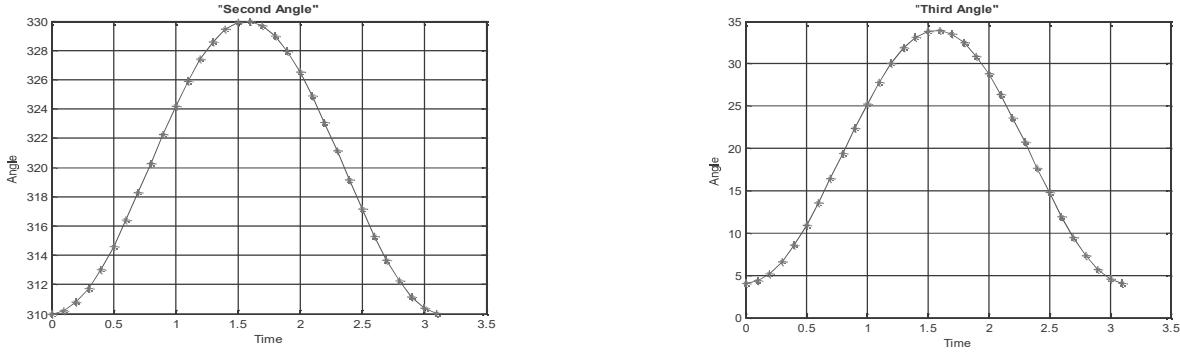


Fig. 9. (a) Angle  $\theta_2$  trajectory; (b) Angle  $\theta_3$  trajectory.

Figure 10 shows the result of implementing degrees  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  (Fig. 9, 10) of the leg respectively, for generating the same path as well as the result of the implementation in a simulation carried out in OpenGL.

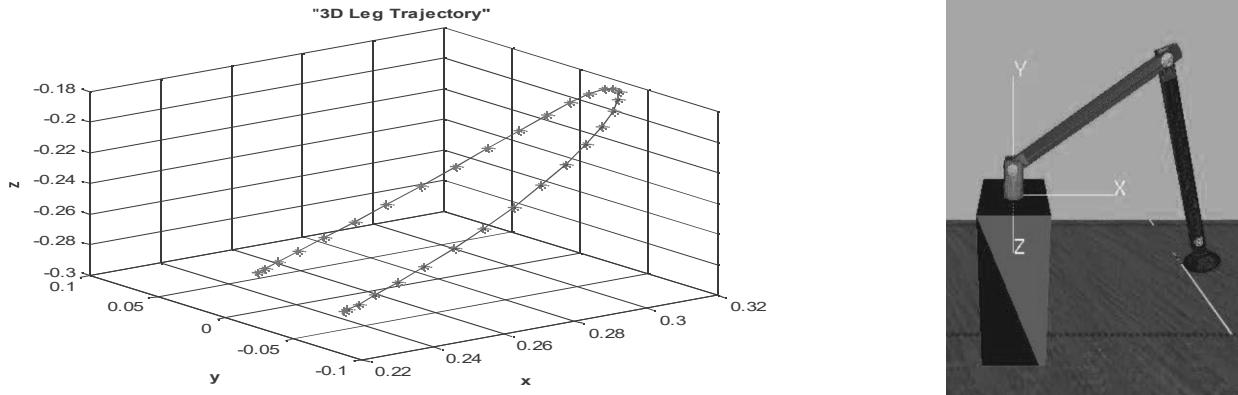


Fig. 10. (a) Trajectory generation of a set  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ; (b) Simulation based on OpenGL.

## 7. Conclusions and future work.

The trajectory generation is a fundamental step in the kinematic and dynamic study of a hexapod robot, as well as the development of the fix or free locomotion of the robot. Here, if there is an inadequate relationship of the angles  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  and  $\theta_3$ , and considering the geometric arrangement of the legs, we could not achieve the correct system's movement, and consequently the robot stability could be affected, due to the fact that it doesn't exist a relationship in the angles of the leg, because if every angle have values which are not proper and performing the tripod movement, then the robot could fall down.

