

## Prótesis inteligente de miembro inferior utilizando inteligencia artificial para víctimas de la violencia.

Yesenia Restrepo Chaustre \*  
Faustino Muñoz Moner \*\*  
Universidad Francisco de Paula de Santander.\*  
Universidad Autónoma de Bucaramanga\*\*.

**Resumen:** En este trabajo se aborda la problemática existente en el Norte de Santander sobre las víctimas de las minas antipersonales, las normativas en jurisprudencia nacional e internacional, y las técnicas utilizadas para mejorar a las víctimas como la inteligencia artificial aplicada a esta área.

**Palabras claves:** Inteligencia artificial, nano autómatas, algoritmos bioinspirados, víctimas de la violencia.

### Desarrollo:

Problemática u oportunidad específica del departamento.

Dentro del marco de la ley, la ley 1448 del 2011, en el cual se consideran víctimas, para los efectos de esta ley, aquellas personas que individual o colectivamente hayan sufrido un daño por hechos ocurridos a partir del 1º de enero de 1985, como consecuencia de infracciones al Derecho Internacional Humanitario o de violaciones graves y manifiestas a las normas internacionales de Derechos Humanos, ocurridas con ocasión del conflicto armado interno (Ley 1448 de 2011, 2011), por la cual se dictan medidas de atención, asistencia y reparación integral a las víctimas del conflicto armado interno y se dictan otras disposiciones.

De acuerdo con la normativa y jurisprudencia nacional e internacional sobre violaciones de Derechos Humanos (DD.HH.) e infracciones al Derecho Internacional Humanitario (DIH), son víctimas de MAP y MUSE aquellas personas de la población civil o miembros de la Fuerza Pública que hayan sufrido perjuicios en su vida, su integridad personal, incluidas lesiones físicas o

psicológicas, sufrimiento emocional, así como el menoscabo de sus derechos fundamentales, pérdida financiera o deterioro en sus bienes, como consecuencia de actos u omisiones relacionados con el empleo, almacenamiento, producción y transferencia de Minas Antipersonal (MAP) (Oficina del Alto Comisionado Para la Paz, 2019).

A la fecha de corte, se han registrado 11.775 víctimas por minas antipersonal y munición sin explotar, siendo 2006 el año más crítico, pues se presentaron 1228 víctimas, el mayor número en toda la historia de Colombia. En la última década, la tendencia ha venido cayendo, con excepción del año 2012, hasta ubicarse en 2016 en niveles que no se presentaban desde el año 1999. En lo corrido de 2019, se han presentado 72 víctimas (Oficina del Alto Comisionado Para la Paz, 2019).

Según datos estadísticos presentados por el Alto Comisionado para la Paz en Colombia, en el departamento del Norte de Santander hasta la fecha se tienen 263 víctimas civiles, 613 víctimas de la fuerza pública, 32 víctimas femeninas, 841 víctimas masculinas, 3 víctimas sin información de género, 689 víctimas heridas, 187 víctimas muertas, 814 víctimas mayores de 18 años, 62 víctimas menores de 18 años para un total de 876 víctimas, siendo el departamento del Norte de Santander el cuarto departamento a nivel nacional afectado por las minas antipersonales (Oficina del Alto Comisionado Para la Paz, 2019).

Por lo tanto, teniendo en cuenta los datos estadísticos mencionados anteriormente, surge la necesidad de interiorizar en los componentes protésicos que permita mejorar la calidad de vida de las víctimas por minas antipersonales en comparación con las prótesis existentes en el país. De igual manera, la búsqueda de implementar el control inteligente a una prótesis mioeléctrica de miembro inferior, permitiendo a las prótesis inteligentes actuales acercarse al comportamiento de un miembro inferior normal (Torrealba Algarra, 2009).

El Plan y Acuerdo Estratégico Departamental de Ciencia Tecnología e Innovación del departamento del Norte de Santander-PAED (Gobernación de Norte de Santander, 2015) cuyo componente fundamental es fortalecer el desarrollo tecnológico sostenible e innovador en la región, en el cual, tiene como uno de los focos estratégicos de ejecución Biotecnología, luego con la ejecución y puesta en marcha de la propuesta se busca fortalecer este foco al estudiar e implementar técnicas de control inteligente, micro-nanoautómatas y algoritmos bioinspirados para implementarlas en las prótesis de miembro inferior de las víctimas del departamento del Norte de Santander.

