

Diseño y co-simulación de un exoesqueleto

Desing and simulation o fan exoskeleton

Aimee Pozo-Méndez^a, Jorge Gudiño-Lau^b, Janeth Alcalá^c, Saida Charre-Ibarra^d, Daniel Vélez Díaz^e

Abstract:

The present work describes the importance of co-simulation in the design of an exoskeleton and in the area of robotic medicine. The proposed methodology consists of two processes: mechanical design and analysis; and the development of the control algorithm to demonstrate the proper functioning of the exoskeleton. The analysis of the mechanism is created through CAD in SolidWorks software, which is used for computer designs since it allows evaluating the mechanical part before it is built. For the validation of the exoskeleton, the simulation of the walk of a person is implemented, this is done with the Matlab software using a linear control algorithm. The foregoing allows to analyze and create rehabilitation routines with the help of a co-simulated exoskeleton of the lower part of the human being, which emulates the movements of a normal human gait and its control of movement, in order to achieve movement natural human and help on the issue of disability of patients with lower body injuries.

Keywords:

Rehabilitation, exoskeleton, co-simulation, linear control

Resumen:

El presente trabajo describe la importancia de la co-simulación en el diseño de un exoesqueleto y en el área de la medicina robótica. La metodología propuesta consta de dos procesos: el diseño y análisis mecánico; y el desarrollo del algoritmo de control para demostrar el buen funcionamiento del exoesqueleto. El análisis del mecanismo es creado a través de CAD en el software SolidWorks, que es empleado para diseños asistidos por computadora ya que permite evaluar la parte mecánica antes de ser construida. Para la validación del exoesqueleto, se implementa la simulación del caminado de una persona, esto es realizado con el software de Matlab empleando un algoritmo de control lineal. Lo anterior, permite analizar y crear rutinas de rehabilitación con la ayuda de un exoesqueleto co-simulado de la parte inferior del ser humano, que emula los movimientos de una marcha normal del humano y su control del movimiento, con la finalidad de lograr un movimiento natural del humano y ayudar en el tema de la discapacidad de pacientes con lesiones en la parte inferior del cuerpo.

Palabras Clave:

Rehabilitación, exoesqueleto, co-simulación, control lineal

^a Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería y Electromecánica, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1504-0430>, Email: apozo@ucol.mx

^b Autor de Correspondencia, Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería y Electromecánica, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0585-908X>, Email: jglau@ucol.mx

^c Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería y Electromecánica, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-3952>, Email: janethalcala@ucol.mx

^d Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería y Electromecánica, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3823-5388>, Email: scharre@ucol.mx

^e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior de Tlahuelilpan, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6488-2960>, Email: daniel@uaeh.edu.mx

I. Introducción

En los últimos años se han realizado diversos trabajos e investigaciones en torno al área de exoesqueletos y co-simulación, de las cuales en esta sección se nombran las más destacadas alrededor del mundo, dando una introducción sobre los temas a tratar.

La mayoría de los primeros trabajos relacionados con los exoesqueletos fueron estudios conceptuales que se plasmaron solo en el tablero de dibujo, pero en realidad nunca se construyeron ni se probaron. La primera mención acerca de un exoesqueleto paralelo fue en una serie de patentes de los Estados Unidos concedidas en 1890 por Nicholas Yagn. Su invención comprende resortes de hoja larga operando en paralelo con las piernas, Figura 1. Pretendía aumentar la habilidad para correr y saltar (Yagn, 1890).

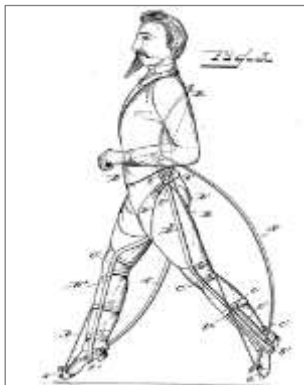


Figura 1. Nicholas Yagn exoeskeleton.

