

DISEÑO Y ANALISIS DE UN ROBOT CUADRUPEDO**DESIGN AND ANALYSIS OF A QUADRUPED ROBOT****Héctor A. Moreno^{*}, Oswal Vera^{**}, Cesar Peña^{**}, Isela Carrera^{*}****^{*} Universidad Autónoma de Coahuila**Faculta de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Norte.
Calle Barranquilla S/N Col. Guadalupe , Monclova, Coah., México
E-mail: h_moreno@uadec.edu.mx**^{**} Universidad de Pamplona**Programa de Ingeniería Mecatrónica
Km 1 vía Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Resumen: En este trabajo se presenta el diseño y análisis de un robot cuadrúpedo de escala pequeña. El propósito de este robot es servir de plataforma experimental para el desarrollo e implementación de algoritmos de marcha y navegación de robots cuadrúpedos. Este robot fue construido a partir de diversos componentes comerciales y fabricación mediante impresión 3D. Luego de describir el robot se presenta el modelado y una serie de análisis de la cinemática y fuerzas estáticas de las piernas del robot. Finalmente se presenta una demostración del robot ejecutando un patrón de marcha.

Palabras clave:

Abstract: This paper presents the design and analysis of a small-scale quadruped robot. The purpose of this robot is to serve as an experimental platform for the development and implementation of marching and navigation algorithms of quadruped robots. This robot was built from various commercial components and manufactured using 3D printing. After describing the robot, modeling and a series of analysis of the kinematics and static forces of the robot's legs are presented. Finally there is a demonstration of the robot executing a gear pattern.

Keywords:**1. INTRODUCCIÓN**

Los robots cuadrúpedos se han convertido en un tema de investigación muy atractivo en años recientes. Este interés se debe principalmente a su alta maniobrabilidad cuando se comparan con otros sistemas de locomoción terrestre. Se distinguen principalmente por su capacidad para escalar superficies de diferentes niveles y su flexibilidad

para atravesar ambientes no estructurados. Los robots cuadrúpedos tienen mayor capacidad de carga y estabilidad que los robots bípedos, y por otro lado son mecánicamente más sencillos que los robots que posee mayor número de patas, por ejemplo los hexápodos (Zhong et al., 2019).

Los diseños de robots cuadrúpedos se diferencian principalmente por la arquitectura de sus piernas. En

la mayoría de los casos son mecanismos seriales de tres grados de libertad. La primera distinción es la configuración de la articulación rotacional de la cadera y posturas de las extremidades posteriores. La configuración de la cadera puede ser extensa (tipo insecto) o erguida (tipo mamífero) (Hirose et al., 2009). Generalmente el resto de las articulaciones son rotacionales, sin embargo se han propuesto diseños en los cuales la articulación del fémur con el pie es de tipo prismática (Raibert, 1989; Ahmadi y Buehler, 1997). En la literatura científica se pueden encontrar diseño de piernas basados en mecanismos de cadena cerrada. Principalmente se emplea una inversión del mecanismo biela-manivela-corredora (Semini et al., 2011). De esa forma es posible emplear actuadores prismáticos y transformar su movimiento lineal en rotacional en cada una de las articulaciones que unen a la cadera, el fémur y la tibia. Por otra parte, se han empleado mecanismos paralelos en el diseño de las patas de robots cuadrúpedos, como lo es el mecanismo de cinco barras articuladas (Kenneally y Koditschek, 2016). Las piernas basadas en estos mecanismos son más ligeras que aquellas basadas los mecanismos seriales e híbridos, ya que los actuadores no están incluidos en la estructura de la pierna, sino en tronco del robot.

A pesar de que los avances en la tecnología han permitido el desarrollo de plataformas experimentales con alto nivel de destreza, existen aún varios retos en el diseño, control en este tipo de robots (Zhong et al., 2019), aunado al hecho de los costos de fabricación limitan su empleo en varias aplicaciones potenciales por el momento. Por lo tanto, esta área de investigación es aún vigente y tiene un gran potencial en el desarrollo de plataformas de locomoción en robots de campo y de servicio.

Un desarrollo relevante fue el robot Little Dog de Boston Dynamics (Murphy, 2011). Este cuadrúpedo es un robot de 12 grados de libertad de escala pequeña que incluía una variedad de sensores y una plataforma de desarrollo de software. El propósito de este robot fue proveer a diversos centros de investigación un dispositivo de bajo costo (comparado con los robots de escala mayor), fácil de mantener y con altas prestaciones.

