

REMLED I

Robot escalador
para mantenimiento
y limpieza de edificios

Ing. Eduardo Calle
Ing. Israel Ávila
Ing. Julio Zambrano
Unidad de Investigación
UPS - Cuenca



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 que 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 inasequibles 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 sólo 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.

REMLED constituye el sistema de transporte de

Actualmente, el diseño de sistemas de locomoción de robots caminantes se ha derivado del estudio de sistemas biológicos, especialmente de animales terrestres comunes, en los cuales se observa un sistema de locomoción basado en eslabones y articulaciones denominadas patas

herramientas 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 teleoperado, evitando el riesgo que implica el uso de personas para realizar dicha tarea.

A continuación se expone una breve descripción del diseño e implementación de una 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.

DISEÑO MECÁNICO INICIAL Y ANÁLISIS DE PARÁMETROS

Diseño mecánico

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 de REMLED 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

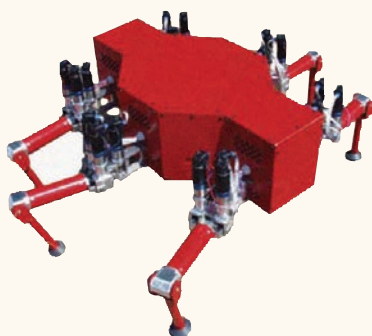


Fig 1. Robot hexápodo SILO 6

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 de REMLED. 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 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 inicial de la pata del robot junto con la longitud efectiva de cada eslabón. La figura 3 muestra una vista general del diseño completo.

A continuación se detallan las características más importantes que presenta REMLED:

- 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 sumamente ligeras y capaces de soportar cargas elevadas en distintas posiciones
- Implementación del control sobre sistemas operativos en tiempo real

Análisis cinemático y dinámico

La figura 4 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 momentos de inercia, centros de gravedad, fuerzas externas, entre otras.

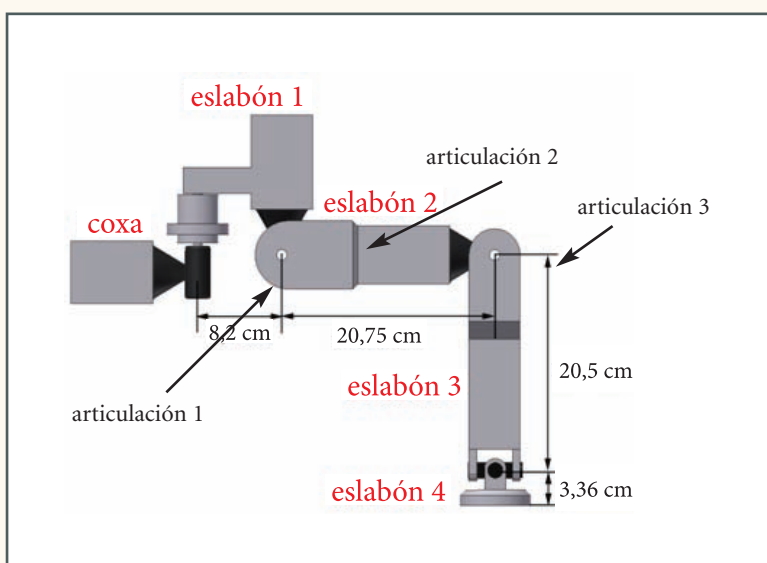


Fig 2. Diseño mecánico inicial de la pata de REMLED

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

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.

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, utilizando programas informáticos o librerías comerciales especializadas como yobotics, simulink, 20sim o software libre como la librería *Modélica* es-

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_1 &= \tan^{-1} \frac{a_z}{a_x} & (1) \\ \theta_2 &= \sin^{-1} \left[\frac{l_3 \sin \theta_3}{\sqrt{\left(\sqrt{a_x^2 + a_z^2} - l_1 \right)^2 + a_y^2}} \right] \\ &+ \sin^{-1} \left[\frac{a_y}{\sqrt{\left(\sqrt{a_x^2 + a_z^2} - l_1 \right)^2 + a_y^2}} \right] & (2) \\ \dot{\theta}_3 &= \cos^{-1} \left[\frac{\left(\sqrt{a_x^2 + a_z^2} - l_1 \right)^2 + a_y^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3} \right] & (3) \end{aligned}$$

pecializada en la simulación de sistemas físicos. La figura 5 presenta el torque generado por cada una de las articulaciones durante una trayectoria determinada de locomoción.

