



Ingeniería

ISSN: 1665-529X

emoreno@uady.mx

Universidad Autónoma de Yucatán

México

Rodríguez-Ángeles, A.; Cruz-Villar, C. A.; Vite-Téllez, D. A.  
Generación de trayectorias para marcha semiestática de un robot bípedo: diseño y pruebas  
experimentales  
Ingeniería, vol. 15, núm. 2, 2011, pp. 57-68  
Universidad Autónoma de Yucatán  
Mérida, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46719773004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# Generación de trayectorias para marcha semi-estática de un robot bípedo: diseño y pruebas experimentales

Rodríguez-Ángeles, A.<sup>1</sup>, Cruz-Villar, C. A.<sup>2</sup> y Vite-Téllez, D. A.

*Fecha de recepción: 25 de enero de 2011 – Fecha de aprobación: 07 de junio de 2011*

**Resumen:** Este artículo presenta el diseño de trayectorias para marcha semi-estática de una plataforma experimental bípeda de 10 grados de libertad (gdl), de la cual se realiza su desarrollo e integración. El control y sincronización de las articulaciones se realiza por medio de un control distribuido embebido en una plataforma basada en microcontroladores dsPICs de 16 bits, donde se implementan leyes de control PI para seguimiento de trayectorias en cada articulación, por lo que la arquitectura resultante es del tipo descentralizada. Se implementan trayectorias fundamentadas en el estudio de la biomecánica de la marcha humana sobre el plano sagital y frontal, siendo ejecutadas por cada articulación de forma síncrona. Las trayectorias y el balanceo semi-estático se verifican mediante simulaciones numéricas empleando Matlab® y su ambiente de realidad virtual, empleando el criterio de proyección del centro de masa sobre la superficie de soporte del robot bípedo. Una vez validadas las trayectorias generadas se implementan en la plataforma experimental, comprobando la marcha estable semi-estática del robot de 10 gdl.

**Palabras clave:** robot bípedo, control distribuido, marcha semi-estática, sistemas embebidos, centro de masa.

## Semi-static gait trajectory generation for a biped robot: design and experimental implementation

**Abstract:** This article presents the design of trajectories for semi-static gait of a 10 degrees of freedom (dof) biped robot, for which development and integration is carried out. The control and synchronization of the robot joints is done by means of a distributed control, which is programmed in an embedded system based on 16 bits dsPICs microcontrollers, where classical PI controls achieve joint trajectory tracking, thus a decentralized control system is obtained. The gait trajectories are designed based on biomechanical studies of human gait on sagittal and frontal planes, which are executed by each joint in a synchronous manner. The gait trajectories and semi-static balance are validated through numerical simulations in Matlab® and its virtual reality toolbox by using the projection of the mass centre criteria. Once the trajectories have been validated, they are implemented on the experimental platform, concluding semi-static stable gait of the 10 dof biped robot.

**Keywords:** biped robot, distributed control, embedded systems, semi-static gait, mass centre.

---

<sup>1</sup> CINVESTAV, Sección de Mecatrónica. Av. I.P.N. 2508, CP. 07360, México D.F. Email: aangeles@cinvestav.mx

<sup>2</sup> CINVESTAV, Sección de Mecatrónica. Av. I.P.N. 2508, CP. 07360, México D.F. Email: cacruz@cinvestav.mx

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1º de marzo de 2012. Este artículo de investigación es parte de **Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán**, Vol. 15, No. 2, 2011, ISSN 1665-529X.

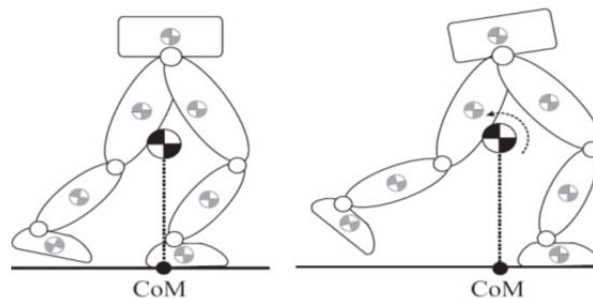
## INTRODUCCIÓN

Los robots bípedos representan uno de los movimientos más complejos e interesantes que el hombre realiza diariamente, la marcha. El análisis de la marcha estática y dinámica en bípedos se ha incrementado en los últimos años debido a las ventajas de movilidad que presentan con respecto a otros robots móviles, e.g. con ruedas convencionales. Es por ello que en institutos de investigación, universidades y algunas compañías privadas se invierte tiempo y recursos para el desarrollo de sofisticados prototipos de robots bípedos y humanoides (Gienger *et al.* 2001; Kaneko *et al.* 2004; Zonfrilli *et al.* 2005; Kajita *et al.* 2006), destacando el trabajo de (Park *et al.* 2006) donde se desarrolla un robot humanoide de 1.25 m de altura con 41 gdl. Por otro lado, algunos de los avances técnicos más impresionantes son de empresas privadas como: ASIMO (Honda 2011), QRIO (Sony 2004) y HRP (Kawada 2010).