### **Justificación**

El cuerpo humano está compuesto por diversos sistemas biológicos que difícilmente pueden reemplazarse por dispositivos biomédicos. A pesar de los avances en ingeniería biomédica no ha sido posible emular, completamente, la función de segmentos corporales y articulaciones que se pierden con la amputación (Lusardi et al., 2012).

Caminar es sinónimo de libertad para el ser humano, ya que brinda la posibilidad de desplazarse de un lado a otro a voluntad, valiéndose del sistema locomotor del cual es dotado por naturaleza. En este sentido, el ser humano se caracteriza por la locomoción bípeda, para la cual está provisto de dos extremidades inferiores, las cuales le permiten caminar con naturalidad. Para poder caminar, aparte de un sistema nervioso que coordine y supervise las acciones, es indispensable contar con un sistema músculo-esquelético que las ejecute, en este caso, un par de piernas. Para algunos individuos, su existencia se ve limitada a este nivel; es el caso de pacientes con amputación, mas, sin embargo, esta no es una problemática nueva, ya que desde la antigüedad el hombre por diferentes causas, ya sea una enfermedad congénita, problemas vasculares ocasionados por enfermedades como la diabetes o en el peor de los casos por los diferentes tipos de violencia que afectan a la humanidad a nivel mundial carecen de un par de extremidades inferiores (Torrealba Algarra, 2009).

La sustitución por pérdida de miembros humanos por artefactos distintos a los naturales es una realidad desde hace más de dos mil años. Con el tiempo los inventos en los campos de la robótica, en particular de la biónica, han proporcionado al ser humano extremidades complementarias que cada día se perfeccionan (Manuel et al., 2004).

Ante el aumento significativo de personas con amputación de miembro inferior, debido a la guerra latente en nuestro país por más de 50 años y con los datos estadísticos dados por las firmas internacionales Esri, USGS, NOAA, DAICMA y soportados ante el gobierno de Colombia por la Oficina del Alto Comisionado para la Paz, las víctimas por minas antipersonal y munición sin explosionar ascienden a 11.775 víctimas, de las cuales en el departamento del Norte de Santander corresponden 879 víctimas, entre las cuales tenemos civiles y de la fuerza pública (Oficina del Alto Comisionado Para la Paz, 2019). Por lo tanto, ante la problemática mencionada anteriormente y el aumento latente de las cifras mencionadas anteriormente, surge la necesidad de plantear la presente propuesta de investigación, con el cual se busca ahondar en el tema y solventar esta problemática.

En los últimos años diversas empresas, sobre todo en países de primer mundo, han desarrollado prótesis transfemorales híbridas con el propósito de mejorar la movilidad del paciente amputado, algunas de estas empresas son: Otto Bock, Blatchford, Endolite, Ossur, Fillauer, etc. (Martínez et al., 2010).

Además, en el Plan y Acuerdo Estratégico Departamental de Ciencia Tecnología e Innovación del departamento del Norte de Santander-PAED (Gobernación de Norte de Santander, 2015), y contando con insumos como el Plan Estratégico Departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación – PEDCTI del Norte de Santander 2012-2024 (Colciencias et al., 2014) liderados por la gobernación y el Gobierno Nacional, en cabeza de Colciencias priorizaron los componentes en 10 focos o sectores estratégicos, entre los cuales se destaca el foco de Biotecnología y como

visión departamental se espera que para el 2025 el departamento Norte de Santander se consolide como referente en desarrollo tecnológico, sostenible e innovador.

Actualmente el alto costo de una prótesis obliga a que se formulen prótesis de baja tecnología, debido a que en Latinoamérica casi en su totalidad los elementos protésicos son importados lo que eleva su costo entre \$2.000USD-\$100.000USD (Vargas Duque, 2018), luego la presente propuesta de tesis doctoral representa una oportunidad de satisfacer las necesidades presentes en las víctimas de la violencia en el departamento del Norte de Santander y además impulsar a la región para crear e innovar en sistemas de control inteligente, junto con nanotecnología aplicados a dispositivos protésicos ofreciendo a las comunidades de bajos recursos de nuestro país y específicamente de la región norte santandereana prótesis de miembro inferior con alta tecnología y bajo costo.

Dentro del marco de políticas sectoriales en materia de discapacidad El Ministerio de Salud y Protección Social aprueba los lineamientos generales para la implementación de la Política Pública Nacional de Discapacidad e Inclusión Social 2013-2022 (Ministerio de Salud y Protección Social, 2013) el cual busca la necesidad de incorporar y transversalizar un enfoque de inclusión social en el que promueva el desarrollo de las capacidades para el mejoramiento de la calidad de vida de las personas con discapacidad y a su vez ofrezca espacios para el desarrollo y participación en todos sus ámbitos. Luego ésta propuesta de tesis doctoral se encuentra en coherencia con las políticas planteadas por el gobierno nacional de proporcionar tecnologías de apoyo y dispositivos para la habilitación y rehabilitación funcional de las personas con discapacidad (Vargas Duque, 2018) y víctimas de la violencia en el departamento del Norte de Santander.

