

Modelado y Simulación de un Robot Terapéutico para la Rehabilitación de Miembros Inferiores

César Humberto Guzmán Valdivia ^{1,ψ}, Andrés Blanco Ortega ², Marco Antonio Oliver Salazar ²,
Héctor Ramón Azcaray Rivera ²

¹ *Departamento de Ingeniería en Mecatrónica, Universidad Politécnica de Zacatecas (UPZ),
Fresnillo, Zacatecas, México.*

² *Departamento de Ingeniería en Mecatrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
(CENIDET), Cuernavaca, Morelos, México.*

Recibido 19 de febrero de 2013. Aprobado 24 de septiembre de 2013.

MODELING AND SIMULATION OF A THERAPEUTIC ROBOT FOR LOWER LIMBS REHABILITATION

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM ROBÔ TERAPÊUTICO DE REABILITAÇÃO DE MEMBROS INFERIORES

Resumen — La rehabilitación en un sentido general tiene el objetivo de reincorporar a una persona a sus actividades de la vida cotidiana. Actualmente, un paciente que requiere de alguna rehabilitación sufre de largas esperas para ser atendido debido a la falta de personal en las clínicas y hospitales. Una alternativa para ayudar al personal médico en las terapias de rehabilitación es utilizando robots terapéuticos. Este artículo muestra el modelado y la simulación de un robot terapéutico para la rehabilitación de miembros inferiores. Se presenta el modelo cinemático y dinámico de un robot de tres grados de libertad con un efector final configurado en paralelo. Se presenta una ley de control por par calculado para el seguimiento de trayectorias planificadas. Se presentan simulaciones de ejercicios terapéuticos para cadera y rodilla realizadas en ADAMS y MATLAB para conocer el comportamiento cinemático y dinámico del robot. Los resultados obtenidos demuestran el gran potencial del robot terapéutico para asistir en la rehabilitación de miembros inferiores.

Palabras Claves — Rehabilitación de miembros inferiores, robot terapéutico, modelado y simulación, control.

Abstract — Rehabilitation in a general sense aims to reinstate a person to their activities of daily living. Currently, a patient that requires a rehabilitation suffers long waits for treatment due to lack of staff in clinics and hospitals. An alternative to assist medical staff in rehabilitation therapies is using therapeutic robots. This paper shows the modeling and simulation of a therapeutic robot for lower limb rehabilitation. The kinematic and dynamic model of a robot of three degrees of freedom with an end-effector configured in parallel is presented. A computed torque control law for a planned trajectory tracking task is presented. Simulations of therapeutic exercises for hip and knee carried out in ADAMS and MATLAB for know the kinematic and dynamic behavior of the robot are presented. The results demonstrate the great potential of the therapeutic robot to assist in the rehabilitation of lower limbs.

^ψ Dirección para correspondencia: hello_ingeniero@hotmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.14508/rbme.2013.7.14.42-50>

Keywords — Lower limbs rehabilitation, therapeutic robot, modeling and simulation, control.

Sumário — A reabilitação de um modo geral tem como objetivo restabelecer uma pessoa para as suas atividades de vida diária. Atualmente, um doente que necessita de alguma reabilitação sofre com longas esperas para o tratamento devido à falta de pessoal em clínicas e hospitais. Uma alternativa para ajudar a equipe médica em terapias de reabilitação é o uso de robôs terapêuticos. Este artigo mostra o modelado e a simulação de um robô terapêutico para a reabilitação do membro inferior. Apresenta-se também Modelo cinemática e dinâmica de um robô de três graus de liberdade com uma extremidade atuante configurados em paralelo. A lei de controle para o acompanhamento calculados para par planejado trajetórias é apresentado. Simulações de exercícios terapêuticos para substituições de quadril e joelho realizadas em ADAMS e MATLAB para o comportamento cinemático e dinâmico do robô são apresentados. Os resultados demonstram o grande potencial do robô terapêutico para ajudar na reabilitação de membros inferiores.

Palavras-chave — menor de reabilitação do membro, terapêutica, modelagem e controle de robô simulação.

I. INTRODUCCIÓN

Los accidentes cerebrovasculares (ACV) son la primera causa de discapacidad en los países desarrollados y la tercera causa de muerte en el mundo [1]. Después de un ACV frecuentemente puede llevar a una hemiparésis o hemiplejía. La hemiplejía es una paralización total de la mitad del cuerpo [2]. La rehabilitación tiene como objetivo mantener, recuperar y desarrollar el movimiento corporal humano. Existen dos tipos de ejercicios para rehabilitación: pasivos y activos. En los primeros, el terapeuta es el que moviliza las extremidades sin ningún esfuerzo del paciente, principalmente se utilizan para mantener la flexibilidad y el rango de movimiento de las articulaciones [3]. En los segundos, el individuo puede realizar los ejercicios por sí mismo de forma voluntaria, en la mayoría de los casos se utilizan para el fortalecimiento de las extremidades [4].

En general, una persona que tiene alguna discapacidad motriz en los miembros inferiores requiere de constantes terapias de rehabilitación por un largo periodo de tiempo. Las terapias de rehabilitación son rutinas de ejercicios repetitivos bajo la supervisión de un fisioterapeuta. Sin embargo, algunas veces son mal realizadas debido a la falta de personal, el aumento del número de pacientes y el cansancio del terapeuta. Una alternativa para solucionar este problema es utilizando un robot. Varias investigaciones acerca del uso de robots en terapias de rehabilitación han demostrado importantes beneficios [5]. Algunas de las razones principales por las cuales utilizar un robot en la rehabilitación son: (1) reemplaza el esfuerzo físico del terapeuta y (2) permite evaluar cuantitativamente la recuperación del paciente [6].