En este trabajo se presenta el diseño y análisis de un robot cuadrúpedo de escala pequeña. El propósito de este robot es servir de plataforma experimental para el desarrollo e implementación de algoritmos de marcha y navegación de robots cuadrúpedos. Este robot fue construido a partir de diversos

componentes comerciales y fabricación mediante impresión 3D. Luego de describir el robot se presenta el modelado y una serie de análisis de la cinemática y fuerzas estáticas de las piernas del robot. Finalmente se presenta una demostración del robot ejecutando un patrón de marcha.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

El diseño y fabricación del Robot *Coyotl.01* se realiza con el fin de poder explorar las relaciones fundamentales entre aprendizaje, control dinámico, complejidad del terreno y locomoción. En particular, el desarrollo de algoritmos que le permitan navegar de forma confiable en terrenos accidentados e irregulares que requieren una selección activa de los puntos de apoyo y la postura del robot para cruzar obstáculos que son comparables en tamaño a la longitud de la pata del robot.

El robot contará con tres grados de libertad en cada pierna, permitiendo realizar el control de posición, fuerza, velocidad y aceleración en cada grado de libertad, siendo impulsado por una batería que le otorga una autonomía de aproximadamente 20 min, y contando con la capacidad de comunicarse a través inalámbricamente con una computadora de control.

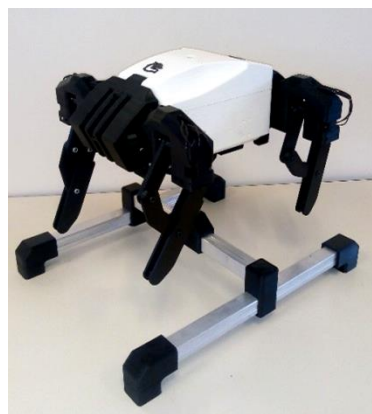


Fig. 1. Robot *Coyotl.01*.

En la Figura 1 se muestra el robot construido y ensamblado en su totalidad, fue completamente elaborado mediante impresión 3D, usando PLA.

El prototipo de robot cuenta con actuadores Dynamixel XM430-W210-T, los cuales son operados con su tarjeta controladora OPENCM 9.04 y su respectiva tarjeta de expansión OPENCM 485, componentes fabricados por ROBOTIS.

Características del COYOTL.01

Largo	336 [mm]
Ancho	337 [mm]
Alto	114 [mm]
Peso	3 [Kg]
Longitud de Pierna	193 [mm]
Altura desde el suelo	138 [mm]
Grados de libertad	12 [GDL]
Voltaje de operación	10-14.8 [V]
Velocidad sin carga	70 [rev/min] a 11.1 [V] 77 [rev/min] a 12.0 [V] 95 [rev/min] a 14.8 [V]
Torque	2.7 [rev/min] a 2.1 [A] 3.0 [rev/min] a 2.3 [A] 3.7 [rev/min] a 2.7 [A]
Tarjeta de control 1 (OPENCM 9.04)	26 pines GPIO Voltaje de operación 5-16 [V] 4 BUS TTL 3 pin Velocidad de reloj 72 [MHz]
Tarjeta de control 2 (RASPERRY PI 3 B+)	40 pines GPIO Voltaje de operación 5 [V] Procesador 1.4 [GHz] Memoria RAM 1[GB] Wireless LAN Ethernet Bluetooth USB
Sensores	Posición Velocidad Aceleración Torque IMU (Unidad de Medición Inercial) Proximidad

Tabla. 1. Características técnicas del robot.

En cada pierna del prototipo se alojan tres actuadores, esta característica otorga a cada pierna 3GDL, controlando velocidad, posición, aceleración en cada una de ellas.

Los sensores IMU (Unidad de Medición Inercial) y de proximidad junto con las demás mediciones que se realizan le proporcionan al robot la capacidad de

locomoción en terrenos irregulares al poder tener datos de su entorno.

2. MODELADO DE UNA PIERNA DEL ROBOT

En la Fig. 2. se muestra el diagrama esquemático del mecanismo de la pierna del robot, compuesto por 5 barras formando por una cadena cinemática cerrada, posee 2 grados de libertad con articulaciones coaxiales actuadas.