Por lo tanto, la creación de nuevas prótesis se ha convertido en una necesidad debido al crecimiento del número de amputaciones originadas por diversas causas: accidentes, guerras, desastres naturales, enfermedades crónicas degenerativas, etc. Una prótesis es una extensión

artificial que reemplaza total o parcialmente (parte o partes del cuerpo que se ha perdido) (Martínez et al., 2010).

### **Marco conceptual**

El nivel de amputación o el tipo de displasia que presente el individuo influirá en el diseño y construcción de una prótesis, partiendo de ésta premisa se inició con implementación de prótesis mecánicas cuyos dispositivos se utilizaban con la función de apertura o cierre voluntario, luego se dio paso a las prótesis eléctricas, utilizando motores eléctricos en el dispositivo terminal. Seguidamente, las prótesis neumáticas, las cuales eran accionadas por ácido carbónico comprimido cuyo inconveniente eran sus accesorios y el riesgo del uso del ácido carbónico. Luego aparecieron las prótesis mioeléctricas, controladas por las señales EMG, este tipo de prótesis tiene la ventaja de que sólo requieren que el usuario flexione sus músculos para operarla, a diferencia de las prótesis accionadas por el cuerpo que requieren el movimiento general del mismo. Las prótesis híbridas la cual combina la acción del cuerpo con el accionamiento por electricidad en una sola prótesis (Manuel et al., 2004).

La construcción y control de un prototipo de muslo-pierna de dos grados de libertad, cuyo mecanismo, es fabricado con materiales ligeros, emulando movimientos de flexo-extensión del miembro inferior humano mediante músculos neumáticos fabricados para este propósito. Con un sistema mecánico y electrónico, que conforman el prototipo. La construcción y puesta en marcha del prototipo de muslo-pierna, hace factible vislumbrar el desarrollo posterior de mecanismos neumáticos con fines de rehabilitación (Ortega et al., 2010).

El libro Atlas of Amputations and Limb Deficiencies (Krajbich et al., 2016) presenta estadísticas sobre las personas con amputación y los dispositivos protésicos, centrándose en las funciones, características y elementos de conexión de estos dispositivos según el tipo de amputación. Además, se presenta información relacionada con los tipos de amputación y los detalles quirúrgicos.

La tesis doctoral (Vargas Duque, 2018) , ofrece una metodología para el desarrollo de dispositivos protésicos con productos asequibles con lo cual se busca disminuir los costos, en cuanto a la falta de productos y servicios para las personas con amputación y de bajos recursos, a su vez ofrece un método computarizado para producir sockets protésicos utilizando código abierto.

El estudio de un algoritmo basado en un modelo matemático para predecir los momentos y las fuerzas de reacción en un punto específico vinculado al miembro inferior de un amputado transfemoral. A su vez, dicho modelo matemático tiene en cuenta la inercia desarrolla durante el ciclo de la marcha (Ramírez et al., 2012).

Para la construcción y diseño de la rodilla, en su tesis doctoral (Torrealba Algarra, 2009), se basa en el uso de materiales poliméricos en la estructura de la prótesis y el planteamiento de una arquitectura de control basada en la generación de una trayectoria de referencia a partir de un generador de patrón central, e implementación de una estrategia de control adaptativo sobre el ángulo de rodilla.

Utilizando técnicas de inteligencia artificial (Muñoz Moner et al., 2010), plantearon un sistema de adquisición de datos que tome las señales de su par biológico e imite por el método de clonación el movimiento de la pierna sana y garantice que la persona al caminar no cojee y ejecute su desplazamiento en forma normal.

En lo referente al control inteligente de las prótesis de miembros inferiores (Martínez-Solís et al., 2016), logra desarrollar un algoritmo que permite aportar solución a la coordinación entre el cuerpo humano y las prótesis transfemorales inteligentes, aún ante cambios de velocidad en la marcha.

El diseño y construcción de un circuito para la adquisición de señales electromiográficas superficiales con el cual se toman datos del músculo Tibial Anterior en su máxima contracción voluntaria para obtener la normalización de los datos. El circuito diseñado permite adquirir señales sEMG de cualquier músculo del cuerpo humano, permitiendo visualizar y guardar la información a través de interfaces (Chaparro-Cárdenas et al., 2018).

