REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

LOS ROBOTS DE MI VIDA

DISCURSO DE LA ACADÉMICA ELECTA

EXCMA. SRA. DÑA. ELENA GARCÍA ARMADA

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA
EL DÍA 6 DE OCTUBRE DE 2022

Y CONTESTACIÓN DE LA ACADÉMICA

EXCMA. SRA. DÑA. MARÍA VALLET REGÍ

MADRID MMXXII

LOS ROBOTS DE MI VIDA

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

LOS ROBOTS DE MI VIDA

DISCURSO DE LA ACADÉMICA ELECTA

EXCMA. SRA. DÑA. ELENA GARCÍA ARMADA

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA
EL DÍA 6 DE OCTUBRE DE 2022

Y CONTESTACIÓN DE LA ACADÉMICA

EXCMA. SRA. DÑA. MARÍA VALLET REGÍ

MADRID MMXXII

Editado por la Real Academia de Ingeniería
© 2022, Real Academia de Ingeniería
© 2022 del texto, Elena García Armada
ISBN: 978-84-95662-86-6
Depósito legal: M-25310-2022
Impreso en España

Su Majestad la Reina Letizia
Excelentísimas Autoridades
Excelentísimo Sr. Presidente de la Real Academia de Ingeniería,
Excelentísima Sra. Vicepresidenta de la Real Academia de Ingeniería,
Excelentísimas Señoras y Señores académicos,
Señoras y Señores, queridos amigos y amigas.

Este es un día que marca un antes y un después en mi carrera profesional al tomar posesión como Académica de Número de la Real Academia de Ingeniería. Deseo expresar mi mayor agradecimiento a Su Majestad la Reina por presidir este acto, lo que me honra y enorgullece. Y quiero, además, destacar el hondo compromiso de Su Majestad en fomentar las vocaciones científicas y que se viene expresando de forma continua y constante. Me siento, como decía, inmensamente agradecida por su presencia aquí, en este día tan importante para mí, pero que lo es, también, para miles de niñas que hoy puedan estar percibiendo que la ciencia y la ingeniería cuentan con referentes femeninos y el apoyo de la más alta institución del Estado. Muchísimas gracias, Majestad, por situar esta desigualdad social entre sus prioridades.

Agradezco también sinceramente la presencia de todos ustedes por acompañarme en un día tan señalado. Gracias a los Académicos que me habéis honrado al elegirme para acompañaros y formar parte de esta ilustre casa.

La ingeniería ha conformado mi vida. Hija, sobrina, hermana y esposa de ingenieros, deseo dedicar este día y estas palabras a la persona que puso todo su empeño en que yo también lo fuera. Mi padre. Catedrático de electromagnetismo por la Universidad de Cantabria, que llevó la ingeniería de telecomunicaciones a Cantabria y formó allí a varias generaciones de ingenieros, fundó empresas de base tecnológica que le han sobrevivido y se empeñó en que sus tres

hijas fueran ingenieras (a poder ser de Teleco). Con dos lo consiguió, en mi caso, contra todo pronóstico, aunque al final le salí industrial. Y digo contra todo pronóstico porque mi inclinación hacia las Bellas Artes se interponía en ese camino, aunque nada que pueda suponer un obstáculo para un maño. Aunque no valoró del todo mi vocación por las artes, la vertiente creativa de la ingeniería, plasmada en robótica, fue su mejor aliada. La última década de mi carrera profesional me ha llevado a alcanzar un reconocimiento que desearía haber podido compartir con él. Él hubiera disfrutado de este día incluso más que yo misma.

Y hablando de compartir, mis hijas Irene y Alba, y mi marido Luis Ángel, han sido más que testigos de una carrera profesional caracterizada por el esfuerzo y el empeño, y que necesariamente ha exigido tiempo. Gracias por entenderlo. Se que hoy estáis orgullosas.

También deseo expresar mi agradecimiento a tantas personas que han propulsado mi carrera profesional con generosidad, desde su talento, su saber y su buen hacer. Mis profesores en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid, y en especial a quienes hoy son mis colegas en la División de Ingeniería de Sistemas y Automática. De forma especial quiero recordar a mi profesor y miembro fundacional de esta Real Academia, Eugenio Andrés Puente, quien derrochó y contagió su pasión en todas y cada una de sus clases de Regulación Automática, olvidando la noción del tiempo mientras nos relataba sus anécdotas en Alemania. Igualmente, quiero recordar con todo mi cariño a Ramón Galán, que despertó mi inquietud por la Inteligencia Artificial. Descansen en Paz. Extiendo mi agradecimiento a los profesores Rafael Aracil y Agustín Giménez, y muy especialmente a Fernando Matía, quien me transmitió su entusiasmo por la investigación y terminó co-dirigiendo mi tesis doctoral.

Mi formación investigadora se la debo al CSIC, mis palabras de agradecimiento más sinceras para el Profesor de Investigación Pablo González de Santos, de quien he aprendido mucho de lo que soy hoy como investigadora, más allá del marco de mi tesis doctoral que dirigió. También a mi tío Chicho, Don Manuel Armada, por abrirme, primero los ojos, y después la puerta a la robótica caminante, área en la que he desarrollado mi carrera profesional.

Hoy aquí, en la Real Academia de Ingeniería, mis palabras más cariñosas son para Antonio Colino y Marita Vallet, no solo en calidad de Presidente y Vicepresidenta, sino como ejemplos a seguir y como

amigos. Y como académicos que han defendido mi candidatura apasionadamente en sucesivas ocasiones. Así mismo a José Antonio Martín Pereda por su cariñosa defensa de mi candidatura, en recuerdo de mi padre. También quisiera agradecer la calurosa acogida que Sara Gómez y Javier Pérez de Vargas me han brindado desde mi incorporación al Comité Mujer e Ingeniería de esta casa.