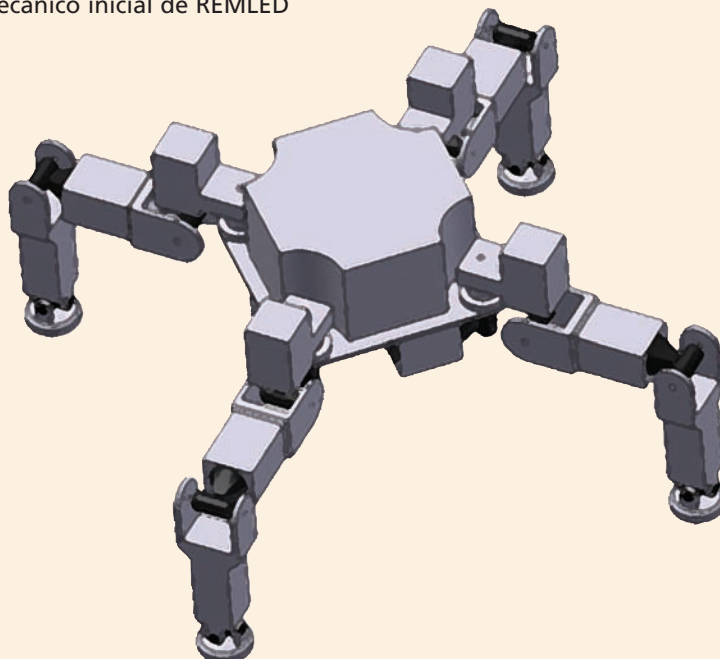
Definición de actuadores

El modelo cinemático y dinámico permiten determinar los parámetros necesarios para la construcción del robot, tales como altura de paso, longitud de paso y esfuerzos reali-

zados por las articulaciones. Este último es uno de los parámetros más importantes ya que permite dimensionar la capacidad de los actuadores que generan el movimiento de dichas articulaciones.

Mediante el análisis dinámico se determinó que, en una configuración tipo insecto, la articulación 2 es la que mayor esfuerzo realiza, seguida de la articulación 3 y finalmente la articulación 1.

Fig 3. Diseño mecánico inicial de REMLED



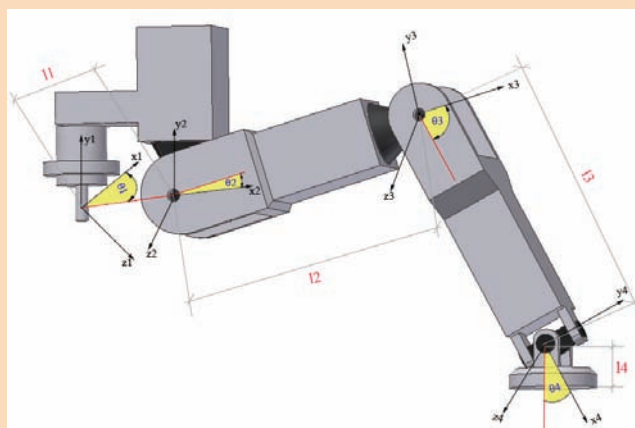


Fig 4. Esquema cinemático de la pata del robot

Debido a los elevados torques generados en las articulaciones, se buscó la implementación de actuadores con sistema de autobloqueo, derivando el esfuerzo necesario para mantener la posición sobre el sistema mecánico y no sobre el actuador eléctrico. Por otra parte, uno de los objetivos del proyecto era 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 6, que eviten los gastos económicos derivados de la cons-

trucción de sistemas mecánicos complejos.

El sistema anterior está formado de un tornillo sinfín, acoplado al eje de rotación del motor, y de un piñón cuyo eje de rotación constituye la salida final del sistema. El movimiento rotacional del tornillo hace que el piñón gire con una determinada velocidad. La aplicación de movimiento sobre el piñón genera una fuerza axial al tornillo, lo que impide su movimiento, bloqueando completamente el sistema.

Además del sistema de autobloqueo, el actuador debe tener un sistema de

El modelo cinemático y dinámico permiten determinar los parámetros necesarios para la construcción del robot, tales como altura de paso, longitud de paso y esfuerzos realizados por las articulaciones

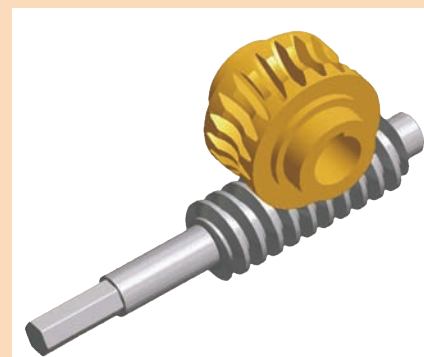


Fig 6. Sistema de autobloqueo

reducción para aumentar el par de salida y disminuir la velocidad. Estas condiciones se han encontrado en los motores DC 404 747 Valeo (véase figura 7).

