

Diseño e Implementación de un Robot Móvil Cuadrúpedo

E. Calle, I. Ávila, J. Zambrano
Unidad de Investigación en Automática
Universidad Politécnica Salesiana
Calle Vieja 12-30 y Elia Liut, Cuenca, Ecuador.
ecalleo@cue.ups.edu.ec; xetrom@hotmail.com; jzambranoabad@hotmail.com

Resumen

El presente resumen expone ideas generales sobre el diseño e implementación de un robot cuadrúpedo, destinado al estudio de los métodos de locomoción en máquinas caminantes. En primer lugar se presenta el diseño mecánico del robot cuadrúpedo usando una herramienta de diseño asistido por computador (CAD). A continuación se estudia el análisis cinemático y dinámico que permite obtener diversos parámetros que se presentarán durante la locomoción del robot. En función de estos parámetros y de los actuadores se realiza un ajuste al diseño original obteniéndose los planos finales para la construcción. Finalmente se expone la arquitectura física y lógica del sistema de control.

Palabras Claves: Robots móviles cuadrúpedos, sistema multiprocesador, máquinas caminantes.

Abstract

This paper presents general ideas on design and construction of a quadruped robot destined for the study of the methods of locomotion of walking machines. Firstly, this paper presents a mechanical design of the quadruped robot using a CAD (*Computer Assisted Design*) tool. Later, it shows the kinematics analysis and dynamic analysis that quantifies diverse parameters that take place during the locomotion of the robot. On the basis of these parameters there is a adjustment of the initial design to obtain the necessary plans for the construction. Finally the physical architecture and logic used to generate the respective signs of control are indicated.

Keywords: *quadrupedal mobile robots, multiprocessor systems, walking machines.*

1. Introducción

En la actualidad, el diseño de sistemas de locomoción de robots caminantes se ha derivado del estudio de sistemas biológicos [1], especialmente de animales terrestres comunes, en los cuales se puede observar un sistema de locomoción basado en un conjunto de eslabones y articulaciones denominadas patas. La naturaleza ha encontrado a través de millones de años de evolución un sistema óptimo para el desplazamiento sobre terrenos irregulares, basado en el apoyo discreto de las patas sobre el terreno, a lo que normalmente se denomina pasos. Las máquinas caminantes aprovechan este tipo de locomoción ya sea mediante uno o más puntos de apoyo (monópodos, bípedos, cuadrúpedos, hexápodos, etc.), convirtiéndolas en las máquinas ideales para espacios peligrosos y de difícil acceso. Por otra parte, estas máquinas exigen sistemas mecánicos y de control más complejos que los usados por sistemas con ruedas, así como mayores niveles de sensorización, que hasta el momento limitan que sean industrialmente rentables, ya que los costos de fabricación y mantenimiento son mucho

más elevados que otros tipos de robots. Las principales características que presentan las máquinas caminantes son [2] [3]:

- Gran omnidireccionalidad.
- Capacidad de adaptación al terreno.
- Control de las fuerzas en los puntos de apoyo.
- Apoyos discretos en el terreno.

La mayoría de robots caminantes están destinados a la exploración de terrenos irregulares inaccesibles para el ser humano [4] [5]. Entre las principales aplicaciones de estas máquinas están la detección de minas personales, transportación de equipos y herramientas de construcción, trabajos de forestación, limpieza de fachadas, entre otros. La figura 1 muestra al robot caminante SILO 6 [2] desarrollado por el Instituto de Automática Industrial – CSIC en Madrid, para la detección de minas antipersonales.

Por todas las características mencionadas las máquinas caminantes se convierten en mecanismos idóneos para desplazarse no solo por superficies horizontales, sino también por superficies con cierto

grado de inclinación o completamente verticales. En este último caso, estos mecanismos toman el nombre de robots escaladores.

El robot presentado en este artículo, constituye el primer robot móvil de bajo costo para el estudio de robots caminantes y forma parte del proyecto ARTE (*Acondicionamiento y Restauración Tele-operada de Edificios*), que pretende implementar tecnología innovadora para la limpieza y mantenimiento de fachadas de edificios de múltiples pisos mediante el uso de un robot escalador cuadrúpedo tele-operado, evitando el riesgo que implica el uso de personas para realizar dicha tarea.