Es un verdadero honor ingresar en esta academia, agradecida por haber sido elegida por tan ilustres académicos e ingenieros de gran talento. Entiendo que he sido elegida por haber llevado a cabo una trayectoria científica y técnica destacable, aplicando el conocimiento y la ingeniería para contribuir a uno de los retos sociales con mayor impacto, el de la salud. El principal logro por el que se me reconoce y por el que, junto con mi equipo, he sido premiada es el desarrollo del primer exoesqueleto pediátrico para la terapia de enfermedades neurológicas en la infancia. Pero ya existían antes de esta aportación otros exoesqueletos para el uso en adultos con lesión medular, y seguramente habrá quien considere esta aportación relativa, y que, sin embargo, la Oficina Europea de Patentes ha reconocido recientemente como diferencial. En este discurso voy a relatar cuál ha sido mi viaje por la ciencia y la ingeniería, y en particular por la robótica para explicar esta aportación.

He comentado que mi vocación inicial me conducía hacia el arte. La observación de la naturaleza, de cómo la luz interacciona con ella y con sus colores y plasmarlo en un lienzo, con una clara influencia impresionista de Sorolla y VanGogh. De forma autodidacta e intuitiva observaba y desmenuzaba la biología y la anatomía de animales. Pero una tarde, por el influjo de mi tío, investigador en el CSIC, descubrí los robots, y encontré una nueva herramienta que me permitía no solo interpretar la naturaleza, sino que podía crear una instancia mecánica de algo biológico y darle vida. Permítanme la osadía de citar a nuestro Premio Nobel, Ramón y Cajal, que decía "a la ciencia no van más que los artistas (…) A mis aficiones artísticas de niño, a las que me padre se opuso tenazmente, debo lo que soy ahora".

¿Qué tenía ese primer robot que cambió mi rumbo? ¿Qué es un robot?

Aunque existen numerosas definiciones de la palabra robot, todas válidas, quedémonos, por ejemplo, con la definición de la RAE: "(Del ingl. robot, y este del checo *robota*, trabajo, prestación personal). Máquina o ingenio electrónico programable, capaz de mani-

pular objetos y realizar operaciones antes reservadas solo a las personas". En definitiva, un robot es, en esencia, una máquina.

Pero partiendo de esa naturaleza electro-mecánica, ¿qué diferencia a un robot de una máquina cualquiera?: Cobrar vida.

¿Por qué una muñeca mecánica andante no es un robot y en cambio el humanoide de Honda, Asimo, sí lo es? La muñeca mueve sus piernas mecánicamente, sin intención, ni capacidad de dejar de hacerlo. No puede adaptarse a un cambio en el suelo, y se desploma a la menor perturbación en el camino, o a veces sin ella, pues no puede controlar el equilibrio al andar. En cambio, un robot como Asimo es capaz de adaptarse al suelo, seleccionar el punto de apoyo, evitando apoyos inestables, maximizando la longitud de paso, y monitorizando y controlando el margen de estabilidad, es decir, asegurando en cada paso que la postura elegida y los apoyos seleccionados son estables, diferenciando suelo y escaleras, sabiendo si sube o baja. El robot no se va a caer... O sí.

La diferencia la marca el trinomio percepción-decisión-acción, que caracteriza al robot y lo distingue de otra máquina, mecanismo o muñeco. El robot percibe información del entorno y de sí mismo, y la utiliza en un proceso de razonamiento más o menos sofisticado, para ejecutar una acción. Este trinomio es lo que permite al robot realizar operaciones de forma autónoma, sin intervención humana.

Esta característica inherente a cualquier robot se debe a su condición de programable, presente en todas las definiciones de robot. La funcionalidad del robot se define en un programa informático o electrónico, siendo éste el que hace posible la toma de decisiones del robot durante su operación. Esta toma de decisiones es la conexión entre la percepción y la acción del robot.

De esta manera, un robot es capaz de realizar sin la intervención humana operaciones antes reservadas solo a personas, y esta es la característica que le distingue de cualquier máquina común.

Los robots han estado siempre vinculados a la ciencia ficción. De hecho el concepto de robot y su propio término se lo debemos a la ciencia ficción. La obra de teatro Robots Universales Rossum, RUR, del dramaturgo checo Karel Capek se anticipa casi cuatro décadas a la primera patente de un robot industrial. La ciencia ficción se convierte en realidad en 1954 cuando George Devol presenta la primera patente de un robot: "Programmed Article Transfer", un robot manipulador muy primitivo para traslado de

Figura 1. George Devol y Joseph Engelberger disfrutan de una copa de vino que les sirve el robot manipulador Unimate2000.

herramientas[1]. Esta patente hace referencia al primer robot manipulador programado de forma digital y representa el nacimiento de la robótica industrial.

Desde entonces el robot es un invento del ser humano destinado a servirle, librándole del trabajo más tedioso. En definitiva, un ingenio del ser humano para mejorar la productividad, la calidad del trabajo y nuestra calidad de vida.

En 1956, Joseph Engelberger, director de ingeniería aeroespacial de la empresa Manning Maxwell y Moore en Stanford, coincide con Devol en un cóctel. Juntos fundan Consolidated Controls Corporation, que más tarde se convierte en Unimation (Universal Automation), la primera compañía de robótica, que en 1961 instala el primer robot Industrial, el Unimate 2000 en una fábrica de General Motors. Posteriormente Unimation fue absorbida por Westinhouse.