Otro de los estudios es el controlador para prótesis robótica de miembro inferior de (Aguilar & Mera, 2017), en el que se utiliza el Método de la Elipsoide Atractiva con la Función Barrera de Lyapunov, generando una región de atracción que asegure la estabilidad del sistema y otra que asegure su convergencia al origen. Los resultados experimentales mostraron la eficacia de la señal de control de compensar las no linealidades del sistema dinámico, esto permite el correcto funcionamiento del control para el seguimiento de trayectorias por lo que se pudo simular satisfactoriamente la marcha humana en una pierna robótica.

Para el estudio biomecánico del pie humano, (M. et al., 2017) se utilizó un modelo de elementos finitos con geometrías obtenidas por medio de una reconstrucción de escaneos 3D. Geometrías que corresponden a los huesos corticales, trabeculares, músculos, fascia plantar y cartílagos, asignando a estos dos últimos tejidos, condiciones de no linealidad a sus respectivos modelos constitutivos. En el cual se simula los efectos de la bipedestación sobre el pie y en base a esto se concluye que el grado de fidelidad de un modelo anatómico es muy relevante para los valores de esfuerzos que se obtienen en una simulación biomecánica.

El desarrollo de un prototipo de prótesis de tobillo y pie que se controla a través de la actividad muscular de la pierna (electromiograma). La lectura de las señales mioeléctricas y el control de la prótesis, se implementaron en el microcontrolador ATmega de la plataforma Arduino, mediante el cual se predicen factores tales como la posición del pie cuando se realiza un paso y el torque necesario para impulsar al siguiente paso (Álvarez-Maldonado et al., 2017).



Se realiza una identificación de la influencia de la prótesis en la musculatura y la función de la marcha del paciente amputado comparándola con los patrones de la marcha humana normal todo esto mediante la utilización del Software de simulación dinámica OpenSim (Silva Castellanos, 2015).

En la investigación realizada por (Muñoz Móner et al., 2012), se replica el movimiento de una pierna real, por mapeo genético evolutivo, partiendo del concepto tecnológico de la clonación artificial con base en algoritmos genéticos y aplicando sistemas adaptativos. Además, utilizando técnicas de clonación artificial, basada en algoritmos evolutivos, es posible diseñar y construir sistemas inteligentes capaces de solucionar problemas con calidad superior a la lograda mediante otros métodos tradicionales.

Para muchos sistemas inteligentes de control, la metodología de diseño del controlador es esencialmente heurística y basada en ciertos principios de la Inteligencia Artificial o la investigación operativa. Las metodologías de control inteligente son muy variadas, e incluyen, por ejemplo, la lógica borrosa, sistemas expertos (control basado en reglas), aprendizaje, sistemas de planificación para control, algoritmos de búsqueda, sistemas híbridos, diagnóstico de fallos y reconfiguración, autómatas, redes de Petri, redes neuronales, programación evolutiva, algoritmos genéticos, optimización heurística, etc (Santos & Santos, 2011).

La inteligencia artificial combinada con la robótica en el área médica posibilita que algunas decisiones puedan ser obviadas de forma correcta. Los sistemas expertos proporcionan la facilidad de almacenar información y tomar decisiones gracias a sus algoritmos de trabajo, obteniendo diagnósticos de forma rápida y asertiva (Beltrán Ramírez et al., 2014).

Las estrategias de control más utilizadas para resolver la problemática son establecidas mediante controladores híbridos que utilizan señales de Electromiografía EMG, controladores

no lineales tipo PD-PID, control inteligente (redes neuronales, algoritmos genéticos, lógica difusa y sistemas expertos), inteligencia artificial, control por ecos y control mediante reglas basadas en el nivel de coordinación (Martínez et al., 2010).

Una interfaz cerebro-computador (ICC) basada en un método propuesto para la selección de características que mejora la capacidad de reconocer patrones de planificación de la marcha, utilizando la representación de entropía (RE) y clasificadores, para el cual se utilizó el análisis discriminante lineal (ADL) y máquina de vectores soporte (MVS) en la selección de características y clasificación de patrones (Delisle Rodríguez et al., 2017). Las características estudiadas se obtuvieron a partir del método EEG filtrado con WAR (EF), Valor medio absoluto (VMO), longitud de onda (LO), dimensión fractal de Higuchi (DFH), dimensión fractal de Sevicik y Higuchi (DFSH) y valores absolutos de referencia obtenidos a través de la transformada rápida de Fourier en 6 bandas de frecuencia según (MacFarland et al., 2006) 0,1-4 Hz, 8-12 Hz, 18-24 Hz, 26-30 Hz, 30-50 Hz, y 50-70 Hz.