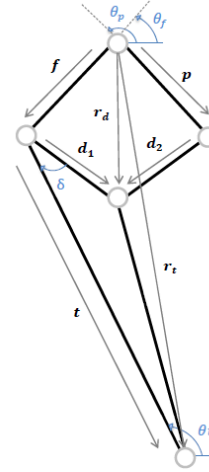


Fig.2. Esquema cinemático de una pierna del robot

2.1 Cinemática directa

Del diagrama esquemático de la Fig. 2. se obtienen las siguientes ecuaciones vectoriales:

$$\mathbf{r}_t = \mathbf{g}(\theta_f, \theta_p) \quad (1)$$

$$\mathbf{f} + \mathbf{d}_1 = \mathbf{p} + \mathbf{d}_2 \quad (2)$$

La representación de los vectores estará dada en su forma compleja ($\mathbf{r} = x + jy$) en coordenadas rectangulares y ($\mathbf{r} = Le^{j\theta}$) en coordenadas polares donde L corresponde a la magnitud del vector y θ a su respectivo ángulo.

Empleando herramientas matemáticas se obtienen las ecuaciones que representan la solución a la cinemática directa del mecanismo.

$$r_{px} = L_f \cos \theta_f + L_t \cos(\theta_{d1} - \delta) \quad (3)$$

$$r_{py} = L_f \sin \theta_f + L_t \sin(\theta_{d1} - \delta) \quad (4)$$

2.2 Cinemática inversa

A continuación se resuelve la cinemática inversa del mecanismo. Esta consiste en dado el valor de r_p determinar θ_f y θ_p , para estos análisis se tiene como punto de partida las anteriores expresiones, Ecuaciones (3) y (4).

Empleando herramientas matemáticas se obtienen las ecuaciones que representan la solución a la cinemática inversa del mecanismo.

$$\theta_f = 2 \tan^{-1} \left(\frac{r_{py} \pm \sqrt{r_{py}^2 + r_{px}^2 - S_1^2}}{r_{px} + S_1} \right) \quad (5)$$

Donde,

$$S_1 = \frac{r_{px}^2 + r_{py}^2 + L_f^2 - L_t^2}{2L_f} \quad (6)$$

$$\theta_p = 2 \tan^{-1} \left(\frac{r_{dy} \pm \sqrt{r_{dy}^2 + r_{dx}^2 - S_3^2}}{r_{dx} + S_3} \right) \quad (7)$$

En donde el valor de S_3 , está dado por:

$$S_3 = \frac{r_{dx}^2 + L_p^2 + r_{dy}^2 - L_d^2}{2L_p} \quad (8)$$

2.3 Análisis de cinemático de velocidad

El análisis cinemático de velocidad se obtiene derivando las ecuaciones vectoriales obtenidas en el análisis de posición, según representación indicada a continuación.

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{q}_f \\ \dot{q}_p \end{bmatrix} \quad \dot{\mathbf{r}}\mathbf{p} = \begin{bmatrix} \dot{r}_{p_x} \\ \dot{r}_{p_y} \end{bmatrix} \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \omega_{d_1} \\ \omega_{d_2} \end{bmatrix}$$

$$\omega_f = \dot{q}_f$$

$$\omega_p = \dot{q}_p$$

El analisis cinematico de velocidad se desarrolla empleando la Ecuación (9),

$$\mathbf{d}_1 - \mathbf{d}_2 = \mathbf{p} - \mathbf{f} \quad (9)$$

Aplicando derivada a la Ecuación (9) se obtiene:

$$\mathbf{A}\mathbf{v} = \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} \quad (10)$$

Donde,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -L_{d_1} \sin \theta_{d_1} & L_{d_2} \sin \theta_{d_2} \\ L_{d_1} \cos \theta_{d_1} & -L_{d_2} \cos \theta_{d_2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} L_f \sin \theta_f & -L_p \sin \theta_p \\ -L_f \cos \theta_f & L_p \cos \theta_p \end{bmatrix}$$

Por otro lado derivando las Ecuaciones (3) y (4), se obtiene:

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\mathbf{v} \quad (11)$$

Donde,

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} L_f \sin \theta_f & 0 \\ L_f \cos \theta_f & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -L_t \sin(\theta_{d_1} - \delta) & 0 \\ -L_t \cos(\theta_{d_1} - \delta) & 0 \end{bmatrix}$$

Finalmente se tiene que:

$$\dot{\mathbf{r}}_p = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \quad (12)$$

donde,

$$\mathbf{J} = \mathbf{C} + \mathbf{D}(\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})$$