[1] Devol, J.G.C. (1961): "Programmed article transfer", Patente US2988237.

La revolución industrial que llegó junto con la implantación de los robots industriales en las fábricas principalmente del sector automovilístico, en los años 60 y 70. Pero no todo fue un camino de rosas y al principio no estaba nada claro que los robots fueran a ser realmente útiles. En los años 80 el director general de la General Motors era un fan de la tecnología y apostó por crear una firma en asociación con la japonesa Fanuc, anunciando que colocaría catorce mil robots en las fábricas de General Motors para el año 1990. La apuesta de futuro le costó a la General Motors miles de millones de dólares y los robots nunca llegaron a funcionar bien. Las malas lenguas cuentan que los robots se pintaban a sí mismos accidentalmente, y que los parabrisas de los coches habían llegado a caer sobre los asientos en varias ocasiones. Un auténtico desastre.

Todos los comienzos son difíciles y parece que el horizonte está infinitamente lejos, pero la robótica ha experimentado un crecimiento espectacular. Sólo hace 80 años que se construyeron los primeros robots con capacidades muy limitadas y hoy disfrutamos de desarrollos fascinantes. Este impulso se debe principalmente al esfuerzo en investigación que ha tenido lugar a lo largo de estos 80 años. La investigación se ha ido orientando hacia la búsqueda de soluciones a los problemas que la sociedad demandaba. De esta manera la ciencia resuelve los problemas tecnológicos y la robótica los incorpora para satisfacer las necesidades humanas. La biografía del robot está marcada por esta relación causa-efecto.

Esta evolución hacía la mejora de nuestra calidad de vida se la debemos, inicialmente, a la industria, que marcó los principales requerimientos de los robots. Sin embargo, a medida que la sociedad occidental ha ido envejeciendo, se han ido reclamando más aplicaciones de los robots para la mejora de nuestra calidad de vida en casa y en el trabajo. Ejemplos de robots ya integrados en nuestra vida cotidiana son los robots de limpieza (como Roomba de iRobot), que se distinguen de la aspiradora tradicional por realizar la limpieza sin la intervención humana, evitando obstáculos, adaptándose a la suciedad y asegurando la limpieza completa. Igualmente encontramos los robots cortacésped. Por poner dos ejemplos muy cotidianos de aplicación robótica en el ámbito doméstico.

El progreso exponencial que ha sufrido la tecnología en las últimas décadas ha hecho posible la introducción de los robots en aplicaciones cada vez más complejas, en las que la interacción con el ser

humano es la principal característica y que marca los grandes requerimientos de seguridad, flexibilidad y robustez de estos robots en entornos reales. Incluso la ética.

Hoy estamos en la era de la robótica al servicio del ser humano[2], los robots forman parte de nuestra sociedad. Y se genera el debate entre la mejora de nuestra calidad de vida y el temor constante a que la máquina supere al ser humano. O nos convierta en algo más allá de lo humano. El transhumanismo.

Los que trabajamos en el ámbito más hardware de la robótica y batallamos con la meta de imitar la destreza humana aún vemos estas super-capacidades desde la óptica de la ciencia ficción. Clara es la visión tradicional del robot como la máquina de gran potencia, fuerza y precisión que libera al ser humano de tareas duras o peligrosas. Difícil es concebir el robot con la habilidad física, la adaptabilidad, la destreza, la sensibilidad o la intuición del ser humano, o de cualquier animal. La agilidad y equilibrio de un felino, el contorsionismo de un pulpo, o la destreza de una mano humana en la manipulación de objetos son capacidades biológicas que un robot está lejos de igualar. Y digo igualar. Muy lejos queda la realidad de superar ese todo que la naturaleza ha diseñado como perfecto, que es el ser biológico.

El avance de la robótica hacia su completa incorporación en la sociedad humana requiere dotar al robot de características que van más allá de lo que la robótica, de forma purista, puede alcanzar: garantizar la seguridad de las personas con las que un robot convive -o de las que forma parte-; tener flexibilidad y adaptabilidad ante entornos cambiantes y ante las propias personas; versatilidad para realizar multitud de tareas; y capacidad de coordinarse con personas y otros robots. Estas capacidades se pueden conseguir en la integración de la robótica con otras disciplinas, como la Inteligencia Artificial (IA). Lo mismo sucede con el avance de la IA. En el libro de López de Mántaras y Meseguer de la colección de divulgación científica del CSIC[3], los autores aclaran que la integración de diversas técnicas de IA como son el aprendizaje automático, la planificación, junto con las técnicas de visión artificial, y la robótica, es imprescin-

---

[2] Garcia, E., Jiménez, M.A., González de Santos, P. and Armada, M.A., The Evolution of Robotics Research from Industrial Robotics to Field and Service Robotics, IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 14, No. 1, pp. 90-103, 2007.

[3] López De Mántaras, R y Meseguer González, P. (2017): "Inteligencia Artificial" colección ¿Qué Sabemos De?, Los libros de la Catarata – CSIC, Madrid.

dible si se quiere alcanzar el objetivo de las inteligencias artificiales de tipo general, dotadas de sentido común. Esta meta, aún no lograda, necesita la interacción física con el entorno, lo que únicamente se puede conseguir a través de una interfaz física, la que provee un robot. Por lo tanto, ambas metas: la de lograr una IA fuerte y la meta de desarrollar robots de propósito general, capaces de realizar tareas versátiles en entornos no estructurados, solo son posibles a través de la investigación transdisciplinar, mediante la convergencia de técnicas y disciplinas heterogéneas.