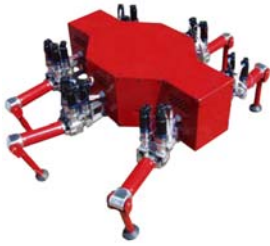


Figura 1. Robot hexápodo SILO 6.

A continuación se expone una breve descripción del diseño e implementación de la plataforma móvil como herramienta de investigación en modos de caminar de robots cuadrúpedos, y que permita además el estudio de métodos de locomoción para robots escaladores.

2. Diseño mecánico y análisis de parámetros

A. Diseño mecánico.

Un mayor número de patas, permite mayores velocidades y mejor estabilidad a los robots caminantes, sin embargo incrementa su complejidad mecánica y de control. Un robot cuadrúpedo disminuye la complejidad mecánica del sistema frente a robots caminantes con mayor número de patas, manteniendo las características de omnidireccionalidad, adaptación al terreno y estabilidad estática y dinámica.

En [6][7] se presentan diversas estructuras de robots cuadrúpedos que permiten múltiples configuraciones de las patas durante el proceso de locomoción.

La estructura básica presentada en este documento, está constituida por el cuerpo y cuatro patas. Cada pata está conformada por cuatro eslabones, tres de los cuales se encuentran unidos a través de articulaciones rotacionales operadas (véase figura 2) por el movimiento del eje de un motor, dando un total de 12 grados de libertad a todo el sistema. El último eslabón (*eslabón 4*) está unido a

su predecesor por medio de una articulación universal no actuada que proporciona dos grados de libertad más al extremo final de la pata.

Una plataforma cuadrada permite la instalación de las cuatro patas y de los dispositivos electrónicos requeridos para el control, constituyéndose en la base estructural del cuerpo del robot. Las patas están dispuestas en el cuerpo de forma simétrica en cada esquina de manera que el centro de gravedad se encuentre en el eje central del cuerpo y que los esfuerzos realizados por cada pata se distribuyan uniformemente.

Se ha diseñado el sistema para optimizar el consumo energético, mediante el uso de motores con mecanismos autobloqueantes, lo que permite que no exista consumo de energía cuando el robot se encuentra detenido.

La figura 2 presenta una vista frontal del diseño mecánico junto con la longitud efectiva de cada eslabón. La figura 3 muestra una vista general del diseño completo.

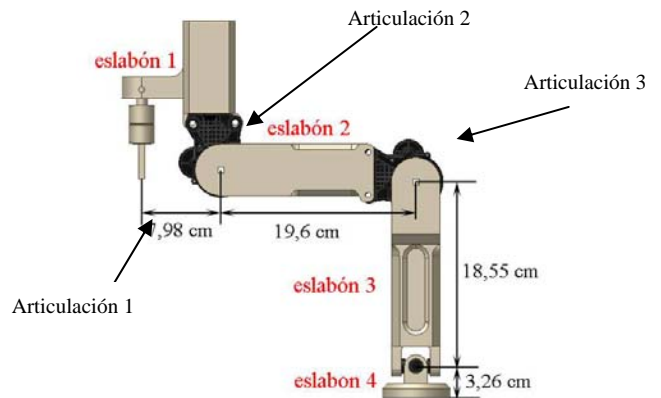


Figura 2. Diseño mecánico de la pata de REMLED.

A continuación se detallan las características más importantes consideradas para el diseño del robot:

- Bajo consumo de energía.
- Gran omnidireccionalidad sobre terrenos horizontales.
- Flexibilidad en el diseño mecánico de manera que la modificación de cualquier eslabón se lo realice sin dificultades.
- Flexibilidad en el diseño electrónico que permite generar plataformas estándar de control.
- Patas ligeras y capaces de soportar cargas elevadas en distintas posiciones.
- Bajo costo
- Capacidad de transportar una carga útil de 6 kilogramos.

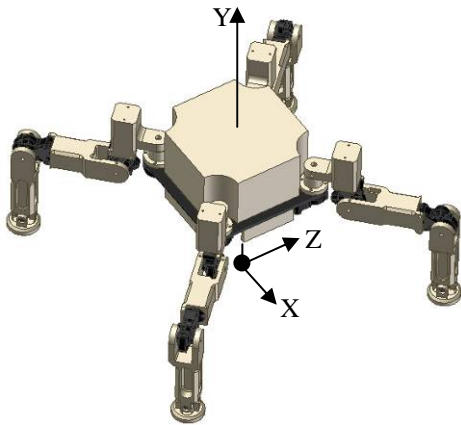


Figura 3. Diseño mecánico del robot.