Los prototipos de asistencia a personas fueron evolucionando constantemente dándose a conocer las primeras aplicaciones médicas e industriales, "Lokomat" fue uno de ellos, se puede observar en la Figura 2. Reinkensmeyer describe el primer exoesqueleto robótico realizado por General Electric, que se utilizó para aplicaciones terapéuticas a principios de 1960 (Reinkensmeyer et al., 2012).



Figura 2. Exoesqueleto "Lokomat".

A mediados de la década de 1965, General Electric Research (Schenectady, NY), con la Universidad de Cornell y el apoyo financiero de la Oficina de Investigación Naval de los EE. UU., construyó un prototipo de exoesqueleto como se muestra en la Figura 3 con alimentación de cuerpo completo apodado "Hardiman", propuso amplificar la fuerza humana drásticamente (Muramatsu, 2011).



Figura 3. Exoesqueleto "Hardiman".

En 1970, se desarrolló el llamado "Partial active exoskeleton", que incorporaba actuadores neumáticos para flexión o extensión de cadera, rodilla y tobillo, así como una articulación de abducción o aducción activada en la cadera para una mayor estabilidad en el plano frontal, este prototipo se observa en la Figura 4.



Figura 4. Exoesqueleto "Complete exoskeleton"

Posteriormente, este concepto se modificó ligeramente en el "complete exoskeleton" al extender el accesorio en el torso para encerrar todo el pecho del paciente,

proporcionando un mayor soporte del tronco. Se realizaron más de 100 ensayos clínicos con este dispositivo, y varios pacientes con diversos grados de parálisis dominaron la marcha utilizando el exoesqueleto completo con el apoyo de muletas.

En 1992, el Instituto de Tecnología de Kanagawa en Japón, desarrolló un exoesqueleto de cuerpo completo, alimentado por un actuador neumático con un control que produce una compensación aproximada en el mecanismo para compensar el peso y la fricción que pudiese existir (Aach, 2014).

A inicios del siglo XXI se fueron observando más prototipos de exoesqueletos mejorados y tecnológicamente actualizados en la rama de la medicina, por lo que algunos exoesqueletos se enfocaron a la asistencia y rehabilitación de personas con problemas de movilidad.

El exoesqueleto eLEGS por sus siglas en inglés "Exoskeleton Lower Extremity Gait System" es un sistema de exoesqueleto de propulsión hidráulica, y permite a los parapléjicos ponerse de pie y caminar con muletas o un andador, ver Figura 5.



Figura 5. ELEGs Exoskeleton.

Permite al usuario caminar en línea recta, pararse desde una posición sentada, permanecer de pie durante un período prolongado de tiempo y sentarse desde una posición de pie (Ali, 2014).

Uno de los más destacados es ReWalk, fue diseñado en Yokneam, Israel, por Amit Goffer y está compuesto por un traje de soporte de refuerzo portátil ligero, que integra motores de CC en las juntas, baterías recargables, una serie de sensores y un sistema de control basado en computadora, como se muestra en Figura 6, puede ajustarse cómodamente en el cuerpo y usarse debajo de la ropa (Muramatsu, 2011).

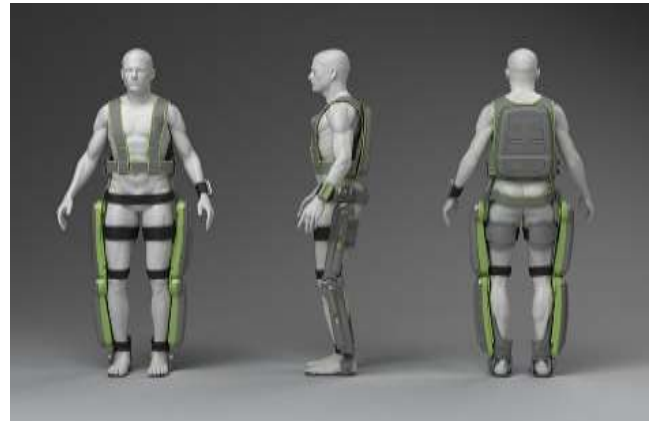


Figura 6. Exoesqueleto ReWalk.

