

**MODELING OF BIPED WITH AN EXOSKELETON ROBOTIC MECHANISM****MODELADO DE UN BIPEDO JUNTO A UN MECANISMO ROBÓTICO  
EXOESQUELETO****MSc. Cristian Méndez Rodríguez, PhD(c). José Armando Ordoñez Córdoba**

**Fundación Universitaria de Popayán**, Popayán, Cauca, Colombia.  
Tel.: (+572) - 820 6449, Fax: (+572) - 824 4140.  
E-mail: {cristian.mendez, armando.ordonez}@docente.fup.edu.co.

**Abstract:** In this paper, at first, a cyclical walking is set for a flat biped robot up on a horizontal surface. The objective of this study is to provide a supporting mechanism for the walking of a biped. The most interesting aspect of this research is to develop the modeling for the entire: biped (human) + exoskeleton robotic device. It will also be interesting to study, if the use of this walking aid mechanism reduces the effort that the biped must do for this type of movement.

**Keywords:** Exoskeleton, biped, energy criterion, trajectory optimization.

**Resumen:** En este artículo, inicialmente, se establece una marcha cíclica para un robot bípedo plano sobre una superficie horizontal. El objetivo principal es proporcionar un mecanismo de soporte a la marcha de un bípedo. El aspecto más interesante que se expone en este artículo, es el desarrollo del modelado para el conjunto: bípedo (humano) + dispositivo robótico exoesqueleto. También será interesante estudiar si el uso de este mecanismo de ayuda a la marcha reduce el esfuerzo que el bípedo debe hacer para este tipo de movimiento.

**Palabras clave:** Exoesqueleto, bípedo, criterio de energía, optimización de trayectorias.

**1. INTRODUCCIÓN**

Un exoesqueleto es definido como un sistema biomecánico en el cual el mecanismo es adaptado a la estructura física del cuerpo humano, con la inteligencia y la flexibilidad necesaria para ejecutar una tarea ordenada por la persona.

Los últimos estudios en robótica bípeda se concentran sobre el control de la estabilidad, ahorro de energía y la innovación conceptual de los cuerpos de estos prototipos. Un sólo objetivo resulta de todos estos estudios: Intentar reproducir la marcha humana lo más fielmente posible (Suleiman *et al.*, 2008). El objetivo de este trabajo es proponer un mecanismo de ayuda a la marcha de un bípedo. El aspecto más interesante es realizar el

modelado para el conjunto: bípedo (humano) + dispositivo robótico exoesqueleto. Las medidas del exoesqueleto fueron establecidas gracias al estudio de otras estructuras robóticas similares como Lokomat (Hocoma, 2013), HAL (Cyberdyne, 2013), GBO (GBO and *University of Delaware*, 2013).

En la sección 2, se estudiara la generación de una marcha en fase de simple apoyo pie plano + impacto pie plano para un bípedo, se propone un problema de optimización paramétrico para generar vectores de posiciones, velocidades y aceleraciones articulares que describan un movimiento cíclico de marcha. Una vez se genera esta trayectoria, se hace posible resolver los dos bucles cerrados formados de la unión del bípedo y el exoesqueleto.

A continuación se pueden calcular las variables articulares del mecanismo de ayuda a la marcha y finalmente, con estos datos obtenidos se calcula el modelo dinámico de toda la estructura; Este es el trabajo que se describe en la sección 3. La sección 4 muestra los resultados de simulación. La sección 5 presenta las conclusiones y perspectivas.

## 2. GENERACIÓN DE UNA MARCHA SIMPLE SOPORTE (SS) PIE PLANO + IMPACTO PIE PLANO PARA UN BÍPEDO

La marcha humana es un sistema de locomoción que consta de una serie de movimientos rítmicos sucesivos y alternantes de las extremidades inferiores, las cuales interactúan con una superficie de desplazamiento. El estudio de marcha de bípedos es estudiada en los trabajos (Gómez *et al.*, 2011; López *et al.*, 2013).

El modelo en 2D del bípedo es definido a partir de las características físicas del modelo de HANAVAN que caracteriza al ser humano (Alfayad, 2009). Los parámetros físicos del bípedo se muestran en la tabla 1 (Anexos).