Movida por toda esta curiosidad, por entender los mecanismos biológicos de adaptación física a su entorno e implementarlos en robots, al terminar mis estudios de ingeniería industrial, en la especialidad de electrónica y automática, inicié una tesis doctoral que se concentró en diseñar algoritmos de control del movimiento de robots cuadrúpedos, desde una perspectiva de optimizar su agilidad de movimientos y su adaptación estable al entorno con el que interaccionaban. Estudiaba la forma en que los mamíferos, los insectos y los reptiles caminan, sus modelos biomecánicos y lo implementaba en la máquina, siendo prioritario el garantizar la estabilidad, el equilibrio del robot, en entornos naturales, incluso ante perturbaciones externas.

Con una fuerte base de modelado dinámico de robots, técnicas de control de impedancia, control de fuerza, control de la interacción robot-entorno, control inteligente y planificación de trayectorias realicé aportaciones en el estudio cualitativo de los criterios de estabilidad[4] con la propuesta de un nuevo criterio de estabilidad dinámica basado en la energía mecánica que un sistema puede almacenar (NDESM[5]) teniendo en cuenta la dinámica del robot y otras perturbaciones externas. Este trabajo se cita en el prestigioso libro "Springer Handbook of Robotics", de Siciliano Ed. 2008, libro que recopila los fundamentos de la robótica internacional.

Una vez definida una medida del margen de estabilidad, pude proponer un nuevo algoritmo de adaptación inteligente y autónoma del robot a entornos naturales y hostiles maximizando la estabilidad del robot en cada instante. El resultado fue un aumento de la velocidad garantizando el movimiento estable con una mejora del 40%

---

[4] Garcia, E., Estremera, J. and Gonzalez de Santos, P.: A comparative study on stability margins for walking machines. Robotica, Vol. 20, pp. 595-606, 2002.

[5] Garcia, E. and Gonzalez de Santos, P. An improved energy stability margin for walking machines subject to dynamic effects, Robotica, vol. 23, no. 1, pp. 13-20, 2005.

en el caso más desfavorable. Este trabajo dio lugar a varias publicaciones en revistas indexadas entre las que destaca la publicación en IEEE Transactions on Robotics[6] que es la publicación con mayor prestigio de la categoría Robotics del JCR, así como varias ponencias en congresos internacionales.

Los nuevos algoritmos de control de la velocidad se encontraban, a la hora de implementarlos en los robots, con las barreras que imponía la propia dinámica interna del robot. Los trabajos en técnicas de control que permitieran aprovechar al máximo la potencia de los actuadores para optimizar la velocidad[7] del robot se realizaron en un trabajo conjunto con el Prof. Canudas de Wit del ENSIEG-LAG, Grenoble. Propusimos un nuevo modelo matemático de la fricción entre dientes de los engranajes donde se refleja su dependencia de la velocidad debido a imperfecciones en fabricación y montaje de los sistemas físicos reales[8]. Estos trabajos han dado lugar a varias publicaciones[9] en revistas indexadas entre las que destacan la publicación en IEEE Robotics and Automation Magazine[10] y The International Journal of Robotics Research y, que corresponden a la primera y tercera revistas de mayor impacto en la categoría Robotics del JCR 2010.

A pesar de modelar la dinámica interna del robot en detalle, el diseño de algoritmos de control dinámico del movimiento encontraba un techo en la experimentación real con robots. La dinámica inherente de los actuadores junto con la rigidez de los sistemas de transmisión limitaban la capacidad física del robot para reaccionar de forma ágil a las consignas de aceleración provistas por los algoritmos de control óptimo. Los actuadores tradicionales estaban impidiendo el desarrollo de la propia robótica. Una vez más, la

---

[6] Garcia, E. and Gonzalez de Santos, P. On the improvement of walking performance in natural environments by a compliant, adaptive gait. IEEE Transactions on Robotics, Vol. 22, No. 6, 2006.

[7] Garcia, E. and Gonzalez de Santos, P.: Using Soft Computing Techniques for Improving Foot Trajectories in Walking Machines. Jrnl. of Robotic Systems, Vol. 18, Nº 7. 2001

[8] Garcia, E., Gonzalez de Santos, P. and Canudas de Wit, C. Velocity dependence in the cyclic friction arising with gears, The International Journal of Robotics Research, V. 21, No. 9, pp. 761-771, 2002.

[9] Garcia, E. and Gonzalez de Santos, P. Dealing with internal and external perturbations on walking robots. Autonomous Robots Vol. 24, pp. 213-227, 2008.

[10] Gonzalez de Santos, P., Galvez, J.A., Estremera, J. and Garcia, E. SILO4: A Four-Legged Test-bed for Educational and Research Purposes. IEEE Robotics and Automation Magazine Vol. 10, No. 4, pp. 23-32, 2003.

observación de la naturaleza y el estudio de la biomecánica del músculo natural me condujo a una etapa de investigación en tecnologías facilitadoras (2007-2013), en busca de nuevos sistemas de actuación que imitaran el funcionamiento versátil del músculo biológico.

El sistema musculo-esquelético humano está formado por un conjunto de estructuras que le dan al cuerpo la capacidad de movimiento. Permite, por tanto, hacer cualquier tipo de movimiento, sea prensil, o de desplazamiento. Los diferentes tipos de estructuras que componen este sistema son huesos, músculos, tendones y articulaciones.

Se han realizado estudios en los que se ha determinado que el músculo trabaja de manera muy versátil. El músculo trabaja en sus distintas fases como motor, freno, muelle y amortiguador. Esta multifuncionalidad es lo que distingue al músculo de cualquier actuador hecho por el ser humano y puede ser la clave para conseguir sistemas artificiales de actuación.