Utilizando un sistema basado en videografía digital, el cual consiste en un arreglo experimental de bajo costo y software libre para computar los parámetros espacio-temporales y la cinemática angular en el plano sagital de un sujeto que desarrolla la marcha libre, el cual permite caracterizar la marcha de pacientes con alteraciones en la misma (Salvucci et al., 2017). El arreglo experimental tiene cinco marcadores pasivos para el cálculo del tilt pélvico, para la adquisición y procesamiento de datos la plataforma Python, con las librerías SciP y OpenCV (*OpenCV User Guide — OpenCV 2.4.12.0 documentation*, n.d.) para la adquisición del video, la detección automática de los marcadores se obtiene utilizando el algoritmo de comparación de plantilla (Brunelli, 2009), el modelamiento de los segmentos corporales se realiza simulando líneas rectas entre cada posición para posteriormente calcular las variables cinemáticas computando el valor del ángulo absoluto entre las rectas de los segmentos que conforman la articulación (Salvucci et al., 2017).

La combinación de neuroprótesis motora y exoesqueleto robótico (ER) conforma un exoesqueleto híbrido (EH), tecnología propuesta hace varias décadas para mitigar las desventajas de cada tecnología (del Alma et al., 2017). Los EH se clasifican teniendo en cuenta dos criterios: la implementación de neuroprótesis motora en el EH en lazo abierto o lazo cerrado y según el modo de actuación de las articulaciones del ER en función de la capacidad del actuador de disipar o añadir energía a la articulación (Del-Ama et al., 2012).

La creación de sensores de pequeño tamaño, es la principal aplicación de la nanotecnología, lo que a su vez trae bajo costo en materiales, peso reducido, facilidad de integración en los sistemas y disminución en el consumo de potencia (Bhushan, 2006). Con este concepto surgen los nano-cables (nanowires) quienes harán parte de los bloques de construcción de los biosensores a nanoescala (Rahman et al., 2013), los cuales se realizan usando un diseño asistido por computadora (CAD) que permite producir micro y nano estructuras por medio de la escritura de un haz de electrones conectado con un microscopio de barrido electrónico (SEM), lo que a su vez proporciona información sobre la estructura del material, distribución y espacios entre los átomos, los tamaños y formas de las partículas (Medina Cámara et al., 2014).

La implementación de impresos NEMS (Nano-Electromechanicals Systems) y MEMS (Micro-Electromechanicals Systems) con multisensores permite que los costos sean competitivos para el desarrollo de instrumentación electrónica y facilita su fabricación, además de obtener un alargamiento de la vida útil de la misma. Los multisensores o red de sensores garantizan la redundancia necesaria para la confiabilidad técnica, que incluye un sistema instrumentado de seguridad (SIS) dotado de un sistema de control redundante (RCS) (Muñoz Moner et al., 2019). Los algoritmos bioinspirados se han soportado en el creciente desarrollo tecnológico y computacional, utilizando procedimientos que reproducen ciertas propiedades inspiradas en la biología diversificando los resultados obtenidos según se obtengan mejores resultados (Flórez et al., 2017). Los algoritmos bioinspirados están íntimamente vinculados al campo de la Inteligencia Artificial, en el cual involucra a: los algoritmos evolutivos (Eiben & Smith, 2015), la

optimización de colonia de hormigas (ACO) meta-heuristic que puede ser aplicado a problemas de difícil optimización discreta (Dorigo & Di Caro, 1999), la optimización de enjambre de partículas (PSO), utilizada para la optimización de funciones no lineales y el entrenamiento de redes neuronales, en el cual se describe una relación entre el enjambre de partículas y la vida artificial y los algoritmos genéticos (Kennedy & Eberhart, 1995).

La lógica difusa ha ido consolidándose paulatinamente, debido a su sencillez conceptual, su facilidad de adaptarse a casos particulares, su habilidad para combinar expresiones lingüísticas con datos numéricos (Duarte, 1999). El control de lógica difusa – Fuzzy Logic se introdujo y desarrollo originalmente como un enfoque de control sin modelo preestablecido (Feng, 2006). En los últimos diez años el control difuso se ha basado en modelos que garantizan estabilidad y rendimiento de los sistemas de control difuso de lazo cerrado, entre los modelos difusos se destacan el Takagi-Sugeno o fuzzy dynamic.