Desde el año 2002 Yoshiyuki Sankai, investigador de robótica de la Universidad de Tsukuba en Japón y fundador de la empresa japonesa Cyberdyne, ha trabajado en un traje robótico diseñado para ayudar a ancianos y personas con discapacidades motoras. El traje HAL (Hybrid Assisting Limb) como se muestra en la Figura 7, es un robot con elementos de la biónica, robótica y electrónica. Después de varias versiones actualmente es un traje de sólo 25 kilos capaz de multiplicar la fuerza del usuario de dos a diez veces (Aach, 2014).



Figura 7. Exoesqueleto "HAL".

Por otro lado, BLEEX por sus siglas en inglés Berkeley Lower Extremity Exoskeleton es un traje que permite al usuario llevar un peso extra de 32 kilos. El traje fue diseñado en el año 2010 con la finalidad de ayudar a los soldados, bomberos y enfermeras para transportar cargas pesadas, como se observa en la Figura 8. El exoesqueleto BLEEX, fue el primer traje diseñado por la DARPA, Defense Advanced Research Project Agency (Zoss et al., 2006).



Figura 8. Exoesqueleto BLEEX de DARPA.

Derivado de las problemáticas con algunos diseños de exoesqueletos en general surge el uso de la co-simulación o integración de varios programas de cómputo para la simulación y diseño de prototipos virtuales antes de su construcción, con la finalidad de validar el diseño evitando errores.

A continuación, se observan algunos trabajos realizados que aportaron gran conocimiento en esta área de co-simulación.

En China se presentó una investigación comparativa que ilustra el mejor rendimiento y los mejores efectos al aplicar las redes neuronales RBF. Mediante MatLab y Robotics Toolbox (RTB) se obtiene la información del modelo dinámico, el diseño se puede observar a continuación en la Figura 9. Evitando la complejidad de cálculo y los resultados de la co-simulación correspondientes en MATLAB SimMechanics, se presentan para demostrar la efectividad y la mejora fundamental del esquema de control propuesto (Han et al., 2018).

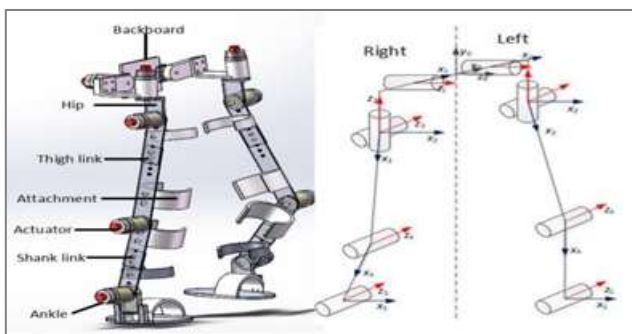


Figura 9. Co-Simulación realizada en china.

Un proyecto realizado en Nanjing, China estableció dos grados de libertad del exoesqueleto de miembros inferiores, para este proyecto se utilizó ADAMS y Simulink

para simular el método de control, parte de los resultados obtenidos en graficas los podemos observar a continuación en la Figura 10. Los resultados de la simulación muestran que: el control PID difuso exhibe un buen rendimiento transitorio y reduce significativamente la fuerza hombre máquina para lograr un movimiento sinérgico humano-máquina (Yasunidos, 2013).

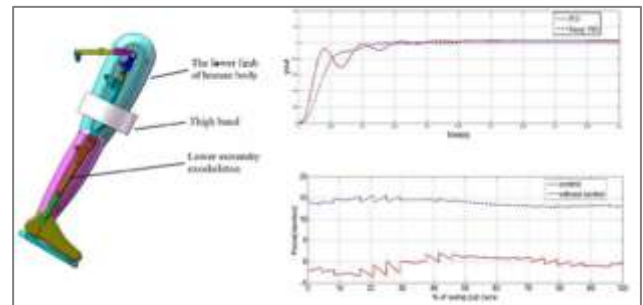


Figura 10. Exoesqueleto con Adams y Simulink.

