

# Bucéfalo: Hexápodo con caminado mamífero autoorientable

Luis Enrique ADAMES MUÑOZ, David Christopher BALDERAS SILVA,  
Rodrigo LEÓN MÉNDEZ, Alfonso MEZA DÍAZ DE LEÓN,  
Christian Alberto PINEDA ÁLVAREZ, Luis Ricardo RAMÍREZ MESTRE,  
José Ricardo RODRÍGUEZ ESQUIVEL, Eduardo VIDAL OLASCOAGA

Universidad Panamericana

Escuela de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Mecatrónica  
Augusto Rodin # 498 Col. Insurgentes Mixcoac .C.P. 03920

[enriqueadames@yahoo.com](mailto:enriqueadames@yahoo.com) , [rodrigo\\_leon\\_m@hotmail.com](mailto:rodrigo_leon_m@hotmail.com)  
[luisramirez Mestre@yahoo.com](mailto:luisramirez Mestre@yahoo.com), [eduardo\\_vidalo@hotmail.com](mailto:eduardo_vidalo@hotmail.com)

## Resumen

*El artículo contiene un breve preámbulo del proyecto Bucéfalo, así como los objetivos fundamentales que se concibieron en un inicio para la realización del mismo, tomando en consideración que se desarrolló para participar en la competencia Walking Machine Challenge, organizada por la Sociedad de Ingenieros Automotrices.*

*El artículo se divide en cinco capítulos fundamentales que proporcionan información acerca de los puntos más relevantes en el proyecto. Primeramente se explica el funcionamiento cinemático y dinámico del mecanismo principal de movimiento basado en la teoría de pantógrafos. En el segundo capítulo se presenta el sistema neumático, sus elementos principales así como las consideraciones tomadas para el uso del sistema de potencia. El tercer capítulo describe los elementos de percepción que usa el robot y su propósito. El cuarto capítulo explica los fundamentos esenciales sobre la teoría de caminado y el algoritmo de control utilizado. Finalmente se explica el funcionamiento y la teoría geométrica del sistema de navegación especialmente concebido para el robot.*

*Al final se hace un análisis de los avances obtenidos en el proyecto así como futuros objetivos del mismo a mediano y corto plazo, concluyendo con las ideas centrales en el proyecto.*

**Palabras Clave:** Robots caminantes, Caminado mamífero, Pantógrafo, Control proporcional neumático, autoorientable.

## 1. Introducción

La tendencia que podemos encontrar en la mayoría de los proyectos en robótica es que el investigador o científico trata de imitar el comportamiento que la naturaleza ha creado para generar la locomoción en animales mamíferos e insectos. Los puntos que son de mayor interés en emular son la eficiencia energética que estos animales poseen, la gran versatilidad de caminado que encontramos, el control del equilibrio ya sea en bípedos, cuadrúpedos o en su extremo insectos con muchas más extremidades.

Precisamente esta forma de pensar fue la que tomamos nosotros, como estudiantes de sexto semestre de ingeniería mecatrónica, al querer construir un robot. Se sabía que intentábamos crear una maquina innovadora, las expectativas de cada uno de los integrantes era el aprender y llevar a cabo de manera satisfactoria un proyecto de esta magnitud, considerando no solo los aspectos técnicos, sino también el aspecto administrativo que a la vez posee igual importancia. Concluimos que el enfocar nuestro proyecto a una competencia ya establecida con varios años de experiencia y organizada por una sociedad de alto renombre como lo es la Sociedad de Ingenieros Automotrices podría brindarnos la oportunidad de lograr una mayor trascendencia en el proyecto y en la maquina en sí.

El enfocar el proyecto en la competencia *Walking Machine Challenge* por otro lado nos reducía la libertad de diseño; las dos restricciones más importantes son: 1) el hecho que el robot debe caminar definiendo maquina caminadora como maquina móvil soportada de manera discontinua y propulsada por mecanismos articulados (patas)

dejando excluidos todo mecanismo rotacional (ruedas). 2) La maquina debe tener como fuente de energía principal o secundario un sistema no contaminante, excluyendo así cualquier motor de combustión interna.