La marcha bípeda es un fenómeno periódico, donde el ciclo de la marcha se define como el intervalo comprendido entre dos eventos sucesivos referidos a una misma pierna y no teniendo ambos pies separados del suelo a la vez. Durante la marcha se tienen dos

periodos o fases importantes: fase de soporte doble (FSD) y fase de soporte simple (FSS), dependiendo del número de pies en apoyo.

El balanceo estático se basa en el concepto del centro de masa (CoM). La condición de balanceo estático se reduce a la proyección del CoM dentro del área formada por la planta de los pies. Esto significa que en cualquier momento donde se detenga el robot, se encontrará en un estado de equilibrio por tiempo indefinido, por ejemplo, durante la FSD el CoM es proyectado sobre el polígono formado por ambas plantas de los pies y durante la FSS se mantiene dentro del área del pie de soporte (ver Figura 1, imagen izquierda). En la Figura 1, imagen derecha, la proyección del CoM queda fuera del área de soporte, por lo que el robot bípedo girará y caerá. Al tipo de desplazamiento que cumple con el criterio anterior se le conoce como marcha estática (Kato *et al.* 1973). Este criterio es válido para velocidades de marcha lenta, donde los efectos dinámicos pueden ser despreciados. En el caso de marcha rápida o dinámica se puede considerar el criterio del punto de momento cero (zero moment point, ZMP), (Vukobratović y Borovac 2008); donde se consideran las velocidades, aceleraciones, momento angular y momento lineal de todos los eslabones.



**Figura 1.** Marcha estática.

En este trabajo se presenta una metodología para el diseño e implementación de trayectorias sobre el plano sagital similares a las estudiadas en la biomecánica del paso humano, asimismo, se proponen trayectorias sobre el plano frontal de tipo polinomial para lograr una marcha natural y balanceada semi-estáticamente, debido a la consideración de ambos planos. Cada articulación es actuada por un motor de corriente continua a través de un tren de engranes. La sincronización y control de los motores se lleva a cabo por medio de un control distribuido embebido. También se presenta el desarrollo de un robot bípedo de 10 gdl para banco de pruebas, Figura 2, bajo una metodología mecatrónica (Amerongen van, Job 2003). Por cada pierna, 3 gdl generan movimiento en el plano sagital y 2 gdl lo hacen en el plano frontal.

Se presenta el modelo cinemático del robot bípedo y la estrategia de planeación de trayectorias para marcha estable. Posteriormente se describe el diseño mecánico, eléctrico y el sistema de control. La estrategia propuesta se valida mediante simulaciones, presentando también resultados experimentales. Finalmente se presentan conclusiones sobre el trabajo presentado.

## MODELO MATEMÁTICO Y GENERACION DE TRAYECTORIAS

La cinemática directa del bípedo se desarrolla por medio de la convención de Denavit-Hartenberg (Craig 1989). La colocación de los ejes de coordenadas y las longitudes para la pierna derecha se muestran en la

Figura 3. El modelo cinemático se analiza en primera instancia tomando el punto medio de la cadera como eslabón final  $\{6\}$  y la planta del pie derecho como el eje de referencia  $\{0\}$ . En segunda instancia, se analiza el pie izquierdo partiendo del punto medio de la cadera

$\{0\}$  hasta llegar a la planta del pie izquierdo que es designado como efector final  $\{7\}$ . Los parámetros de Denavit-Hartenberg y las dimensiones se listan en la Tabla 1 para la pierna derecha y en la Tabla 2 para la pierna izquierda.



Figura 2. Robot bípedo de 10 gdl.

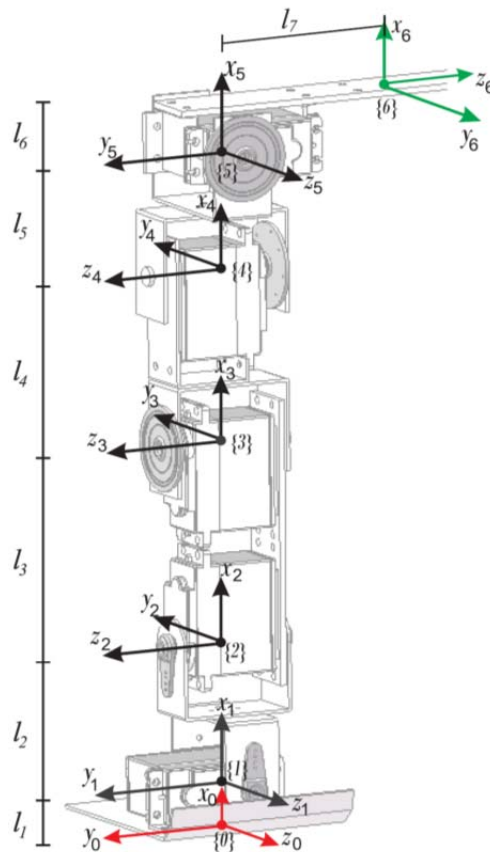


Figura 3. Ejes y dimensiones del robot bípedo, pierna derecha.

