



UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR  
Decanato de Estudios de Postgrado  
Coordinación de Postgrado de Ingeniería Electrónica  
Maestría en Ingeniería Electrónica

## **PLANIFICACIÓN DE PISADAS Y CONTROL DE LOCOMOCIÓN DE UN ROBOT HEXÁPODO EN TERRENOS IRREGULARES**

### **Resumen**

Este trabajo de grado consistirá en desarrollar un algoritmo que le permita a un robot hexápodo circular caminar sobre terrenos irregulares. Esto se logra creando un algoritmo que dote al robot de la inteligencia necesaria para, dependiendo de los obstáculos que atraviesa, escoger una pisada óptima para cada pata según criterios dados. Adicional a realizar el estudio del movimiento del robot se creará un modelo en un simulador para probar el algoritmo desarrollado. La estructura del terreno es conocida, al igual que la trayectoria para desplazarse; y el robot será capaz de explotar una de las mayores ventajas de los robots con patas, viajar sobre terrenos irregulares.

Fecha estimada de culminación:  
Presentado por: Maureen Rojas Medrano.  
Carnet: 11-88344  
Firma:

Profesor Asesor: Prof. José Cappelletto.  
Firma:  
Profesor Asesor: Prof. Juan Carlos Grieco.  
Firma:

# 1. Planteamiento del problema

En el mundo de robots móviles terrestres existen dos grupos principales que se han estudiado constantemente durante varias décadas; por un lado están los robots con ruedas, y por el otro los robots con patas [1]. Todos estos vehículos, autónomos o no, son creados y utilizados (o se planean utilizar) en diferentes tareas dirigidas a facilitar la vida del hombre. Este trabajo se concentra en el estudio de robots con patas, y se destaca que son robots caminantes no-bípedos; vehículos que se han vuelto populares en los últimos tiempos debido a que son capaces de sobreponer problemas presentes en terrenos definidos como irregulares.

Una parte sustancial del planeta tierra es inaccesible para cualquier tipo de mecanismo con ruedas. Obstáculos como grandes rocas, suelo aceitoso, huecos grandes o suelos muy inclinados son algunos ejemplos en donde vehículos que ruedan suelen ser inefectivos [2]. Por su lado, los robots con patas presentan características superiores de movilidad debido a la capacidad que tienen de adaptarse a distintos tipos de superficies; habilidad que les permite desplazarse sobre terrenos irregulares, inclinados o con obstáculos [3, 4]. Sin embargo, estos robots se han incorporado lentamente en aplicaciones reales debido a que su estudio y control resulta complicado; teniendo que controlar un “alto” número de actuadores, la planificación de movimientos sencillos requiere un análisis muy completo y por lo general se debe contar con distintos tipos de sensores con la finalidad de realizar un control efectivo.

Aún mencionando lo anterior, los robots caminantes resultan de gran interés en el mundo de la investigación debido a la versatilidad de sus movimientos; por esto es deseable sobreponer las contrariedades mencionadas y lograr un caminado controlado de robots con patas. A continuación se presenta una introducción a la locomoción de robots caminantes.

Es primordial crear definiciones de los estados en los que se puede encontrar una pata del robot. Idealmente existen dos estados: apoyo y transferencia; notación utilizada ampliamente en esta área, por ejemplo como en: [3, 5, 6, 7]. Durante la fase de apoyo de una pata, la misma es un punto de soporte para el robot (se mantiene en el mismo punto en el suelo); por otro lado, la fase de transferencia es la transición entre dos puntos de apoyo (la pata está suspendida en el aire). Por lo general se define el estado de una pata como '1' o '0', dependiendo de si está en apoyo o en transferencia (y viceversa, depende del autor). El estado de soporte de un sistema de locomoción con  $j = 1, \dots, k$  patas es un vector binario  $y(t)$ , tal que para el momento  $t$ ,  $y_j(t)$  es '0' o '1' dependiendo de si la pata  $j$  está en apoyo o transferencia.

Según lo anterior, se desea determinar la secuencia de estados de soporte para un sistema de locomoción sobre un terreno particular, y que será óptimo respecto a criterios definidos. Una solución periódica de este problema es lo que se define usualmente como “caminado” [3].

En este punto vale destacar que la locomoción de robots con patas suele dividirse en “caminado estático” y “caminado dinámico”. En ambos modos de caminado se desea que las fuerzas producidas por los soportes queden en equilibrio, de manera que no se produzca un momento que trate de voltear el cuerpo. En el caso de caminado estático esto se logra moviendo el Centro de Gravedad (CDG) “lentamente” de manera que su posición esté dentro de un volumen deseado; en el caso de caminado dinámico el móvil vuela balísticamente entre pasos de propulsión; en cada paso se debe crear la fuerza de soporte (en magnitud y dirección) necesaria para mantener la estabilidad [6].