Los robots para rehabilitación pueden ser clasificados en tres principales grupos: para asistencia [7], movilidad [8] y terapéuticos. Los robots terapéuticos también pueden clasificarse en dos grupos: miembros superiores [9-12] y miembros inferiores. Los robots terapéuticos

para miembros inferiores se pueden dividir en: (1) exoesqueletos, (2) entrenadores de la marcha y (3) sistemas para rehabilitación de miembros inferiores. Los exoesqueletos fueron desarrollados para asistir a personas que tienen alguna debilidad en sus miembros inferiores [13]. Los entrenadores de la marcha fueron desarrollados para asistir en el caminado del paciente, algunos ejemplos de éstos son: LOKOMAT [14] y Gait Trainer [15]. Los sistemas para rehabilitación de miembros inferiores fueron desarrollados para absorber el esfuerzo físico de la terapia y desempeñar movimientos repetitivos y constantes al paciente.

Algunos ejemplos de sistemas para rehabilitación de miembros inferiores se mencionan a continuación. Sakaki y otros desarrollaron una máquina de ejercicios terapéuticos para mover las articulaciones de la cadera y rodilla de pacientes con espasticidad [16]. Moughamir y otros desarrollaron una máquina para entrenamiento y rehabilitación de miembros inferiores llamado MultiIso [17]. Homma y otros proponen un rehabilitador con múltiples grados de libertad (GDL) para la rehabilitación de miembros inferiores el cuál emplea un mecanismo con cables paralelos [18]. Hashimoto y otros desarrollaron un manipulador de tres GDL para sostener los miembros inferiores durante la rehabilitación de cadera y rodilla en el plano sagital [19]. El Motion Maker desarrollado por Swortec SA es un sistema comercial que permite desempeñar ejercicios activos a pacientes con paraplejía [20].

Bradley y otros presentan el proyecto Nexos para la rehabilitación de miembros inferiores, el cual es capaz de operar a través de una interfaz gráfica de usuario (GUI) y es actuado con pistones neumáticos [21]. Sun y otros desarrollan un robot horizontal para la rehabilitación de miembros inferiores basado en un mecanismo paralelo [22]. Akdogan y otros desarrollaron un robot para ejercicios terapéuticos de tres GDL para miembros inferiores llamado Physiotherobot, el dispositivo cuenta

con una GUI y un sistema de enseñanza terapeuta-robot [23]. Wang y otros desarrollan un sistema robótico para asistir a la rehabilitación de pacientes con cuadriplejía, el dispositivo mueve ambas piernas mediante un solo GDL [24].

Los robots terapéuticos para rehabilitación de miembros inferiores antes mencionados fueron diseñados con uniones de revoluta para ajustarse lo más cercano posible a la cinemática de la pierna. Otra alternativa al problema es utilizando uniones de traslación para reproducir el movimiento cinemático de la pierna. La principal ventaja de diseñar un robot terapéutico con actuadores de traslación es su simplicidad para ser modelado e implementado. Este artículo presenta el modelado y la simulación de un robot terapéutico de tres GDL con uniones de traslación para la rehabilitación de miembros inferiores con la particularidad de contar con un actuador final en paralelo.

El artículo se estructura de la siguiente manera: la sección II muestra el modelo cinemático de la pierna y del robot, la sección III muestra el modelo dinámico del robot, la sección IV presenta la implementación de un controlador de par calculado, la sección V muestra los resultados de la simulación y finalmente la sección VI muestra las conclusiones.

II. CINEMÁTICA DE LA PIERNA Y DEL ROBOT

La cadera es una articulación compuesta por una bola y una cavidad que permite 3 rangos de movimientos. Los movimientos de flexión y extensión son hacia al frente de la persona, abducción y aducción son hacia los lados de la persona y la rotación interna y externa son giros internos de la cadera [25]. La rodilla es una articulación de un solo GDL. La flexión es el movimiento que acerca la cara posterior de la pierna a la cara posterior del muslo [26].

El diseño del robot tiene como objetivo principal reproducir los movimientos que más se realizan en las terapias de rehabilitación de miembros inferiores. El sistema robótico se compone de tres GDL. Los dos primeros sirven para desplazar la pierna del paciente, los cuales realizan el movimiento de flexión-extensión de cadera y rodilla. El tercero sirve para soportar y orientar la pierna del paciente, el cual cuenta con un efector final en paralelo. La pierna fue considerada como un sistema robótico de dos GDL, el primero simula el movimiento de flexión-extensión de cadera y el segundo la flexión de rodilla. La cinemática directa describe de manera analítica el movimiento espacial del efector final del robot en función de las posiciones de cada articulación [27]. La Fig.1 muestra la representación geométrica de la pierna y

del robot. El punto de interés es P_x , P_y y P_z y se encuentra situado en el tobillo.

En la Tabla 1 se presentan los parámetros geométricos de la pierna y del robot según la convención de Denavit-Hartenberg [28]. Donde: i representa el número de articulación, a_i representa la distancia a lo largo del eje x_p , α_i se refiere al ángulo entre los ejes z_i y z_{i+1} , d_i representa la distancia entre los ejes z_p , θ_i representa el ángulo con respecto al eje x_i y x_{i+1} , b_i representa la distancia a lo largo del eje x'_i , β_i se refiere al ángulo entre los ejes z'_i y z'_{i+1} , l_i representa la distancia entre los ejes z'_i y finalmente ϕ_i representa el ángulo con respecto al eje x'_i y x'_{i+1} .