El objetivo principal que consideramos en el momento de generar el diseño del robot fue el hecho que fuera innovador, al menos en la forma de caminar con respecto de otros robots en la competencia. Existen dos diseños típicos que se presentan comúnmente, el primero es con movimientos cartesianos deslizables, y el segundo es imitando la locomoción de insectos. Se invirtió una gran parte de tiempo analizando las características de la maquina, de tal forma que cumpliera con nuestro objetivo y a la vez que su desempeño fuera óptimo en pruebas.

De acuerdo con estudios realizados en 1981 por Waldron y Kinzel un caminado con movimientos de mamífero es más eficiente que uno con movimientos de insecto, debido a que este último hace uso de los actuadores como freno.<sup>1</sup> Analizando un ciclo completo de una pata, tenemos una fase de soporte y otra de retorno, durante cada una de estas, la energía cinética fluctúa alcanzando valores mínimos de cero hasta máximos de valor considerable. La razón por la cual un movimiento de mamífero es más eficiente se encuentra en el decremento de energía cinética realizado por la gravedad. Debido a la oscilación en un plano vertical la energía cinética se transforma en energía potencial, a diferencia del movimiento de insectos donde el decremento de energía cinética, lo realiza el actuador perdiendo esa energía en el sistema en forma de calor.

Debido a lo anterior, Bucéfalo es un robot caminador hexápodo con movimientos de mamífero autoorientable. Creemos haber construido una máquina con un diseño innovador y un alto grado de complejidad en el control (13 grados de libertad), en su construcción (fibra de carbono y resinas epóxicas) y en su sensorización (potenciómetros lineales en actuadores horizontales y de posición en verticales. Sus dimensiones 125 cm de largo, 96 cm de ancho y 100 cm de alto, con un peso de 164 Kg. Consta de 12 pistones neumáticos que brindan una fuerza de aproximadamente 1900 N cada uno. Bucéfalo es capaz de dar una zancada de 64 cm, esto gracias al factor de magnificación que el mecanismo empleado en la pata le brinda.

El sistema de navegación desarrollado permite hacer saber al robot su posición dentro de un plano de dimensiones conocidas, tiene un costo reducido. Este sistema, en conjunto con la

versatilidad del aspecto mecánico, permite crear un potencial de sensorización y a la vez crear algoritmos de movimiento complejos. Esto en conjunto con el control neumático instalado, nos lleva a la creación de una máquina que con mínimas alteraciones podría ser de gran utilidad en aplicaciones reales en la industria, en específico exploración de cualquier ambiente inseguro para el hombre.

## 2. Pantógrafo

Es el mecanismo principal en las patas del robot. Presenta un comportamiento cinemático sencillo permitiendo movimientos precisos y estables. Se decidió implementar pantógrafos gracias a su característica de magnificación, tanto en desplazamiento como en velocidad. Esta característica única en cada pantógrafo se denomina factor de magnificación, y depende de la proporción de las distancias entre las juntas de los elementos o barras que lo conforman. En Bucéfalo, el factor es de cuatro para movimientos horizontales en el mecanismo y de tres para verticales, con dos grados de libertad en cada pata.

Una desventaja del mecanismo, es que el factor también afecta en las fuerzas de reacción en el piso, teniendo una fuerza proporcional al factor vertical en el elemento de entrada. Esto hace más complejo y robusto el diseño de la estructura principal. Además, al tener cuatro barras la precisión del mecanismo aumenta y a su vez se logra una mejor distribución de esfuerzos.

Una ventaja considerable del mecanismo, es que se tienen entradas independientes entre sí, en este caso si se utiliza un grado de libertad, el movimiento provocado no afecta la posición del otro. Esto simplifica la programación y el análisis del caminado, ya que se puede dividir en dos partes, movimientos horizontales y verticales, los cuales pueden ser controlados por separado.

El pantógrafo se asemeja a una extremidad mamífera en estructura y en función, logrando una versatilidad de movimientos muy amplia, manteniendo al robot estable y paralelo al piso.

Mediante el análisis de elemento finito y pruebas de laboratorio se decidió utilizar fibra de carbono por su ligereza y resistencia, reforzando aun más las juntas entre las barras con un aglomerado de fibra de vidrio y resinas epóxicas.