Para generar una marcha cíclica compuesta de una fase de simple apoyo pie plano más impacto pie plano, se establecen las coordenadas generalizadas del bípedo (ángulos absolutos definidos con respecto al eje vertical). Ver fig. 1

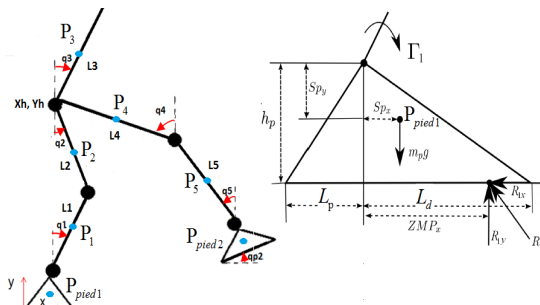


Fig. 1. Configuración del bípedo en plano sagital

### 2.1 Modelo dinámico en fase de simple apoyo

El modelo dinámico del robot puede describirse con la ayuda de las coordenadas  $q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_{p2}]$ . Así, el modelo dinámico del bípedo en fase de simple apoyo puede escribirse (ecuación 1):

$$A(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) = BG \quad (1)$$

$G = [G_1 \ G_2 \ \dots \ G_n]^T$  es el vector de torques articulares,  $A(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es la matriz de inercia,  $C(q,\dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  representa las fuerzas de Coriolis y las fuerzas centrífugas,  $G(q) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  es el vector de efectos de la gravedad y  $B \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es la matriz de accionamiento. En este caso  $n=6$ , el número de articulaciones del bípedo.

### 2.2 Modelo de impacto

En el transcurso de la marcha bípeda, el impacto se produce al final de una fase de simple apoyo cuando la pierna que está desplazándose toca el suelo. Dos casos se pueden presentar: el primero es que el pie de apoyo despegue luego del impacto y el segundo es que los dos pies permanezcan en el suelo.

Se consideró el primer caso: el pie de apoyo despegue luego del impacto, es decir que la fase de doble apoyo se supone instantánea. En esta situación, la componente vertical de la velocidad del pie que despegue justo luego del impacto debe ser positiva. La fuerza de reacción del suelo sobre la pierna que despegue debe ser nula  $R_1=0$ . Y la componente vertical de la fuerza de reacción del suelo sobre el pie de apoyo justo luego del impacto debe ser positiva (Aoustin y Formal'sky, 2008).

El modelo de impacto puede escribirse como se muestra en la ecuación 2.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}^+ \\ R_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -J_2^T \\ J_2 & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A\dot{X}^- \\ 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\dot{X}^-$  y  $\dot{X}^+$  son los vectores de las velocidades justo antes del impacto y justo después del impacto respectivamente;  $J_2$  es la matriz jacobiana para el pie 2 y  $R_2$  representa las fuerzas de reacción impulsivas del suelo sobre el pie de apoyo al momento del impacto.

### 2.3 Definición de la marcha cíclica

Lo más importante es resaltar que se trata de un movimiento cíclico, es decir que todos los pasos son simétricos. Cada paso es asociado a un balanceo de uno de los dos pies.

Para la definición de este movimiento, es necesario fijar las posiciones y velocidades articulares al inicio al intermedio y al final del paso como se

muestra en la fig. 2. Sabiendo que el bípedo dispone de 6 grados de libertad, entonces es necesario determinar 30 coeficientes o parámetros para describir el movimiento cíclico

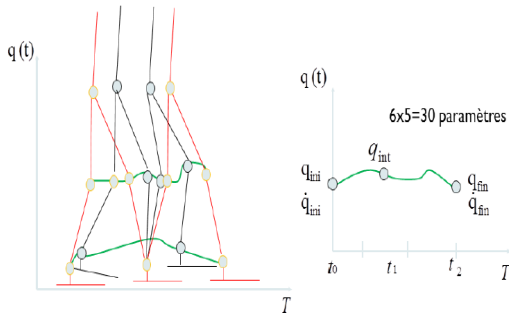


Fig. 2. Definición de la marcha cíclica

## 2.4 Optimización de trayectorias

**2.4.1 Variables de optimización:** los 30 parámetros que se necesitan para describir la trayectoria, pueden ser reducidos a 16 como se indica a continuación:

- i. El carácter cíclico de la marcha permite determinar las posiciones articulares al comienzo del paso en función de las posiciones articulares al final del paso.
- ii. Con el fin de garantizar que el bípedo este en doble apoyo (instantáneo), se calculan las variables articulares  $q_1, q_2, q_4, q_5$  con la ayuda del modelo geométrico inverso, dónde es necesario conocer la posición de la cadera al final del paso  $(xh, yh)$ , la longitud del paso  $d$ , y la orientación del tronco al final del paso  $q_3(T)$ . Así establecemos las posiciones articulares al fin del movimiento.