Tabla 1. Parámetros geométricos de la pierna y del robot.

Pierna					Robot			
i	a_i	α_i	d_i	θ_i	b_i	β_i	l_i	ϕ_i
1	a_1	0	0	θ_1	0	90	l_1	0
2	a_2	0	0	θ_2	0	-90	l_2	0
3					0	β_3	l_3	0

El modelo geométrico directo (MGD) permite calcular la posición y orientación de la pierna en función de sus ángulos articulares. Para encontrarlo es necesario calcular la matriz de transformación homogénea ${}^{i-1}T_i$ de cada articulación usando (1).

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C\alpha_i & S\theta_i S\alpha_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_i S\alpha_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde: $S_i = \text{Sin}\theta_i$, $C_i = \text{Cos}\theta_i$ y $S_{ij} = \text{Sin}(\theta_i + \theta_j)$

Para obtener el MGD de la pierna es necesario multiplicar las siguientes matrices ${}^0P_2 = {}^0T_1 {}^1T_2$. La matriz de transformación que representa la posición y orientación de la pierna está dada por (2).

$${}^0P_2 = \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 & a_1 C_1 + a_2 C_{12} \\ S_{12} & C_{12} & 0 & a_1 S_1 + a_2 S_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Para obtener el MGD del robot es necesario multiplicar las siguientes matrices ${}^0R_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3$. La matriz de

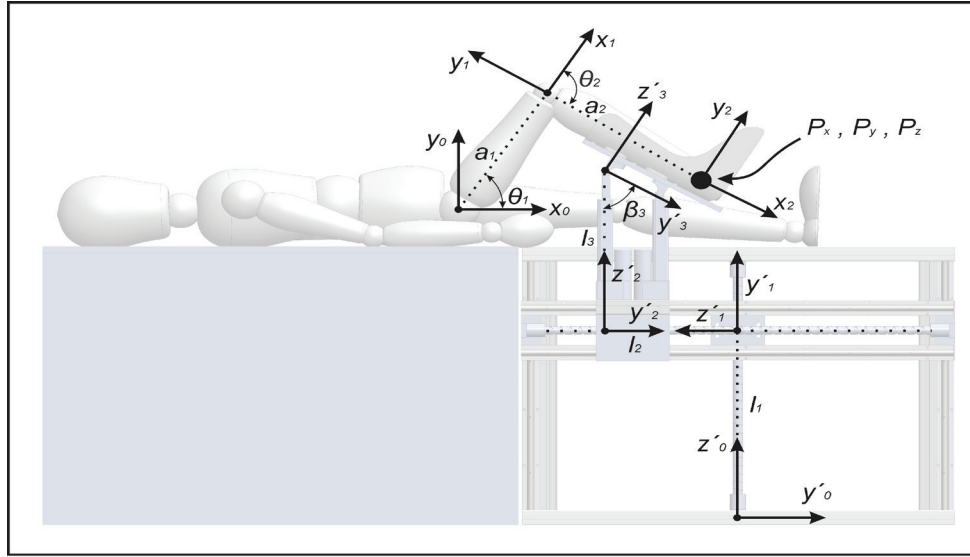


Fig. 1. Estructura cinemática de la pierna y del robot.

transformación que representa la posición y orientación del robot está dada por (3).

$${}^0R_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\beta_3 & S\beta_3 & l_2 \\ 0 & -S\beta_3 & C\beta_3 & l_1 + l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Por otra parte, el modelo geométrico inverso (MGI) puede determinar los movimientos articulares para llevar el actuador final a una posición cartesiana deseada [27]. La solución de la cinemática inversa es fundamental para el seguimiento de trayectorias. Para encontrar el MGI de la pierna se realizaron algunas manipulaciones algebraicas para obtener las soluciones (4).

$$\theta_1 = \text{Asin} \left[\frac{P_y (a_1 + a_2 C_2) - P_x (a_2 S_2)}{(a_2 S_2)^2 + (a_1 + a_2 C_2)^2} \right]$$

$$\theta_2 = \text{Acos} \left(\frac{Px^2 + Py^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1 a_2} \right) \quad (4)$$

Para el caso del robot, las soluciones del MGI se muestran en (5).

$$l_1 = P_y - l_3$$

$$l_2 = P_x$$

$$l_3 = P_y - l_1 \quad (5)$$

III. DINÁMICA DEL ROBOT

El modelo dinámico es útil en la simulación de movimiento del robot, el diseño y valoración de su estructura mecánica, el dimensionamiento de los actuadores y la evaluación del controlador [29]. Debido a que el robot tiene componentes de distintas formas y tamaños se consideraron tres masas concentradas para simplificar la obtención de las ecuaciones, uno por cada GDL. En la Fig. 2 se muestra un diagrama simplificado de la localización de las masas concentradas y sus sistemas de referencia.