Cada área mencionada es una rama diferente de estudio y los problemas se atacan de diferentes maneras [1]. Este trabajo de investigación se enfoca en el caminado estático de robots con patas,

por lo que toda la investigación se dirige a este campo. A continuación se describen una serie de definiciones pertinentes al área en estudio [3, 5, 6].

#### ■ Definición de espacio de trabajo

Cada  $j = 1, \dots, k$  pata de un robot tiene un espacio de trabajo que se dice alcanzable por la misma. Es decir, la punta de una pata se puede mover a cualquier posición del espacio de trabajo definido sin requerir el movimiento del cuerpo. El espacio de trabajo depende de la configuración de las patas y del robot.

#### ■ Definición de pisada y punto de soporte

Un punto en el espacio  $i$  se clasifica como “pisada posible”  $F_{ij}$  de la pata  $j$  si y sólo si se encuentra dentro del espacio de trabajo de la pata. Una pisada  $F_{ij}$  se convierte en un punto de soporte  $S_j$  de la pata  $j$  cuando la pata se encuentra posicionada en el punto. Así, las pisadas  $F_{ij}$  son vistas como un grupo de posibilidades para el soporte de la pata  $j$ .

Ahora, para la toma de la decisión de qué pisadas escoger para formar el vector de soporte se pueden tomar distintos criterios, por ejemplo: maximizar la velocidad del vehículo, maximizar la distancia recorrida, minimizar el consumo de energía, evitar los obstáculos, evitar que las patas deslicen, etc; la escogencia del criterio dependerá de la aplicación deseada para el robot. Sin embargo, al trabajar bajo régimen estáticamente estable existen dos conceptos primordiales y que en general siempre son tomados en cuenta (aunque no sean utilizadas como valores a optimizar): margen de estabilidad estática y margen cinemático. Varios autores dan definiciones de ambos conceptos, por ejemplo McGhee en [3], Cappelletto en [6], Estremera en [5, 8], Kalakrishnan en [9], entre otros. A continuación se da una descripción general de estos conceptos y en la Figura se ilustran los mismos.

#### ■ Definición de estabilidad

Un “patrón de soporte” o “polígono de apoyo” asociado a un estado de soporte es aquel polígono convexo que se forma en el plano horizontal a partir de la proyección vertical de las patas en apoyo. Los patrones de soporte encierran aspectos tanto geométricos como temporales durante la locomoción, de manera que cada patrón de soporte se asocia a una variable dependiente del tiempo  $p(t)$ .

Sea  $q(t)$  una variable que en un momento determinado contiene la posición de la proyección vertical del CDG del robot sobre el plano horizontal. Entonces, se define que en el tiempo  $t_0$ ,  $p(t_0)$  es estáticamente estable si y sólo si  $q(t_0)$  está contenido en su interior.

- **Margen de estabilidad absoluto:** es la distancia más corta (en valor absoluto) de la proyección vertical del CDG en el plano horizontal a los lados del polígono de apoyo. Este valor es simplemente el valor absoluto de lo conocido como margen de estabilidad estática.

#### ■ Definición de margen cinemático

Para una pata  $j$ , es la distancia del punto de soporte  $i$  al límite del espacio de trabajo en dirección contrario al movimiento del robot. De convertirse la pisada  $F_{ij}$  en el soporte  $S_j$ , el margen cinemático durante la traslación del CDG está relacionado con qué tanto tiempo puede estar la pata  $j$  en  $S_j$  antes de que la pata llegue a su límite cinemático.

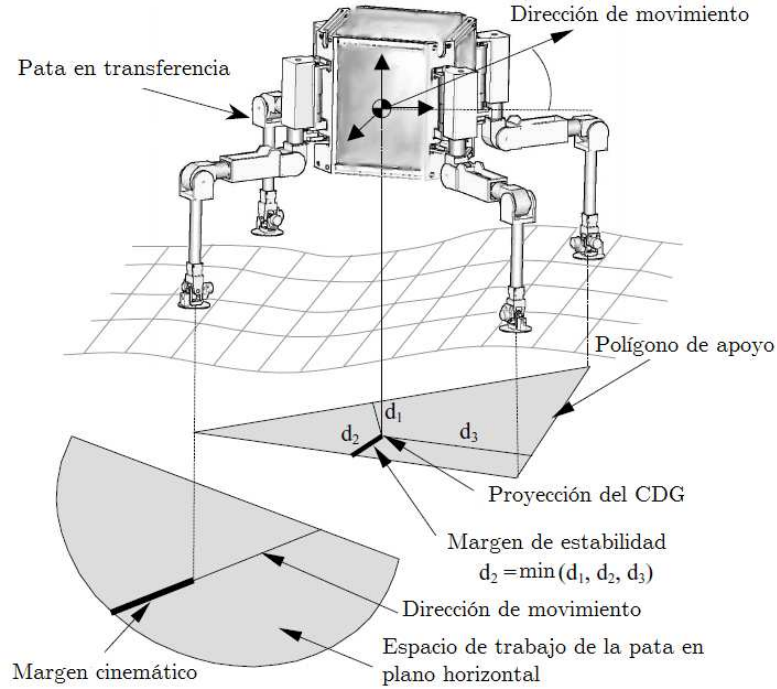


Figura 1: Definición de magnitudes en caminado estáticamente estables [5].