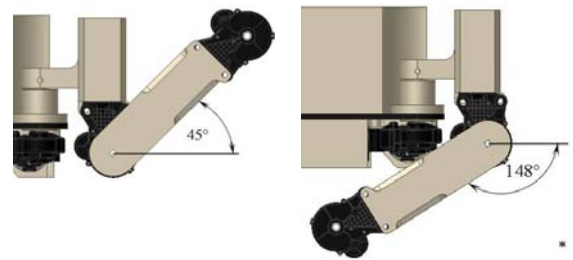
El movimiento generado por las articulaciones se ve limitado por la estructura mecánica de los eslabones. La amplitud máxima alcanzada por cada una de las articulaciones se presenta en la figura 4.

De igual forma, los ángulos máximos y mínimos generados por las articulaciones nos permiten determinar la altura máxima y mínima del cuerpo respecto a una superficie horizontal (figura 5), y la altura de paso del robot (figura 6). Esta última nos permite determinar la altura máxima de los objetos que el robot podrá superar en un paso normal.

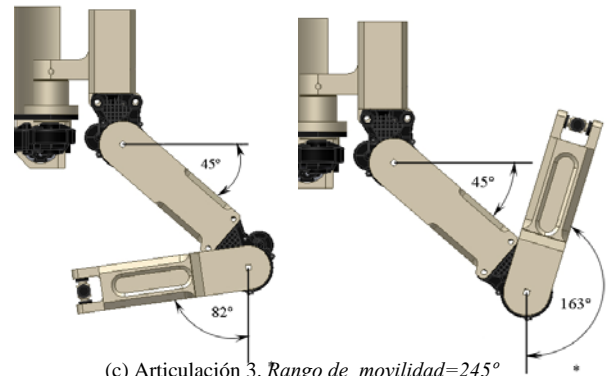
La amplitud de los ángulos conseguidos en cada una de las articulaciones, permite una diversidad de configuraciones que puede adoptar el robot al momento de la locomoción.

B. Análisis cinemático y dinámico.

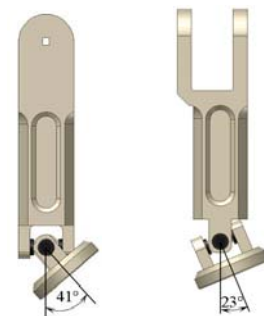
La figura 7, presenta el esquema cinemático de la pata, el cual nos permite identificar las ecuaciones de la cadena cinemática tanto en coordenadas cartesianas como en coordenadas articulares, considerando únicamente aspectos geométricos. El análisis dinámico por su parte, permite determinar los esfuerzos, así como velocidades y aceleraciones que se generan en las diferentes articulaciones debido a los esfuerzos realizados, sean estos debido a los momentos de inercia, centros de gravedad, fuerzas externas, entre otras.



(b) Articulación 2. Rango de movilidad=193°

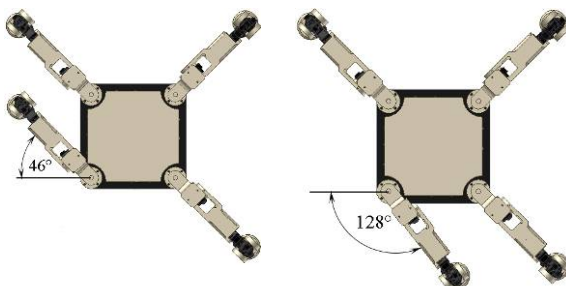


(c) Articulación 3. Rango de movilidad=245°



(c) Pie. Rango de movilidad en el eje 1=82°
Rango de movilidad en el eje 2=46°

Figura 4. Amplitudes máximas alcanzadas en las articulaciones.