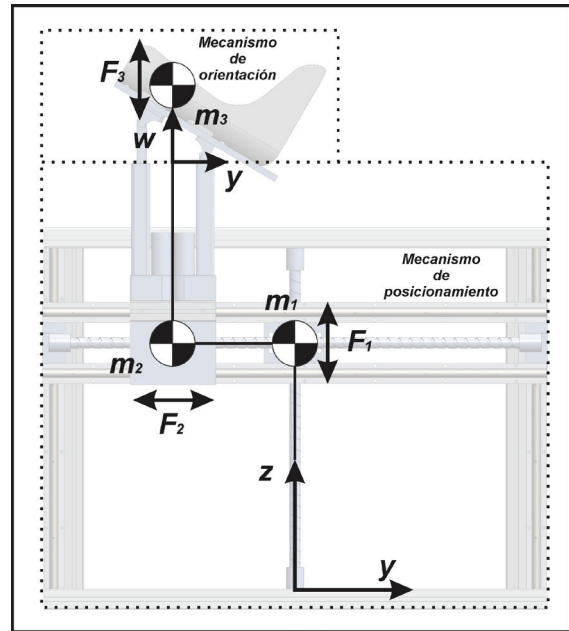


Fig. 2. Modelo dinámico del robot.

El modelo dinámico del robot según el método de Euler-Lagrange se expresa mediante (6).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (6)$$

Donde,

L : Lagrangiano

K : Energía cinética total del sistema

V : Energía potencial total del sistema

D : Disipación de energía

q_i : Coordenada generalizada. Cada grado de libertad del sistema se expresa mediante una coordenada generalizada.

Q_i : Fuerzas generalizadas

La energía cinética total del robot se muestra en (7).

$$K = \frac{1}{2} m_1 \dot{z}^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2} m_3 (\dot{w}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) \quad (7)$$

La energía potencial total del robot se muestra en (8).

$$V = (m_1 + m_2) gz + m_3 g (z + w) \quad (8)$$

El Lagrangiano ($L = K - V$) se muestra en (9).

$$L = \frac{1}{2} a \dot{z}^2 + \frac{1}{2} b \dot{y}^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{w}^2 - agz - m_3 gw \quad (9)$$

El modelo dinámico del robot se muestra en (10).

$$\begin{aligned} F_1 &= a\ddot{z} + ag \\ F_2 &= b\ddot{y} \\ F_3 &= m_3 \ddot{w} + m_3 g \end{aligned} \quad (10)$$

Donde,

$$a = (m_1 + m_2 + m_3)$$

$$b = (m_2 + m_3)$$

g = gravedad

IV. CONTROL DEL ROBOT

Con la finalidad de controlar el robot para obtener los movimientos de flexión-extensión de la cadera y rodilla se propone una ley de control por par calculado. La dinámica del robot es no lineal. Para solucionar este problema se utiliza un control por par calculado para cancelar los términos no lineales [30]. Las ecuaciones dinámicas para controlar los movimientos del robot tienen la siguiente forma:

$$\mathbf{M}(q)\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(q,\dot{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(q) = \mathbf{u} \quad (11)$$

Donde \mathbf{M} es la matriz de inercias, \mathbf{C} son los términos de la fuerza centrípeta y de Coriolis, \mathbf{G} son los términos gravitacionales y \mathbf{u} es el vector de torques y fuerzas externas aplicadas al sistema. El controlador de par calculado se propone en (12).

$$\mathbf{u} = \hat{\mathbf{M}}(q)\mathbf{v} + \hat{\mathbf{C}}(q,\dot{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(q) \quad (12)$$

$$\mathbf{v} = \ddot{\mathbf{q}}_d - \mathbf{K}_d(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d) - \mathbf{K}_p(\mathbf{q} - \mathbf{q}_d)$$

Donde: q_d es la trayectoria de la posición deseada, \dot{q}_d es la trayectoria de la velocidad deseada, \ddot{q}_d es la trayectoria de la aceleración deseada, K_d y K_p son las ganancias derivativas y proporcionales, respectivamente. Combinando (11) con la dinámica del sistema y el controlador (12), se obtiene la ecuación del error en lazo cerrado. De esta manera, seleccionando los parámetros de diseño K_d y K_p tales que se asocien a un polinomio de Hurwitz, es posible garantizar que la dinámica del error puede ser asintóticamente estable.

En el proceso de planear trayectorias, en general se usan polinomios de órdenes diferentes para lograr las posiciones, velocidades y aceleraciones deseadas para cada punto entre dos segmentos. Con esta información el controlador calcula los valores de las variables de las articulaciones usando las ecuaciones de la cinemática inversa para controlar los movimientos del robot. Para lograr esto se puede usar un polinomio de tercer orden para planificar la trayectoria tal que las condiciones inicial y final coincidan con los valores finales en un tiempo final y que las velocidades al inicio y al final del movimiento sean cero (pueden ser otros valores si se requiere). Con esas cuatro piezas de información se puede resolver el siguiente polinomio de tercer orden:

$$q_d(t) = C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + C_3 t^3 \quad (13)$$

Derivando (13) se tiene:

$$\dot{q}_d(t) = C_1 + 2C_2 t + 3C_3 t^2 \quad (14)$$

Al sustituir las condiciones iniciales y finales en (13) y (14) se obtiene:

$$q_d(t_i) = C_0 = q_{di}, \quad q_d(t_f) = C_0 + C_1t + C_2t^2 + C_3t^3 \quad (15)$$

$$\dot{q}_d(t_i) = C_1 = 0, \quad \dot{q}_d(t_f) = C_1 + 2C_2t + 3C_3t^2 = 0$$

Con estas 4 ecuaciones se pueden obtener los 4 valores de las constantes del polinomio y con ello se pueden calcular las posiciones de la articulación para cualquier valor de tiempo.