The leg simulation was developed in C++ with OpenGL libraries, and it is an approach of the trajectory movement of the robot's leg in a real mechanism. As a future work, a simulator of the whole hexapod robot will be developed, including some algorithms that allow analyzing different stability parameters, locomotion, trajectory planning and some artificial intelligence algorithms like neural networks for the development of movements similar to the animals.

## Acknowledgements

We would like to thank Consejo y Ciencia de Tecnología del Estado de Querétaro (CONCYTEQ) by the 2012-01 science and technology activities programs, and the Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) for the facilities and support.

## References

- [1] Mustafa Suphi Erden, "Optimal Protraction of a Biologically Inspired Robot Leg", 2001, J Intell Robot Syst, 64:301-322, DOI 10.1007/s10846-011-9538-8.
- [2] Manuel F. Silva, J. A. Tenreiro Machado, July-2006, "A Historical Perspective of Legged Robots", Journal of Vibration and Control 2007 13: 1447, DOI: 10.1177/1077546307078276.
- [3] Joaquin Estremera and Pablo Gonzales de Santos, "Generating Continuous Free Crab Gaits for Quadruped Robots on Irregular Terrain", 2005, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 21, No. 6. December.
- [4] E. Calle, I. Ávila, J. Zambrano, Octubre-2007, "Diseño e Implementación de un Robot Móvil Cuadrúpedo", Revista Tecnológica ESPOL, Vol. 20, N. 1, ISSN : 0257-1749. pp. 65-72.
- [5] Zu Guang Zhang, Hiroshi Kimura and Kunikatsu Takase, "Adaptive Running of a Quadruped Robot Using Forced Vibration and Synchronization", in Proceeding of the Journal of Vibration and Control/SAGE, May 4, 2006, pp.1361–1383.
- [6] Kristi A. Morgansen, Benjamin I. Triplett, and Daniel J. Klein, (2007), "Geometric Methods for modeling a Control of Free-Swimming Fin-Actuated Underwater Vehicles", SUBMITTED TO THE IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, December.
- [7] Paolo Arena, Holk Cruse, Mattia Frasca, "2001", "Cellular Nonlinear Network-Based Bio-Inspired Decentralized Control of Locomotion for Hexapod Robots", Adaptive Behavior 2002 10: 97, DOI: 10.1177/1059712302010002002.
- [8] Uluc Saranli, Martin Buehler and Daniel E. Koditschek, 2000, "RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot", The International Journal of Robotics Research 2001 20: 616, DOI: 10.1177/02783640122067570, July.
- [9] Jorge Cortes, Sonia Martinez James, P. Ostrowski, Kenneth A. McIsaac, 2001, "Optimal Gaits for Dynamic Robotic Locomotion", September.
- [10] Vargas Soto Jose Emilio, "Diseño un Robot Hexápedo Tipo Hormiga", 2006, 8vo. Congreso Mexicano de Robótica, COMRob 2006.
- [11] Paolo Arena, Luigi Fortuna, Mattia Frasca, and Giovanni Sicurella, 2004, "An Adaptive, Self-Organizing Dynamical System for Hierarchical Control of Bio-Inspired Locomotion", IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS—PART B: CYBERNETICS, VOL. 34, NO. 4, AUGUST.
- [12] Hiroshi Kimura, Yasuhiro Fukuoka, Avis H. Cohen, 2007, "Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Natural Ground Based on Biological Concepts", The International Journal of Robotics Research 2007 26: 475, DOI: 10.1177/0278364907078089.
- [13] Stanley Kwok-Kei Chu and Grantham Kwok-Hung Pang, 2002, "Comparison Between Different Model of Hexapod Robot in Fault-Tolerant Gait", IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS—PART A: SYSTEMS AND HUMANS, VOL. 32, NO. 6, NOVEMBER.
- [14] Zhiying Wang, Xilun Ding, Alberto Rovetta, Alessandro Giusti, 2001, "Mobility analysis of the typical gait of a radial symmetrical six-legged robot", Contents list available at Science Direct, 31, May.
- [15] J. P. Flores Fernandes, J. C. Pimenta Claro, Fernando Ribeiro. Design of a Hexapod Robotic System.
- [16] Jing Liu, Min Tan and Xiaoguang Zhao, 2007, "Legged robots – an overview", Transactions of the Institute of Measurement and Control 2007 29: 185, DOI: 10.1177/0142331207075610.