**Tabla 1:** Parámetros de Denavit-Hartenberg y dimensiones para pierna derecha.

i	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$	$l_i$ [cm]
1	0°	$l_1$	0	$\theta_1$	1.65
2	-90°	$l_2$	0	$\theta_2$	6.2
3	0°	$l_3$	0	$\theta_3$	10.5
4	0°	$l_4$	0	$\theta_4$	8.3
5	90°	$l_5$	0	$\theta_5$	6.4
6	90°	$l_6$	$l_7$	0°	2.8
7					6.45

**Tabla 2:** Parámetros de Denavit-Hartenberg y dimensiones para pierna izquierda.

i	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0°	0	$l_7$	180°
2	90°	$l_6$	0	$\theta_5$
3	-90°	$l_5$	0	$\theta_4$
4	0°	$l_4$	0	$\theta_3$
5	0°	$l_3$	0	$\theta_2$
6	90°	$l_2$	0	$\theta_1$
7	0°	$l_1$	0	0°

El modelo cinemático que especifica la posición y la pierna derecha es:  
orientación del eje {6} con respecto a {0}, en el caso de

$${}^0T_6 = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$r_{11} = c_1 c_{234} c_5 - s_1 s_5,$$

$$r_{12} = c_1 s_{234},$$

$$r_{13} = c_1 c_{234} s_5 + s_1 c_5,$$

$$r_{21} = s_1 c_{234} c_5 + c_1 s_5,$$

$$r_{22} = s_1 s_{234},$$

$$r_{23} = s_1 c_{234} s_5 - c_1 c_5,$$

$$r_{31} = -s_{234} c_5,$$

$$r_{32} = c_{234},$$

$$r_{33} = -s_{234} s_5,$$

$$p_x = c_1 c_{234} (c_5 l_6 + s_5 l_7 + l_5) - s_1 (s_5 l_6 - c_5 l_7) + c_1 c_{234} l_4 + c_1 c_2 l_3 + c_1 l_2 + l_1,$$

$$p_y = s_1 c_{234} (c_5 l_6 + s_5 l_7 + l_5) + c_1 (s_5 l_6 - c_5 l_7) + s_1 (c_2 l_4 + c_2 l_3 + l_2),$$

$$p_z = -s_{2+3+4} (c_5 l_6 + s_5 l_7 + l_5) - s_{2+3} l_4 - s_2 l_3$$

donde se considera la notación  $\sin(\theta_{i+} \theta_{j+} \theta_k) = s_{ijk}$  y  $\cos(\theta_i) = c_i$ .

De manera similar se pueden obtener las ecuaciones que describen la rotación y posición del sistema del pie izquierdo {7} con respecto al sistema de referencia {0} de cadera. Las ecuaciones del modelo cinemático permiten obtener las coordenadas del centro de masa de cada uno de los eslabones, resultando en el cálculo del centro de masa del robot bípedo y su proyección sobre el área de soporte.

#### Análisis del ciclo de marcha

En este artículo, se hace énfasis en la combinación del plano sagital con el plano frontal, considerando el centro de masa (CoM) del bípedo para evaluar la condición de marcha estática. Esta integración de trayectorias por plano resulta en movimiento en tres dimensiones (3D) de tipo semi-estático, ver Figura 4.

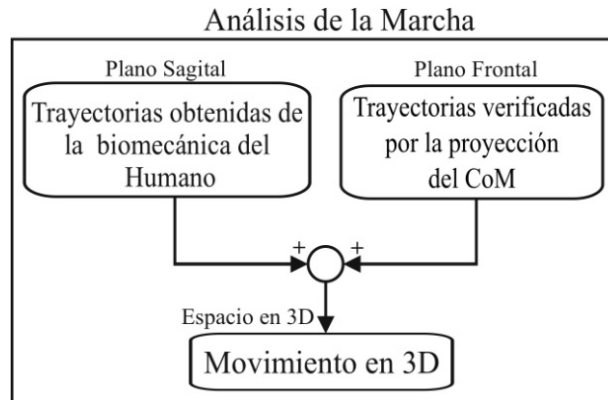


Figura 4. Análisis de la Marcha

#### Planeación de trayectorias en el plano sagital

Con el fin de imitar la locomoción bípeda del humano, se implementan trayectorias similares a las del paso normal del ser humano proyectadas sobre el plano sagital en las articulaciones del muslo (cadera) y rodilla (Perry 1992). Para ello se obtienen polinomios mediante interpolación en el sentido de mínimos cuadrados, que aproximan trayectorias de cadera y rodilla que

experimenta el ser humano durante el ciclo de la marcha. Estos polinomios son parametrizados considerando el porcentaje del periodo deseado del ciclo de marcha y se programan directamente en el microcontrolador del sistema embebido. Los polinomios obtenidos para muslo y rodilla en el plano sagital están dados por la ecuación (2)