V. RESULTADOS

Con este trabajo de investigación se propone aportar una nueva alternativa para el diseño de robots terapéuticos utilizando actuadores lineales que sean capaces de desempeñar movimientos de rehabilitación para miembros inferiores. Para validar la factibilidad del sistema robótico es necesario simular su comportamiento cinemático y dinámico.

Las primeras simulaciones que se realizaron fueron para validar la cinemática directa e inversa de la pierna y del robot. En la Fig. 3 se presenta el seguimiento de una trayectoria cartesiana que va desde la coordenada (1; 0) hasta la (0,5; 0,5) en el plano YZ. El propósito de esta simulación es mostrar los movimientos de la pierna y del robot con respecto al punto de interés P_x , P_y y P_z . En la Fig. 4 se muestran los movimientos articulares de la cadera y rodilla. En las Figs. 5, 6, y 7 se muestran los movimientos del robot. Donde: los coeficientes de las trayectorias planeadas son: $C_0 = 0$; $C_1 = 0$; $C_2 = 0,06$; y $C_3 = -0,008$ para el movimiento en Z; $C_0 = 1$; $C_1 = 0$; $C_2 = -0,06$; y $C_3 = 0,008$ para el movimiento en Y, y $C_0 = 0$, $C_1 = 10$, $C_2 = -2$, y $C_3 = 0$ para el movimiento en W.

Como se observa en las simulaciones anteriores existe una relación entre la pierna y el sistema robótico. Para fines prácticos esto es una ventaja debido a que se puede programar el movimiento del robot por medio de trayectorias cartesianas, movimientos articulares ó posicionamiento de los actuadores. Este tipo de simulaciones demuestra la adaptabilidad del robot a la posición y orientación de la pierna para realizar los movimientos de rehabilitación sin causarle dolor al paciente.

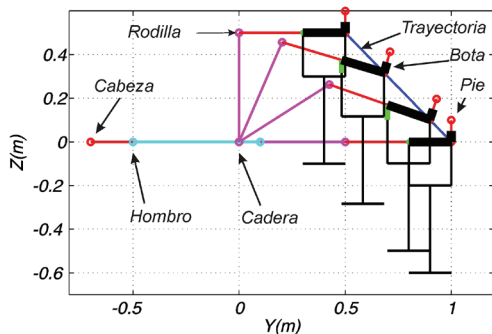


Fig. 3. Movimiento de flexión de cadera y rodilla.

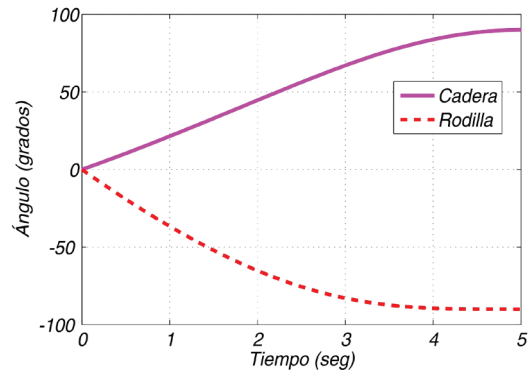


Fig. 4. Movimientos angulares de la cadera y rodilla desde 0° hasta 90°.

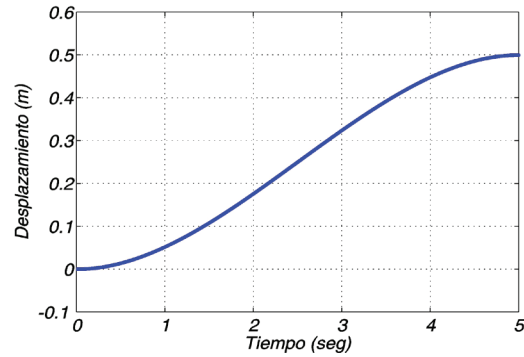


Fig. 5. Posicionamiento en Z desde 0 hasta 0,5 metros.

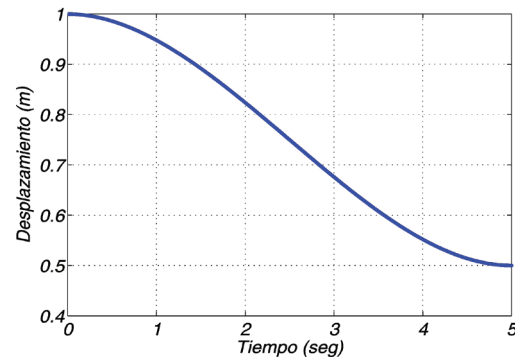


Fig. 6. Posicionamiento en Y desde 1 hasta 0,5 metros.

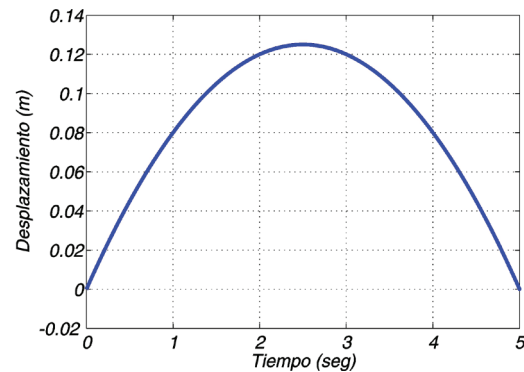


Fig. 7. Movimiento de orientación en W.

ADAMS es un software desarrollado por la empresa MSC para el análisis dinámico de sistemas mecánicos. La ventaja de utilizar este tipo de programas es para hacer simulaciones de sistemas multicuerpos, sistemas dinámicos compuestos de muchos componentes interconectados por uniones y elementos de fuerza, en los cuales se pueden simular prototipos virtuales. En la Fig. 8 se muestra el prototipo virtual simulado en el entorno de ADAMS.