Según la definición de estabilidad, la locomoción del robot a través de patrones de soporte requiere coordinación entre patrones para mantener la estabilidad; es decir, el movimiento de las patas debe realizarse en el momento exacto para que  $q(t)$  se encuentre siempre dentro de los diferentes cambios de  $p(t)$ . Para llevar este tiempo se crean diferentes conceptos que describen la trayectoria de una pata del robot. En [6] se explican dichos conceptos dentro de un modelo geométrico del robot.

### ■ Modelo geométrico del robot y modos de caminado

Las patas de un robot pueden tener distintos tipos de trayectorias, por ejemplo: rectangulares, ovaladas, triangulares, etc. Todas son descritas por tres parámetros principales.

- Longitud de paso ( $\lambda$ ): es la longitud recorrida (respecto al cuerpo) por la pata durante la fase de apoyo.
- Período de paso ( $T$ ): es el tiempo requerido por la pata para completar un ciclo de la trayectoria.  $T = T_{\text{fase-apoyo}} + T_{\text{fase-transferencia}}$ .
- Factor de apoyo ( $\beta$ ): es el cociente entre el intervalo de tiempo de la fase de apoyo y la duración total de un ciclo de la trayectoria.  $\beta = \frac{T_{\text{fase-apoyo}}}{T}$ . Este rango teórico va de 0 a 1, para valores mayores a 0,5 la pata permanece más tiempo sobre la superficie que separada de la misma.

Note que este modelo parametriza una trayectoria descrita por la pata principalmente por la longitud del paso en la fase de apoyo (no se toma en cuenta la transferencia). También se observa que la velocidad promedio del robot queda dictada por la relación  $V_{\text{prom}} = \frac{\lambda}{T}$ ; el parámetro  $\beta$  modifica el tiempo que la pata está en apoyo y en transferencia. La Figura 2 muestra una trayectoria rectangular para una pata, y se identifican los parámetros del modelo geométrico.

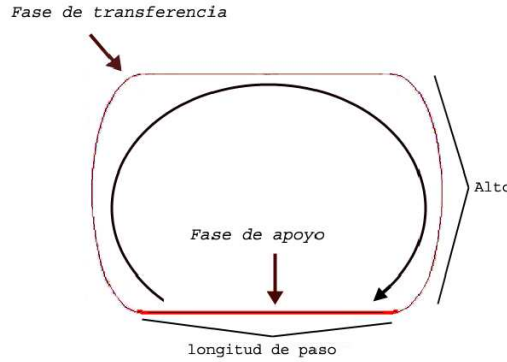


Figura 2: Parámetros de modelo geométrico [6].

Dada una longitud de paso y un período de paso igual para todas las patas, cambiando  $\beta$  se puede controlar qué pata está en apoyo en un momento deseado dentro del tiempo de marcha del robot; se logra coordinar el movimiento de una manera deseada. Al cambiar el factor de apoyo en las patas, el robot cambia su modo de caminado; éstos se refieren a la cantidad de patas que el robot tiene en el suelo. Por ejemplo, si el robot siempre tiene 3 patas en el suelo mientras las otras están en transferencia, se dice que el modo de caminado es trípode; que es el modo mínimo necesario para mantener estabilidad estática (al tener más patas en apoyo, la estabilidad podría mejorar).

Los modos o patrones de caminado estáticos se dividen en dos grupo [1]: caminado periódico y no-periódico. Entre éstas existen 2 que se describirán en este trabajo:

- Caminado tipo cangrejo (*Crab Gait*) ó Caminado continuo (*Continous Gait*): pertenece a la clase periódico. Se caracteriza por el ángulo de cangrejo (*crab angle*:  $\alpha$ ) que es definido como el ángulo entre el eje longitudinal del cuerpo y la dirección de locomoción; para  $\alpha = 0^\circ$ , el *crab gait* se llama en *continous gait*. En el caso del hexápodo las patas se mueven en tríos con una secuencia predeterminada (un trío está en apoyo y el otro en transferencia), el movimiento del cuerpo es permitido sólo cuando todas las patas están en apoyo. Se puede realizar una variación en este caminado variando las patas en apoyo; pero el algoritmo se basa en que la pata a mover es predeterminada.
- Caminado libre (*Free Gait*): este algoritmo pertenece a la clase no-periódico. Tiene la característica de que la próxima pata a mover se escoge según un criterio dado. Es posible mover el hexápodo en cualquier dirección, buscar por pisadas ideales basado en características del terreno.

