



DISEÑO BIOINSPIRADO DE EXOSQUELETO DE MIEMBRO INFERIOR PARA REHABILITACIÓN

Diego Fernando Casas, Alejandro Cuervo Blanco, Daniel Alejandro Gómez, Marcela Múnera, Miguel Montoya, Alexander Sierra, Luis E Rodriguez, Carlos Andrés Cifuentes

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Bogotá, Colombia

Resumen

Los exoesqueletos se están convirtiendo en dispositivos prometedores para mejorar la calidad de vida a pacientes con lesiones que afectan el desarrollo de la marcha. En este proyecto se busca desarrollar un diseño bioinspirado de exoesqueleto que incremente la adaptabilidad y reduzca los desalineamientos entre los centros de rotación del cuerpo humano y el dispositivo. Para obtener este tipo de diseño se tuvo en cuenta medidas tomadas por medio del análisis de la marcha con el uso de un sistema optoelectrónico de cámaras BTS. Gracias a esto, un exoesqueleto bioinspirado ha sido desarrollado y se encuentra en etapa de prueba dentro del grupo de investigación. Adicionalmente, se proponen mejoras al diseño establecido basado en el concepto de robótica flexible.

Palabras clave: exoesqueleto; bioinspiración, robótica flexible

Abstract

Exoskeletons are becoming one of the most promising devices to improve the quality of life for injured patients that affect gait development. Bioinspired designs in exoskeletons could increase adaptability as well as minimal interference to perform gait movements. The aim of this work is to develop a bioinspired exoskeleton with the capacity to increase adaptability reducing the misalignments between the joint's center of rotation and the device. The design is based on a motion analysis model, taking into account bioinspired design criterion, and also concepts of wearable robots. Currently, a bioinspired

exoskeleton has been developed and is under evaluation. In the near future, a design based on soft robotics is proposed.

Keywords: *exoskeleton, bioinspiration, soft robotics*

1. Introducción

Enfermedades como lesión en la medula espinal, parálisis cerebral o apoplejía afectan la movilidad del ser humano, causando pérdida total o parcial de la capacidad de locomoción. Por esta razón, dentro de los diferentes dispositivos de asistencia y rehabilitación, los exoesqueletos se están convirtiendo en uno de los dispositivos más prometedores para mejorar la calidad de vida de dichos pacientes y así obtener nuevamente la oportunidad de caminar. La implementación de estos dispositivos puede brindar beneficios como disminuir la atrofia o espasticidad muscular (Quintero, Farris, & Members, 2012), reduciendo la probabilidad de perder minerales en los huesos, problemas de circulación y complicaciones en el sistema digestivo.

Por otra parte, el término biomecatrónica describe un dispositivo inspirado en los seres vivos que involucra la implementación de electrónica, mecánica, sensores de control y procesamiento de señales. Así mismo, la bioinspiración brinda una visión a través de la observación de un modelo biológico que le permite al ingeniero desarrollar un dispositivo biomecatrónico (J. Pons, R. Ceres, 2008). Por esa razón, al realizar un diseño de un exoesqueleto bioinspirado, se puede incrementar la adaptabilidad al cuerpo y así disminuir el desalineamiento entre el dispositivo y el paciente durante la ejecución de la marcha. Adicionalmente, para el desarrollo de un exoesqueleto de miembros inferiores, se deben tener en cuenta los grados de libertad DOF (Degrees of freedom) de las articulaciones y su desempeño durante la marcha. Por ejemplo, la articulación de la cadera tiene 3 DOF, dos de ellos a menudo no implementados en los dispositivos actuales (abducción/aducción y rotación interna/externa de la cadera), tal como se puede observar en algunos exoesqueletos comerciales como Lokomat (Lünenburger, Colombo, Riener, & Dietz, 2004), Ekso (Chen et al., 2016) y HAL-5 (Dollár & Herr, 2008); donde únicamente se implementa actuación en el plano sagital.



Figura 1. (a) The Lokomat®(Lünenburger et al., 2004), **(b) Ekso**(“Ekso GT - Exoskeleton Report,” n.d.) y **(c) HAL5**.(Beciri, 2009)

Con el objetivo de suplir la necesidad de asistir a pacientes con distintas patologías que afectan su movilidad, nace la iniciativa EksoWalker, que busca brindar un soporte estructural rígido con la capacidad de adaptarse al cuerpo.