El músculo está formado por fascículos que a su vez contienen grupos de fibras musculares. En su interior están la células musculares, compuestas de las proteínas *miosina* y *actina*. El movimiento se logra mediante la contracción de células musculares, que hacen trabajo mecánico al contraerse, en cuyo acto se acortan y ensanchan. La miosina contiene la elasticidad de las fibras y la actina provoca la contracción mediante el movimiento relativo de la miosina dentro de la actina. La precisión en la generación de fuerza viene dada por el número de fibras musculares, siendo más preciso cuantas menos fibras musculares contenga.

En lo referente a sus propiedades mecánicas, la tensión que provoca el músculo es una función no lineal de su longitud cuando el músculo está activo. Sin embargo, la relación pasiva longitud-tensión es lineal y puede simularse como un muelle. Durante la contracción muscular, también exhibe un comportamiento velocidad-tensión. A partir de un determinado aumento de la velocidad, la tensión decrece, apareciendo una velocidad óptima en términos de generación de potencia[11]. El modelo más general y simple propuesto para este comportamiento del músculo es el de Hill[12]. Consiste en tres elementos pasivos y uno activo.

---

[11] Dickinson, M., Farley, C., Full, R., Koehl, M., Kram, R., and Lehman, S., 2000. "How animals move: an integrative view". Science(288), pp. 100–106.

[12] Hill, A. First and Last Experiments in Muscle Mechanics. London, UK: Cambridge University Press. 1970.

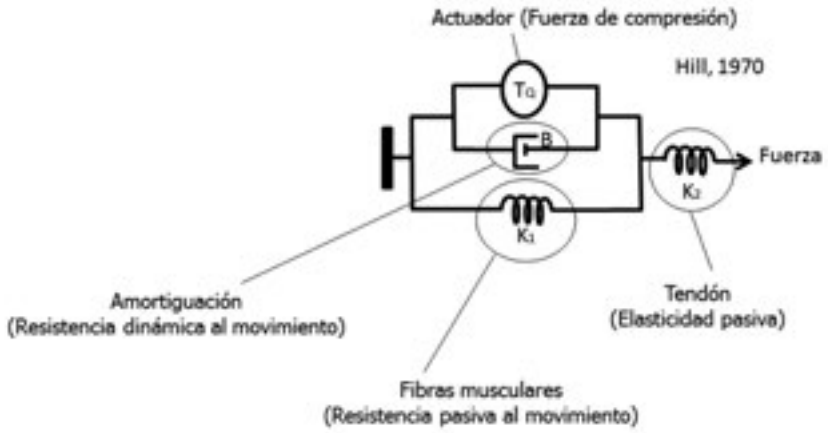

Figura 2. Modelo del comportamiento del músculo humano (Fuente: Hill, 1970).

El elemento activo es el generador de la fuerza, el elemento elástico en serie representa el funcionamiento elástico del tendón que lo une al esqueleto. El elemento elástico paralelo representa la resistencia pasiva del músculo a estirarse debido a las fibras musculares (miosina) y el amortiguador representa la resistencia dinámica al movimiento que depende de la velocidad.

El músculo humano se contrae aproximadamente un 30% de su longitud total y puede ejercer fuerzas máximas de 2N en su compresión. Con un peso aproximado de 100 gramos, tiene una potencia específica de unos 30 W/kg. La frecuencia de trabajo máxima está alrededor de 2 Hz.

El equivalente al músculo, en un robot, es el **actuador**. Los actuadores, al igual que el músculo, son generadores de movimiento: transforman algún tipo de energía en movimiento. Los actuadores empleados en la robótica industrial pueden generar el movimiento articular a partir de tres tipos diferentes de energía: eléctrica, hidráulica y neumática. Los actuadores neumáticos utilizan aire comprimido como fuente de energía y generan movimientos rápidos, pero de precisión limitada debido a la compresibilidad del aire, por lo que es difícil controlar la posición articular. Los motores hidráulicos utilizan aceite o agua y se caracterizan por una gran capacidad de carga, junto a una precisa regulación de velocidad. Los motores eléctricos son los más utilizados, por ser la eléctrica una energía más limpia, y por su fácil y preciso control de posición. Sin embargo, como los hidráulicos, son rígidos, no se acomodan al entorno.

Los robots industriales han resuelto sus requerimientos en base a estos tipos de actuadores, cambiando de electromecánicos a hidráulicos al aumentar el requerimiento de potencia o de capacidad de carga del robot. Recordemos que estos robots buscan precisión y repetibilidad en su posicionamiento, por lo que la rigidez y precisión de los actuadores convencionales son adecuados para su operación. Pero ¿qué pasa cuando la robótica da un giro hacia los robots de servicio?, ¿pueden los nuevos robots utilizar los actuadores convencionales? La respuesta es: pueden, pero por lo general, no son los más adecuados. Estos actuadores tradicionales carecen de la versatilidad y adaptabilidad que caracteriza al músculo humano.

Los robots de servicio son autónomos, móviles o portables, e interaccionan con el entorno y con el propio ser humano. Esto impone ciertos requerimientos de adaptabilidad y seguridad al movimiento del robot. Los actuadores hidráulicos y neumáticos necesitan fuentes de alimentación voluminosas y pesadas, lo que disminuye mucho la potencia específica (potencia en relación a su masa) e imposibilita llevarlos a bordo de un robot autónomo de pequeño tamaño. Tanto los hidráulicos como los electromecánicos son estupendos para controlar posición y realizar un buen seguimiento de trayectorias, pero flaquean cuando se trata de controlar fuerzas, por presentar efectos dinámicos inherentes dominantes como inercia y fricción. Además son totalmente rígidos, no cabe la adaptación al entorno. Los neumáticos son algo más adaptables, por la compresibilidad del aire, pero también presentan no-linealidades y baja potencia específica. Lo que hace falta es un actuador que emule el comportamiento versátil del músculo humano.