2.4 Análisis de carga estática

Cuando actúan fuerzas sobre un mecanismo, se realiza trabajo siempre y cuando el mecanismo realiza algún desplazamiento. El trabajo es definido como la fuerza que actúa a través de una distancia, y se expresa como un escalar con unidades de energía. El planteamiento de trabajo virtual permite realizar ciertas afirmaciones en cuanto a carga estática, esto debido a que al permitir que la magnitud del desplazamiento se muy pequeña. El trabajo realizado en términos cartesianos permite ser igualado al trabajo realizado en término de espacio de articulación. En un caso de múltiples dimensiones, el trabajo se define como el producto punto de la fuerza o momento de torsión vectorial y el desplazamiento de un vector, obteniendo:

$$\mathbf{F} \cdot \delta \mathbf{r}_p = \tau \cdot \delta \mathbf{q} \quad (13)$$

En donde \mathbf{F} es el vector de fuerza-momento cartesiano que actúa en el extremo de la pierna, $\delta \mathbf{r}_p$ representa al desplazamiento cartesiano

infinitesimal del extremo de la pierna, τ es el vector de momentos de torsión de las articulaciones y δq es el vector de desplazamientos infinitesimales de articulación.

Teniendo en cuenta que el Jacobiano está definido como:

$$\delta r_p = J \delta q \quad (14)$$

Se obtiene,

$$\tau = J^T F_p \quad (15)$$

La transpuesta del Jacobiano asigna fuerzas cartesianas que actúan en la pierna del prototipo, a momentos de torsión de articulaciones equivalentes.

3. ANALISIS DEL DESEMPEÑO

Los estudios presentados en este documento están orientados al análisis y evaluación del desempeño del mecanismo paralelo 5R empleado como pierna en robots cuadrúpedos. Se presentan los modelos cinemáticos de posición y velocidad y de fuerzas de carga estática para para los mecanismos de las piernas. Por otra parte, se resuelve el problema de planificación de movimientos del robot cuadrúpedo, definiendo los patrones de marcha y determinando los movimientos requeridos en los actuadores a través de los modelos obtenidos. Además, se presenta un estudio del espacio de trabajo del mecanismo evaluando diversas magnitudes y criterios de desempeño. Si bien existen antecedentes del empleo de mecanismo 5R en robots con patas, el enfoque del estudio realizado en este trabajo es original. Finalmente se definen los problemas de síntesis dimensional del mecanismo planteando diversos escenarios.

3.1 Trayectoria de la pierna

Es necesario que el movimiento que realice la pierna sea suave, por lo que se deben tener en cuenta ciertos criterios a la hora de seleccionar la curva a utilizar como trayectoria.

Para este caso se hace la elección de una elipse, como se muestra en la Figura 3 (a), ya que cumple con ciertos parámetros necesarios tales como lo son:

1. La función de la elipse es continua en su segunda derivada, garantizando esto un movimiento suave del pie lo que implica que el movimiento del cuerpo del robot también es suave. Estando descrita por la Ecuación (16) mostrada a continuación.

Donde,

x_0, y_0 : Coordenadas x e y del centro de la elipse.

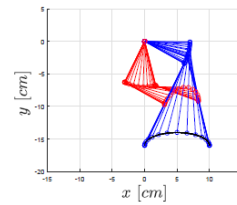
a : Semieje de abscisas.

b : Semieje de ordenadas. En nuestro caso debe cumplirse que $b \leq a$.

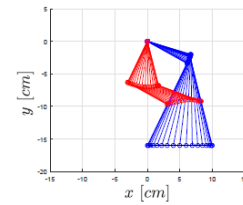
$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} = 1 \quad (16)$$

2. La orientación de la curva, tanto en el movimiento de ascenso como en el descenso, es normal al suelo.

Ahora, para llegar a completar una secuencia de movimiento se requiere que la pierna regrese a la posición inicial, por esto, se emplea una trayectoria en línea recta como se muestra en la Figura 3(b), la cual une el punto de inicio de la transición y su punto final. En las figura el movimiento del extremo dela pierna se realiza de derecha a izquierda para el caso de la Figura 3(a) desplazándose desde su límite cinemático posterior, y para el caso de la Figura 3(b), de derecha a izquierda retornando a su límite cinemático posterior.



(a) Simulación de elipse.



(b) Simulación de línea.

Fig.3. Simulación de trayectoria de pierna del robot.

Para todas las simulaciones se hace uso de la función cicloidal como planificador de trayectorias mostrada en la Ecuación (17), ya que es ampliamente recomendada para reducir vibraciones y otros efectos nocivos en los sistemas mecánicos. Se usaron velocidades iniciales y finales iguales a cero. Los radios de las circunferencias que conforman la elipse son $a = 5$, $b = 2$.

$$y = \delta_y \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \right] \quad (17)$$

Donde,

y : es la distancia recorrida en el tiempo t .