### 3. Neumática

Dadas las restricciones de la competencia, el sistema de suministro de potencia al mecanismo de las patas debe ser no contaminante, reduciendo nuestras posibilidades a tres sistemas: eléctrico, hidráulico y neumático. Un factor importante es el hecho que el sistema neumático posee una relación potencia entre peso mayor en comparación con los otros dos. Respecto al almacenamiento de energía y tomando en consideración las restricciones de peso y dimensiones que previamente establecimos, debíamos encontrar la forma de almacenar la mayor cantidad de energía en un volumen y peso reducidos.

El sistema neumático que se instalo nos permite contener 3810 litros de aire en 3 tanques, lo cual nos da capacidad para desplazar el robot 45 m; distancia mas que suficiente para los requisitos de la competencia. El peso de cada tanque es de aproximadamente 5 kg. En general la recarga de energía en un sistema neumático es mucho mas rápido que la recarga de baterías ya sea para un sistema hidráulico o eléctrico.

Es importante reconocer que una desventaja del sistema neumático es el hecho que un flujo controlado de aire a los pistones es difícil de obtener por lo que afecta al control de desplazamiento. Esta desventaja creemos haberla minimizado con el uso de válvulas proporcionales reguladoras de velocidad que en función de una señal de voltaje analógico nos brindan un movimiento en la pata en ambas direcciones con una velocidad proporcional al voltaje suministrado. Dicho dispositivo se empleo únicamente en los actuadores horizontales, los cuales generan el movimiento que repercute directamente sobre el desplazamiento del centro de masa. Con el fin de no hacer tan elaborado el algoritmo de caminado se decidió controlar los pistones verticales con electro-válvulas digitales tipo *on-off*.

Tanto las válvulas analógicas como digitales son de 5 vías 3 posiciones de centro cerrado, esta configuración nos permite regular de manera óptima los pistones de doble efecto con la ventaja de detener el émbolo en cualquier posición de la carrera, siempre y cuando se retroalimente dicha posición con los sensores correspondientes. Al hacer uso del centro cerrado podemos emplear un paro de emergencia que, al cortar el suministro de aire a los pistones mantenemos herméticamente cerrada la cámara del pistón deteniendo en ese instante el movimiento, manteniendo la posición en la que el robot se encuentre, cualquiera que esta sea.

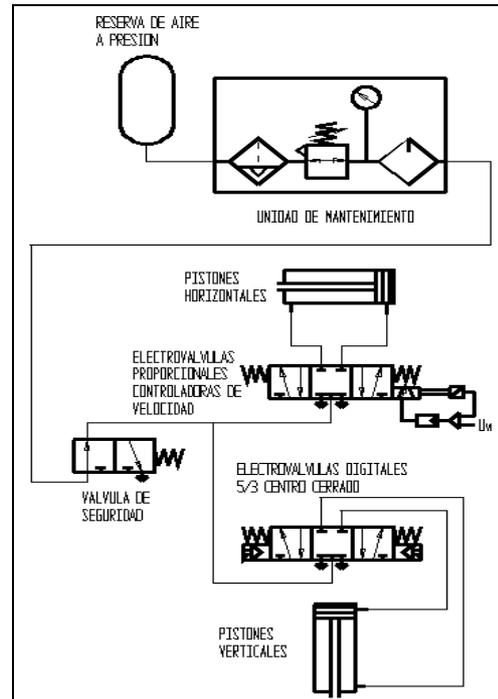


Figura 1. Diagrama Neumático

### 4. Sensores

La sensorización del robot se puede dividir en digital y analógica. Los sensores digitales incluyen a los sensores de contacto y a los proximómetros magnéticos. Los analógicos son los potenciómetros lineales y el sensor ultrasónico.

**Sensores de contacto:** instalados en la superficie de apoyo de cada extremidad. Su función es mandar un pulso al controlador cuando una pata haga apoyo sobre alguna superficie.

**Sensores magnéticos:** colocados por fuera del cuerpo de cada pistón en el robot. Su función es sensar el embolo y mandar una señal al controlador, permitiendo limitar la carrera en puntos específicos requeridos.