Esto ha provocado un punto y aparte en la robótica para abordar el diseño de nuevos actuadores para robots de servicio, tomando el músculo como modelo. Las primeras investigaciones tratan de buscar soluciones de bajo peso y volumen y que consigan prestaciones similares a las del músculo en cuanto a potencia, fuerza, deformación y velocidad.

Los principales requerimientos que deben cumplir son:

1. El robot debe ser autónomo y contener a bordo todos los sistemas de actuación. Esto establece unos límites muy severos en los ratios fuerza/peso y potencia/peso de los actuadores.

2. Los actuadores del robot no deben sufrir daños durante un impacto con el entorno y al mismo tiempo deben acomodarse a él para no provocar daños en el entorno.

3. Los actuadores deben ser controlables en fuerza ya que los algoritmos de control de la interacción segura con el entorno están basados en fuerzas.

Los primeros actuadores para robots de servicio que imitan al músculo natural son los **músculos neumáticos**. Los músculos neumáticos, también denominados músculos de Mckibben[13] son actuadores neumáticos formados por una membrana doble. Entre ambas membranas se introduce una malla. Al llenarse de aire el tubo interior, la malla se contrae longitudinalmente con un funcionamiento similar a unas tijeras, al mismo tiempo que contiene la expansión radial. Como resultado, el músculo se contrae un 20%, similar a la

Figura 3. Robot Airic's Arm actuado por músculos neumáticos (Cortesía de Festo Automation S.A.U.).

[13] G. K. Klute and B. Hannaford, "Accounting for elastic energy storage in mckibben artificial muscle actuators," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 122, no. 2, pp. 386–388, 2000.

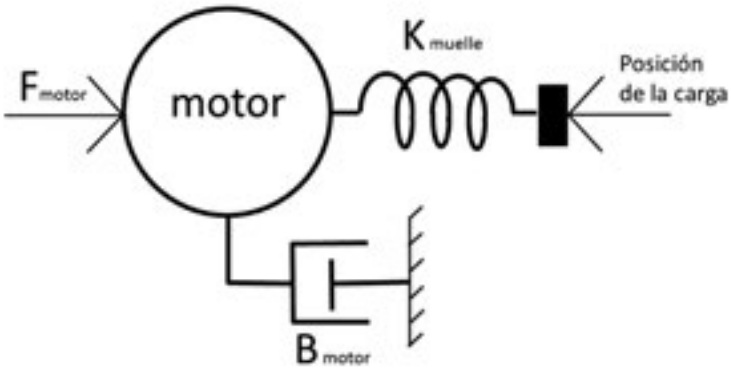

Figura 4. Modelo mecánico de un actuador con elasticidad en serie.

contracción del músculo natural. Esta compresión produce una fuerza de tensión en el eslabón al que esté sujeto el músculo. Al igual que el musculo natural, funciona en parejas, de forma antagonista, y posee acomodación y elasticidad inherentes. El mayor inconveniente de estos actuadores es la histéresis entre las dos membranas, difícil de modelar en el control del movimiento. Además necesita compresor y distribución de aire.

Otra variante son los actuadores que emulan el modelo mecánico del músculo, el modelo de Hill. Estos actuadores, denominados **Actuadores con Elasticidad en Serie** (*Series Elastic Actuators, SEA*)[14] están formados por un motor como fuente de fuerza que comprime un muelle colocado en serie, a modo de tendón. Midiendo la deformación del muelle se puede calcular la fuerza que se está ejerciendo sobre la carga a partir de la constante elástica del muelle, utilizando la ley de Hook (la fuerza ejercida es proporcional a la deformación que sufre el muelle). Esto emula al Órgano Tendinoso de Golgi, receptor sensorial biológico que se sitúa entre el músculo y el tendón. Con esta medida de la fuerza ejercida se puede cerrar un lazo de control de fuerza. Por otro lado, la presencia del muelle desacopla mecánicamente las no-linealidades del motor de la carga, y la elasticidad absorbe energía ante impactos. Estos actuadores se diseñaron, desarrollaron y patentaron por el equipo del Prof. Gil Pratt del MIT Leg

[14] J. Pratt, B. Krupp, and C. Morse, "Series elastic actuators for high fidelity force control," Industrial Robot: An International Journal, vol. 29, no. 3, pp. 234–241, 2002.

Lab[15] y su concepto ha sido el más utilizado como mecanismo de seguridad en robots que trabajan en contacto con seres humanos, ya que amortiguan cualquier impacto.

Los SEA se aproximan bastante al funcionamiento más simple del músculo natural. Los primeros SEAs aplicados a robots en contacto directo con seres humanos se encuentran en las articulaciones del exoesqueleto IHMC Mobility Assist, desarrollado por el equipo de Jerry Pratt en el *Institute for Human and Machine Cognition* de Florida, y en el dispositivo de rehabilitación LOPES, un exoesqueleto no vestible, que camina sobre una cinta de marcha, desarrollado por investigadores de la Universidad de Twente, en Holanda. En ambos casos, el SEA aporta propiedades de flexibilidad articular.

Los SEA también se han implementado en robots humanoides. Los casos más notables son el robot de la NASA Robonaut2 que utiliza la actuación elástica en los brazos, y los robots humanoides THOR y NASA-JSC Valkyrie desarrollados para el DARPA Robotics Challenge. También el robot cuadrúpedo ScarlETH (del equipo ETH Zurich), basado en piernas SEA de alta adaptabilidad, del que procede también el robot manipulador ANYpulator.