$$\begin{aligned}
 p_{\text{muslo}} = & 1,9815 \times 10^{-15} x^{10} - 1,083 \times 10^{-12} x^9 \\
 & + 2,5137 \times 10^{-10} x^8 - 3,214 \times 10^{-8} x^7 \\
 & + 0,2461 \times 10^{-5} x^6 - 0,115 \times 10^{-3} x^5 \\
 & 0,32016 \times 10^{-2} x^4 - 0,4833 \times 10^{-1} x^3 \\
 & 0,2825 x^2 - 0,34417 x + 23,38 \\
 \\
 p_{\text{rodilla}} = & -0,866 \times 10^{-13} x^9 + 0,3667 \times 10^{-10} x^8 \\
 & -0,631 \times 10^{-8} x^7 + 0,5768 \times 10^{-6} x^6 \\
 & -0,3091 \times 10^{-4} x^5 + 0,9923 \times 10^{-3} x^4 \\
 & -0,1653 \times 10^{-1} x^3 + 0,3435 \times 10^{-1} x^2 \\
 & + 2,0139 x + 4,334
 \end{aligned} \quad (2)$$

Es importante resaltar, que en el caso de la trayectoria correspondiente al tobillo se desea que siempre se mantenga horizontal al piso por lo que se aplica la siguiente ecuación:

$$\theta_{\text{tobillo}} = -(\theta_{\text{muslo}} + \theta_{\text{rodilla}}) \quad (3)$$

Las gráficas dadas por los polinomios de la ecuación (2) se muestran en la Figura 5, siendo estas las trayectorias deseadas del análisis de la marcha para el plano sagital.

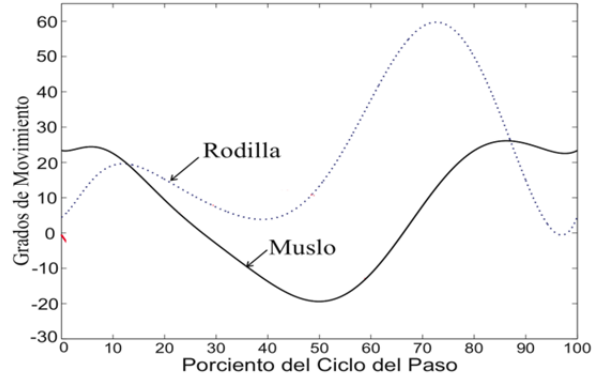


Figura 5. Trayectorias deseadas en plano sagital

#### Planeación de trayectorias en el plano frontal

El movimiento sobre el plano frontal se utiliza para el balanceo estático, de modo que la combinación del movimiento en el plano frontal con las trayectorias del plano sagital genera una marcha natural y estable. El balance estático o marcha estática hace referencia a un sistema que permanece equilibrado manteniendo su centro de masa equivalente (CoM) dentro del polígono

formado por ambos pies en la FSD y dentro de la planta del pie de soporte durante la FSS. Para la verificación de la marcha estática y prevenir que el mecanismo caiga se consideran los  $N = 11$  eslabones rígidos que conforman el robot (Figura 6) y se determinan las coordenadas del CoM global mediante la ecuación (4). Las coordenadas  $(p_x, p_y)$  del CoM corresponden a la proyección del mismo sobre el plano de soporte.

$$M = \sum_{j=1}^N m_j ,$$

$$c = \sum_{j=1}^N m_j c_j / M ,$$
(4)

En el cálculo del CoM se tiene que  $m_j$  es la masa de cada eslabón y  $c_j$  es el CoM de cada eslabón referenciado con respecto al sistema base, como se

muestra en la Figura 6;  $M$  es la masa equivalente del robot y  $c = [p_x, p_y, p_z]^T$  es el CoM resultante.

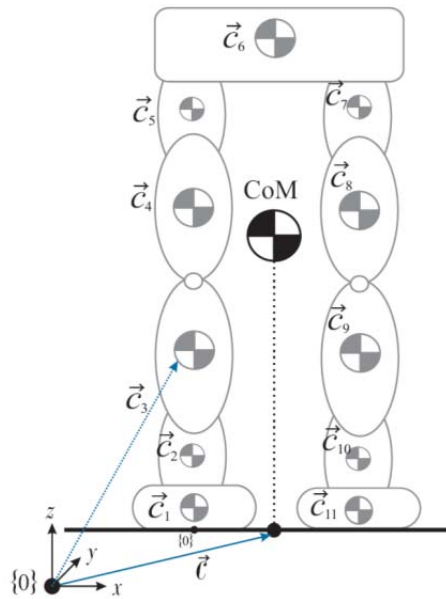


Figura 6. CoM del robot bípedo

La planificación de marcha en el plano frontal se realiza proponiendo trayectorias en cadera y tobillo a partir del comportamiento de la cadera del humano durante el ciclo de la marcha (Vaughan 1992). De forma similar al plano sagital, se obtienen coeficientes de una

aproximación polinomial que definen las trayectorias deseadas. En el caso del plano frontal, se aproximó polinomialmente la trayectoria de cadera, obteniendo la ecuación paramétrica (5)

$$p(k)_{\text{cadera-frontal}} = 9.94 \times 10^{-5}k^3 - 1.61 \times 10^{-2}k^2 + 0.613k + 0.360 \quad (5)$$

La Figura 7 muestra el comportamiento de la articulación de cadera en el plano frontal en relación al

porcentaje del ciclo de marcha.