Por otro lado, el uso de tecnología flexible en el diseño de dispositivos robóticos vestibles, puede proporcionar al usuario una mayor capacidad de realizar tareas de forma natural, en donde las máquinas rígidas se ven limitadas. De igual forma, este tipo de diseño puede brindar un sistema de fusible mecánico, que actúa ante un exceso de carga.

2. Trabajo relacionado

El proyecto EksoWalker, actualmente en desarrollo, se basó en diferentes dispositivos, entre ellos el Lokomat (Figura 1a). Este consiste en una ortesis para la marcha con controladores electromecánicos que ayudan al paciente mientras camina y posee 2 grados de libertad por pierna (Flexión y extensión de rodilla y cadera). Cabe resaltar que es el único que consta de una banda caminadora y de un sistema de soporte del peso para el cuerpo además del sistema de ortesis para miembro inferior. De esta forma, Lokomat brinda una herramienta al terapeuta evitando la tarea de mover las piernas del paciente durante el entrenamiento en la banda caminadora, además de una guía segura para las piernas del paciente, una alta exactitud de repetición y la oportunidad de aumentar el tiempo de entrenamiento en comparación con la ayuda manual prestada por el terapeuta (Lünenburger et al., 2004).

Por otra parte, el dispositivo EKSO (Chen et al., 2016) mostrado en la figura 1b, está compuesto por un mecanismo vestible que brinda asistencia y rehabilitación a pacientes que poseen parálisis o debilidad extrema en las articulaciones de los miembros inferiores. Este dispositivo posee tres DOF en cada pierna en el plano sagital, de forma activa para las articulaciones de cadera y rodilla y una articulación pasiva en el tobillo. Con la implementación de este dispositivo, se han realizado estudios que demuestran mejoría en la longitud de paso y velocidad durante marcha de pacientes que han sufrido parálisis cerebral (Paper, Poswiata, Wychowania, & Cygo, 2015).

En tercer lugar, se tiene el exoesqueleto HAL-5 (Dollar & Herr, 2008). Este es un dispositivo de cuerpo completo que busca aumentar el torque en las diferentes articulaciones del cuerpo humano, como se muestra en la figura 1c. El sistema HAL realiza la sujeción de todos los miembros y proporciona una asistencia por medio de un sistema de caja reductora de tipo "Harmonic Drive" colocado directamente sobre las articulaciones, siendo la principal característica aplicada en el EksoWalker. En cuanto a la rehabilitación, este dispositivo muestra un incremento considerable de velocidad y longitud de paso en pacientes con apoplejía (Yoshikawa et al., 2016).

Finalmente, se tiene el proyecto Exosuit que posee un novedoso diseño que se adapta a la intención de la robótica suave, en donde se busca no limitar al usuario en algunos de sus movimientos cuando realiza tareas simples, sin dejar de brindarle asistencia. De igual forma, este dispositivo elimina los problemas de alineación del exoesqueleto con

cada una de las articulaciones en donde se va actuar, a cambio de utilizar la estructura esquelética del cuerpo como soporte. El uso del cuerpo como soporte dificulta el uso del dispositivo en procesos de rehabilitación de pacientes que presenten patologías en donde se reduce el equilibrio y/o soporte; sin embargo, brinda una gran ventaja en técnicas de fortalecimiento muscular. Por otro lado, el exoesqueleto tiene como principio ejercer fuerzas de tensión sobre el cuerpo de forma paralela a los músculos y así no limitar la cinemática natural del usuario. En el desarrollo de este dispositivo, inicialmente los autores realizaron un diseño para lograr asistencia de la cadera durante el ciclo de marcha (Alan T Asbeck, Schmidt, & Walsh, 2014) (Figura 2a). Los resultados obtenidos arrojan un incremento del 30% en el torque del plano sagital suministrado en la cadera, un incremento del 6% de fuerza en los muslos durante la fase de balanceo y se logra anular la fuerza ejercida al 20% del ciclo. Por otro lado, durante la fase de postura el dispositivo no actúa, dándole libertad al usuario.