δ_y : es la longitud total de la trayectoria.

T : es el tiempo total requerido para realizar la trayectoria.

3.2 Simulaciones

Con ayuda de la cinemática inversa de posición se realizan las simulaciones de posición de los eslabones p y f , retornando esta, el comportamiento de las variables articulares, en la Figura 8 se muestra el comportamiento de estas variables durante la realización del movimiento, correspondiendo la Figura 4 al comportamiento de la variable articular del eslabón p , el cual durante la transferencia realizada describe un comportamiento suave, hasta llegar a estabilizarse, caso contrario al comportamiento del eslabón f que describe cambios rápidos en el sentido de movimiento de la variable articular, teniendo en cuenta que el movimiento se realiza en 1 segundo.

Empleando la cinemática inversa de velocidad se realizan las simulaciones de velocidad de los eslabones p y f , retornando esta, el comportamiento de las variables articulares, en la Figura 4 se muestra el comportamiento de estas variables durante la realización del recorrido, el eslabón p durante la transferencia realizada describe etapas de decremento e incremento de la variable, hasta llegar a estabilizarse, caso contrario a lo mostrado por el eslabón f que describe cambios rápidos en la variable articular, teniendo en cuenta que el movimiento se realiza en 1 segundo.

Empleando la matriz Jacobiano se realizan las simulaciones de torque de los eslabones p y f , retornando esta, la exigencia de torque durante la realización del movimiento. Las simulaciones se realizaron empleando un tiempo de 1 segundo y una carga de 9,81 N.

3.3 Análisis de espacio de trabajo

El diseño de mecanismos de 1 grado de libertad consiste en determinar las longitudes de los eslabones de manera que un punto del mecanismo atraviese una trayectoria que pase por una serie de coordenadas deseadas. Cuando los mecanismos tienen 2 o más grados de libertad, estos tienen la capacidad de generar trayectorias arbitrarias en dos o más variables que definen las coordenadas de operación de la herramienta de trabajo. De esta manera, se considera que espacio de trabajo es el principal criterio a satisfacer en el diseño de mecanismos con múltiples grados de libertad. En este capítulo se realiza un estudio del espacio de trabajo del mecanismo de las piernas del robot y posteriormente se plantean y resuelven una serie de problemas de síntesis dimensional.

En la Figura 6 se muestra el espacio de trabajo del mecanismo de la pierna del robot. La región en color negro indica las coordenadas que puede alcanzar el extremo de la pierna. Se considera que en el origen de plano presentado se encuentran las articulaciones actuadas. Se observa que el extremo de la pierna puede alcanzar posiciones en un rango de -21 cm a 21 cm en x y de -21 cm a 5 cm en y .

Para obtener el espacio de trabajo se discretizó una área de exploración y se realizó la revisión de una rejilla de puntos en el plano $x - y$. En cada punto se verifica que la coordenada pueda ser alcanzada por el mecanismo resolviendo la cinemática inversa. Esto se realizó en dos partes, primero se obtienen los valores de θ_f y θ_t . Si los valores obtenidos son reales se pasa a la siguiente parte de la solución de la cinemática inversa. Si se obtienen valores imaginarios el punto de estudio se considera inaccesible y no forma parte del espacio de trabajo.

En la segunda parte de la solución de la cinemática inversa se obtiene los valores de θ_p y θ_{d_2} . Si dichos valores son reales entonces se procede a realizar la evaluación de los límites articulares. La última evaluación consiste en el cálculo del determinante de la matriz Jacobiana, para determinar la existencia de singularidades. En la Figura 6 se presentan los valores del valor absoluto del determinante de la matriz Jacobiana J en el plano $x - y$. Se observó que no existen configuraciones singulares al interior del espacio de trabajo del mecanismo con las longitudes empleadas.

En la Figura 6 se presentan los valores del inverso del número de condición de la matriz Jacobiana del mecanismo. La inversa el número de condición es el índice de desempeño más utilizado para caracterizar el rendimiento cinemático de un mecanismo paralelo. Proporciona una medida para la isotropía, la destreza, la rigidez, el error relativo en las fuerzas y torques del efector final debido al error de entrada en los pares de torsión, el error relativo en las velocidades cartesianas debido al error en las velocidades articulares y también puede indicar la ocurrencia de singularidad o se puede emplear como medida de cercanía a una configuración singular. El número de condición de una matriz se define en la Ecuación 18, como el producto de la norma de la matriz y la norma de su inverso.