### Conclusiones:

Se presenta la problemática social que se presenta con alta incidencia en el departamento Norte de Santander, siendo los niños, jóvenes, civiles y militares los directamente afectados con estos problemas sociales, teniendo como resultado la pérdida física de alguno de sus miembros o en su defecto la pérdida de sus vidas como daño colateral del conflicto armado. Se presentan los avances tecnológicos que pueden facilitar la vida de estas víctimas, con aplicación del sistema de control inteligente a las prótesis de miembro inferior la cuales permitirán mejorar la función global para la bipedestación y la ejecución de la marcha en personas con discapacidad.

### Bibliografía

- Aguilar, B., & Mera, M. (2017). Controlador para prótesis robótica de miembro inferior considerando el efecto de saturación en los actuadores. *Memorias de XL Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica, 1*, 375–378. <https://doi.org/10.24254/CNIB.17.76>
- Álvarez-Maldonado, O. U., León-Segura, K. E. De, Montalvo-Aguilar, J. C., Vázquez-Tapia, R.,

- González-Badillo, G., & Guerrero-Mora, G. (2017). Prótesis Automatizada de Tobillo y Pie Controlada por Señales Electromiográficas. *Memorias Del XL Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica*, 4(1), 336–339. <https://doi.org/dx.doi.org/10.24254/CNIB.17.67>
- Beltrán Ramírez, R., Maciel Arellano, R., & Jiménez Arévalo, J. (2014). La Tecnología y la inteligencia artificial como futuro en el área médica. *Universitas Revista de Ciencias Sociales y Humanas*, 21, 185. <https://doi.org/10.17163/uni.n21.2014.16>
- Bhushan, B. (2006). *Springer Handbook of Nanotechnology* (S. B. Heidelberg (Ed.)).
- Brunelli, R. (2009). *Template Matching Techniques in Computer Vision: Theory and Practice*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470744055>
- Chaparro-Cárdenas, S. L., Lozano-Guzmán, A. A., Ramirez-Bautista, J. A., & Hernández-Zavala, A. (2018). Circuito para Adquisición de Señales Electromiográficas de Superficie y Caracterización del Músculo Tibial Anterior. *Memorias Del Congreso Nacional de Ingeniería Biomedica*, 5, 98–101. <https://doi.org/10.25254>
- Colciencias, Gobernación de Norte de Santander, Universidad del Rosario, Universidad de Pamplona, & BID. (2014). *Plan Estratégico Departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación - PEDCTI 2014-2024* (Gobernació). Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación. <http://www.colciencias.gov.co/sites/default/files/upload/paginas/pedcti-norte-santander.pdf>
- Del-Ama, A. J., Koutsou, A. D., Moreno, J. C., De-los-Reyes, A., Gil-Agudo, Á., & Pons, J. L. (2012). Review of hybrid exoskeletons to restore gait following spinal cord injury. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 49(4), 497–514. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2011.03.0043>
- del Alma, A. J., Pérez Rizo, E., de los Reyes Guzman, A., & Moreno, J. C. (2017). Memorias Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad, novena versión, 2017. In E. E. C. de Ingeniería (Ed.), *Exoesqueletos híbridos para la compensación de la marcha de Lesionados Medulares* (pp. 165–170). <https://doi.org/ISSN 2619-6433>
- Delisle Rodríguez, D., Villa Parra, A. C., Fizera Neto, A., Krishnan, S., & Bastos, T. F. (2017). Memorias Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad, novena

- versión, 2017. In Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería (Ed.), *Optimización de una Interfaz Cerebro-Computador para Reconocer Patrones de Planificación de la Marcha* (pp. 25–30). <https://doi.org/ISSN 2619-6433>
- Dorigo, M., & Di Caro, G. (1999). Ant Colony Optimization: A New Meta-Heuristic. *Congress on Evolutionary Computation*, 1470–1477. <https://doi.org/10.1109/CEC.1999.782657>
- Duarte, O. G. (1999). Sistemas de lógica difusa: fundamentos. *Ingeniería e Investigación*, 42, 22–30. <https://doi.org/10.15446/ing.investig>
- Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2015). Introduction to Evolutionary Computing Genetic Algorithms. In Springer (Ed.), *Natural Computing Series* (Second Edi). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44874-8>
- Ley 1448 de 2011, 75 (2011).
- Feng, G. (2006). A Survey on Analysis and Design of Model - Based Fuzzy Control Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14(5), 676–697. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2006.883415>
- Flórez, E., Díaz, N., Gómez, W., Bautista, L., & Delgado, D. (2017). Evaluación de algoritmos bioinspirados para la solución del problema de planificación de trabajos. *I+D Revista de Investigaciones*, 11(1), 133–143. <https://doi.org/10.33304/revinv.v1 1n1-2018011>
- Gobernación de Norte de Santander, D. de C. T. e I. (2015). *Plan Y Acuerdo Estratégico Departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación Departamento de Norte de Santander - Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS* (p. 8). Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación. <http://repositorio.colciencias.gov.co/handle/11146/34101>
- J Pérez, J Castro., (2018), LRS1: Un robot social de bajo costo para la asignatura “Programación 1”. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, ISSN: 1692-7257.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). *Particle swarm optimization - IEEE Conference Publication*. 1942–1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Krajbich, J. I., Pinzur, M. S., Potter, B. K., Stevens, P. M., & American Academy of Orthopaedic Surgeons. (2016). *Atlas of amputations and limb deficiencies : surgical, prosthetic, and*