Finalmente, son necesarias 16 variables de optimización para generar una marcha simple apoyo pie plano más impacto pie plano:

- La posición de la cadera al fin del paso  $(xh, yh)$ , la longitud del paso  $d$ , y la orientación del tronco al fin del paso  $q_3(T)$ : 4 parámetros.
- Las velocidades articulares al fin del paso: 6 parámetros.
- Las posiciones intermedias: 6 parámetros.

**2.4.2 Criterio de optimización:** El objetivo es minimizar el criterio energético  $C_T$  descrito en la ecuación 3.

$$C_T = \frac{1}{d} \int_0^T \Gamma(t)^T \Gamma(t) dt \quad (3)$$

Dónde  $d$  es la longitud del paso,  $T$  la duración del paso y  $\Gamma$  el conjunto de torques articulares. El objetivo es minimizar el criterio de energía escogido encontrando los valores óptimos de las variables de optimización ya definidas, para esto se usa una metodología de optimización paramétrica bajo restricciones no lineales; este tipo de problemas puede resolverse con la ayuda de un algoritmo SQP (*Sequential Quadratic Programming*), en este caso se usará la función en Matlab® *fmincon* (Barclay et al., 1997).

**2.4.3 Restricciones de optimización:** Para que las trayectorias obtenidas sean realizables, es necesario tener en cuenta las siguientes restricciones:

1) Restricciones de contacto con el suelo:

- Restricciones de *no despegue* del pie de apoyo durante la fase de simple apoyo: la fuerza de reacción del suelo sobre el pie de apoyo sea siempre positiva (ecuación 4).

$$R_{1y} > 0 \quad (4)$$

- Restricciones de *no deslizamiento* (ecu. 5).

$$mR_{1y} \geq |R_{1x}| \quad (5)$$

Dónde  $m$  representa el coeficiente de frotamiento entre el pie y el suelo.

- Finalmente, para asegurar la validación del modelo de impacto, es necesario verificar que las *velocidades del pie en movimiento* sean positivas (ecuación 6).

$$\begin{cases} V_{talon} \geq 0 \\ V_{punta\_pie} \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

- 2) Restricciones tecnológicas: Son importantes para garantizar que las trayectorias de marcha generadas respeten las características técnicas del robot. Para esto es importante limitar los valores de torques, velocidades máximas y bornear las posiciones articulares como se indica en la ecuación 7 respectivamente.

$$\begin{aligned} |\Gamma_i| - \Gamma_{i,max} &\leq 0, \quad \text{para } i=1,\dots,n \\ |\dot{q}_i| - \dot{q}_{i,max} &\leq 0, \quad \text{para } i=1,\dots,n \\ q_{i,min} &\leq q_i \leq q_{i,max}, \quad \text{para } i=1,\dots,n \end{aligned} \quad (7)$$

De esta manera, se pueden generar movimientos de marcha cíclica óptima para un movimiento de simple apoyo pie plano más impacto pie plano, compuesto de fases de simple apoyo separadas por impactos impulsivos (ver fig. 3).

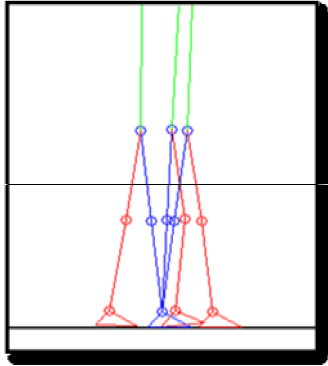


Fig. 3. Movimiento simple soporte pie plano + impacto pie plano. Velocidad 0.5 m/s.