(a) Articulación 1. Rango de movilidad=174°

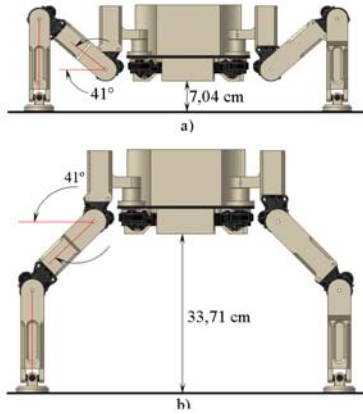


Figura 5. Altura mínima y máxima del cuerpo respecto a una superficie horizontal.

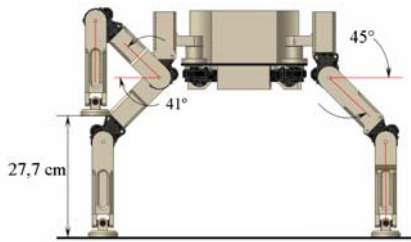


Figura 6. Altura de paso

Las ecuaciones (1) (2) y (3) representan el análisis cinemático inversa de la pata del robot.

$$\theta_1 = \text{atan}^{-1} \frac{a_z}{a_x} \quad (1)$$

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1} \left[\frac{l_3 \text{sen } \theta_3}{\sqrt{(\sqrt{a_x^2 + a_z^2} - l_1)^2 + a_y^2}} \right] + \text{sen}^{-1} \left[\frac{a_y}{\sqrt{(\sqrt{a_x^2 + a_z^2} - l_1)^2 + a_y^2}} \right] \quad (2)$$

$$\theta_3 = \text{cos}^{-1} \left[\frac{(\sqrt{a_x^2 + a_z^2} - l_1)^2 + a_y^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \right] \quad (3)$$

Donde:

- l_1 , l_2 , l_3 y l_4 son las longitudes de los cuatro eslabones respectivos que conforman la pata.
- θ_1 , θ_2 , y θ_3 son los desplazamientos angulares de las articulaciones uno, dos y tres respectivamente.
- a_x , a_y y a_z son las coordenadas de la posición del extremo final.

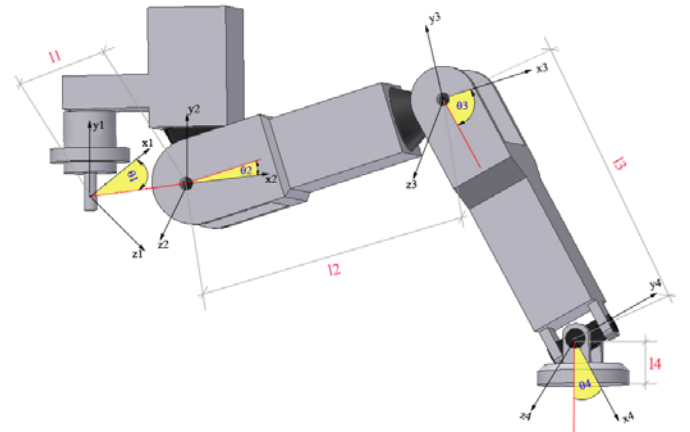


Figura 7. Esquema cinemático de la pata del robot.

Las ecuaciones del esquema cinemático inverso permiten generar trayectorias determinadas para la locomoción del robot.

El análisis dinámico puede ser realizado mediante el apoyo de ordenadores a través de la modelación de la cadena cinemática con las propiedades físicas del modelo CAD. La figura 8 presenta el torque generado por cada una de las articulaciones en diferentes posiciones de locomoción.

C. Definición de actuadores.

Debido a los altos torques generados en las articulaciones, se buscó la implementación de actuadores que cumplan con las especificaciones de fuerza determinados en el análisis dinámico y que posean un sistema de autobloqueo, desviando el esfuerzo necesario para mantener la estabilidad estática sobre el sistema mecánico y no sobre el actuador eléctrico. Por otra parte, el proyecto busca de desarrollar una plataforma móvil de bajo costo, por lo que se implementaron actuadores comerciales con sistemas mecánicos de autobloqueo como el presentado en la figura 9, que eviten los gastos económicos derivados de la construcción de sistemas mecánicos complejos.

Además del sistema de autobloqueo, el actuador debe tener un sistema de reducción para aumentar el par de salida y disminuir la velocidad. Estas condiciones se han encontrado en los motores marca Valeo, modelo DC 404 747.