Diseño final

El diseño mecánico final considera la geometría exacta de los actuadores, por lo que todos los elementos mecánicos que conforman el robot deben ser modificados para permitir el acoplamiento con dichos actuadores. Además de esta consideración se han realizado ciertas modificaciones para reducir el peso de los elementos mecánicos y para mejorar la eficiencia de la máquina.

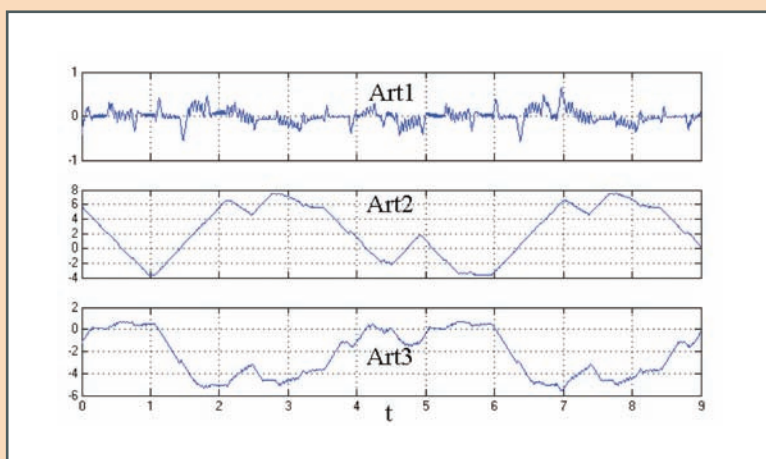


Fig 5. Torques ejercidos por las articulaciones de una de las patas del robot durante una trayectoria determinada de locomoción.

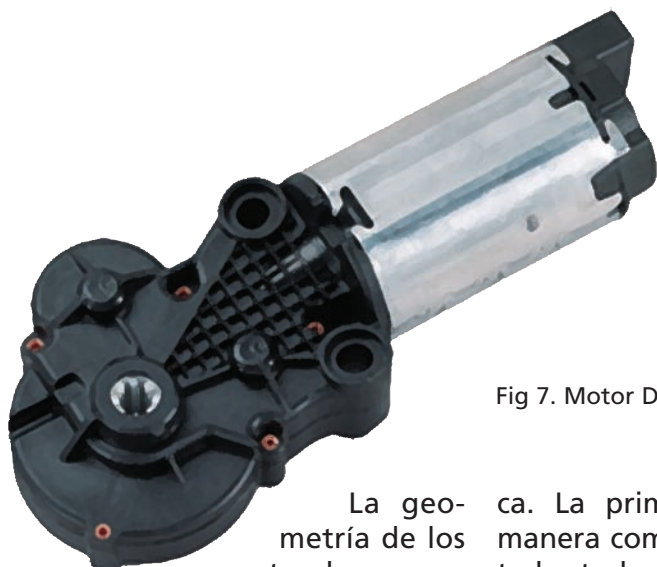


Fig 7. Motor DC 404 747 Valeo

La geometría de los actuadores presenta una gran ventaja para el diseño, ya que el eje de salida final es perpendicular al eje del motor, lo que facilita el acoplamiento del actuador a los eslabones. La figura 8 muestra una vista frontal del diseño mecánico final de la pata del robot junto con la longitud efectiva de cada eslabón. La figura 9 presenta una vista general del diseño completo en aluminio con un peso de 17 kg.

ARQUITECTURA DEL SISTEMA

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 como están conectados todos los dispositivos necesarios para el control del robot, mientras que la segunda establece la comunicación que se realiza entre los dispositivos.

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, y consta de tres microcontroladores dsPIC30F2010 encargados de controlar la posición y velocidad de los actuadores. Todos los microcontroladores están comunicados con el computador perso-

El diseño mecánico final considera la geometría exacta de los actuadores, por lo que todos los elementos mecánicos que conforman el robot deben de ser modificados para permitir el acoplamiento con dichos actuadores.

nal 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.