Dadas las definiciones más importantes que resumen el caminado estático de robots con patas, se desea destacar el fin último de la investigación. Como ya se mencionó, la mayor ventaja de los robots con patas es su capacidad de sobreponer terrenos irregulares. Para la realización de esta tarea se debe dotar al robot con la inteligencia necesaria para tomar decisiones al trasladarse sobre dichos terrenos; es un problema similar al que viven los humanos al viajar sobre terrenos con obstáculos (zonas prohibidas): deben planear en donde colocar las extremidades para poder mantener el cuerpo estable.

Así, es motivo de esta investigación crear un algoritmo que le permita al robot tomar decisiones sobre a donde mover las patas al encontrarse con zonas prohibidas en el camino. Distintos planteamientos para la solución del problema son estudiados, y se ha identificado el problema como “posición óptima de pisada” (conocido mejor por su traducción al inglés: *Optimal foothold placement* (OFP)) .

## 1.1. Condiciones de Trabajo

El robot con patas escogido para trabajar es un hexápodo circular de la empresa Lynxmotion llamado “BH3-R”. De este modelo, se posee un robot físico en el laboratorio del Grupo de Investigación de Mecatrónica de la USB, que es el mostrado en la Figura 3; sin embargo, no se contempla implementar el trabajo en el robot físico.

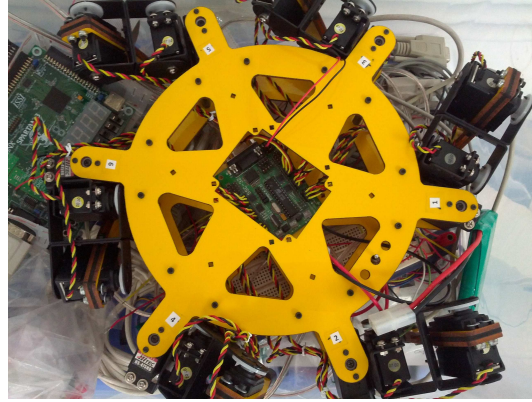


Figura 3: Hexápodo BH3-R de Lynxmotion.

Según la investigación a realizar, es posible utilizar cualquier robot con patas. Primero, se escoge un robot hexápodo frente a un robot cuadrúpedo, porque el análisis a realizar requiere que el robot sea lo más estable posible, ventaja que presenta el hexápodo; por otro lado, este robot radialmente simétrico posee características particulares, entre ellas el hecho de que es un vehículo omnidireccional, se puede mover en cualquier dirección. Finalmente, es una ventaja poseer el robot físico porque permite obtener una réplica exacta al modelarlo en un simulador.

El hexápodo BH3-R tiene una masa aproximada de  $M = 2,5[Kg]$  y su cuerpo central tiene un diámetro (medido entre dos centros de motores diametralmente opuestos) aproximado de  $R = 0,27[m]$  [10].

### ■ Simulación del Robot

El algoritmo desarrollado para el hexápodo BH3 será probado en un simulador. En el mismo se creará una copia del hexápodo con las propiedades físicas y dinámicas lo más fieles posibles; igualmente se desarrollará el ambiente de simulación que contará con el terreno a travesar y se implementarán los sensores necesarios para el funcionamiento del algoritmo en el robot.

El simulador se escogerá durante la investigación a partir de un análisis comparativo entre diferentes programas. Inicialmente se proponen simuladores como: **V-REP** (*Virtual Robot Experimentation Platform*) de la compañía Coppelia Robotics; **Gazebo**, plataforma desarrollada en la Universidad de *Southern California*; **Webots** de Cyberbotics, entre otros.

### ■ Definición de ambiente de trabajo y obstáculos

El mapa del terreno es completamente conocido por el robot.

Se plantea que el robot enfrente terrenos irregulares, por lo que es necesario definir qué significa “irregular” en el contexto de esta investigación. El ambiente implementado es un plano XY (sin inclinación) por donde se desplaza el robot y que posee ciertas zonas prohibidas (que el robot no debe pisar) en 2D, es decir los obstáculos estarán “pintados” en la superficie.

El ambiente de trabajo a desarrollar tendrá un tamaño aproximado de 10 veces la longitud y ancho del cuerpo del hexápodo. El mismo contará con los obstáculos deseados para probar el algoritmo a desarrollar. Una de las maneras posibles para trabajar los obstáculos, es la división del ambiente de trabajo en una cuadrícula y simular los obstáculos como celdas prohibidas para el robot; sin embargo, a lo largo de la investigación se decidirá si ésta es la manera más conveniente de plantear el ambiente.