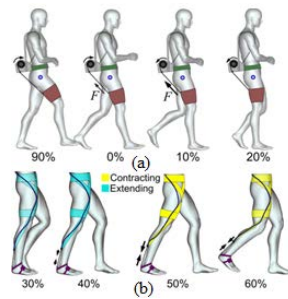


Figura 2. (a) Exosuit para asistencia de cadera durante el ciclo de marcha.(Alan T Asbeck et al., 2014)
(b) Exosuit para asistencia de cadera y tobillo durante el ciclo de marcha (A. T. Asbeck, De Rossi, Holt, & Walsh, 2015)

Posteriormente, los mismos autores realizan el diseño para un dispositivo que proporcione asistencia tanto en cadera como en el tobillo bajo el mismo principio, aunque utilizando un "bowden cable" en lugar de las correas anteriormente manejadas (Alan T Asbeck et al., 2014) (Figura 2b). Para este diseño se encuentra una reducción del costo metabólico en un 6.4% en el mejor de los casos, aunque se puede generar una carga sobre el usuario cercana al 70% en el ciclo de marcha durante la fase de balanceo.

3. Métodos

La iniciativa EksoWalker nace por la necesidad de asistir a pacientes con distintas patologías que afectan su movilidad, brindando un soporte estructural rígido de tipo órtesis que se adapta al cuerpo sin restringir los grados de libertad más importantes para la marcha, siendo estos los que actúan principalmente en el plano sagital (Figura 3).



Figura 3. Grados de libertad que permite la estructura en el plano sagital en el ciclo de marcha

Para el diseño del exoesqueleto es importante estudiar el cuerpo humano, su composición y el funcionamiento mecánico de sus articulaciones. Para dicho estudio, se modela el cuerpo humano resaltando cada elemento importante durante el movimiento de las articulaciones en la sección de interés (Casas et al., 2016), en este caso, para un exoesqueleto de rodilla, es necesario modelar todo el miembro inferior y hacer un análisis de los grados de libertad identificando que movimientos son importantes y cuales se pueden restringir. Este modelo se obtuvo utilizando un sistema de captura de movimiento BTS y un protocolo adecuado para el estudio de los miembros inferiores como el de Davis-Heel (Figura 4) (Davis, Ounpuu, Tyburski, & Gage, 1991).

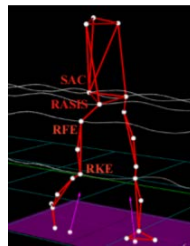


Figura 4. Sistema de captura de movimiento BTS (Casas et al., 2016)

Las extremidades se modelan como eslabones rígidos que se unen en puntos específicos llamados Centros Articulares de Rotación (CAR) que permiten tres grados de libertad: abducción -aducción, flexión – extensión y rotación en el mismo eje. Con estos CAR se diseña la estructura del exoesqueleto respetando los rangos de movimiento y asegurando que cada articulación siga correctamente el movimiento del cuerpo humano. Esto se consigue haciendo que el centro de rotación de la articulación del exoesqueleto coincida con el CAR del cuerpo humano, evitando así los microdesalineamientos (E. Rocon, J. L. Pons, A. Ruiz, R. Raya, 2008).

Con el objetivo de reducir los microdesalineamientos, se diseñó una estructura adaptable que permite variar su longitud en pacientes entre 1.70m y 1.85m por medio de un sistema telescópico continuo, tanto para el fémur como para la tibia y peroné. Por otro lado, se diseñó la estructura para que se pueda adaptar a la curvatura del cuerpo humano, de tal forma que los puntos articulares del dispositivo estén próximos a los CAR (Figura 5).