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

En la figura 12 se observa la arquitectura general del robot constituida por el computador central, los módulos de control, los módulos de potencia y los actuadores.

TABLA 1.

Características motor DC 404 747 Valeo.	
Voltaje nominal [UN]	12V.
Torque nominal [MN]	3N-m.
Velocidad nominal [n0]	21 rpm.
Duración máxima de encendido	10 min.
Torque inicial [MA]	19.6N-m.
Relación de reducción [i]	210/1
Inercia del rotor [JR]	9.5x10-6 kg-m2.
Peso	0.44 kg.

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

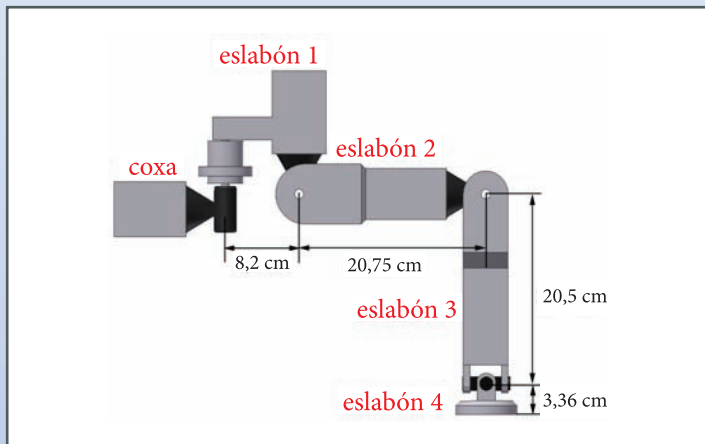


Fig 8. Diseño mecánico final de la pata de REMLED

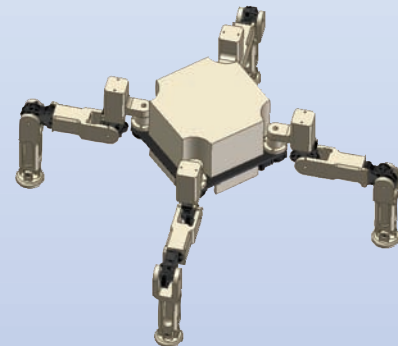


Fig 9. Diseño mecánico final de REMLED

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 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. La figura 13 muestra el esquema de inicio de comunicación para establecer conexión entre el computador central y un

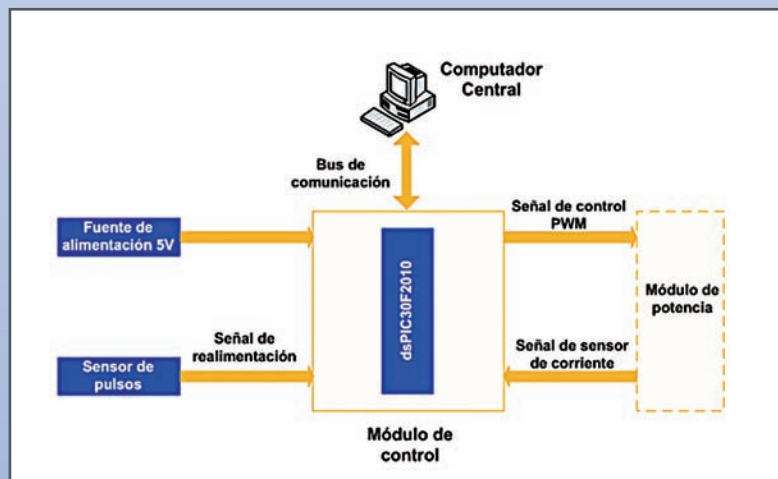


Fig 10. Arquitectura del dispositivo controlador

dispositivo de control con la dirección dos.

Una vez que el bus de datos ha sido ocupado por

algún dispositivo, el computador central envía otra palabra de ocho bits que contiene el código del