Una de las desventajas de los actuadores elásticos en serie tradicionales es que la elasticidad o rigidez está predeterminada por la constante elástica del muelle que se utiliza. Por tanto, el actuador está limitado al entorno de un punto de operación determinado, en términos de impedancia mecánica. Sin embargo, el sistema neuromuscular humano es tan adaptable que es capaz de modificar su impedancia.

Los seres humanos son capaces de moverse de forma estable en entornos naturales y ante perturbaciones imprevistas. El control dinámico de la rigidez de las articulaciones, o más bien de los músculos que las actúan, es crucial para que los humanos se adapten a los cambios en el entorno. Cuando caminamos por la calle, mientras nuestra mirada y atención está más en los escaparates que en el suelo que pisamos, nuestro sistema neuromuscular está pendiente de todo. A todos nos ha sucedido alguna vez que de pronto hay un desconchado en la acera, y en el lugar de las baldosas hay una capa de arena, donde precisamente va a pisar nuestro pie. Nosotros no nos damos

[15] Pratt, G.; Williamson, M. (1995) Series Elastic Actuators. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1995, pp. 399–406.

cuenta, porque estábamos mirando el escaparate de la izquierda, pero nuestro sistema neuromuscular se encarga de modificar automáticamente la rigidez de los músculos de nuestra pierna, para asegurarnos la estabilidad, el equilibrio, y evitar que esa pisada en un terreno blando nos haga caer al suelo. Lo notamos también cuando caminamos por la arena de la playa, que nuestros músculos están más rígidos que cuando caminamos por el cemento. Y eso es porque, para garantizar un contacto estable, la rigidez de ambos cuerpos en contacto debe adaptarse. Si el suelo es rígido, nuestros músculos se adaptan a ese suelo dotando de elasticidad y amortiguación a la pisada. Pero si el suelo es blando, nuestros músculos se rigidizan para evitar un contacto inestable. La modulación de la rigidez en el contacto además reduce significativamente el gasto energético y la fuerza transmitida, puesto que, al acomodarse al tipo de suelo, el impacto se evita, y en consecuencia la pérdida de energía en el choque. Emulando estas características, y partiendo del diseño del SEA, se han desarrollado nuevos actuadores con elasticidad en serie que permiten variar la rigidez natural del muelle durante su funcionamiento. Se denominan **Actuadores de Rigidez Variable**.

Los avances en la investigación sobre actuadores de impedancia variable se produjeron gracias al impulso de la Comisión Europea a través de proyectos de investigación como VIACTORS, con el objetivo de desarrollar, explotar e integrar sistemas de actuadores de impedancia variable en robots para manipulación, locomoción y rehabilitación.

Los actuadores de impedancia variable tienen un impacto importante en aplicaciones de la robótica en las que el contacto del robot con su entorno es crítico: los denominados cobots (o robots colaborativos) que colaboran con los trabajadores en la industria, así como los robots que cooperan entre sí, y exoesqueletos. Cuando el principal requerimiento de estos robots es la interacción segura con un humano, de manera que el robot sea lo suficientemente suave en la detección del contacto con un humano, y lo suficientemente rígido para reaccionar inmediatamente, es importante poder cambiar instantáneamente la rigidez física del robot. Los prototipos VSA del Prof. Bicchi (Instituto Italiano de Tecnología-IIT y Universidad de Pisa) y CompAct-VSA del Prof. Tsagarakis (IIT) son ejemplos de los principales desarrollos llevados a esta aplicación, aunque su volumen y peso ha sido un limitante para su aplicación, tanto en mani-

pulación como en locomoción. El sistema antropomórfico DLR Hand Arm se construyó en el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) por el equipo del Prof. Albu-Schäffer como plataforma experimental para evaluar el concepto de VSA en 3 tipos diferentes de VSA[16]. El manipulador tiene un total de 26 grados de libertad con 7 en el brazo y 19 en la mano. Los actuadores del brazo tienen impedancia variable.

Sin embargo, los intentos de incluir VSA para el control de exoesqueletos de marcha para la neurorrehabilitación han tenido un éxito cuestionable. Los exoesqueletos motorizados de extremidades inferiores X1 y Mina v1, desarrollados conjuntamente por el Centro Espacial Johnson de la NASA y el IHMC (haciendo uso de las patentes de SEAs del MIT Leg Lab) para una potencial gama de aplicaciones, incluyendo la asistencia a la movilidad de usuarios con discapacidades, la rehabilitación y el ejercicio terminaron con una interesante aplicación para el ejercicio de entrenamiento de astronautas para contrarrestar los efectos de la ausencia de gravedad en el espacio. En la actualidad, el equipo está desarrollando el exoesqueleto Quix, y sigue trabajando para resolver las limitaciones anteriores para la asistencia a personas con discapacidad. Ninguno de estos dispositivos ha recibido aún la autorización de la FDA o de la CE como dispositivos médicos.