Tabla 1

Características motor Valeo, modelo DC 404 747.

Voltaje nominal [U _N]	12V.
Torque nominal [M _N]	3N-m.
Velocidad nominal [n ₀]	21 R.P.M
Duración máxima de encendido	10 min.
Torque inicial [M _A]	19.6N-m.
Relación de reducción [i]	210/1
Inercia del rotor [J _R]	9.5x10 ⁻⁶ Kg-m ² .
Peso	0.44Kg.

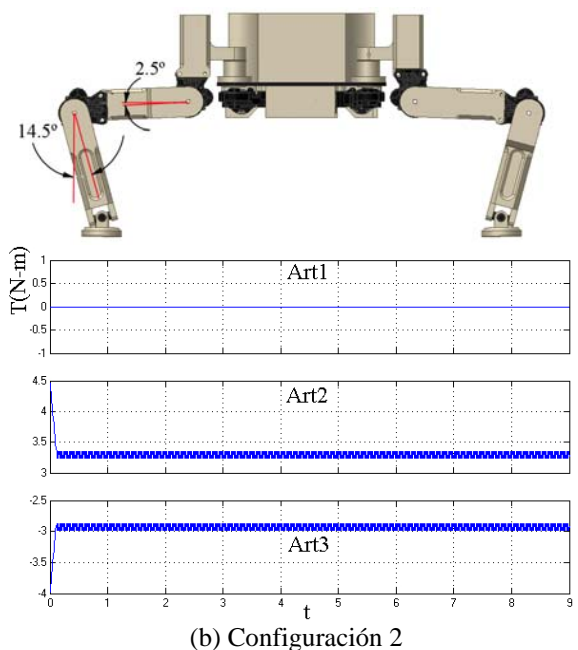
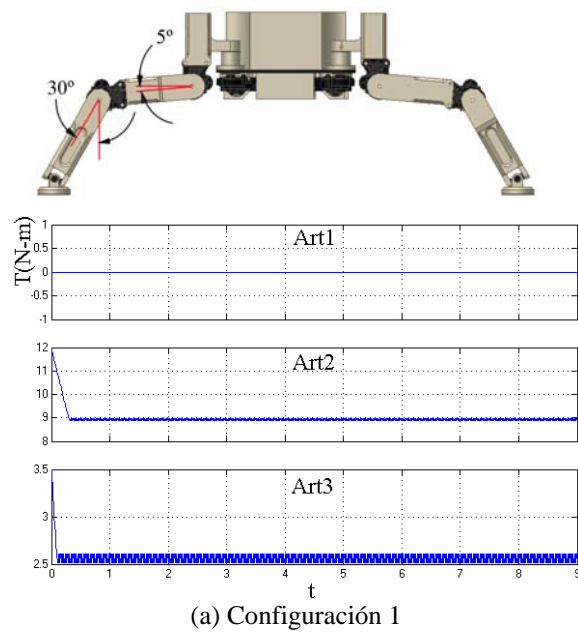


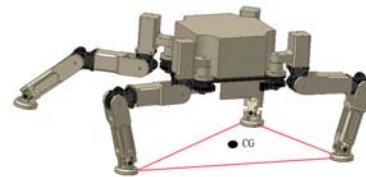
Figura 8. Torques ejercidos por las articulaciones de una de las patas del robot en dos configuraciones distintas.

C. Locomoción

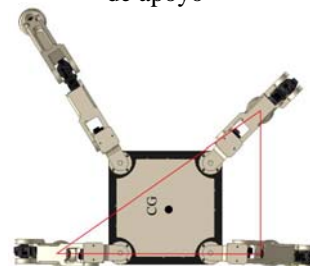
Para la locomoción se ha implementado un algoritmo básico de movimiento, centrado en mantener la estabilidad al colocar en todo momento el centro de gravedad del robot sobre el triángulo de apoyo formado por los tres pies en contacto con el piso, en un período de transición (figura 10).



Figura 9. Motor Marca Valeo, Modelo DC 404 747



(a) Proyección del centro de gravedad al triángulo de apoyo



(b) Vista superior de la localización del centro de gravedad al interior del triángulo de apoyo

Figura 10. Triángulo de apoyo y centro de gravedad para mantener al robot estable durante la locomoción.