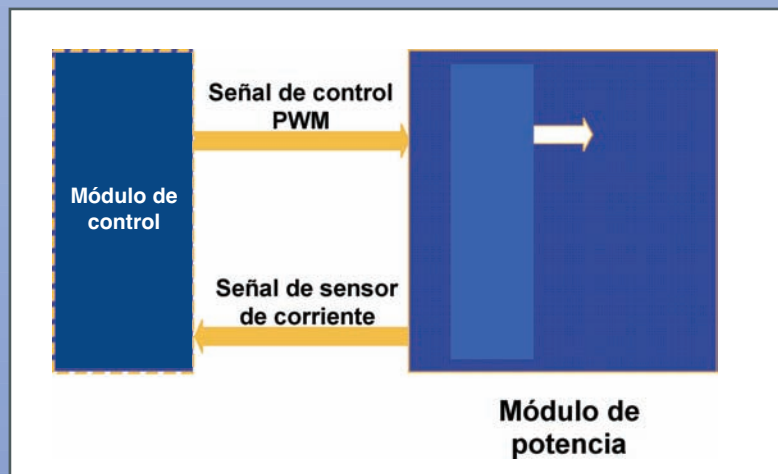


Fig 11. Arquitectura del circuito de potencia

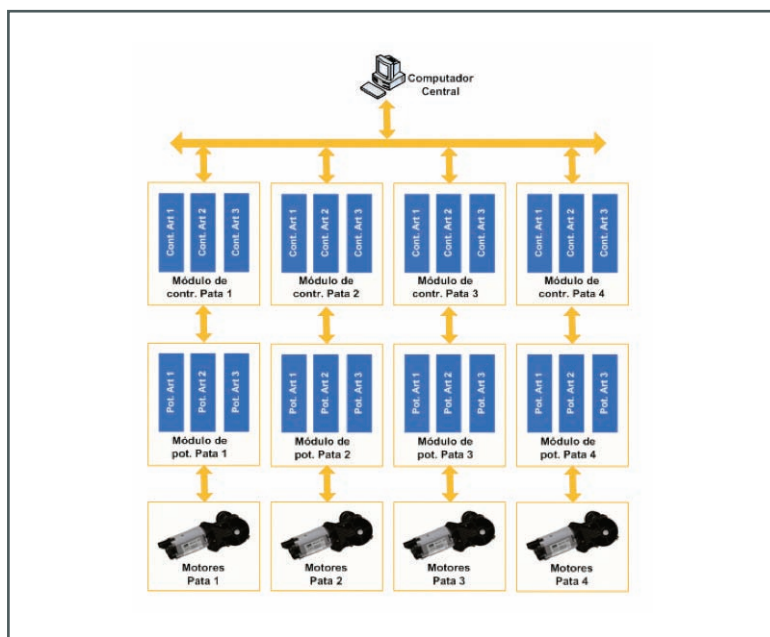


Fig 12. Arquitectura física de REMLED

Una vez que el bus de 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.

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.

ADMINISTRACIÓN DEL SISTEMA

El control de cada una de las articulaciones para

la locomoción del robot se realiza a través de un programa llamado "CMR v1.12.06" (Control para el Movimiento de REMLED). El sistema fue diseñado sobre LabVIEW™ 7.1 y proporciona un entorno gráfico que permite al usuario interactuar con los doce dispositivos controladores. Por medio de este entorno se pueden enviar órdenes codifica-

das hacia el módulo de control para realizar diversas tareas. 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 REMLED no es totalmente autónomo, ya que la locomoción es generada por el computador externo por lo que requiere de un bus de datos que permita la comunicación entre éste 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.