Figura 5. Diseño ergonómico adaptable de la estructura a la curvatura del cuerpo

Con la información medida de los patrones de marcha se identificaron los grados de libertad de la pierna, analizada como un conjunto de eslabones rígidos con 3 grados de libertad en la cadera, un grado de libertad en la rodilla y un grado de libertad en el tobillo. En el ExoWalker se restringe un DOF debido al bajo impacto que genera la rotación en el mismo eje de la articulación coxofemoral que una rótula que no tiene un eje sino un punto o vértice, por tanto, si el hueso rota en su mismo eje no afecta el eje articular de la cadera para el plano sagital. Para el caso del tobillo, se presenta una rotación interna-externa considerable durante el ciclo de marcha que no se tiene en cuenta en el diseño actual ya que los pacientes con estas limitaciones en su mayoría no tienen la capacidad de efectuar este movimiento. Por esta razón, se ve la necesidad de considerar este grado de libertad en diseños futuros, aumentando así la bioinspiración de la estructura. Para el análisis de la articulación de la rodilla se considera un modelo de bisagra con un grado de libertad de tipo flexión - extensión, ya que, al estudiar individualmente la articulación, los grados de libertad de abducción–aducción y de rotación en el mismo eje, son imperceptibles.

4. Resultados

Con el análisis de las articulaciones en conjunto se llega a una estructura que permite 2 grados de libertad en la articulación de la cadera, un grado de libertad en la articulación de la rodilla y un grado de libertad en la articulación del tobillo, con el fin de darle al usuario la movilidad esperada para una marcha natural.

Este diseño se basó principalmente en la bioinspiración, por tanto, cada uno de sus eslabones es adaptable a la longitud de las extremidades del paciente, con el fin de disminuir los desalinamientos entre la estructura del exoesqueleto y la estructura humana, específicamente entre el eje del motor y el eje de la articulación. Por otra parte, se diseñaron los eslabones de la estructura basados en el contorno del cuerpo humano, es decir, pasando de un eslabón lineal a uno curvo, mejorando la ergonomía y la sujeción al paciente.

El exoesqueleto cuenta con seis motores que actúan en la cadera, rodilla y tobillo. Al mismo tiempo, teniendo en cuenta una implementación pasiva de la estructura, los motores son fácilmente removibles dejando los encoders para obtener información de las articulaciones en el plano sagital. Para la sujeción de las piernas a la estructura es

necesario acoplar elementos rígidos, cómodos y ajustables. Por un lado, estos elementos deben evitar que el usuario sufra daños o molestias. Por otro lado, se debe garantizar que cada sección transmita las fuerzas de forma adecuada a la pierna en toda la superficie de contacto, con el fin de permitir la movilidad sin causar desalineamientos. Estas secciones fueron fabricadas por medio de impresión 3D en nailon, el cual es un polímero de ingeniería resistente a la fatiga y a la tensión, que se puede adaptar al contorno de la pierna de un paciente estándar (Figura 5).



Figura 5. Diseño de sujeción del exoesqueleto adaptado a la musculatura humana

Uno de los factores más importantes a tener en cuenta en el diseño de un exoesqueleto es el peso, siendo la geometría de los materiales una característica importante en el dispositivo. Por esta razón, todo el cuerpo metálico del EksoWalker fue fabricado en aluminio de alta resistencia; material con baja densidad y liviano, que proporciona un peso por pierna de 2kg sin instrumentación electrónica, pero al mismo tiempo cumple con los requerimientos de diseño mecánico para brindar apoyo a pacientes de hasta 90 kg. Estos requerimientos mecánicos fueron validados utilizando una simulación por elementos finitos.

5. Trabajo futuro

Con el objetivo de dotar a los robots con nuevas y bioinspiradas capacidades, los ingenieros se dan la tarea de investigar la robótica flexible, brindándole al robot la capacidad de adaptarse y realizar interacciones flexibles en ambientes impredecibles (Kim, Laschi, & Trimmer, 2013). Uno de los ejemplos más claros, es el desarrollo de un brazo flexible inspirado en un pulpo (Figura 6). El prototipo del brazo robot, presenta la morfología del modelo biológico y la amplia disposición de los músculos (Laschi et al., 2012). Además, muestra los movimientos básicos del brazo del pulpo como alargamiento, acortamiento y flexión en el agua (Laschi et al., 2012).

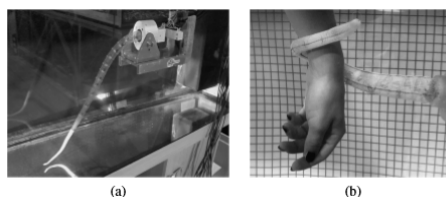


Figura 6. Brazo robot basado en Octopus Vulgaris. (a) En reposo y (b) agarrando un brazo humano (Laschi et al., 2012).