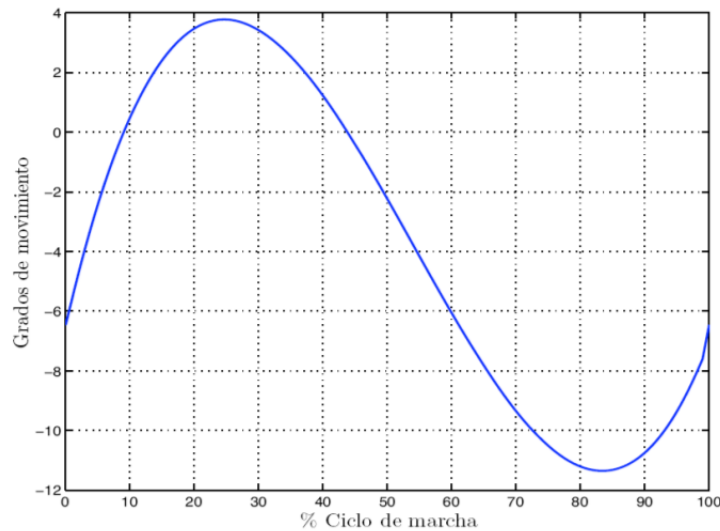


Figura 7. Trayectoria deseada en cadera-frontal  $p(k)_{\text{cadera-frontal}}$ .

Para la trayectoria del tobillo se emplea el polinomio obtenido en la ecuación (5) y un factor de escalamiento  $fe = -1.5$ , el cual fue ajustado iterativamente mediante el criterio de marcha estática.

### PLATAFORMA EXPERIMENTAL

En esta sección se describe la plataforma experimental desarrollada como banco de pruebas de las trayectorias propuestas para marcha semi-estática. El diseño e implementación del robot bípedo sigue una metodología mecatrónica (Ullman, 1994), y las diferentes etapas del desarrollo fueron validadas empleando herramientas CAD/CAE, como son Solidworks® y CAMworks®.

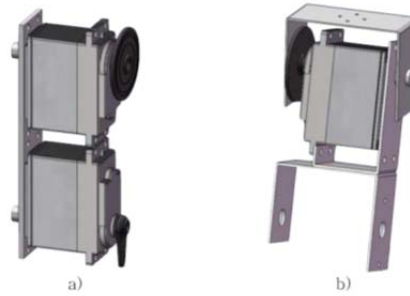
### Diseño Mecánico

La estructura mecánica se realizó empleando

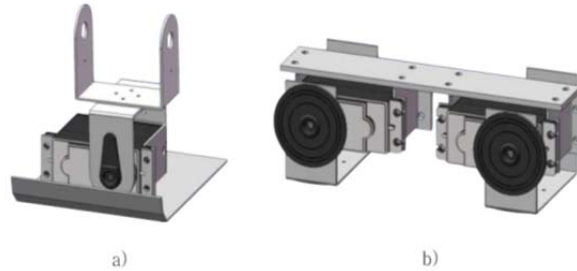
Solidworks®. Los eslabones se basan en proporciones de las extremidades inferiores humanas; resultando en un espacio de trabajo similar pero escalado al del humano, debido a que se emulan los principales movimientos de la biomecánica del humano.

Los 11 eslabones están contruidos de aluminio 6063-T5, haciendo al robot ligero y de bajo costo. El diseño del robot bípedo cuenta con 10 gdl. Cada pierna tiene 3 gdl que brindan movimientos angulares en el plano sagital (muslo (cadera), rodilla y tobillo) y 2 gdl que ofrecen movimiento angular sobre el plano frontal (cadera, tobillo), ver Figuras 8 y 9. En las figuras 2 y 3 se puede observar el diseño e integración del robot bípedo.