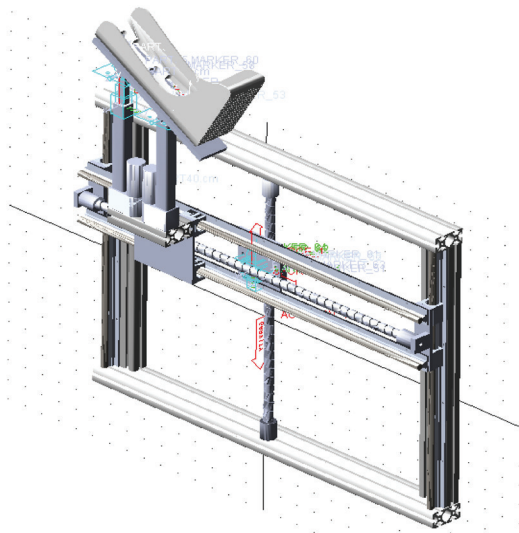


Fig. 8. Prototipo virtual simulado en ADAMS.

Otra posibilidad que ofrece ADAMS es la de exportar la planta a Simulink de MATLAB. En la Fig. 9 se muestra el diagrama a bloques creado en Simulink con la particularidad de incluir la planta generada en ADAMS (color naranja) con las entradas y salidas del sistema directamente conectadas al controlador de par calculado.

Retomando el movimiento obtenido en las Figs. 5, 6, y 7 es posible conocer la evolución de las fuerzas en los actuadores del robot. Los parámetros para la simulación dinámica son: $m_1 = 5,42$ kg; $m_2 = 3,91$ kg; $m_3 = 0,51$ kg; $g = 9,8$ m/s²; $K_p = 200000$, $K_d = 30000$ para el actuador en Z; $K_p = 2500$, $K_d = 250$ para el actuador en Y, y $K_p = 50000$, $K_d = 5000$ para el actuador en W. Las Figs. 10, 11 y 12 muestran las fuerzas de control requeridas para realizar el movimiento de rehabilitación mostrado en la Fig. 3.

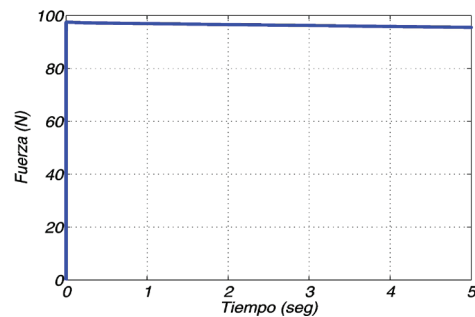


Fig. 10. Fuerza de control requerido para el movimiento en Z.

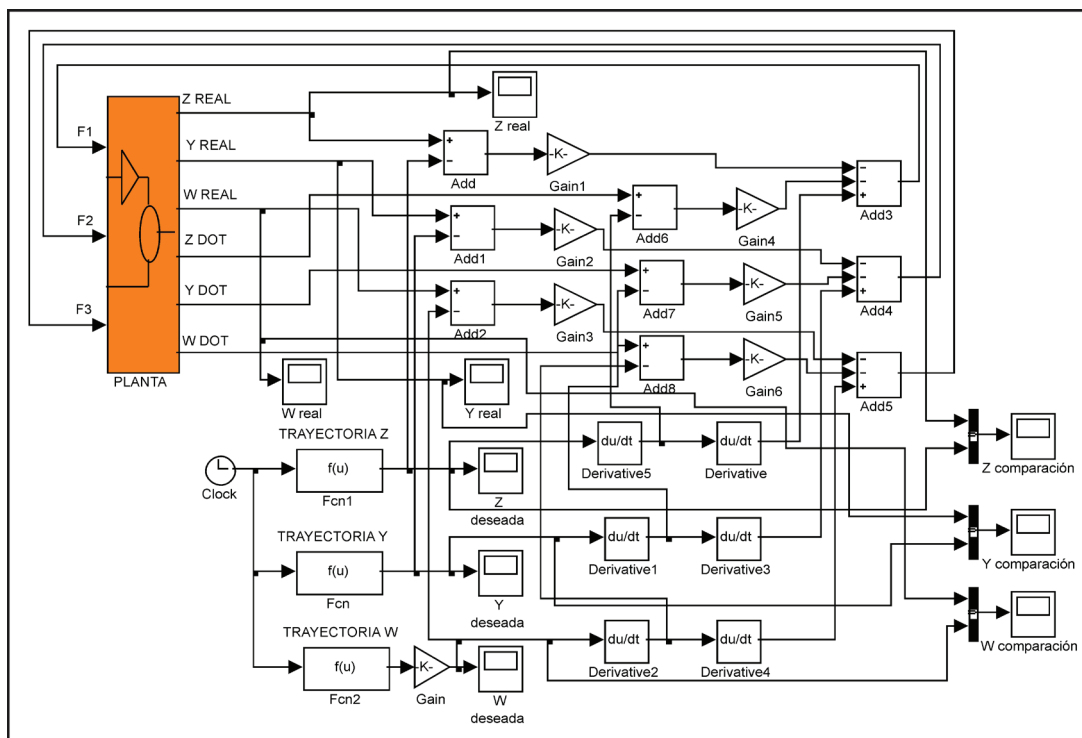


Fig. 9. Modelo en Simulink con el prototipo virtual.