**Sensor ultrasónico:** su función es emitir una frecuencia ultrasónica en una dirección predeterminada y contar el tiempo de regreso de la onda, mandando una señal de voltaje proporcional a la distancia a la que se encuentra el objeto que produjo el rebote.

**Potenciómetros lineales:** su función es seguir mecánicamente el desplazamiento del vástago y

mediante una resistencia variable entregar un señal proporcional a la distancia de desplazamiento.

## 5. Control

Debido al control analógico que se tiene en los actuadores horizontales, es posible lograr diferentes secuencias de caminado. Las secuencias con mayor facilidad de implementación son las periódicas, en las cuales cada pata se encuentra efectuando tareas similares durante intervalos de tiempo similares llamados periodos. Para poder comprender este tema es necesario definir los siguientes conceptos:

**Fase de transferencia** ( $t_T$ ): intervalo de tiempo en el cual el pie no está apoyado contra el suelo.

**Fase de apoyo** ( $t_A$ ): intervalo de tiempo en el cual el pie está apoyado contra el suelo.

**Periodo** ( $t_C$ ): tiempo que tarda una pata en completar una fase de apoyo y una de transferencia en una secuencia periódica.

**Tamaño de paso** ( $\lambda$ ): Distancia que se desplaza el centro de gravedad durante un periodo completo.

**Factor de trabajo** ( $\beta$ ): fracción de un periodo en el cual la pata se encuentra en fase de apoyo. Se define de la siguiente manera:

$$\beta_i = \frac{\text{Tiempo en fase de apoyo de la pata } i}{\text{Periodo de la pata } i} \quad (1)$$

**Fase relativa** ( $\phi_{i,j}$ ): fracción de un periodo que hay después de que se apoya la pata  $j$  hasta que apoya la pata  $i$ . Si  $j=1$ , se denota  $\phi_i$ .

**Margen de estabilidad**: distancia más corta medida desde la proyección vertical del centro de gravedad hasta la frontera del polígono de apoyo, aquel que tiene como vértices los puntos donde haya alguna pata apoyada.

Para este proyecto se decidió programar el tipo de caminado llamado de *secuencias en ola*. Esta secuencia permite lograr el óptimo margen de estabilidad. En este tipo de caminado todas las patas tienen el mismo factor de apoyo y periodo. Tiene la desventaja de que no es un caminado óptimo para terrenos irregulares, pero en terrenos regulares es lo que más se aproxima al caminado de un mamífero. Esto consigue que sea un caminado muy rápido y

estable. La característica principal que lo distingue de otras secuencias es la fase que existe entre las patas, el lado derecho está desfasado medio periodo respecto al lado izquierdo. En general para un robot de  $2n$  patas se tiene:

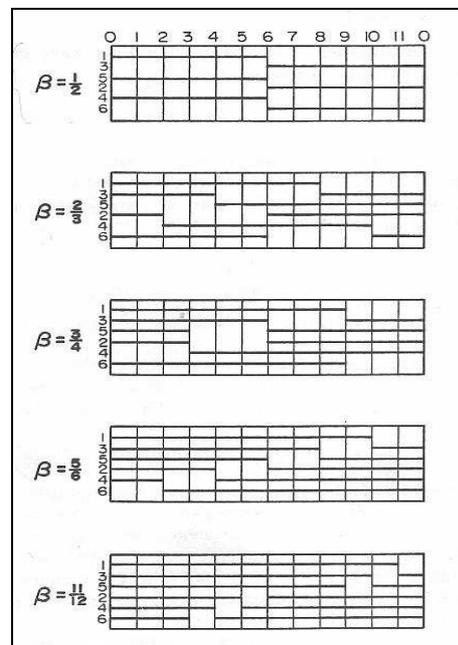
$$\phi_{2n+1} = \text{MOD}(n\beta) \quad (2)$$

donde  $\text{MOD}(X)$  es la parte fraccional de un número real  $X$  si  $X > 0$  y  $1 - \text{MOD}(-X)$  si  $X < 0$

Para un robot de seis patas se tiene:

$$\phi_3 = \beta, \phi_5 = 2\beta - 1 \quad (3)$$

Visto en un diagrama de secuencias se tiene lo siguiente.