- rehabilitation principles* (American Academy of Orthopaedic Surgeons (Ed.); 4 Edition).
- Lusardi, M. M., Jorge, M., & Nielsen, C. (2012). Orthotics & Prosthetics in rehabilitation Third Edition. In M. M. Lusardi, M. Jorge, & C. Nielsen (Eds.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (Third). Elsevier Saunders. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- M., L. Á. P., A., R. L., C., R. R., & N., C. H. (2017). Análisis Biomecánico del Pie Durante la Bipedestación A través del Método de Elementos Finitos (CNIB). *Memorias Del XL Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica, 4*, 82–86. <https://doi.org/10.24254/CNIB.17.4>
- MacFarland, D., Anderson, C. W., Muller, K. R., Schlogl, A., & Krusienski, D. J. (2006). BCI Meeting 2005 - Workshop on BCI Signal Processing: Feature Extraction and Translation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 14*(2), 135–138. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2006.875637>
- Manuel, J., González, D., Murillo, P. R., Luna, I. F., & Mendoza, A. J. (2004). ROBÓTICA Y PRÓTESIS INTELIGENTES. *Revista Digital Universitaria, Volumen 6*(Sustitución por pérdida de miembros humanos por artefactos distintos a los naturales), 1–15. [http://www.revista.unam.mx/vol.6/num1/art01/art01\\_enero.pdf](http://www.revista.unam.mx/vol.6/num1/art01/art01_enero.pdf)
- Martínez-Solís, F., Ramírez-Betancour, R., Olmos-López, A., Rodríguez-Lelis, J. M., Claudio-Sánchez, A., & González-Contreras, B. (2016). Algoritmo para estimación de ángulo de rodilla en marcha normal: Enfoque a trazado de trayectoria en prótesis transfemorales inteligentes. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica, 37*(3), 221–233. <https://doi.org/10.17488/RMIB.37.3.7>
- Martínez, F., Claudio, A., Vergara, S., Rodríguez, J. M., & Olmos, A. (2010). Estrategias de control implementadas en el diseño de prótesis para extremidades inferiores. *Congreso Anual de La Asociación de México de Control Automático.*, 1–6.
- Medina Cámara, S. R. de J., Peet Manzón, J., & Rodríguez Alonzo, L. (2014). Caracterización de Nanofibras de Óxido de Vanadio sintetizadas por el método de Electrohilado [Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.]. In *Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.biochi.2015.03.025> <http://dx.doi.org/10.1038/nature10402>

%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/nature21059%0Ahttp://journal.stainkudus.ac.id/index.php/equilibrium/article/view/1268/1127%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/nrmicro2577%0Ahttp://  
/

Ministerio de Salud y Protección Social. (2013). *Lineamientos generales para la implementación de la Política Pública Nacional de Discapacidad e Inclusión Social en entidades territoriales 2013-2022*. <https://www.minsalud.gov.co/proteccionsocial/promocion-social/Discapacidad/Paginas/politica-publica.aspx>

Muñoz Móner, A. F., Díaz Rodríguez, J. L., & Gómez Camperos, J. A. (2012). Nuevos Modelos Nanotecnológicos En El Diseño De Piel Artificial Con Nanopartículas Para El Recubrimiento De Prótesis De Mano Y Pierna En Discapacitados. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2, 136–143. <https://doi.org/10.24054/16927257.v20.n20.2012.200>