En Perak, Malaysia se implementó la metodología de uso de la co-simulación para estudiar el análisis de rendimiento dinámico de un exoesqueleto de miembro inferior llamado LLE. Sin embargo, el modelo LLE usualmente lidió con dificultades en el desarrollo debido a su característica no lineal, como se muestra en la Figura 11. El modelado se desarrolló mediante el uso de la técnica de identificación del sistema Matlab. El modelo LLE tridimensional está diseñado con el software CATIA y el enfoque de co-simulación se presenta mediante el uso de un software dinámico multicuerpo llamado ADAMS (Aliman et al., 2018).

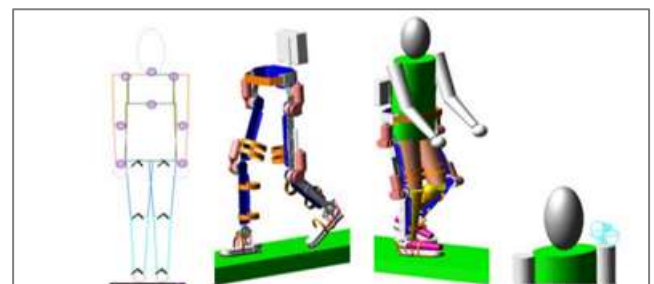


Figura 11. Co-Simulación LLE.

Para el 2014 en el Tecnológico de Monterrey Campus Ciudad de México, se llevó a cabo la metodología del diseño virtual a través de la co-simulación para diseñar un exoesqueleto personalizado como se muestra en la Figura 12.

Considerando la información obtenida del estado del arte y de los tres programas especializados que se utilizaron, como son Opensim, Solidworks y Matlab permitieron establecer una plataforma de co-simulación estable y a

bajo costo consiguiendo un diseño personalizado, que simula los movimientos de una marcha completa para lograr un movimiento natural (Lugo et al., 2014).

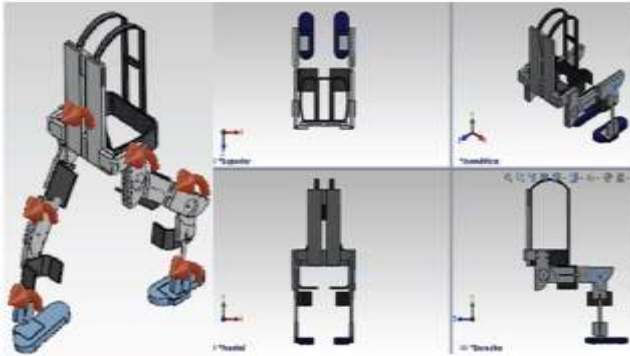


Figura 12. Diseño y Co-Simulación con SolidWorks y MatLab.

II. Diseño de exoesqueleto

Se observaron los diferentes equipos de exoesqueletos que se tienen actualmente en el mercado y se logró escoger uno en el cual es posible adaptar un mecanismo que favorezca y se pueda aprovechar de la mejor manera el paciente, creando un mecanismo funcional y eficiente, que se adapte a las características de las terapias de rehabilitación.

Debido a que en la actualidad en el Centro de Rehabilitación de Manzanillo no tienen un plan de apoyo de equipos para tratamientos terapéuticos para diferentes discapacidades, se optó por crear un proyecto de un exoesqueleto para el mejoramiento de las rehabilitaciones motrices de los pacientes, para que en un futuro se pueda construir.

El proyecto se realiza bajo estrategias de desarrollo del diseño y control de un prototipo de exoesqueleto para la rehabilitación de la parte inferior de una persona con altura y peso promedio en México. Se trabaja con la ayuda de dos softwares para realizar la co-simulación entre Matlab/Simscape y SolidWorks en conjunto, de esta forma se crea el diseño, se realiza la simulación y se ejecuta su control.

Para el diseño del exoesqueleto se se toma como base el sistema óseo enfocado a las extremidades inferiores del ser humano, como se observa en la Figura 13, a partir de esto se diseña tanto los eslabones como las uniones con las que conforman el exoesqueleto.