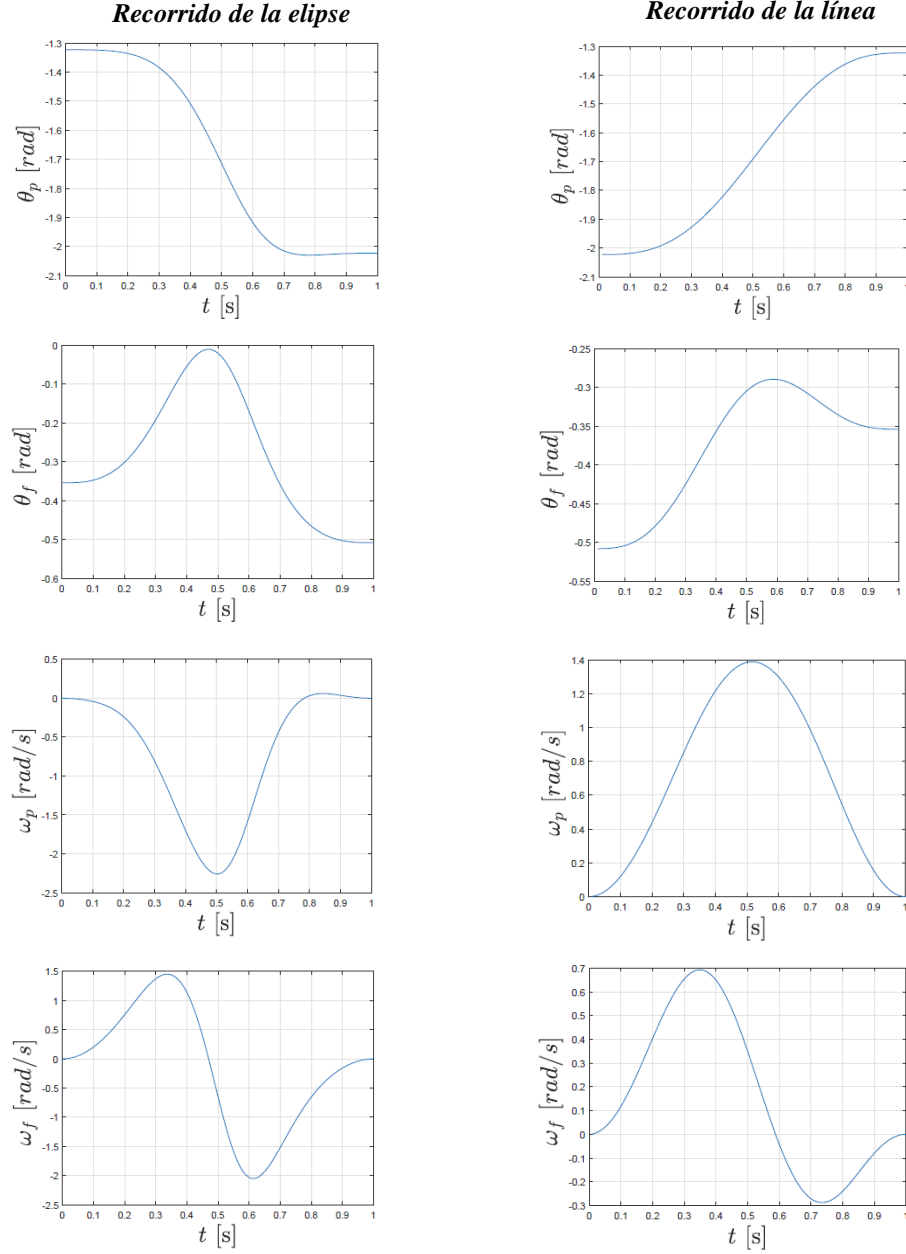


Fig. 4. Simulación de posición y velocidad de mecanismo de pierna.

$$C(J) = \|J\| \|J^{-1}\|, \quad (18)$$

Donde $\|, \|$ denota cualquier norma de matrices.

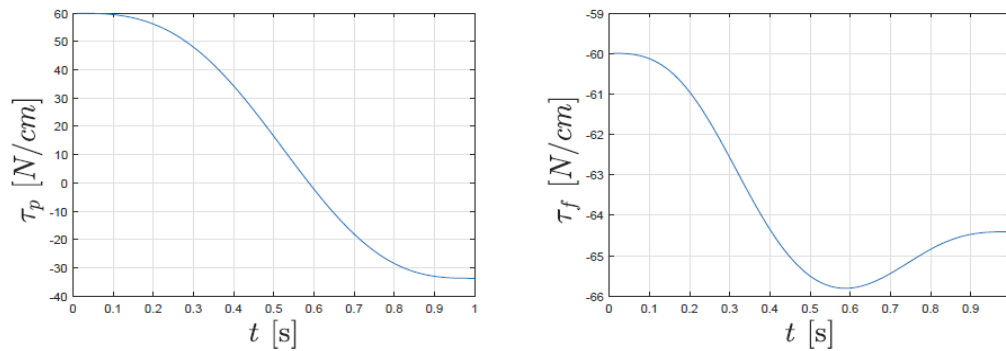


Fig. 5. Simulación de la exigencia de torque en actuadores.