3. Arquitectura del sistema de control

En el sistema electrónico de control se pueden identificar dos tipos de arquitecturas: la arquitectura física y la arquitectura lógica. La primera define la manera en que están conectados todos los dispositivos necesarios para el control del robot, mientras que la segunda establece la comunicación que se realiza entre los dispositivos.

A. Arquitectura física.

La parte central de la arquitectura de REMLED la constituye un computador personal encargado de administrar la comunicación entre los diferentes módulos de control. Cada módulo de control gobierna el movimiento de una pata del robot, es decir, controla tres articulaciones y consta de tres microcontroladores dsPIC 30F2010¹ encargados de controlar la posición y velocidad de los actuadores a través del codificador óptico incremental instalado en eje del motor. Todos los microcontroladores están

¹ dsPIC es una marca registrada de MICROCHIP

comunicados con el computador personal a través de un puerto paralelo utilizando un protocolo de comunicación propietario de manera que el intercambio de información se lo realice por técnicas de multiplexación. La figura 10 muestra un diagrama de la arquitectura de un dispositivo controlador de una pata.

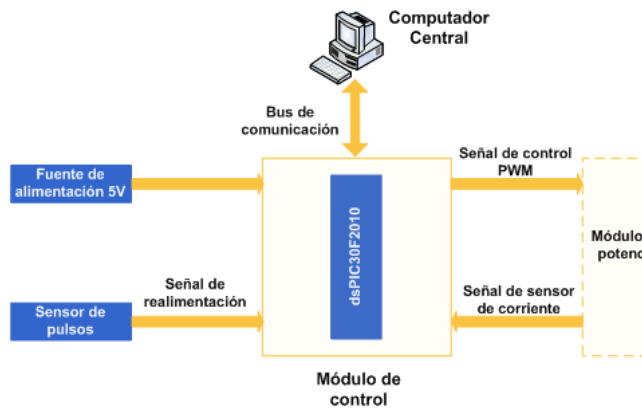


Figura 10. Arquitectura del dispositivo controlador de una pata.

La salida de control generada por cada microcontrolador es ingresada a un amplificador de potencia, constituido de tres amplificadores independientes, cuyas salidas son conectadas a los motores que accionan las articulaciones de la pata del robot. La arquitectura física del circuito de potencia se muestra en la figura 11.

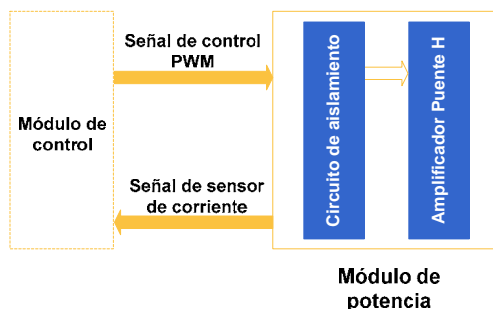


Figura 11. Arquitectura del circuito de potencia.

En la figura 12 se observa la arquitectura global del sistema, formada por el computador central, los módulos de control, los módulos de potencia y los actuadores.

B. Arquitectura lógica

Para establecer la comunicación entre los dispositivos de control y el computador central, cada microcontrolador posee una dirección física que lo identifica dentro del sistema. La comunicación es guiada utilizando doce de estas direcciones, correspondientes al dispositivo controlador de cada uno de los motores que conforman el sistema de locomoción del robot.

Para iniciar el proceso de comunicación, el computador central envía a través del bus de comunicación una palabra de ocho bits que contiene la dirección del dispositivo con el que quiere establecer conexión. Esta información es recibida por los doce dispositivos de control y comparada con la dirección que se le fue asignada. Si la dirección enviada y la dirección interna de algún dispositivo coinciden, éste envía una respuesta al computador central indicando su presencia en el sistema. Si las direcciones no coinciden simplemente el dato enviado por el computador es descartado.