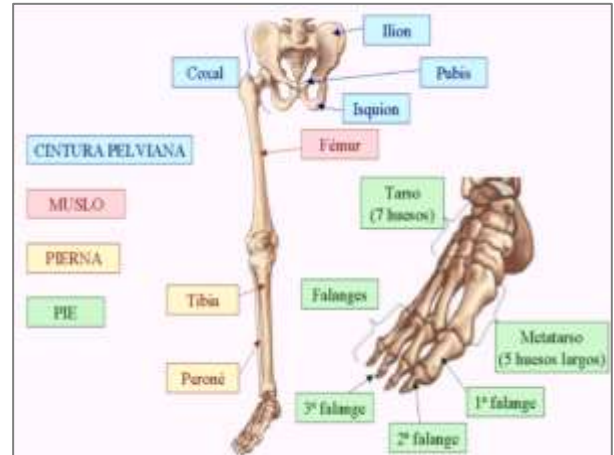


Figura 13. Extremidad inferior del cuerpo humano.

Las uniones y eslabones tienen forma básica y sencilla para facilitar su remplazo si en dado caso llegan a ser dañadas o tienen algún efecto negativo durante su uso, de esta manera pueden ser cambiados rápida y fácilmente. Uno de los objetivos, es que tanto los pacientes como los psicoterapeutas no tengan complicaciones al colocarlo, retirarlo o durante el uso del paciente y puedan utilizarlo el tiempo que sea necesario.

En la Figura 14 se observa el modelo con 4 eslabones, que son comparados con el sistema óseo del cuerpo humano, representando la cadera, la rodilla y el tobillo, correspondientes a una pierna. Como se observa, cuenta con 3 GDL por cada pierna, con un total de 6 GDL por todo el exoesqueleto, para generar el movimiento de marcha con las condiciones angulares necesarias para el desempeño de ésta en la rehabilitación.

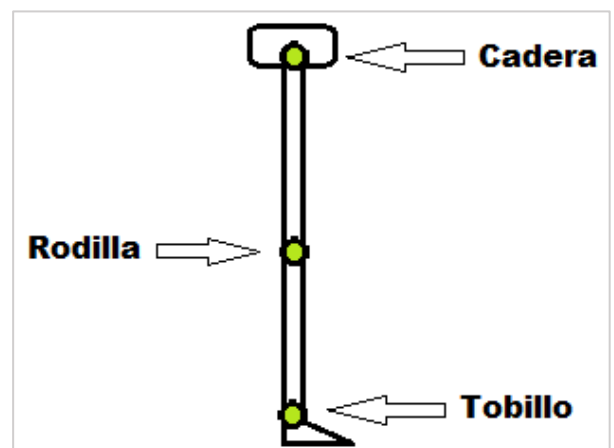


Figura 14. Segmentos y uniones básicas de la pierna.

Para el diseño se presenta un modelo de exoesqueleto para la rehabilitación de una persona con problemas de movilidad en las piernas. La característica principal de este diseño, en cuanto al usuario, es que puede contar o no con movilidad en la parte superior del cuerpo y puede

brindar rehabilitación individual tanto para la cadera, rodilla o tobillo. Tiene 6 grados de libertad, 3 en cada pierna, se pueden adaptar colchones y cinturones de seguridad para mantener a la persona unida al dispositivo haciéndolo más ergonómico.

La pieza de la cadera está conformada por un respaldo alto, tiene la medida suficiente para sostener a una persona que no cuente con movilidad en la parte superior del cuerpo, además el diseño tiene un soporte lumbar.

El diseño se observa en la Figura 15, posee un soporte unido con barras móviles (verticales y horizontales) en la parte trasera, para adecuarlo al paciente; dos pares de cinturones de seguridad, los cuales se pueden ajustar dependiendo de la complejión del mismo.