### ■ Trayectoria a recorrer

La finalidad principal de este trabajo es crear un algoritmo que plantee cómo mover las patas, de manera que el robot necesita tener una trayectoria a recorrer para poder implementar el mismo. Dicha trayectoria que dirigirá al hexápodo de un punto *A* a un punto *B* será obtenida de un sistema de control superior al del robot, es decir, será dada previamente y no es correspondencia de este trabajo plantear un método para decidir la misma.

Finalmente, esta investigación tiene como meta desarrollar un algoritmo que le permita la robot hexápodo BH3 escoger en donde colocar sus patas para transitar terrenos irregulares (con obstáculos 2D) dada previamente una trayectoria a recorrer. La obtención de estas pisadas óptimas se refiere a la maximización (minimización) de alguno de los criterios mencionados anteriormente. El robot (su movimiento y dinámica), el ambiente (y obstáculos) y el algoritmo a desarrollar serán todos implementados en el simulador seleccionado.

## 2. Antecedentes de la investigación

Realizando una revisión bibliográfica del problema planteado, se ha encontrado que distintos autores plantean soluciones muy similares entre sí. A continuación se presenta un breve resumen de los trabajos considerados pertinentes con esta investigación.

- Yang y Kim en [11], proponen una solución más sencilla para resolver el problema de caminado alrededor de obstáculos. Se define el espacio de trabajo del robot de manera que cada pata puede moverse sólo dentro de su propio espacio de trabajo. La idea es mover cada pata la mayor distancia posible dentro de dicho espacio hacia la dirección de movimiento; se utiliza un algoritmo muy sencillo llamado *Follow The Lider* (FTL), en donde se calcula la posición de las patas delanteras (se escoge el extremo y el centro de la zona de trabajo) y se mueven

hacia el objetivo, luego las patas traseras se van colocando en donde estuvieron las primeras. En caso de encontrarse con un obstáculo, las patas delanteras se moverán hacia el objetivo lo más posible (evitando el obstáculo) y luego las traseras repetirán este movimiento.

- Jin *at el* en [7] presentan un caminado libre basado en un algoritmo A\* (A-estrella) para la búsqueda en grafos. El planificador de caminado se divide en un caminado primario y un caminado secundario. En el caminado primario todas las patas tienen una secuencia fija de transferencia (se trabaja con  $\beta = 2/3$ ), en donde la pisada final de la pata se mueve según el criterio de margen cinemático si hay obstáculos presentes. El caminado secundario se escoge como:
  - Se divide el movimiento del robot en pequeños segmentos de movimiento.
  - Se crea un grafo de movimiento del robot, en donde cada nodo representa un patrón de soporte, y las uniones representan las transiciones entre los mismos.
    - A partir del nodo actual se abren nuevos nodos cuyas transiciones puedan provenir del patrón anterior.
    - Las transiciones entre estados son previamente definidas y se obtienen de una tabla de un trabajo anterior.
    - Cada nuevo nodo es evaluado con una función de costos.
    - A medida que se vayan consiguiendo los mejores nodos, los mismos se van expandiendo hasta llegar a un límite predefinido.

El algoritmo de caminado primario se desarrolla de acuerdo a la influencia de los obstáculos; si es posible sobreponer los obstáculos según los criterios dados, el caminado primario se genera con cambios en el tiempo de transferencia y la longitud del paso según lo requiera la posición de los obstáculos. En caso contrario, se adopta el caminado secundario para ajustar la posición de la pata.

- Hauser, Latombe *at el* [12] presentan un planificador que tiene dos etapas: primero generan candidatos de secuencias de pisadas, encontrando transiciones entre estados de soporte; luego expanden esta idea hasta obtener una trayectoria realizable por el CDG que se realizaría a través de las secuencias soporte. Es decir, este algoritmo se centra en elegir los puntos de soportes y las transiciones antes de realizar los movimientos.

El planificador descrito combina la búsqueda en grafos para generar secuencias de posibles pisadas con un *Probabilistic Roadmap* (PRM). Se muestrean configuraciones realizables (soportes), se generan caminos locales posibles, y se realiza la una búsqueda en los grandes grafos de soportes y transiciones creados. Para mejorar los resultados, se describe cómo generar una estrategia de muestreo probabilístico a partir de una pequeña librería de primitivas de movimiento pre-calculadas.