**Figura 8.** Movimiento plano sagital: a) Tibia-Perone (rodilla y tobillo), b) Femur (muslo).

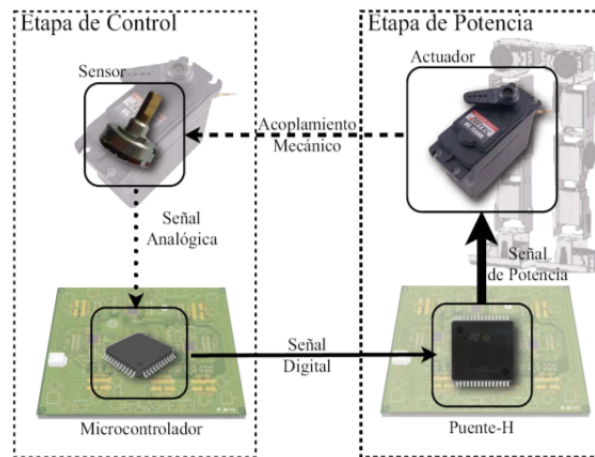


**Figura 9.** Movimiento plano frontal: a) Tobillo, b) Cadera.

### Diseño electrónico

El diseño electrónico es parte primordial del funcionamiento del robot bípedo ya que concentra una gran cantidad de tareas como son: adquisición de datos, procesamiento de señales, cálculo de la ley de control, amplificación de señales, suministro de potencia, etc. La

electrónica está dividida en una etapa de control y una etapa de potencia, ver Figura 10. Cada etapa está conformada en su mayoría por dispositivos electrónicos de montaje superficial para obtener mayor eficiencia en el consumo de energía, reducir el tamaño y el peso.



**Figura 10.** Diagrama esquemático de la etapa electrónica.

En la etapa de potencia se utilizan motores de la marca Hitec, modelos HS-805HB en las articulaciones de cadera y HS-755HB en las articulaciones restantes, esto debido a la carga que mueve cada motor. Los motores cuentan con un tren de engranes reductor y potenciómetros de 5K $\Omega$  para medición del ángulo de rotación entre 0° y 190°. Los motores son originalmente servo-controlados, por lo que para fines de contar con una arquitectura abierta, fueron modificados para

funcionar con una señal PWM de 10 KHz, y circuitos puente-H modelo VNH2SP30 de ST Microelectronics. Los puente-H sirven como Buffer entre las señales provenientes de la etapa de control y señales de potencia.

### Controlador embebido distribuido

Para la implementación de la ley de control en cada articulación se emplean 4 microcontroladores

dsPIC30F4011 de 16 bits identificados como  $\mu$ C-A,  $\mu$ C-B,  $\mu$ C-C y  $\mu$ C-D. El microcontrolador A ( $\mu$ C-A) se dedica a gobernar los movimientos en el plano sagital de la extremidad derecha del robot (tobillo, rodilla y muslo), el  $\mu$ C-C controla las articulaciones del plano

sagital de la pierna izquierda. En los dos microcontroladores restantes se controlan las articulaciones de cadera y tobillo que producen movimiento en el plano frontal, ver Figura 11.

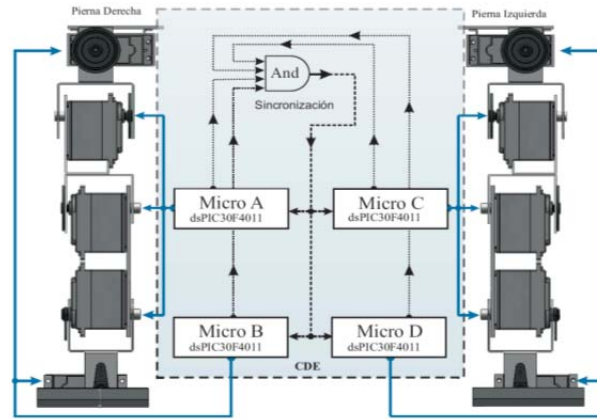


Figura 11. Esquema del Control Distribuido

Debido a la diferencia en el tiempo de cálculo en cada microcontrolador, existe un desfase al termino del ciclo de aproximadamente 40 [ms], lo cual se resuelve programando una señal de entrada y salida para cada principio y fin del ciclo en cada microcontrolador. Estas señales son procesadas por una compuerta lógica AND la cual regresa un bit de inicio que comparten los 4 microcontroladores obteniendo de esta manera una sincronización en el comienzo de cada ciclo. Los convertidores analógico digital ADC de 10 bits de los microcontroladores trabajan a una frecuencia de 8 KHz. El control distribuido se encuentra colocado en la parte superior del robot requiriendo solo alimentación para iniciar la marcha programada en lenguaje C.

#### Controlador PI

Las articulaciones del robot son actuadas por motores de CD los cuales se alimentan a 6.0 volts proporcionando un par máximo = 13,2 [kg.cm] con reductor de velocidad. El proceso de locomoción requiere del seguimiento de trayectorias en las articulaciones de la estructura mecánica, por lo que se emplea un controlador PI. La implementación de esta ley de control sobre una plataforma digital (microcontrolador) se realiza en tiempo discreto, sin embargo, se asume que el tiempo en el que se calculan los valores es lo suficientemente rápido respecto a la frecuencia natural del sistema que se está controlando, por lo que el controlador se supone válido. El controlador PI en función de transferencia es:

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s}, \quad (2)$$

dentro del microcontrolador se emplea una aproximación rectangular de integración, de manera que

$$\frac{Y(z)}{E(z)} = \frac{\alpha + \beta z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (3)$$

con los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  dados por

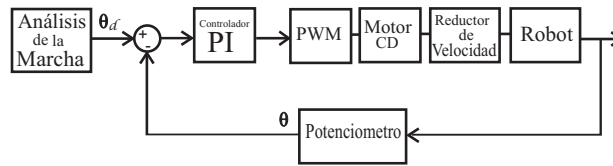
$$\alpha = K_{pd} + \frac{K_{Id}T}{2}$$

$$\beta = \frac{K_{Id}T}{2} - K_{pd}$$

donde  $K_{pd}$  y  $K_{Id}$  son las ganancias proporcional e integral en tiempo discreto y  $T$  es el periodo igual a 125 $\mu$  segundos.