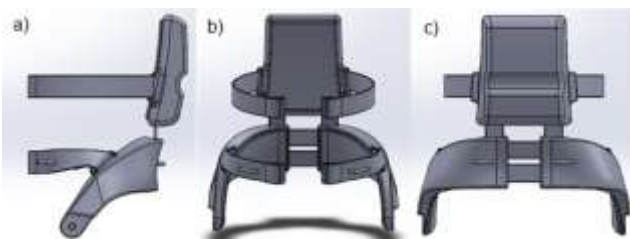


Figura 15. Respaldo modelo: a) Vista lateral, b) Vista frontal, c) Vista trasera.

En la Figura 16 se observa el eslabón que tiene una ranura en el centro de la pieza realizando un concentrador de esfuerzos, de esta manera disipa las cargas a lo largo de todo el eslabón haciéndolo más resistente.



Figura 16. Eslabón del muslo.

En la Figura 17 se puede observar que el modelo tiene con una pieza ranurada en su centro, ambos extremos poseen formas circulares y sus medidas son estandarizada para la población en México.



Figura 17. Eslabón de la pierna o fémur.

El modelo completo del exoesqueleto se muestra en la Figura 18, tiene aditamentos como lo son los cinturones

de seguridad, motores, tornillos, almohadillas y estructura de soporte.



Figura 18. Modelo ExoSim1. a) Vista lateral, b) Vista frontal, c) Vista isométrica.

En la Figura 19 se puede observar la estructura metálica para que el exoesqueleto permanezca fijo y a su vez soportar a una persona en reposo o en movimiento, la estructura diseñada se puede ubicar fácilmente encima de una caminadora para la rehabilitación asignada, este exoesqueleto con 3 piezas de fácil unión, la base que se observa de negro, el andamio de color rojo y la pieza de elevación, esta cuenta con diferentes niveles de altura para adecuarse al usuario. Cuenta con 4 soportes para el exoesqueleto hacia la estructura que pueden ser arneses resistentes, en este mismo sitio se pueden colocar arneses para la persona y hacer más cómoda la rehabilitación.



Figura 19. Diseño del soporte.

III. Co-simulación del Exoesqueleto

Para realizar la co-simulación del exoesqueleto se debe tener antecedentes de la biomecánica para conocer el ciclo de marcha humana, los ángulos a los que se someten las piernas al realizar distintos movimientos y la estatura promedio de las personas en México, de esta manera se definen las variables que el exoesqueleto necesita para ayudar al paciente en la generación básica de movimientos de flexión y extensión. Luego se realiza el diseño del mecanismo aplicando la información obtenida en la investigación con el programa SolidWorks. Para realizar la co-simulación se selecciona el modelo ExoSim que se muestra en la Figura 20, se desarrolla el control por medio del programa MatLab, vinculando el trabajo en conjunto de estos dos programas.



Figura 20. Modelo ExoSim.

El modelo del exoesqueleto es diseñado y ensamblado en el programa SolidWorks como se observa en la Figura 21, cuidando las relaciones de posición entre cada pieza y las coordenadas de origen de estas.



Figura 21. Prototipo en SolidWorks.

Establecido el modelo se continua con la exportación a MatLab. Una vez realizado la migración del modelo se puede observar en la Figura 22 el diseño del exoesqueleto en el ambiente de MatLab listo para controlar con los bloques de Simulink.



Figura 22. Prototipo exportado a MatLab.

La validación del exoesqueleto se realiza en lazo abierto.

Trayectoria cadera

Los ángulos que se observan en la Tabla 1 son los utilizados para la programación de la trayectoria de la cadera, cada uno es analizado con respecto al tiempo.

Tabla 1. Ángulos de la cadera para la trayectoria.

Fase	Cadera
Apoyo inicial	20°
Carga	20°
Apoyo medio	20°
Apoyo final	-20°
Prebalanceo	-10°
Balanceo inicial	20°
Balanceo medio	20°
Balanceo final	20°

La Figura 23 muestra la gráfica con los resultados de la simulación del prototipo con control en lazo abierto, se observa la línea en color rojo la trayectoria deseada para la cadera y en color azul la trayectoria real que sigue el sistema.