Uno de los desafíos en el diseño de la robótica flexible, es el diseño de sistemas de actuación capaces de ejercer fuerzas elevadas, y así replicar la funcionalidad de los músculos del cuerpo (Kim et al., 2013). Para lograr este diseño, se debe contar con materiales flexibles lo suficientemente resistentes para alcanzar el objetivo.

Se deben tener en cuenta las ventajas que se obtienen al hacer uso de la robótica flexible sobre la robótica rígida: (i) las interacciones son mucho más seguras y robustas en comparación con los robots comerciales disponibles; (ii) los comportamientos son adaptativos y usan inteligencia mecánica simplificando el sistema de control necesario para la interacción física y (iii) son más económicos y sus componentes son más simples (Kim et al., 2013). También tiene desventajas, por ejemplo, no puede prestar un soporte rígido al paciente. Entonces, ¿Por qué no mezclar lo mejor de ambas tecnologías?

Los investigadores de robótica han desarrollado una variedad de robots que emplean principalmente materiales rígidos pero que logran la flexibilidad que se encuentra en las estructuras biológicas (Laschi et al., 2012). En este sentido, Trimmer (Trimmer et al., 2006) construyó un robot con la capacidad de escalar llamado "Softbot", basado en la biomecánica y neuromecánica de la oruga *Manduca sexta*. El cuerpo del robot está hecho de caucho de silicona elástica y es accionada mediante resortes hechos de SMA (Shape Memory Alloy). Además, tiene una deformación continua y es capaz de encogerse en un pequeño volumen. Ejemplos como estos muestran que es posible conseguir la mayoría de las capacidades de los robots flexibles incluso cuando los materiales de accionamiento subyacentes son rígidos (Laschi et al., 2012).

Por lo anterior, nace la necesidad de implementar tecnología de robótica flexible a la estructura rígida del EksoWalker, con el fin de tener una actuación más natural y adicionalmente darle un soporte elástico y lo suficientemente rígido que pueda ejercer la fuerza necesaria para brindar soporte al movimiento de las articulaciones del paciente.

Inicialmente, la implementación de esta tecnología será en la articulación del tobillo, ya que se puede hacer una reducción de masa de la estructura en la sección más distal acercándose de esta forma a una estructura más bioinspirada y mejorando también la estética del dispositivo.

6. Referencias

Artículos de Conferencia

- Casas, D., Rubio, M. G., Montoya, M., Sierra, W., Rodriguez, L., Rocon, E., & Cifuentes, C. A. (2016). Bioinspired Hip Exoskeleton for Enhanced Physical Interaction. In *International Conference on NeuroRehabilitation* (pp. 1–2). https://doi.org/10.1007/978-3-319-46669-9_245
- Lünenburger, L., Colombo, G., Riener, R., & Dietz, V. (2004). Biofeedback in gait training with the robotic orthosis Lokomat. *Annual International Conference of*

the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference, 7, 4888–4891. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2004.1404352>

- Paper, C., Poswiata, A., Wychowania, A., & Cygo, K. (2015). Effects of short-term locomotion training with assistance of EKSO GT exoskeleton (TM) in patients with Cerebral Palsy - CASE REPORT P-057 Anna Poświata PhD (pp. 7–8).
- Quintero, H. a, Farris, R. J., & Members, M. G. (2012). Control and Implementation of a Powered Lower Limb Orthosis to Aid Walking in Paraplegic Individuals, *19(6)*, 652–659. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2011.5975481>.Control
- Trimmer, B. a, Takesian, A. E., Sweet, B. M., Rogers, C. B., Hake, D. C., & Rogers, D. J. (2006). Caterpillar locomotion: A new model for soft- bodied climbing and burrowing robots. *7th International Symposium on Technology and the Mine Problem, Monterey, CA May 2-5, 2006*, 1–10.