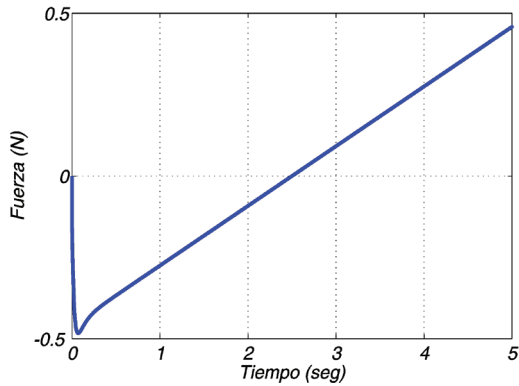


Fig. 11. Fuerza de control requerido para el movimiento en Y.

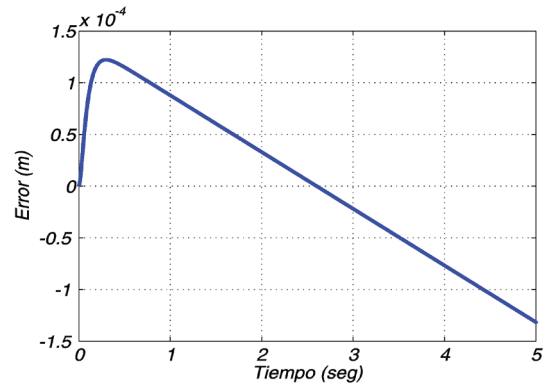


Fig. 14. Dinámica del error en Y.

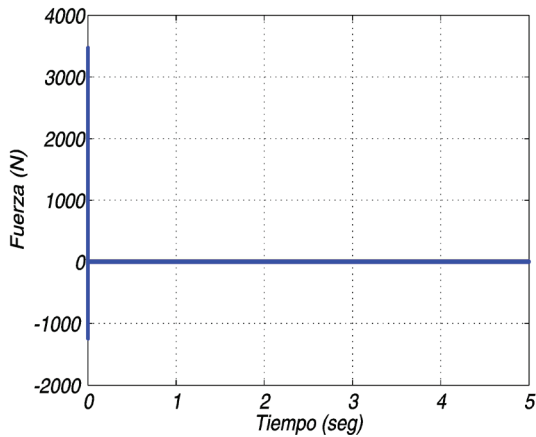


Fig. 12. Fuerza de control requerido para el movimiento en W.

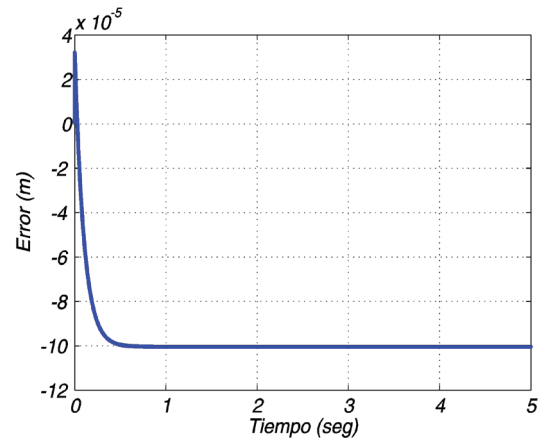


Fig. 15. Dinámica del error en W.

En las Figs. 13, 14 y 15 se muestra el error de posición de cada articulación. Como se observa en estas gráficas el error en los movimientos es menor que 1 milímetro, lo que garantiza que los movimientos sean precisos durante las terapias.

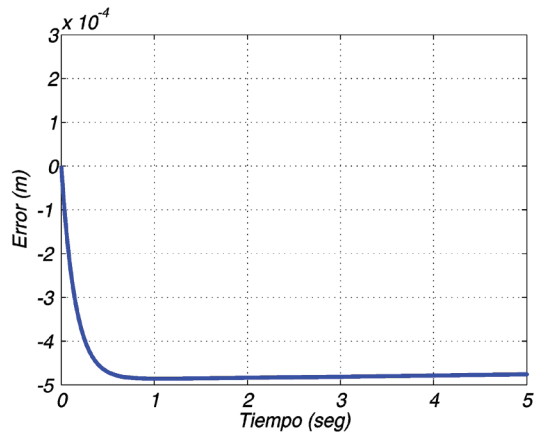


Fig. 13. Dinámica del error en Z.

VI. CONCLUSIÓN

En este artículo se presenta el modelado y la simulación de un robot terapéutico de tres GDL con uniones de traslación para la rehabilitación de miembros inferiores con la particularidad de contar con un actuador final en paralelo. Se obtuvo el modelado y la simulación del sistema robótico para conocer su respuesta cinemática y dinámica. El controlador propuesto fue por par calculado para el seguimiento de trayectorias planificadas.

Esta aportación es otra alternativa al problema de inducir movimiento a los miembros inferiores con propósitos terapéuticos. Los resultados obtenidos demuestran el gran potencial del robot terapéutico para asistir en la rehabilitación de miembros inferiores. Finalmente, como trabajo futuro se tiene contemplada la construcción del prototipo para implementar distintos algoritmos de control.