- Estremera, Gonzalez de Santos *at el* en [5, 8, 13] trabajan con un robot cuadrúpedo y otro hexápodo. En sus primeros trabajos se concentran en realizar su algoritmo para encontrar la pisada más óptima para la siguiente pata en movimiento. Para realizar esta búsqueda definen un “Espacio de búsqueda” para cada pata, calculadas a través de definiciones matemáticas dirigidas a que el movimiento de una pata debería favorecer los próximos movimientos de las otras patas. Más adelante se concentran en crear el algoritmo de selección de pata y a la ejecución de movimiento.



Así, utilizan controles en diferentes niveles jerárquicos: un nivel alto que crea una estrategia general de movimiento, hasta niveles bajos que controlan el movimiento de cada articulación. El robot siempre está programado para caminado continuo, en el caso del hexápodo en modo tipo trípode, de manera que en línea general el algoritmo de caminado no presente una carga computacional. Sin embargo, cuando el robot comienza a encontrar zonas prohibidas en su trayectoria pasa al caminado libre.

El planificador de caminado se divide en tres partes: planificador de pata a levantar, planificador de trayectoria del cuerpo y planificador de pisada. Luego de completar las primeras dos etapas, el planificador de pisada realiza los siguientes pasos:

- Divide el espacio de trabajo en una cuadrícula de  $N$  celdas, en donde cada celda representa espacios que pueden ser posibles pisadas o no.
  - Se realiza una primera selección en donde se escogen las  $F_{ij}$  de la pata seleccionada. Una celda  $i$  se convierte en  $F_{ij}$  si y sólo si:
    - La celda  $i$  no se encuentra en una zona prohibida.
    - El margen cinemático debe ser lo suficientemente grande para que la pata no salga del área de trabajo mientras se completa la transferencia.
    - El margen de estabilidad que sigue a la transferencia de la pata debe ser mayor que el mínimo establecido.
  - Obtenido el conjunto  $F_{ij}$ , se evalúan todas las celdas según el criterio de maximización del margen cinemático y maximización del margen de estabilidad.
  - Debido a que puede haber varias pisadas que cumplan con los criterios, se crea una función de costos en donde se realiza una suma ponderada entre el margen de estabilidad y cinemático. La pisada con el mayor valor en la función de costos es la ganadora.
  - Los factores de “peso” en la suma ponderada se obtienen a partir del compromiso que se desee tener entre los dos márgenes.
- Kalakrishnan, Buchli *et al* en [14, 9] trabajan con algoritmos en donde definen funciones de costos para las pisadas como una combinación ponderada de las características del terreno. Se trabaja en régimen estático o semi-estático, por lo que se considera que el CDG o el ZMP (*Zero Moment Point*) dentro del polígono de apoyo. Las condiciones para encontrar la nueva pisada son: minimizar el deslizamiento de la pata, maximizar el avance hacia la meta, estar dentro del margen cinemático del robot, maximizar el área de los próximos polígonos de apoyo (para mayor estabilidad).

Por lo general, las metas mencionadas tienden a ser conflictivas entre sí, por lo que se debe definir el compromiso que se desea con cada una. Se menciona que especificar este compromiso a mano suele ser problemático; por lo que se propone adquirir una “demostración de expertos” para sintonizar la función de costos a crear. Los expertos son personas que ven una simulación del recorrido del robot y la manera cómo escoge las pisadas (sintonizado inicialmente de manera aleatoria), se encargan de corregir las pisadas menos eficientes escogidas por el robot y durante este proceso se ajustan los pesos de la función de costo. También se menciona que dichos pesos se pueden seleccionar mediante un clasificador lineal como SVN o una regresión logística. Este entrenamiento se realiza *off-line* antes de que el robot comience a operar.

Finalmente, al momento de escoger un soporte entre posibles pisadas, el robot evalúa todas las posibilidades y adquiere la que tenga mayor costo. Más adelante se modifica el algoritmo

para que al escoger la pisada no lo haga sólo por la posición actual, sino que estudia los 5 pasos siguientes de cada opción; al final, la pisada actual que tenga el mejor desempeño a futuro es la escogida.

- Belter *at el* en [15] proponen un algoritmo aprende a crear un sistema de puntaje para el terreno a partir de experimentos realizados en el robot real, o en las simulaciones del mismo. Para hacer esto, el robot primero debe crear un modelo del ambiente, se realiza a través de un mapa tipo cuadrícula.