La trayectoria deseada en cada articulación está definida en el análisis de la marcha, por lo que en cada instante de tiempo discreto se conoce la posición deseada  $\theta_d$  y se obtiene la señal real  $\theta$  para realizar el cálculo del error  $e = \theta_d - \theta$ . La posición real se consigue por medio de un potenciómetro acoplado al reductor de velocidad. Una

modulación por ancho de pulso (PWM) proporcional a la señal del controlador PI es enviada al puente-H que controla la potencia del motor de CD. El eje del motor se encuentra acoplado a un reductor de velocidad, el cual proporciona un par mayor en la articulación del robot. El lazo de control se muestra en la figura 12.

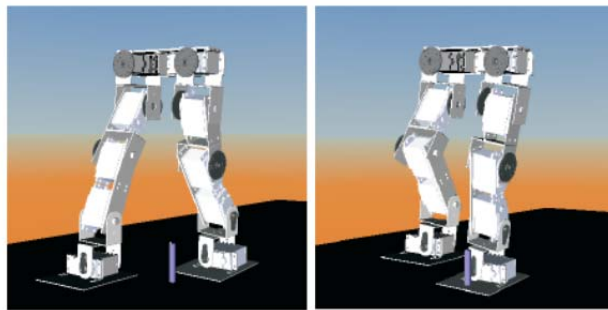


**Figura 12.** Diagrama a Bloques del controlador

## SIMULACIONES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

La validación de las trayectorias en el ciclo de la marcha semi-estática se realiza mediante simulaciones numéricas para ello se emplea Simulink y el toolbox de

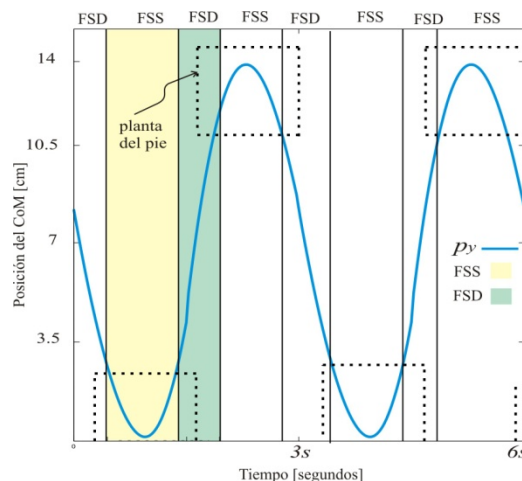
Realidad Virtual de Matlab® en el que se inyectan las trayectorias descritas sobre el plano sagital y frontal. El CoM del robot se proyecta sobre el piso por medio de un cilindro para su fácil localización durante el ciclo de marcha, Figura 13.



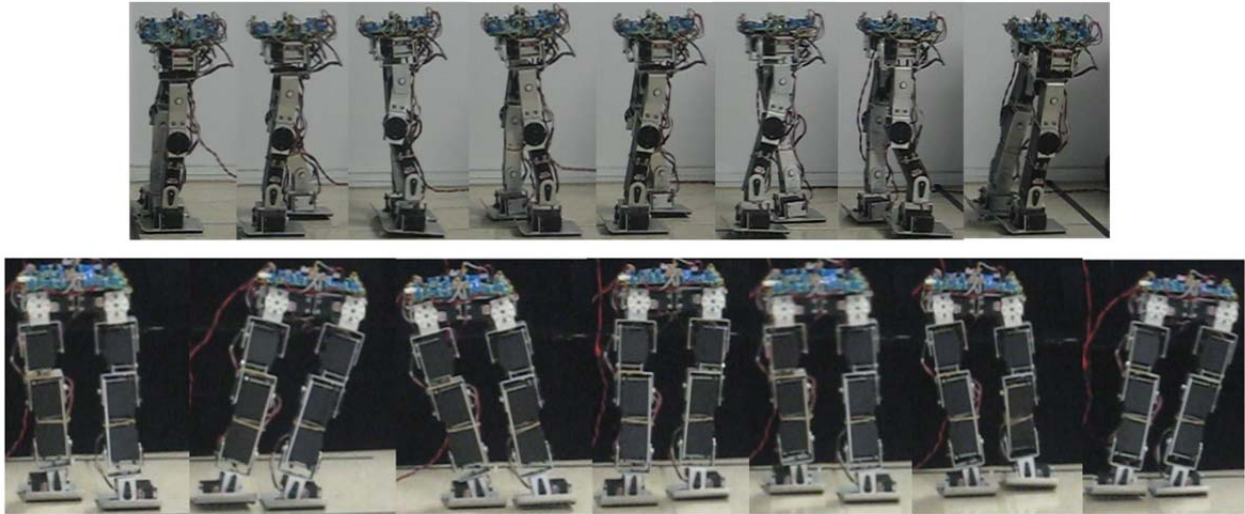
**Figura 13.** Proyección del CoM en el plano de apoyo, FSD (izquierda) y FSS (derecha).