### 3. MODELADO Y SIMULACIÓN DEL BÍPEDO Y EL EXOSQUELETO

Ya calculadas las variables articulares del bípedo (sección anterior), el objetivo ahora es calcular las configuraciones articulares del exoesqueleto. Para resolver este problema se deben resolver los dos bucles cerrados formados por la unión entre el bípedo y el exoesqueleto como se indica en la fig. 4. Los parámetros físicos del bípedo y del exoesqueleto son mostrados en la tabla 1 (Anexos).

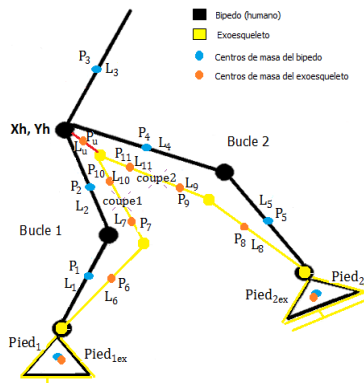


Fig. 4 Estructura robótica: Bípedo y exoesqueleto

### 3.1 Modelo dinámico en fase de simple apoyo

Se establecen las coordenadas generalizadas de toda la estructura robótica (ángulos absolutos definidos con respecto al eje vertical).

Numerosos métodos han sido propuestos para modelar robots con bucles cerrados; para este estudio se utilizará el método propuesto por Khalil-Kleinfinger (Kleinfinger y Khalil), basado en la utilización del modelo dinámico del sistema arborescente equivalente y sobre el cálculo de la matriz Jacobiana (modelo cinemático) de la estructura arborescente. Así, el modelo dinámico se puede escribir como la ecuación (8), esta ecuación es válida si se garantiza que el pie de apoyo permanece fijo, es decir no hay ni despegue, ni deslizamiento ni rotación del pie de apoyo.

$$A(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) = BG + J_{bucle1}^T F_1 + J_{bucle2}^T F_2 \quad (8)$$

Dónde  $G = [G_1 \ G_2 \ \dots \ G_n]^T$  es el vector de torques articulares,  $A(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es la matriz de inercia,  $C(q,\dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  representa las fuerzas de coriolis y centrífugas,  $G(q) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  es el vector de efectos de la gravedad y  $B \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es la matriz de accionamiento. En este caso,  $n=12$ , el número de coordenadas generalizadas. Y las matrices  $J_{bucle1}^T$  y  $J_{bucle2}^T$  son las matrices Jacobianas de los bucles 1 y 2 respectivamente.  $F_1$  y  $F_2 \in \mathbb{R}^3$  son las fuerzas y los momentos necesarios para satisfacer las restricciones cinemáticas que aseguren el cierre de los bucles. En nuestro caso las incógnitas son  $F_1$ ,  $F_2$  y  $\Gamma$ .

### 3.2 Solución de los bucles cerrados del robot

Como se puede observar en la fig.5 la estructura robótica y el bípedo forman dos bucles cerrados, que se han denominado bucle 1 y bucle 2.

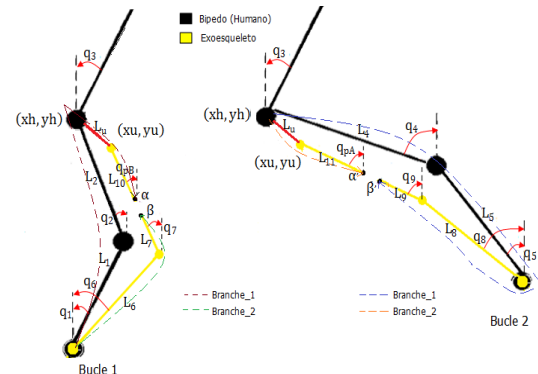


Fig. 5. Bucles cerrados y restricciones

### 3.2.1 Cálculo de las configuraciones articulares del exoesqueleto

La estructura (bípido + exoesqueleto) está compuesta por dos bucles idénticos. Del bucle 1 se conocen las variables articulares  $q_1$  y  $q_2$ ; así, es posible calcular las posiciones de la cadera del bípido ( $x_h, y_h$ ), y se establece que la posición de la cadera del exoesqueleto es:  $x_u=x_h$  y  $y_u=y_h-L_u$ . Conocida esta posición cartesiana, es posible calcular el modelo geométrico inverso del bucle 1 del exoesqueleto (MGI robot scara 2R). Es decir que la solución de  $q_6$  y  $q_7$  dependerá de las posiciones articulares  $q_1$  y  $q_2$  (ecuación 9):