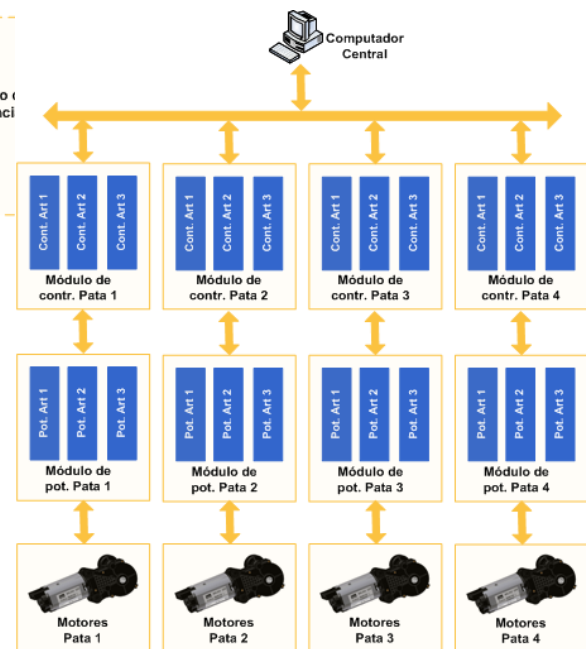


Figura 12. Arquitectura física de REMLED.

La figura 13 muestra el esquema de inicio de comunicación para establecer conexión entre el computador central y un dispositivo de control con la dirección dos.

Una vez que el bus da datos ha sido ocupado por algún dispositivo el computador central envía otra palabra de ocho bits que contiene el código del asunto a tratar, tales como configuración de la velocidad de referencia, velocidad sensada, etc. Establecido el argumento a tratar, el dispositivo de control empieza a enviar los datos solicitados por el computador central y viceversa. Una vez enviado el dato el bus es liberado y queda disponible para otra tarea.

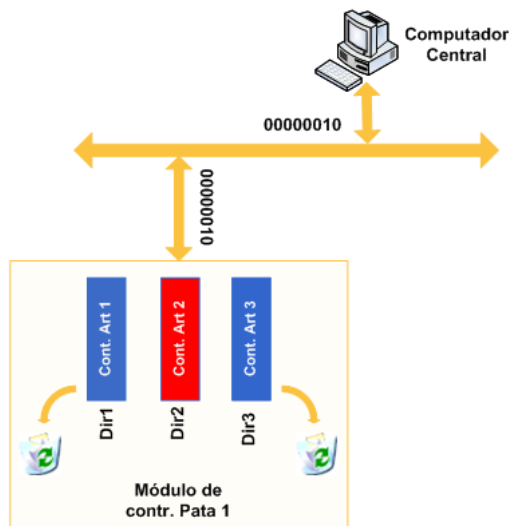


Figura 13. Esquema de inicio de comunicación.

4. Administración del sistema

Los cálculos necesarios para la locomoción del robot se realizan en el sistema principal, actualmente implementado sobre una computadora personal externa al robot con sistema operativo *Windows XP*. El control de cada una de las articulaciones se realiza a través de un sistema diseñado sobre LabVIEW² 7.1 y proporciona un entorno gráfico que permite al usuario interactuar con los doce dispositivos controladores en tiempo real. Por medio de este entorno se pueden enviar órdenes codificadas hacia el módulo de control para realizar diversas tareas y ha sido desarrollado como herramienta de prueba del sistema. De igual manera existe información que proviene del dispositivo controlador y puede ser monitoreada por el usuario en este mismo sistema (véase figura 14)

Por el momento el robot no es totalmente autónomo por lo que requiere de un bus de datos que permita la comunicación entre el computador principal y los dispositivos controladores. Además existen dos cables adicionales que llevan las señales de alimentación para los módulos de control y potencia respectivamente. La figura 15 muestra el sistema final ensamblado.

El robot ensamblado cuenta con sensores de corriente que permiten determinar el contacto de un pie con el piso a través de la medición de esta variable, además de los codificadores ópticos incrementales para el control de velocidad y posición de los motores.

5. Perspectivas de trabajo

Se pretende que la plataforma desarrollada permita establecer nuevas áreas de trabajo, centradas en:

- Estudio de sistemas operativos en tiempo real y su aplicación en robots móviles
- Desarrollo e implementación de sensores virtuales sobre robots móviles.
- Estudio de modos de caminar libre en robots caminantes que permitan dotarlo de una mayor autonomía en la movilidad de la máquina.
- Estudio de nuevas configuraciones para la locomoción del robot que permitan elevar los niveles de eficiencia energética.
- Estudio de sistemas embebidos que permitan la inclusión del sistema central en el cuerpo de robot.