En la Figura 14 se presenta la evolución de la proyección del CoM en el plano de soporte durante todo un ciclo de la marcha. Se observa que el CoM se encuentra dentro del área de soporte en ambas fases (FSS y FSD) durante el ciclo del paso, por lo que se

concluye que las trayectorias propuestas cumplen con el criterio de estabilidad estática durante la marcha. En la Figura 15 se presenta una secuencia de fotografías de la prueba experimental, mostrando los planos sagital y frontal durante la marcha del robot bípedo.



**Figura 14.** Proyección del CoM durante un ciclo de marcha (paso).



**Figura 15.** Marcha semi-estática del Robot Bípedo, plano sagital (superior) y frontal (inferior).

## CONCLUSIONES

A fin de lograr un movimiento natural en robots bípedos, en este artículo se presenta la integración de una plataforma experimental en la que se propone la implementación de trayectorias obtenidas de la biomecánica del humano. Se debe considerar que el diseño y las dimensiones de las extremidades del robot deben ser proporcionales a las medidas antropométricas para tomar en cuenta este enfoque. Las trayectorias obtenidas son válidas para superficies planas y

movimientos lentos (marcha estática), debido a que no se tiene retroalimentación alguna de las fuerzas de reacción en la planta del pie y efectos dinámicos. El trabajo a futuro del robot bípedo es verificar mediante el criterio del punto de momento cero (ZMP) el balanceo dinámico. El objetivo de la plataforma experimental es plantear nuevos esquemas de generación de trayectoria y control para conseguir un movimiento natural, es decir, similar al del humano y garantizar en todo tiempo su balanceo estable.

## AGRADECIMIENTO

Se agradece al CONACYT por apoyo mediante los proyectos de investigación 133527 y 084060.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Amerongen van, Job (2003) *Mechatronic design*. Mechatronics, 13 (10). pp. 1045-1066.
- Christopher L. V., Brian L. D., O'Connor J. C., (1992) *Dynamics of Human Gait*. 2a Edición. Kiboho Publishers.
- Craig J. J., (1989): Introduction to robotics: mechanics and control. Addison-Wesey Longman.
- Gienger M., Löffler K., Pfeiffer F., (2001): *Towards the design of a biped jogging robot*, IEEE International Conference on Robotics & Automation. pag. 4140-4145.
- Honda Motor Co. (2011) ASIMO. <http://world.honda.com/ASIMO/>
- Kajita S., Morisawa M., Harada K., Kaneko K., Kanehiro F., Fujiwara K., y Hirukawa H., (2006): *Biped Walking Pattern Generator allowing Auxiliary ZMP Control*. Internacional Conference on Intelligent Robots and Systems 2993-2999.
- Kaneko K., Kanehiro F., Kajita S., Hirukawa H., Kawasaki T., Hirata M., Akachi K., y Isozumi T., (2004):

*Humanoid Robot HRP-2*. International Conference on Robotics & Automation 1083-1090.

Kato I., Ohteru S., Kobayashi H., Shirai K., Uchiyama A., (1973): Information power machine with senses and limbs. In Proc. CISM-IFTOMM Symp. on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Udine, Italy, pag. 12 - 24.

Kawada Industries Inc. (2010) HRP. <http://global.kawada.jp/mechatronics/index.html>

Park I.W., Kim J.Y., Lee J., Oh J.H., (2006): *Online free walking trajectory generation for biped humanoid robot KR-3(HUBO)*, IEEE International Conference on Robotics & Automation. pag. 1231-1236.

Perry J., (1992): *Gait Analysis - Normal and Pathological Function*. SLACK. USA.

Sony Corporation (2004). QRIO. <http://www.sonyaibo.net/aboutqrio.htm>

Vukobratović M., y Borovac B., (2008): *Dynamic Balance Concept and the Maintenance of the Dynamic balance in Humanoid Robotics*. Intelligent Systems and Informatics. pag. 1 - 11.

Zonfrilli F., Wollherr D., Nakamura Y., (2005): *Walking control of the humanoid UT-Theta*. Advanced Robotics.

---

Este documento debe citarse como:

Rodríguez-Ángeles, A., Cruz-Villar, C. A., Vite-Téllez, D. A. (2011). **Generación de trayectorias para marcha semi-estática de un robot bípedo: diseño y pruebas experimentales**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 15-2, pp 57-68, ISSN: 1665-529-X.