$$[q_6, q_7] = \text{MGI}(q_1, q_2, \text{parámetros\_geometricos}) \quad (9)$$

Ya que los dos bucles son idénticos, entonces:

$$[q_8, q_9] = \text{MGI}(q_4, q_5, \text{parámetros\_geometricos}) \quad (10)$$

### 3.2.2 Restricciones geométricas de los bucles

**a. Bucle 1:** Con el fin de asegurar el cierre del bucle, es necesario que la posición y la orientación del punto **a** sean igual al punto **b** (Ver fig. 5). Estas ecuaciones se pueden escribir:

$$\begin{cases} L_1 \sin(q_1) + L_2 \sin(q_2) - L_{10} \sin(q_{pB}) = L_6 \sin(q_6) + L_7 \sin(q_7) \\ L_1 \cos(q_1) + L_2 \cos(q_2) - L_u - L_{10} \sin(q_{pB}) = L_6 \cos(q_6) + L_7 \cos(q_7) \\ q_{pB} = q_7 \end{cases} \quad (11)$$

**b. Bucle 2:** la posición y la orientación del punto **a'** debe ser igual al del punto **b'** (Ver fig.5) para garantizar el cierre del bucle, como se indica en la ecuación (19).

$$\begin{cases} -L_4 \sin(q_4) - L_5 \sin(q_5) + L_8 \sin(q_8) + L_9 \sin(q_9) = -L_{11} \sin(q_{pA}) \\ -L_4 \cos(q_4) - L_5 \cos(q_5) + L_8 \cos(q_8) + L_9 \cos(q_9) = -L_u - L_{11} \cos(q_{pA}) \\ q_9 = q_{pA} \end{cases} \quad (12)$$

Para el cálculo de las velocidades articulares del exoesqueleto, hacemos uso de las ecuaciones de restricciones cinemáticas del bucle 1 y del bucle 2, las cuales se obtienen de la derivación de las ecuaciones de restricciones geométricas, (11) y (12) respectivamente.

Así calculado el modelo cinemático de primer orden se pueden definir las velocidades articulares del exoesqueleto ( $\dot{q}_6, \dot{q}_7, \dot{q}_{pB}, \dot{q}_8, \dot{q}_9, \dot{q}_{pA}$ ) en términos de las variables del bípido ( $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_4, \dot{q}_5$ ).

De igual manera, para el cálculo de las aceleraciones articulares del exoesqueleto hacemos uso del modelo cinemático de segundo orden, lo que nos permite calcular las aceleraciones articulares del exoesqueleto en función de las aceleraciones del bípido que ya son conocidas.

## 4. SIMULACIONES Y RESULTADOS

La fig. 6 muestra la secuencia de imágenes del bípido con el exoesqueleto efectuando el desplazamiento de un paso (marcha simple soporte pie plano + impacto pie plano, para una velocidad de marcha de 0.5 m/s).

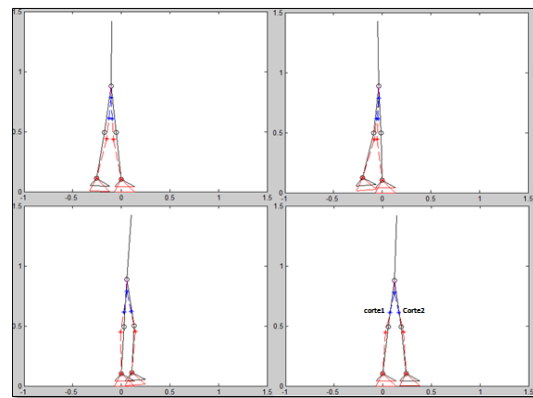


Fig. 6. Secuencia de imágenes bípido con exoesqueleto

Los resultados obtenidos son satisfactorios, ya que las variables calculadas para el exoesqueleto son ideales para efectuar la trayectoria requerida. Además de asegurar el cierre de los dos bucles en todo instante de tiempo.