REFERENCIAS

- [1]. Sengler J. Rehabilitación y readaptación del paciente con hemiplejía vascular. Revisión de la literatura. Enciclopedia Médica Quirúrgica. (Elsevier, Paris-France), *Kinesioterapia, Medicina Física y Readaptación*, 26-455-D-10, 2006.
- [2]. Jegat J., et al. Rehabilitación en caso de parálisis cerebral. Enciclopedia Médica Quirúrgica. (Elsevier, Paris-France), *Kinesioterapia, Medicina Física y Readaptación*, 26-480-A-10, pág. 28, 1995.
- [3]. Neiger H., Gosselin P., Lacombe M.T. Fisioterapia técnicas pasivas. *Médica Panamericana*, 1998.
- [4]. Kisner C., Colby L. A. Ejercicio Terapéutico. *Paidotribo*, 2005.
- [5]. Krebs H.I., Hogan N. Therapeutic Robotics: A Technology Push. *Proceedings of the IEEE*, 94, 1727-1738, 2006.
- [6]. Senanayake C., Senanayake A. Emerging Robotics Devices for Therapeutic Rehabilitation of the Lower Extremity. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Singapore, 2009.
- [7]. Tapus A., Mataric M., Scassellati B. Socially Assistive Robotics. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 14, 35-42, 2007.
- [8]. Díaz I., Gil J.J., Sánchez E. Lower-Limb Robotic Rehabilitation: Literature Review and Challenges. *Journal of Robotics*. Article ID 759764, 2011.
- [9]. Moubarak S., Pham M.T., Pajdla T., Redarce T. Design and modeling of an upper extremity exoskeleton. *11th International Congress of the IUPESM: medical physics and biomedical engineering world congress 2009*. pp. 476-479, 2009.
- [10]. Tsai B.C., Wang W., Hsu C., Fu C., Lai S. An articulated rehabilitation robot for upper limb physiotherapy and training. *The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. pp. 1470-1475, 2010.
- [11]. Gopura R.A.R.C., Kiguchi K., Li Y. SUEFUL-7: A 7 DOF upper-limb exoskeleton robot with muscle-model-oriented EMG-based control. *The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. pp. 1126-1131, 2009.
- [12]. Klein J., Spencer S.J., Allington J., Minakata K., Wolbrecht E.T., Smith R., Bobrow J.E., Reinkensmeyer. Biomimetic orthosis for the neurorehabilitation of the elbow and shoulder (BONES). *Proceedings of the 2nd Biennial IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*. pp. 535-541, 2008.
- [13]. Zoss A., Kazerooni H., Chu A. On the mechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. pp. 3132-3139, 2005.
- [14]. Bernhardt M., Frey M., Colombo G., Riener R. Hybrid force-position control yields cooperative behaviour of the rehabilitation robot LOKOMAT. *ICORR 2005, 9th International Conference on Rehabilitation Robotics*. pp. 536-539, 2005.
- [15]. Hesse S., Uhlenbrock D., Sarkodie-Gyan T. Gait pattern of severely disabled hemiparetic subjects on a new controlled gait trainer as compared to assisted treadmill walking with partial body weight support. *Clin Rehabil*. 13, 401-410, 1999.
- [16]. Sakaki T., Okada S., Okajima Y., Tanaka N., Kimura A., Uchida S., Taki M., Tomita Y., Horiuchi T. TEM: therapeutic exercise machine for hip and knee joints of spastic patients. *Proceedings of the 6th International Conference on Rehabilitation Robotics*. pp. 183-6, 1999.
- [17]. Moughamir S., Manamanni N., Zayton J., Afilal L. Control law implementation for multi-iso: a training machine for lower limbs. *Proceedings of the 23rd Annual EMBS International Conference*. pp. 1477-1480, 2001.
- [18]. Homma K., Fukuda O., Nagata Y., Usuba M. Study of a wire-driven leg rehabilitation system. *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. pp. 1668-1673, 2004.
- [19]. Hashimoto Y., Komada S., Hirai J. Development of a Biofeedback Therapeutic Exercise Supporting Manipulator for Lower Limbs. *IEEE International Conference on Industrial Technology, 2006. ICIT 2006*. 352-357, 2006.
- [20]. Metrailler P., Frischknecht R., Schmitt C., Fournier J., Bouri M., Clavel R. Improvement of rehabilitation possibilities with the Motion Maker. *Proceeding of the IEEE BioRob2006 Conference*. pp. 359-64, 2006.
- [21]. Bradley D., Acosta-Marquez C., Hawley M., Brownsell S., Enderby P., Mawson S. NeXOS - The design, development and evaluation of a rehabilitation system for the lower limbs. *Mechatronics*. 19 (2), 247-257, 2009.
- [22]. Sun H., Zhang L., Li C. Dynamic Analysis of Horizontal Lower Limbs Rehabilitative Robot. *IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*. 656-660, 2009.
- [23]. Akdogan E., Adli M.A. The design and control of a therapeutic exercise robot for lower limb rehabilitation: Physiotherobot. *Mechatronics*. 21, 509-522, 2011.
- [24]. Wang D., Gao X., Liu Y. A Robotic Extremities Muscle Rehabilitation System for Quadriplegia. *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 1190-1195, 2011.
- [25]. Miralles M., Rodrigo C. y Puig C. Biomecánica clínica del aparato locomotor. MASSON, 2000.
- [26]. Kapandji A.I. Fisiología Articular del Miembro Inferior. *Médica Panamericana*, 2000.
- [27]. Barrientos A., Peñín L. F., Balaguer C., Aracil R. Fundamentos de Robótica. McGraw-Hill, 1997.
- [28]. Bolton W. Mecatrónica. Alfaomega, 2001.
- [29]. Vivas A. Diseño y Control de Robots Industriales: Teoría y Práctica. Elaleph, 2010.
- [30]. Sciavicco L., Siciliano B. Modelling and Control of Robot Manipulators. Springer, 2005.