**Figura 2.** Diagrama de Secuencias<sup>1</sup>

Los números en la parte vertical representan tiempos, las líneas horizontales están asignadas para cada pata, la parte oscura representa la fase de apoyo.

Conociendo todas estas características de los caminados en ola, es posible crear un algoritmo de control que logre secuencias con diferentes factores de apoyo, diferentes tamaños de paso y a diferentes velocidades, por lo que se requiere que antes se establezcan algunos parámetros. Nosotros escogimos los siguientes: Factor de trabajo ( $\beta$ ), Tamaño de paso ( $\lambda$ ) y Velocidad de desplazamiento ( $V_D$ ), con la relación:

$$V_D = \frac{\lambda}{t_A} \quad (4)$$

es posible calcular  $t_A$ , sabiendo que

$$\beta = \frac{t_A}{t_C} \quad (5)$$

finalmente  $t_C$  se calcula como sigue:

$$t_C = t_A + t_T \quad (6)$$

Las fases se calculan con las relaciones para caminados en ola y es así como ya se tiene lo necesario para ubicar la posición y velocidad de cada una de las patas en el tiempo. La velocidad promedio en la fase de transferencia ( $V_T$ ) debería ser

$$V_T = \frac{\lambda}{t_T} \quad (7)$$

para que la pata tenga un movimiento continuo, pero en realidad sucede que

$$V_T \geq \frac{\lambda}{t_T} \quad (8)$$

debido a que esta velocidad no influye en la dinámica del movimiento a menos que las patas tengan una inercia considerable. Esto se puede considerar como una ventaja, ya que así es posible coordinar con mayor facilidad el instante en que la pata apoya contra el suelo y comienza a empujar el robot, al igual que el momento en que la pata se despegar del suelo y avanza para colocarse en su posición de partida. Si la pata tarda demasiado en comenzar a empujar trabará el movimiento del cuerpo, lo que provocará desbalances importantes. Lo mismo si se frena antes de levantar para pasar a la fase de transferencia.

El parámetro de referencia utilizado para comenzar cada evento es el tiempo, debido a que representa menos complicación localizar cada evento en el tiempo y luego repetirlo cada vez que se cumpla un periodo.

Para poder comenzar a caminar es necesario que el robot parta de alguna posición que pueda ser como una fotografía del caminado. Para cada pata se calcula el diagrama de secuencias, hecho esto se ve en que fase está la pata ya sea transferencia o apoyo (si está en el instante de cambio se toma como la fase que sigue a éste) se calcula la diferencia entre el tiempo que hay entre el instante de la fotografía y el instante en que ocurre el siguiente evento para esa

pata. Tomando la velocidad promedio en esa fase se puede saber la distancia a la que se encuentra de la posición que debe alcanzar, así que se conoce completamente la disposición de cada una de las patas.

## 6. Sistema de Navegación

Este sistema fue desarrollado con la intención de obtener un alto grado de autonomía en robots móviles, permitiéndole saber a la máquina su localización dentro de una plataforma de dimensiones previamente conocidas. Por medio de este sistema el robot adquiere la capacidad de autocorregir su trayectoria, en caso que ocurra una desviación de la misma ya sea por fallas mecánicas o porque el programa controlando el robot así lo indique.

Por reglas de competencia, se nos permitía colocar tres *señalamientos* en tres esquinas específicas de la plataforma, sobre la cual el robot desempeñaría varias tareas. Las dimensiones de dicha plataforma deben ser conocidas por la máquina de manera previa ya que la distancia entre señalamientos es básica para el correcto funcionamiento del sistema.

Los datos que se necesitan conocer para que las ecuaciones geométricas den las coordenadas del receptor, el cual va montado sobre la máquina, son los ángulos de separación entre cada una de las tres líneas que conectan la esquina que tiene un señalamiento y el punto en el que se encuentra el receptor, además de la separación entre señalamientos.