El robot inicia caminado en modo trípede, pero a medida que se encuentra con obstáculos se ve en la necesidad de cambiar la posición de las próximas pisadas. El algoritmo que va escogiendo las pisadas funciona como:

- El punto que servirá de soporte debe minimizar el riesgo de deslizamiento. El deslizamiento se define como la diferencia entre la posición de la pata al inicio y final de la fase de apoyo.
- Se divide el algoritmo en 3 etapas: recolección de datos, aprendizaje-aproximación, operación regular.
- Recolección de datos: existen dos estrategias; (1) el robot va caminando sobre el terreno seleccionando pisadas aleatoriamente, se guardan coeficientes o “pesos” relacionados con los soportes escogidos, y como resultado se obtiene un índice de deslizamiento para los tipos de pisadas probadas. (2) El robot prueba siete “primitivas de terreno” pre-planeadas, y se mide el índice de deslizamiento para cada una.
- Aprendizaje-aproximación: el robot posee la data apropiada para construir una superficie de decisión con pisadas posibles, previamente distinguiendo entre buenas y malas pisadas.
- Operación regular: durante su desplazamiento, el robot utiliza aproximación polinomial para darle valor a las posibles pisadas que ve, según la base de datos que posee. Los resultados se utilizan para posicionar la pata en el punto que se selecciona como mejor. Se toman en cuenta características como: no usar puntos cercanos al límite cinemático, utilizar pisadas con bajos índices de deslizamiento, etc.

Finalizando el análisis de estos y otros trabajos, se observan semejanzas en varios de ellos. Todos trabajan dividiendo ya sea todo el terreno, o una porción del mismo, o sólo el espacio de trabajo en una cuadrícula; así el problema se transforma en una búsqueda con restricciones en un espacio finito. La dimensión de dicho espacio depende del robot y de la aplicación que tenga el robot.

Cada celda de la cuadrícula se evalúa como posible pisada si cumple con condiciones establecidas. Y finalmente, todos los trabajos utilizan una función de costos para obtener una celda ganadora que se escogerá como punto de soporte.

### 3. Justificación e importancia del trabajo

Los robots con patas presentan gran interés para los investigadores por varias razones. Una razón académica se relaciona con el estudio y emulación del comportamiento de animales e insectos al caminar; de donde surgen soluciones a múltiples problemas en robótica. Y una razón más

práctica se refiere a las ventajas que presentan respecto a los robots con ruedas (especialmente en terrenos irregulares), y su estudio llevaría al desarrollo de una nueva clase de vehículos que poseen largas ventajas viajando sobre terrenos irregulares o sobre sustratos suaves y pueden llegar a tener diferentes aplicaciones como transporte árticos, minería, agricultura, ingeniería forestal, manejo de incendios, disposición de explosivos o desechos, e incluso vehículos no tripulados para la exploración submarina.

Es de gran importancia dotar a los robots con patas con suficiente inteligencia para poder explotar todas sus capacidades y ventajas sobre otros tipos de vehículos. El problema de optimización de trayectorias óptimas es un tema que ha sido explotado poco en la literatura respecto el resto de los problemas referentes a robots caminantes, de manera que presenta gran interés presentar una alternativa a los algoritmos existentes.

Este trabajo de grado estará enfocado al desarrollo de un algoritmo de planificación-optimización. El robot deberá capaz de escoger posiciones definidas como óptimas bajo ciertos criterios para la colocación de las patas, a partir de la información de su entorno; para luego planificar la trayectoria que posicionará las mismas en los lugares previstos. La realización del trabajo pretende ofrecer una solución para una de las mayores desventajas de los robots con patas, que es la dificultad de manejarse en terrenos difíciles.

## 4. Objetivo General

Modelado cinemático del robot hexápodo BH3-R, planificación de las trayectorias de sus patas y control para locomoción estable en terrenos definidos como irregulares.

## 5. Objetivos Específicos

1. Revisión bibliográfica sobre planificación de pisadas y trayectorias de patas, y control para locomoción estable en terrenos regulares e irregulares implementados en robots con patas.
2. Revisión bibliográfica y análisis comparativo sobre soluciones para la planificación de trayectoria y control de robots con patas para resolver el problema de posición óptima de pisadas durante la locomoción estable en terrenos irregulares.
3. Modelado cinemático del robot hexápodo circular BH3-R.
4. Crear modelo de robot y ambiente a trabajar dentro de un programa simulador. Prueba de su correcto funcionamiento bajo régimen estáticamente estable.
5. Desarrollo de algoritmo de locomoción del robot hexápodo BH3-R que escoja pisadas óptimas al atravesar los terrenos irregulares presentados.
6. Simulación y pruebas del algoritmo creado para locomoción de robot hexápodo BH3-R sobre terrenos irregulares.
7. Evaluación de resultados y desempeño del sistema de caminado desarrollado.