Retomando la ecuación (8) que representa el modelo dinámico del conjunto: bípido más exoesqueleto, se puede observar que las incógnitas del sistema son los torques articulares  $G$  y las fuerzas  $F_1$  y  $F_2$  que garantizan el cierre de los bucles, en consecuencia, la solución del modelo dinámico puede ser escrita como se indica en la ecuación (13).

$$\begin{matrix} \underline{A(q)}\ddot{q} & + & \underline{C(q, \dot{q})}\dot{q} & + & \underline{G(q)} & = \\ (12 \times 1) & & (12 \times 1) & & (12 \times 1) & \\ \left[ \begin{matrix} B & J_{\text{bucle1}}^T & J_{\text{bucle2}}^T \end{matrix} \right] & & \left[ \begin{matrix} G \\ F_1 \\ F_2 \end{matrix} \right] & & & (13) \\ (12 \times 18) & & (18 \times 1) & & & \end{matrix}$$

Este es un sistema de ecuaciones no lineales con 12 igualdades escalares, 12 torques desconocidos y 6



fuerzas de restricción también desconocidas. Es decir, hay más incógnitas que ecuaciones. Para resolver este problema se propuso un problema de optimización; Dónde las variables de optimización serán  $F_1$  y  $F_2 \in R^3$  ( $[F_x \ F_y \ m_z]^T$ ) a cada instante de tiempo. El criterio de optimización es el mismo descrito en la ecuación (3) y las restricciones de optimización se definen a partir de las ecuaciones detalladas en la sección anterior (restricciones de contacto con el suelo y restricciones tecnológicas).

#### 4.1 Test de simulación

Los resultados obtenidos son satisfactorios como lo indica la fig. 7. En ella se muestra la comparación entre los torques articulares del bípido cuando este porta el exoesqueleto y cuando no lo lleva consigo.

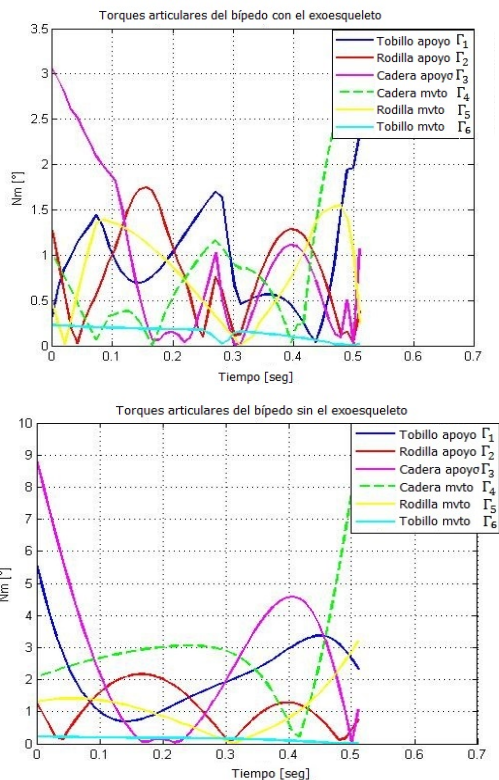


Fig. 7. Torques articulares del bípido con y sin exoesqueleto.

Finalmente en la fig. 8 se observa la diferencia (error) entre los torques articulares del bípido sin exoesqueleto y los torques articulares del bípido con el mecanismo de ayuda a la marcha.

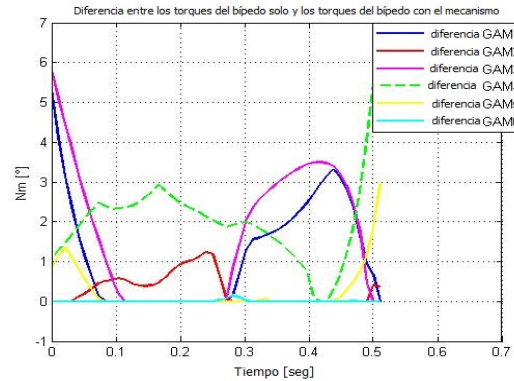


Fig. 8. Diferencia de Torques del bípido solo y con el exoesqueleto.

Los resultados son los esperados, ya que los esfuerzos efectuados por el bípido cuando el utiliza el exoesqueleto son menores que cuando el efectúa los movimientos por sí solo.