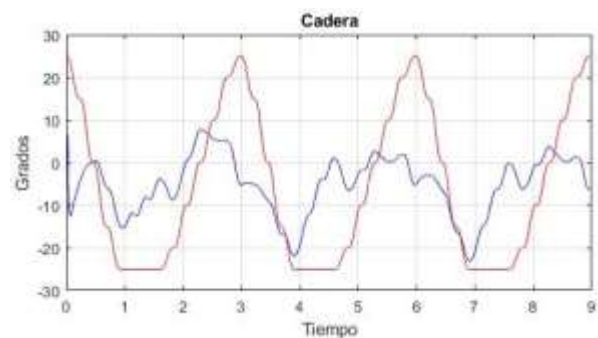


Figura 23. Simulación movimientos de cadera.

Trayectoria rodilla

Los ángulos utilizados para programar la trayectoria de movimiento de la rodilla fueron tomados de la Tabla 2, donde se plasmas los movimientos para cada fase de la marcha.

Tabla 2. Ángulos de la rodilla.

Fase	Rodilla
Apoyo inicial	0-5°
Carga	20°
Apoyo medio	0-5°
Apoyo final	0-5°
Pre-balanceo	40°
Balanceo inicial	60°
Balanceo medio	25°
Balanceo final	5°

La rodilla se considera el punto de rotación con más movimientos, por lo tanto, es la parte del cuerpo que presenta más desgaste al caminar.

Al realizar la prueba de simulación con el control en lazo abierto se observa en la Figura 24 que los movimientos reales representado con la línea azul es capaces de seguir los movimientos de la trayectoria deseada línea color rojo.

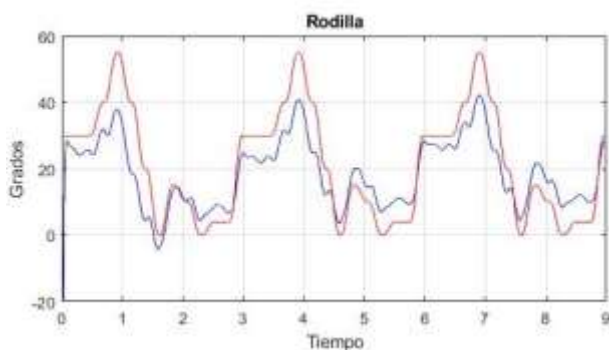


Figura 24. Simulación movimientos de rodilla.

Trayectoria tobillo

La Tabla 3 muestra los ángulos de movimiento del tobillo, estos son utilizados para la programación de la trayectoria de movimiento. Se puede observar que el tobillo en comparación a la rodilla presenta menos rango de movimiento.

Tabla 3. Ángulos del tobillo en sus 8 fases.

Fase	Tobillo
Apoyo inicial	0°
Carga	10°
Apoyo medio	5°
Apoyo final	10°
Pre-balanceo	15°
Balanceo inicial	5°
Balanceo medio	0°
Balanceo final	0°

En la Figura 25 se presenta el desempeño del exoesqueleto en lazo abierto, con la línea en color rojo la deseada y la línea de color azul la co-simulada del sistema.

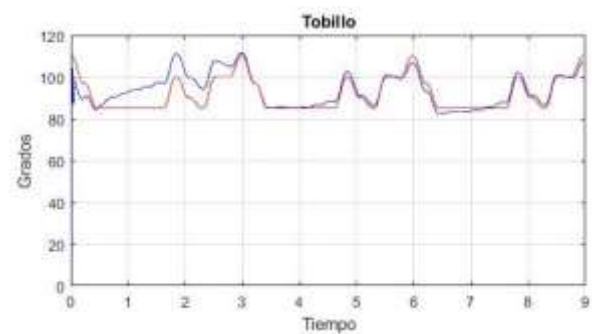


Figura 25. Movimiento de la rodilla.

En la Figura 26 se observan las 3 trayectorias reales del sistema correspondientes a los puntos de rotación de la cadera (línea azul), rodilla (línea roja) y tobillo (línea verde), trabajando paralelamente para obtener el movimiento total y estable de la marcha humana del prototipo.