Artículos de Revista

- Asbeck, A. T., De Rossi, S. M. M., Holt, K. G., & Walsh, C. J. (2015). A biologically inspired soft exosuit for walking assistance. *The International Journal of Robotics Research, 34(6)*, 744–762. <https://doi.org/10.1177/0278364914562476>
- Asbeck, A. T., Schmidt, K., & Walsh, C. J. (2014). Soft Exosuit for Hip Assistance. *Robotics and Autonomous Systems, 73*.
- Chen, B., Ma, H., Qin, L.-Y., Gao, F., Chan, K.-M., Law, S.-W., ... Liao, W.-H. (2016). Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons. *Journal of Orthopaedic Translation, 5*, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2015.09.007>
- Davis, R. B., Ounpuu, S., Tyburski, D., & Gage, J. R. (1991). A gait analysis data collection and reduction technique. *Human Movement Science, 10(5)*, 575–587. [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(91\)90046-Z](https://doi.org/10.1016/0167-9457(91)90046-Z)
- Dollar, A. M., & Herr, H. (2008). Lower Extremity Exoskeletons and Active Orthoses:Challenges and State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Robotics, 24(1)*, 144–158. <https://doi.org/10.1109/TRO.2008.915453>
- Kim, S., Laschi, C., & Trimmer, B. (2013). Soft robotics: A bioinspired evolution in robotics. *Trends in Biotechnology, 31(5)*, 287–294. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.002>
- Laschi, C., Cianchetti, M., Mazzolai, B., Margheri, L., Follador, M., & Dario, P. (2012). Soft Robot Arm Inspired by the Octopus. *Advanced Robotics, 26(7)*, 709–727. <https://doi.org/10.1163/156855312X626343>
- Yoshikawa, K., Mizukami, M., Kawamoto, H., Sano, A., Koseki, K., Hashizume, Y., ... Tsurushima, H. (2016). Hybrid Assistive Limb enhances the gait functions in sub-acute stroke stage: A multi single-case study. *Physiotherapy Practice and Research, 37(2)*, 91–100. <https://doi.org/10.3233/PPR-160074>

Libros

- E. Rocon, J. L. Pons, A. Ruiz, R. Raya, A. S. (2008). Human-robot Physical Interaction. In *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons* (pp. 129–134). Madrid.

- J. Pons, R. Ceres, L. C. (2008). "Introduction to wearables robots. In *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons*. (John Wiley, pp. 6–9). Madrid.

Fuentes Electrónicas

- Beciri, D. (2009). Cyberdyne HAL-5 – exoskeleton robot | RobAid. Retrieved June 4, 2017, from <http://www.robaid.com/bionics/cyberdyne-hal-5-exoskeleton-robot/>
- Ekso GT - Exoskeleton Report. (n.d.). Retrieved June 7, 2017, from <http://exoskeletonreport.com/product/ekso-gt/>

Sobre los autores

- **Diego Fernando Casas**, Estudiante Ingeniería Mecánica. diego.casas-b@mail.escuelainq.edu.co
- **Alejandro Cuervo Blanco**, Estudiante Ingeniería Electrónica. alejandro.cuervo@mail.escuelainq.edu.co
- **Daniel Alejandro Gómez**, Estudiante Ingeniería Electrónica. daniel.gomez-v@mail.escuelainq.edu.co
- **Marcela Múnera**, Bioingeniera, Master en Mecánica, PhD in Mechanics & Biomechanics at Reims Champagne-Ardenne University. Profesora Asistente. marcela.munera@escuelainq.edu.co
- **Miguel Montoya**, Ingeniero Mecánico, Master en Mecánica, PhD in Mechanical Engineering at Universidade de Sao Paulo. Profesor Asistente. miguel.montoya@escuelainq.edu.co
- **Alexander Sierra**, Ingeniero Electrónico. Profesor Asistente. wilson.sierra@escuelainq.edu.co
- **Luis E Rodríguez**, Ingeniero Electrónico, PhD en Ingeniería Biomédica en Universidad Politécnica de Cataluña. Decano Ingeniería Biomédica. Profesor titular. luis.rodriquez@escuelainq.edu.co
- **Carlos Andrés Cifuentes**, Ingeniero Electrónico, Master en Biomédica, PhD in Electrical Engineering at Federal University of Espirito Santo. Profesor Asistente. carlos.cifuentes@escuelainq.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2017 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)