PERSPECTIVAS DE TRABAJO

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

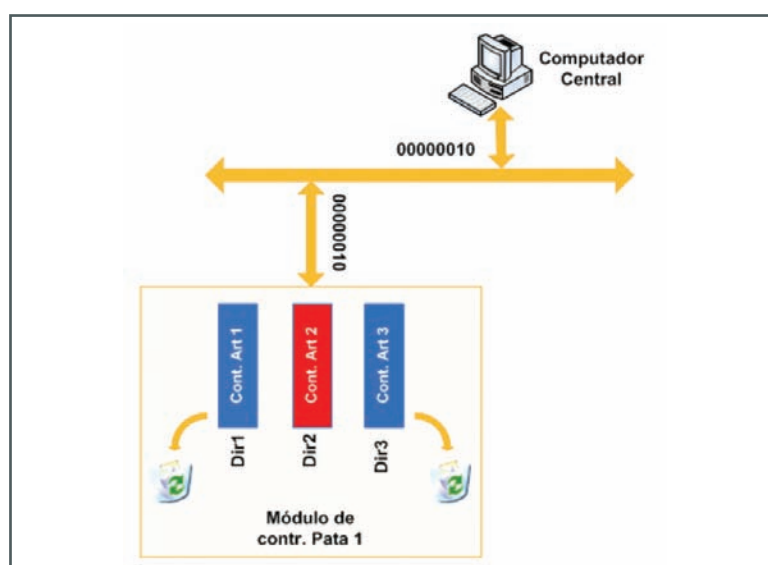


Fig 13. Esquema de inicio de comunicación

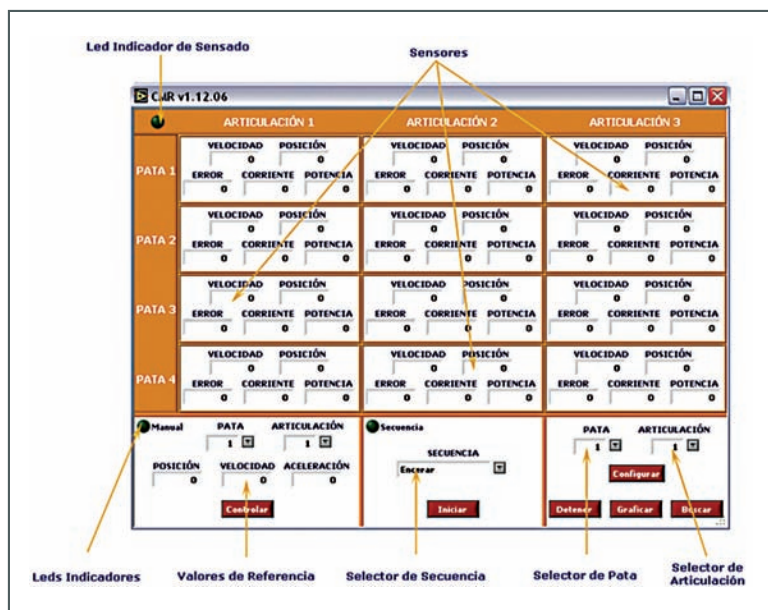
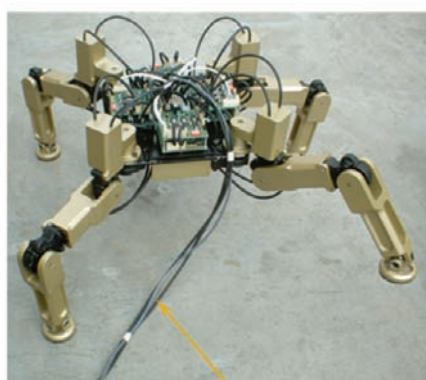


Fig 14. Programa informático para la administración del sistema



Cables de Alimentación y bus de datos

Fig 15. Ensamble final de REMLED

CONCLUSIONES

Se implementó una plataforma móvil de bajo costo, basada en un robot caminante cuadrúpedo. La simetría del sistema permite gran onmidireccionalidad 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 pruebas iniciales de locomoción que han posibilitado definir las configuraciones de las patas que permiten un menor gasto energético durante el proceso de caminata.

Se expone el uso de herramientas de software libre, como la librería *Modélica* como alternativa de bajo costo para el desarrollo de simulaciones físicas.

Bibliografía

- Calle Ortiz Eduardo. *Estudio de la cinemática*

- Desarrollo e implementación de sensores virtuales sobre el robot, a través del uso de redes neuronales artificiales, lógica difusa entre otras.
- Estudio de modos de caminar libre en robots caminantes que permitan dotarle 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.
- Incremento en la capacidad de autonomía de procesamiento mediante la implementación de computadoras de bolsillo y la implementación de nuevos sistemas operativos en tiempo real.

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

e implementación de un sensor virtual sobre la pata del robot SILO 6, Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Madrid, 2004.

- Gálvez, J.A., Estremera, J., Gonzalez de Santos, P. *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, 2000.
- González de Santos, P., García, E., Estremera, J.,

Armada M.A. *Silo6: desing and configuration of a legged robot for humanitarian demining*, In proceedings of the IARP Workshop on Robots for Humanitarian Demining 2002, Vienna, 2002.

- Hirose, S. and Kato, K. *Quadruped walking robot to perform mine detection and removal task*, In Proceedings of the fist International Conference on Climbing and Walking Robots, Brussels, 1998.
- Keisuke Arikawa, Shigeo

Hirose. *Development of Quadruped Walking Robot TITAN-VIII*, Proc. IROS 96, Osaka, 1996.

- Kenzo Nonami. *Autonomous mine detection robot for humanitarian demining*, Dept. of Electronics and Mechanical Engineering, Chiba University.
- Kimura, H. Tsuchiya, K. Ishiguro, A. Witte, H. *Adaptive Motion of Animals and Machines*, Hirakawa Kogyosha, Japan: Springer Tokio, 2006.