Muñoz Moner, A. F., Gómez Camperos, J. A., & Vega Torres, J. M. (2010). Research and Development of New Methodology for Design Based on pattern of mothers cells and artificial cloning of a bioelectric prosthesis of inferior member for disabled people of the violence. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2, 25–32. [http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home\\_40/recursos/03\\_v13\\_18/revista\\_16/27102011/resumen\\_05.jsp](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_40/recursos/03_v13_18/revista_16/27102011/resumen_05.jsp)

Muñoz Moner, A. F., Pardo García, A., & Caicedo Torres, P. M. (2019). Development of new methodology of design , analysis and applications of intelligent micro and nanoinstrumentation supported in Nanobiotechnology Engineering for Industrial Automation. *INGE CUC*, 15(2), 1–9. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.15.2.2019.10>

Oficina del Alto Comisionado Para la Paz. (2019). *Víctimas de Minas Antipersonal y Municiones sin Explosionar*. [Http://Www.Accioncontraminas.Gov.Co/Paginas/AICMA.Aspx](http://Www.Accioncontraminas.Gov.Co/Paginas/AICMA.Aspx). <http://www.accioncontraminas.gov.co/estadisticas/Paginas/victimas-minas-antipersonal.aspx>

*OpenCV User Guide — OpenCV 2.4.12.0 documentation*. (n.d.). Retrieved January 27, 2020, from [https://docs.opencv.org/2.4.12/doc/user\\_guide/user\\_guide.html](https://docs.opencv.org/2.4.12/doc/user_guide/user_guide.html)

Ortega, M. E. B., Pineda, A. C., Rodríguez, M. A. I., López, V., Rivera, C. A. M., Acevedo, F. A., &



- González, R. R. (2010). Construcción y control de un prototipo de muslo-pierna actuado por músculos neumáticos. *Memorias Del Congreso Nacional 2010 de La Asociación de México de Control Automático*, 1–6. [http://amca.mx/memorias/amca2010/Articulos/Sistemas biomédicos/amca2010\\_submission\\_25.pdf](http://amca.mx/memorias/amca2010/Articulos/Sistemas_biomédicos/amca2010_submission_25.pdf)
- Rahman, S. F. A., Yusof, N. A., Hashim, U., & Nuzaihan Md Nor, M. (2013). Design and fabrication of silicon nanowire based sensor. *International Journal of Electrochemical Science*, 8(9), 10946–10960. <http://103.86.130.60/handle/123456789/34976>
- Ramírez, J. F., Muñoz, E. J., & Vélez, J. A. (2012). Algorithm for the prediction of the reactive forces developed in the socket of transfemoral amputees. *DYNA (Colombia)*, 79(173 PART II), 89–95. <https://www.mendeley.com/catalogue/algoritmo-para-la-predicción-fuerzas-reactivas-en-sockets-amputados-transfemorales/>
- Salvucci, F., Facello, J., & Kohanoff, R. (2017). Memorias Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad, novena versión, 2017. In Editorial Escuela Colombiana de Ingenierías (Ed.), *Caracterización cinemática de la marcha de sujetos con discapacidad motriz mediante un sistema videográfico de bajo costo* (pp. 82–87). <https://doi.org/ISSN 2619-6433>
- Santos, M., & Santos, M. (2011). Tutorial Un Enfoque Aplicado del Control Inteligente. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 8, 283–296. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2011.09.016>
- Silva Castellanos, C. A. (2015). Modelamiento De La Marcha Humana Con Prótesis De Miembro Inferior Mediante Herramientas De Simulación Dinámica (" Una Aplicación en Opensim") [Universidad Nacional de Colombia]. In *Universidad Nacional*. <http://bdigital.unal.edu.co/48031/1/80796285-2015.pdf>
- Torrealba Algarra, R. R. (2009). *Prótesis inteligente de rodilla para pacientes con amputación transfemoral: Vol. No aplica* [Universidad Simón Bolívar]. [https://www.researchgate.net/publication/273753601\\_Protesis\\_inteligente\\_de\\_rodilla\\_para\\_pacientes\\_con\\_amputacion\\_transfemoral](https://www.researchgate.net/publication/273753601_Protesis_inteligente_de_rodilla_para_pacientes_con_amputacion_transfemoral)
- T Velásquez, E Espinel, G Guerrero (2016). Estrategias pedagógicas en el aula de clase. *Revista*

Colombiana de Tecnologías de Avanzada, ISSN: 1692-7257.

Vargas Duque, J. (2018). *Aportaciones Metodológicas Para el Diseño y Fabricación de Dispositivos Protésicos: Aplicación en Prótesis de Miembro Inferior* [Universidad del Norte].  
<http://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/8187/133198.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