## 6. Metodología

- **Fase 1:** Revisión bibliográfica completa de los principales aspectos que conforman el proyecto. Se procede con una revisión del estado del arte sobre soluciones para el problema del caminado de robots y la solución para el problema de OFP.
- **Fase 2:** Estudio y selección de las herramientas computacionales para el posterior modelado y simulación del robot hexápodo. En esta fase también se realizará el estudio cinemático (para la descripción del movimiento) del robot, junto con su posterior modelado físico e implementación en el ambiente de simulación seleccionado. Validación del modelo obtenido y simulaciones de trayectorias pre-programadas sencillas sobre terrenos irregulares.
- **Fase 3:** Desarrollo e implementación de un sistema de locomoción que cumpla con los criterios de coordinación y estabilidad que se hayan establecidos en las simulaciones sobre terrenos irregulares.
- **Fase 5:** Se desarrollarán algoritmos que, a partir de los datos que se poseen del entorno, planifique la trayectoria óptima del movimiento de cada pata. Desarrollo del control para locomoción de las patas según la trayectoria calculada por el algoritmo mencionado.
- **Fase 6:** Simulación del sistema de locomoción obtenido a partir del algoritmo desarrollado sobre el robot hexápodo. Simulación de experimentos en distintos ambientes y obtención de resultados. Ajuste y corrección de distintos errores para obtención del desempeño deseado.
- **Fase 7:** Evaluación del desempeño del control y algoritmos desarrollados, análisis de resultados y comparaciones pertinentes con las simulaciones realizadas y trabajos previos con el fin de obtener conclusiones que permitan caracterizar el sistema desarrollado.
- **Fase 8:** Elaboración y revisión de la documentación sobre el progreso y desarrollo del trabajo realizado que concluirá con la redacción final del libro.

## 7. Cronograma de actividades a realizar

Tareas	Objetivos	Meses											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fase 1	1, 2												
Fase 2	3												
Fase 3	3												
Fase 4	5												
Fase 5	4												
Fase 6	6												
Fase 7	7												
Fase 8													

# Referencias Bibliográficas

- [1] C. Kara, T. Brandt, y D. Schramm, “A comparison of static gait patterns for quadrupeds,” en *CLAWAR 2009*, 2009, pp. 1–8.
- [2] D. Wettergreen, H. Pangels, y J. Bares, “Behavior-based Gait Execution for the Dante II Walking Robot,” en *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Ago. 1995, pp. 7–9.
- [3] R. McGhee y G. Iswandhi, “Adaptive Locomotion of a multilegged robot over rough terrain,” *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. Part B, Cybernetics : a publication of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society*, vol. SMC-9, no. 4, pp. 176–182, 1979.
- [4] D. Barnes, “Hexapodal robot locomotion over uneven terrain,” *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications*, vol. 1, no. 1, pp. 441–445, Sep. 1998.
- [5] J. Estremera y P. Gonzalez de Santos, “Free Gaits for Quadruped Robots over Irregular Terrain,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 21, no. 2, pp. 115–130, Feb. 2002. [En Línea]. Disponible en: <http://ijr.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/027836402760475333>
- [6] J. Cappelletto, “Generador de modos de caminado para robot cuadrupedo en principios neurofisiológicos,” Tesis de Maestría, 2006.
- [7] Y. Jin, W. Chen, J. Zhang, y L. Xu, “New Free Gait Generation for a Cockroach Robot,” en *Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2007, pp. 1214–1219.
- [8] J. Estremera y P. de Santos, “Generating continuous free crab gaits for quadruped robots on irregular terrain,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 6, pp. 1067–1076, Dic. 2005. [En Línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1549934>
- [9] M. Kalakrishnan, J. Buchli, P. Pastor, M. Mistry, y S. Schaal, “Fast, robust quadruped locomotion over challenging terrain,” *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2665–2670, Mayo 2010. [En Línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5509805>
- [10] Lynxmotion. (2013) About the bh3-r walking robot. [En Línea]. Disponible en: <http://www.lynxmotion.com/c-100-bh3-r.aspx>
- [11] J. Yang y J. Kim, “A fault tolerant gait for a hexapod robot over uneven terrain,” *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. Part B, Cybernetics : a publication of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society*, vol. 30, no. 1, pp. 172–180, 2000.

- [12] K. Hauser, T. Bretl, J. C. Latombe, K. Harada, y B. Wilcox, “Motion planning for legged robots on varied terrain,” *International Journal of Robotics Research*, vol. 27, no. 11-12, pp. 1325–1349, 2008.
- [13] J. Estremera, J. Cobano, y P. Gonzalez de Santos, “Continuous free-crab gaits for hexapod robots on a natural terrain with forbidden zones: An application to humanitarian demining,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 58, no. 5, pp. 700–711, Mayo 2010. [En Línea]. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921889009002012>
- [14] M. Kalakrishnan, J. Buchli, P. Pastor, y S. Schaal, “Learning locomotion over rough terrain using terrain templates,” *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 167–172, Oct. 2009. [En Línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5354701>
- [15] D. Belter, P. Labecki, y P. Skrzypczynski, “Map-based Adaptive Foothold Planning for Unstructured Terrain Walking,” en *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, pp. 5256–5261.