- [17] Efrén Gorrostieta-Hurtado, Emilio Vargas-Soto. Diseño de un Controlador Aplicado a la Generación de Pasos en un Robot Caminante.
- [18] Kris Hauser, Timothy Bretl, Jean-Claude Latombe, Kensuke Harada and Brian Wilcox, 2008, "Motion Planning for Legged Robots on Varied Terrain", *The International Journal of Robotics Research* 2008 27: 1325, DOI: 10.1177/0278364908098447.
- [19] Kris Hauser, Jean-Claude Latombe, 2009, "Multi-modal Motion Planning in Non-expansive Spaces", *The International Journal of Robotics Research* OnlineFirst, published on October 22, 2009 as doi: 10.1177/0278364909352098.
- [20] Efrén Gorrostieta y Emilio Vargas Soto, 2007, "Algoritmo Difuso de la Locomoción Libre para un Robot Caminante de Seis Patas", *Computación y Sistemas*, Vol. 11 No. 3, 2008, pp. 260-287 ISSN 1405-5546.
- [21] Philip Holmes, Robert J. Full, Dan Koditschek, John Guckenheimer. *The Dynamics of Legged Locomotion: Models, Analyses, and Challenges*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol.48, No.2, 2006, pp.207–304.
- [22] Manuel f. Silva, j. A. Tenreiro machado. Fractional Order PD\_ Joint Control of Legged Robots, 2006, *Journal of Vibration and Control*. DOI: 10.1177/1077546306070608.
- [23] Raibert M. Running on Four Legs As Though The Were One, 1986, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA2, No. 2.
- [24] Md. Masum Billah, Mohiuddin Ahmed, and Soheli Farhana, 2008, "Walking Hexapod Robot in Disaster Recovery Developing Algorithm for Terrain Negotiation and Navigation", *World Academy of Science, Engineering and Technology*.
- [25] Mustafa Suphi Erden and Kemal Leblebicioglu. Torque Distribution in a Six-Legged Robot, 2007, *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, VOL. 23, NO. 1.
- [26] J. Zico Kolter, Mike P. Rodgers, and Andrew Y. Ng, "A Control Architecture for Quadruped Locomotion Over Rough Terrain", Computer Science Department, Stanford University, Stanford, CA 94305.
- [27] Pablo Gonzalez de Santos, José a. Gálvez, Joaquin Estremera, and Elena García, 2003, "A True Walking Robot for the Comparative Study of Walking Machine Techniques", I IEEE Robotics & Automation Magazine, December.
- [28] Efrén Gorrostieta y Emilio Vargas Soto. Algoritmo Difuso de Locomoción Libre para un Robot Caminante de Seis Patas, 2007.
- [29] G. Figliolini, S.-D. Stan, P. Rea. Motion Analysis of the Leg Tip of a Six-Legged Walking Robot, 2007, 12th IFToMM World Congress, Besançon (France).
- [30] Aníbal Ollero Baturote. Robótica Manipuladores y Robots Móviles, 2001, Edit. Alfaomega. ISBN 9701507584.
- [31] J. A. Soto Cajiga, J. E. Vargas Soto, J. C. Pedraza Ortega, 2006, Generación de trayectorias para un robot manipulador utilizando procesamiento de imágenes y splines. Segundo Congreso Internacional de Ingeniería, UAQ, Marzo.