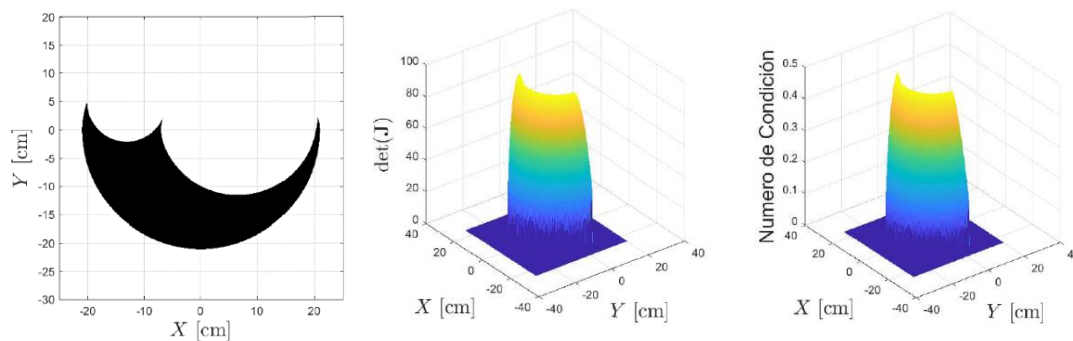


Fig. 6. Simulación de espacio de trabajo de mecanismo.

4. MARCHA DISCONTINUA

En el campo de la locomoción en las piernas, una marcha se define como un patrón repetitivo de colocaciones del pie (Todd, 1985). Song y Waldron (1989) hicieron una descripción más precisa: La marcha se define por el tiempo y la ubicación de la colocación y elevación de cada pie, coordinada con el movimiento del cuerpo en sus seis grados de libertad, para mover el cuerpo de un lugar a otro.

La caminata periódica se divide en dos grupos, continua (onda) y discontinua. La primera de ellas es aquella en donde el cuerpo está en constante movimiento, mientras que todas las piernas se mueven simultáneamente, y en la marcha periódica discontinua se tiene que se caracteriza por el movimiento secuencial de las piernas y el cuerpo, el cuerpo es impulsado hacia adelante o hacia atrás con todos los pies colocados firmemente en el

suelo y una pierna se transfiere con las otras tres piernas y el cuerpo detenido.

Para el caso de estudio que se está abordando, la marcha que se empleará está basada en el principio de caminata periódica discontinua.

La marcha discontinua se caracteriza por el movimiento secuencial de las piernas y el cuerpo (González de Santos y Jiménez, 1995). Una pierna se transfiere con todas las otras piernas en apoyo. El cuerpo es propulsado con todas las piernas apoyadas y moviéndose simultáneamente, por supuesto, manteniendo sus piernas en apoyo. Al generar caminatas discontinuas periódicas para cuadrúpedos, ciertos aspectos deben considerarse:

1. Si una pierna en su fase de soporte alcanza el límite posterior de su espacio de trabajo (límite cinemático), esta pierna debe cambiar a la fase de transferencia para ubicarse en su límite cinemático frontal.
2. El cuerpo es impulsado hacia adelante con todas las piernas en el suelo. Después de un