Se hizo un estudio a detalle de varios medios de transmisión de datos inalámbrica que nos permitiera mandar una señal diferente en cada señalamiento (que ahora cada señalamiento actuaría como emisor), ya que el programa necesita distinguir de que emisor recibió cierta señal y registrar el ángulo en el que fue recibida. Se llegó a la conclusión que los rayos infrarrojos facilitaban la recepción justo en el momento que el receptor estuviera apuntando exactamente al emisor, y bloquearla en cualquier otra posición.

Para que el módulo receptor pueda recibir la señal de cada señalamiento y bloquear cualquier señal de ruido proveniente del medio ambiente, el tren de pulsos generado por el señalamiento debe estar modulado a una frecuencia compatible con el receptor.

La forma en la que se diferencia la señal de cada señalamiento y sin utilizar un microprocesador, es por medio de la duración del tiempo en bajo del tren de pulsos. Es decir, el tiempo en alto de la señal es el mismo para los tres señalamientos, pero la separación entre tiempos en alto es diferente para cada uno. De esta manera, el algoritmo de control lo que hace es iniciar un contador de “x” segundos en el momento que se recibe un pulso y únicamente contabilizar cuantos pulsos entraron en ese intervalo de tiempo. Para cada emisor existirá un número de pulsos entrantes específico, y así el CPU del robot pueda diferenciar una señal de otra.

La manera en la que el receptor barre su alrededor en busca de las tres señales de los señalamientos, es por medio de un motor de pasos, que permite la rotación del módulo receptor de manera controlada. El programa en la computadora del robot simplemente controla los pulsos que le manda al controlador del motor de pasos y en el momento en el que se recibe una señal esa cantidad de pasos se traduce a radianes, para que se calcule posteriormente la posición del robot.



**Figura 2.** Foto del hexápodo desarrollado: Bucéfalo

## 7. Resultados Obtenidos

Hasta el momento la parte referente ha control no se ha podido concluir, se ha implementado un sistema de control de lazo abierto, basándonos en las especificaciones de fabricación para controlar la velocidad en los actuadores horizontales. Es crucial tener un sistema de lazo cerrado para lograr un óptimo control en el caminado. Es posible que se implanten controladores pequeños para cada pata y un controlador principal. Se deben hacer mejoras en

los elementos de apoyo contra el suelo, debido a que esto afecta en el desempeño del caminado.

Otro aspecto importante que se debe lograr es la disminución y balanceo del peso, con el fin de optimizar el desempeño dinámico. En este artículo no se menciona la forma en que se puede cambiar la dirección del movimiento, se tiene desarrollada una forma de dar vuelta en la que el tamaño de paso es diferente entre las patas izquierdas y derechas, ha dado algunos resultados, la desventaja es que depende de la fricción entre el suelo y el apoyo, por lo que se tienen diferentes comportamientos en diversos terrenos lo que impide tener un control en los giros a menos que se sense el desplazamiento angular. Esto se está desarrollando a través del sistema de navegación.

## 8. Conclusiones

En su estado actual el prototipo desarrollado permitió obtener el cuarto lugar en el *Walking Machine Challenge* desarrollado en la Universidad La Salle de México D.F. en abril del 2003. Sin embargo, el proyecto está actualmente a un 40% de su potencial, ya que fue concebido originalmente para dos años y medio de trabajo. La experiencia obtenida en el tiempo transcurrido permite tener una gama amplia de mejoras en varios aspectos, desde diseño mecánico hasta control.

Actualmente el proyecto se encuentra en una fase de rediseño y evaluación dinámico. El algoritmo básico de movimiento y control del mismo funcionan aceptablemente, debido a esto la importancia de reducir o eliminar las restricciones mecánicas encontradas.

Con esto se piensa lograr una autonomía alta con un sistema de control que permita el dominio del comportamiento de la máquina y su interacción con el medio, a su vez logrando una versatilidad de movimientos y tareas ejecutables en el robot.

## Referencias

- [1] Song S, Waldron K. *“Machines that Walk”*, MIT press, USA, 1989
- [2] Mabie H, Reinholtz C. *“Mecanismos y Dinámica de Maquinaria”*, Limusa Wiley, México, 2001
- [3] Shigley J, Mischke C. *“Diseño en Ingeniería Mecánica”*, Mc Graw Hill, México, 2001