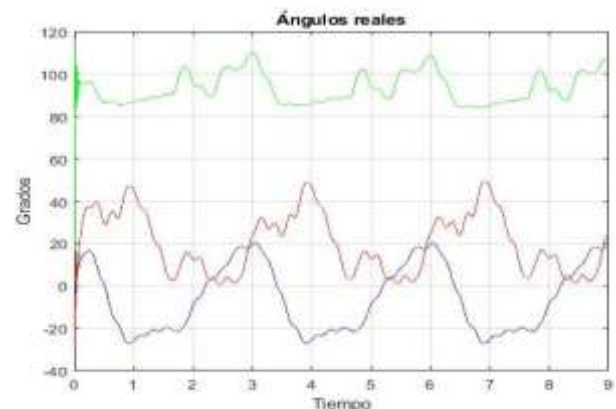


Figura 26. Movimiento de los 3 puntos de rotación.

Conclusiones

El diseño del exoesqueleto cumple con las características planteadas y mecánicamente las piezas son de fácil fabricación. Trabajar con diseños virtuales a través de la co-simulación para diseñar un exoesqueleto personalizado fue realmente satisfactorio, considerando la información obtenida del estado del arte y de los tres programas especializados que se utilizaron, como son: Simscape Multibody, MatLab y SolidWorks. Con la co-simulación se obtiene ahorro de tiempo, en costos y en pruebas al prototipo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima.

Referencias

- Aach, M., Cruciger, O., Sczesny-Kaiser, M., Höffken, O., Meindl, R. C., Tegenthoff, M., ... Schildhauer, T. A. (2014). Voluntary driven exoskeleton as a new tool for rehabilitation in chronic spinal cord injury: a pilot study. *The Spine Journal*, 14(12), 2847–2853. <https://doi.org/10.1016/J.SPINEE.2014.03.042>
- Ali, H. (2014). Bionic Exoskeleton: History, Development and the Future. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 2014, 58–62. Retrieved from <http://iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/ICAET-2014/me/volume-5/12.pdf?id=7622>
- Aliman, N., Ramli, R., & Haris, S. M. (2018). Modeling and co-simulation of actuator control for lower limb exoskeleton. 2018 3rd International Conference on Control and Robotics Engineering, ICCRE 2018, 94–98. <https://doi.org/10.1109/ICCRE.2018.8376441>
- Han, S., Wang, H., & Tian, Y. (2018). Adaptive computed torque control based on RBF network for a lower limb exoskeleton. *Proceedings - 2018 IEEE 15th International Workshop on Advanced Motion Control, AMC 2018*, 35–40. <https://doi.org/10.1109/AMC.2019.8371059>
- Lugo, E., Ponce, P., Molina, A., & Castro, S. (2014). Co-simulación del Diseño Biomecánico para un Exoesqueleto Robótico del Miembro Inferior. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomedica*, 35(2), 145–158.
- Muramatsu, Y., Kobayashi, H., Sato, Y., Jiaou, H., Hashimoto, T., & Kobayashi, H. (2011). Quantitative Performance Analysis of Exoskeleton Augmenting Devices - Muscle Suit - for Manual Worker. *International Journal of Automation Technology*, 5(4), 559–567. <https://doi.org/10.20965/ijat.2011.p0559>
- Reinkensmeyer, D. J., & Boninger, M. L. (2012). Technologies and combination therapies for enhancing movement training for people with a disability. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-9-17>
- Yagn, N. (1890). Apparatus for facilitating walking, running, and jumping. Retrieved from <https://patentimages.storage.googleapis.com/0f/e0/2c/161bea0a876b81/US420179.pdf>
- Yasunidos. (2013). Fuzzy PID Control for Passive Lower Extremity Exoskeleton in Swing Phase. *Yasunidos*. <https://doi.org/10.1109/ICEIEC.2013.6835483>
- Zoss, A. B., Kazerooni, H., & Chu, A. (2006). Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 11(2), 128–138. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2006.871087>