## 5. CONCLUSIONES

El aporte más interesante de esta investigación es mostrar el modelado del conjunto bípido más exoesqueleto. Para el desarrollo de este trabajo fue necesario inicialmente analizar estructuras de exoesqueletos ya existentes, realizar el estudio y la generación de movimiento de marcha para el bípido, y finalmente resolver el modelo dinámico de toda la estructura (bípido y exoesqueleto).

Con los test de simulación realizados, se puede constatar que el uso del mecanismo de ayuda a la marcha propuesto permite reducir los esfuerzos que debe hacer una persona para realizar una marcha de tipo simple apoyo pie plano más impacto pie plano.

Como perspectiva, sería pertinente realizar un estudio detallado de generación de trayectorias diferentes.

## REFERENCIAS

- Alfayad, S. (2009). *Robot humanoïde HYDROiD: Actionnement, structure cinématique et stratégie de contrôle*, Tesis de Doctorado, Université de Versailles Saint Quentin, Paris, Francia.
- Aoustin, Y. and Formal'sky, A. (2008). "On optimal swinging of the biped arms". International Conference on Intelligent Robots IROS, pp. 2922-2927.

- Barclay, A.; Gill, P. E. and Rosen J. B. (1997). "Sqp methods and their application to numerical optimal control", Technical Report NA 97-3, Department of Mathematics, University of California, San Diego, USA.
- Cyberdyne. (2013). *Robot suit Hal*. <http://www.cyberdyne.jp/english/robotsuithal/index.html>. (10 de Junio de 2013).
- GBO and University of Delaware. (2013). *gbo system*. [http://www.isa.umh.es/vr2/euron08/doc/Sunil%20Agrawal/Exo\\_pres\\_Agrawal.pdf](http://www.isa.umh.es/vr2/euron08/doc/Sunil%20Agrawal/Exo_pres_Agrawal.pdf). (15 de Junio de 2013).
- Gómez, A. E.; Archila, J. F. y Acosta, A. (2011). "Kinematic model for direct analysis of human progress". *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, N. 18, Vol. 2, pp. 63-69.
- Hocoma. (2013). *Hocoma, arneo and lokomat systems*. <http://www.hocoma.com>. (10 de Junio de 2013).
- Kleinfinger, J. F. and Khalil, W. (1986) "Dynamic modelling of closed-chain robots". *16th International Symposium on Industrial Robots*, pp. 401-412, Bruxelles, Belgium.
- López, D. A.; Hernández, J. E. y Peña, C. A. "Advances in the control of bipedal platforms using the System kinect". *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, Vol. 2, No. 22, pp. 117-124.
- Suleiman, W.; Yoshida, E.; Kanehiro, F.; Laumond, J. P. and Monin, A. (2008). "On Human Motion Imitation by Humanoid Robot", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2697-2764, California, USA.

## ANEXOS

*Tabla 1. Parámetros físicos del bípido y del exoesqueleto.*

Mecanismo	Descripción	Massa Kg	Longitud m	CdM m	Inercia Kg.m <sup>2</sup>
Robot (Bípido)	Pie (cuerpos Pie1, Pie2)	0.678	$L_p = 0.072$ $L_d = 0.135$ $h_p = 0.06425$	$\varphi_x = 0.0135$ $\varphi_y = 0.03212$	0.00175 3
	Tibia (cuerp. 1 y 5)	2.188	0.392	0.16856	0.02765
	Muslo (cuerp. 2 y 4)	5.025	0.392	0.16856	0.06645
	Tronco (cuerpo 3)	29.27	0.5428	0.192065	0.81496 35
Exoesqueleto	Pie (cuerp. Pied1ex et Pied2ex)	0.32	$L_p = 0.072$ $L_d = 0.135$ $h_p = 0.06425$ $h_e = 0.04$	$\varphi_{x\_ex} = 0.015$ $\varphi_{y\_ex} = 0.034$	0.00175 3
	Tibia (cuerp. 6 et 8)	1	0.344	0.172	0.02765
	Muslo (cuerp. 7 y 9)	0.6	0.172	0.082	0.03322 5
	Muslo (cuerp. 10 y 11)	0.6	0.172	0.082	0.03322 5
	Union (cuerpo union)	0.1	0.1	0.05	0.0001