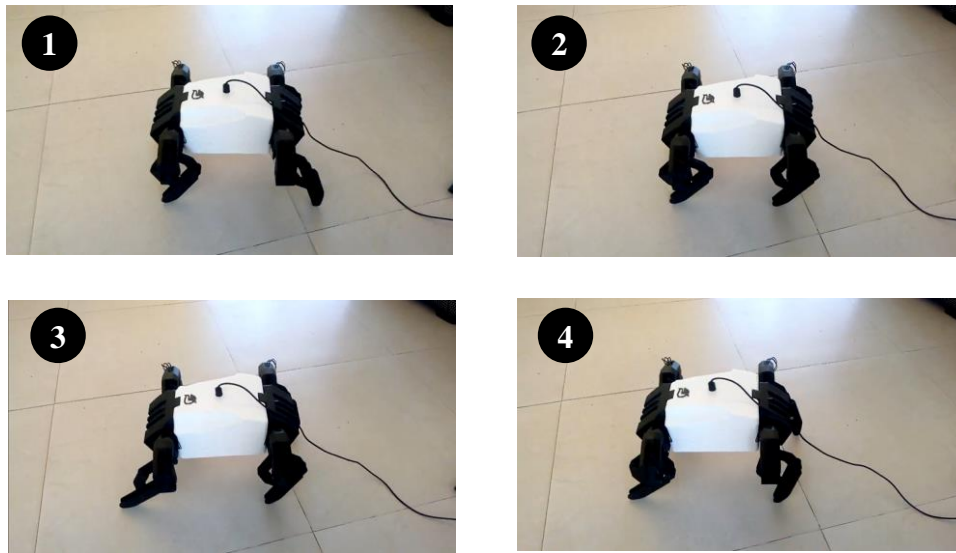


Fig. 9. Robot realizando una caminata periódica discontinua

movimiento del cuerpo, al menos una pierna debe permanecer en su límite cinemático posterior para realizar una fase de transferencia al siguiente movimiento de la pierna.

3. La pierna que es contra lateral y no adyacente (CNA) a la pierna de transferencia actual debe colocarse en un punto tal que después de la colocación de la pierna transferida, el COG (Centro De Gravedad) permanezca en el otro lado de la línea que conecta la pierna de CNA con la pierna de transferencia. De esta manera, será posible levantar otra pierna mientras se mantiene la estabilidad de la máquina.
4. La secuencia de piernas debe ser periódica; Esto permitirá que varios ciclos de locomoción se unan para seguir un camino.

5. CONCLUSIONES

En este documento se presentó el diseño de un robot cuadrúpedo de escala pequeña. Los estudios presentados están orientados al análisis y evaluación del desempeño del mecanismo paralelo 5R empleado como pierna en robots cuadrúpedos. Se presentan los modelos cinemáticos de posición y velocidad y de fuerzas de carga estática para para los mecanismos de las piernas. Además, se presenta un estudio del espacio de trabajo del mecanismo

evaluando diversas magnitudes y criterios de desempeño. Si bien existen antecedentes del empleo de mecanismo 5R en robots con patas, el enfoque del estudio realizado en este trabajo es original. Finalmente se presenta una demostración del robot ejecutando un patrón de marcha.

En la Figura 9 se muestra al *Coyotl.01* realizando una marcha periódica discontinua empleando el margen de estabilidad longitudinal, conservando en todo momento la proyección del centro de gravedad dentro del polígono formado por los tres puntos de contacto mínimos que debe conservar el robot en todo momento.

En la Figura se aprecia como el robot realiza las transiciones de sus piernas, una a una, lo que en conjunto le permite desplazarse, en la Figura 9 (1), (2) se muestra como se realiza la transición de la pierna 3, en la Figura 9 (3), (4), se muestra la realización de la transición de la pierna 1, finalizando este movimiento con el desplazamiento del cuerpo.

REFERENCIAS

- Hirose, S., Fukuda, Y., Yoneda, K., Nagakubo, A., Tsukagoshi, H., Arikawa, K., Endo, G., Doi, T.

- y Hodoshima, R. (2009). Quadruped Walking Robots at Tokyo Institute of Technology Design, Analysis, and Gait Control Methods. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*. 16. 104 - 114. 10.1109/MRA.2009.932524.
- Raibert, M. H., Brown, H.B., Cheponis, M, et al. (1989) Dynamically stable legged locomotion. *Robotics*; 10: 303–314. 8.
- Ahmadi, M. y Buehler, M. (1997). Preliminary experiments with an actively tuned passive dynamic running robot. In: *The 5th international symposium pm experimental robotics (ISER)* (eds Casals A and DeAlmeida AT), Barcelona, Spain, 15–18 June 1997, pp. 313–324. London: Springer.
- Semini C, Tsagarakis NG, Guglielmino E, et al. (2011). Design of HyQ – a hydraulically and electrically actuated quadruped robot. *P I Mech Eng I-J Sys*; 225(16): 831–849.
- Kenneally G, De A, and Koditschek DE. (2016) Design principles for a family of direct-drive legged robots. *IEEE Robot Autom. Lett.*; 1(2): 900–907.
- Murphy, M., Saunders, A., Moreira, C. Rizzi, A. y Raibert, M. (2011). The LittleDog robot. I. *J. Robotic Res.* 30. 145-149. 10.1177/0278364910387457.