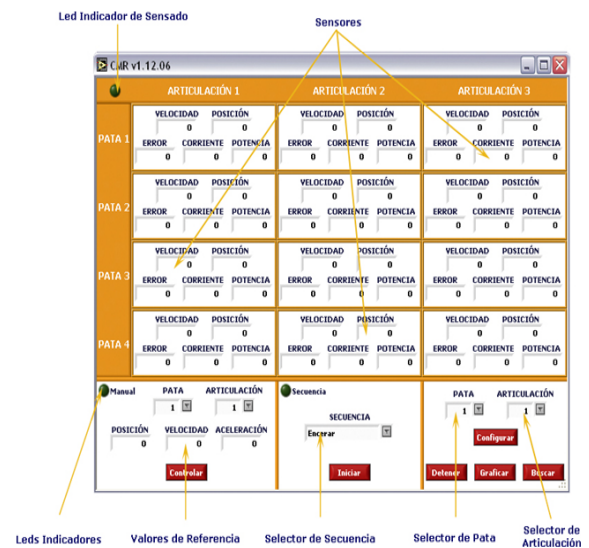
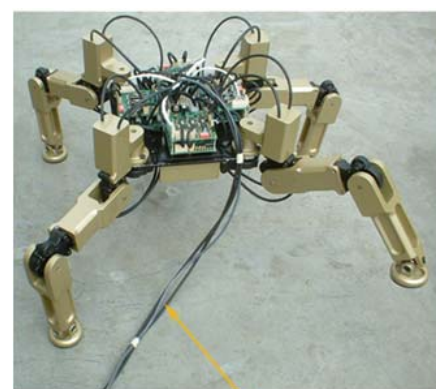


Figura 14. Programa informático para la administración del sistema.



Cables de Alimentación y bus de datos

Figura 15. Ensamble final del robot.

² LabVIEW es una marca registrada de *National Instrument*

6. Conclusiones

Se implementó una plataforma móvil de bajo costo, basada en un robot caminante cuadrúpedo. El diseño elegido permite gran omnidireccionalidad del robot, facilitando su desplazamiento por terrenos irregulares.

Las características de los actuadores seleccionados han dotado al robot de una gran eficiencia energética, brindándole mayor autonomía.

Se ha diseñado un controlador electrónico flexible que permite obtener y configurar parámetros en tiempo real, a través de microcontroladores de bajo costo.

Se han realizado prueba iniciales de locomoción que han posibilitado definir las configuraciones de las patas que permiten un menor gasto energético durante el proceso de caminata.

7. Bibliografía

- [1] Kimura, H., Tsuchiya, K., Ishiguro, A., Witte, H. (2006) "Adaptive Motion of Animals and Machine". Hirakawa Kogyosha, Japan :Springer Tokyo
- [2] Gonzalez de Santos, P., García, E., Estremera, J., Armada M.A., (2002), " SILO6: Design and configuration of a legged robot for humanitarian demining", In *proceedings of the IARP Workshop on Robots for Humanitarian Demining 2002*, Vienna, pp 21-26.
- [3] Calle Ortiz Eduardo. "Estudio de la cinemática e implementación de un sensor virtual sobre la pata del robot SILO 6". *Tesis de Maestría*, Universidad Politécnica de Madrid, 2004.
- [4] Keisuke Arikawa, Shigeo Hirose: "Development of Quadruped Walking Robot TITAN-VIII", Proc. IROS 96, Osaka, 1996.
- [5] Kenzo Nonami, "Autonomous Mine Detection Robot for Humanitarian Demining", Dept. of Electronics and Mechanical Engineering, Chiba University. *JSME International Journal Series C : Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, Vol. 46, pp.7-8.
- [6] Gálvez, J.A., Estremera, J., Gonzalez de Santos, P., (2000), "SILO4: a versatile quadruped robot for research in force distribution", In *Proceedings of the 3rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Madrid, Spain, pp. 629-641.
- [7] Hirose, S. and Kato, K., "Quadruped walking robot to perform mine detection and removal task", In *Proceedings of the first International Conference on Climbing and Walking Robots*, Brussels, Belgium, 1998, pp 261-266.