Los prototipos de exoesqueletos desarrollados en el Instituto Italiano de Tecnología no han podido cumplir las especificaciones de los dispositivos médicos para la neurorrehabilitación y, de hecho, se han orientado hacia los exoesqueletos industriales para usuarios sanos en la fábrica con el fin de reducir las lesiones relacionadas con el trabajo. Por lo tanto, todos los exoesqueletos del mercado con autorización de la FDA o la CE para su uso como dispositivos médicos (Ekso, ReWalk, Indego, Wandercraft) están actualmente indicados para adultos con paraplejia (lesión medular) y sólo unos pocos están aumentando las indicaciones hacia el ictus (Ekso Bionics), pero restringidos a pacientes no espásticos. Cabe destacar que el 80% de los ictus son espásticos. En general el paciente neurológico presenta una sintomatología compleja, que incluye exceso de tono muscular,

---

[16] Grebenstein, M., Albu-Schaffer, A., Bahls, T., Chalon, M., Eiberger, O., Friedl, W., Gruber, R, Haddadin, S., Hagn, U., Haslinger, R., Höppner, H., Jörg, S. Nickl, M., Nothhelfer, A., Petit, F., Reill, J., Seitz, N., Wimböck, T., Wolf, S. and Hirzinger, G. (2011). The DLR hand arm system. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 3175 - 3182. 10.1109/ICRA.2011.5980371.

o bien hipotonía, contracturas y en algunos casos deformidades articulares.

La falta de adaptabilidad de las articulaciones de estos exoesqueletos es lo que limita las indicaciones a los síntomas neurológicos más comunes. En el caso de exoesqueletos de asistencia o rehabilitación de la marcha, son necesarias las articulaciones que permitan variar la rigidez del dispositivo y controlar el comportamiento de la articulación en función de las necesidades del usuario o de su sintomatología.

La mayoría de los actuadores con rigidez variable son muy voluminosos y pesados. Introducen un segundo motor, en paralelo al motor principal que mueve la articulación, para regular la rigidez del muelle, al que comprime o descomprime según interese. Este segundo motor es considerablemente más pequeño que el motor principal, aunque debe superar la resistencia del sistema al cambio de rigidez. El resultado es un conjunto actuador voluminoso y pesado.

Durante mi estancia en el equipo del MIT Leg Lab, precursores de los SEAs, tuve la oportunidad de estudiar los fundamentos de esta técnica biomimética. A mi regreso al CSIC empecé a trabajar junto con mi equipo del proyecto ATLAS en la investigación para avanzar sobre el Estado del Arte en la actuación de impedancia variable con el objetivo de resolver las dificultades de su implementación en exoesqueletos. El resultado de esta investigación es el sistema ARES[17], que patentamos y extendimos a Europa y USA. Este diseño evita la lucha del segundo motor contra el cambio de rigidez al controlar la posición del sistema de muelles respecto del eje de la articulación, variando así la rigidez torsional equivalente. Para entenderlo, imaginemos que queremos ejercer resistencia a la apertura de una puerta, que puede pivotar sobre el eje de su bisagra. Si tratamos de frenar la puerta apoyando nuestra mano sobre la parte de la puerta más próxima a la bisagra, nos resulta mucho más dificil vencer la fuerza de la puerta que si tratamos de frenarla desde la parte más alejada de la bisagra, donde se encuentra habitualmente el picaporte. Si nuestro brazo fuera un muelle, podríamos pensar que la resistencia que opone el muelle a la apertura de la puerta es dife-

[17] Cestari, M., Sanz-Merodio, D., Arevalo, J.C., Garcia, E. (2014): "An Adjustable Compliant Joint for Lower-Limb Exoskeletons," Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on , vol.PP, no.99, pp.1,12.

rente según su posición respecto de la bisagra, es decir, que nuestro muelle parece más blando cuando trata de resistirse a la apertura de la puerta desde una posición más cercana al picaporte, o más rígido cuando lo hace más cerca de la bisagra. Variando su distancia al eje de giro, para el mismo ángulo de apertura de la puerta, modificamos la rigidez.

La tecnología adaptativa de ARES, que incluye el sistema de articulación de impedancia variable patentado y la arquitectura de adaptación inteligente relacionada con él, supera a los diseños de impedancia variable anteriores al resolver los requisitos de potencia específica en una solución compacta con sensores integrados y algoritmos de control de impedancia. ARES demuestra reducir hasta un 40% el consumo eléctrico del robot que lo incorpora, además de mejorar la relación potencia-peso en comparación con el estado del arte. La patente de ARES, licenciada a Marsi Bionics está en explotación comercial y ha sido extendida a USA y Europa (ES20130030882 / EU EP14810160/ US10016331B2)[18].

Además, debido a su naturaleza inteligente y a los sensores incorporados, los robots en los que se utiliza esta solución pueden realizar mediciones muy precisas y consistentes de parámetros específicos biomecánicos con una exactitud que no se ha visto antes. En pocas palabras, la tecnología de articulación adaptativa basada en ARES es el mejor enfoque tecnológico para proporcionar un patrón de marcha seguro y específico para un robot que asiste en la marcha a un paciente, considerándose un avance en la ingeniería robótica.

El primer exoesqueleto que incorporó estas capacidades de control de rigidez articular fue el exoesqueleto pediátrico ATLAS[19], actualmente comercializado por la empresa española derivada del CSIC, Marsi Bionics. El prototipo de investigación original ATLAS incorporaba el actuador de impedancia variable ARES, desarrollado y patentado internacionalmente por mi grupo en el CSIC. Gracias al empleo de estas articulaciones es posible aumentar las indicaciones

---

[18] Cestari M., D. Sanz-Merodio, X. Carrillo, J.C. Arevalo, and E.Garcia, (2013) Actuator with adjustable-rigidity and embedded sensor for an active orthosis knee joint, 16th Int. Conf. Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Sidney, Australia, (Innovation Award 2013 –WINNER- For practical innovation in the field of robotics, Awarded by Industrial Robot, Emerald Group Publishing Limited).

[19] M. Cestari, D.Sanz-Merodio, and E. Garcia (2017) Preliminary Assessment of a Compliant Gait Exoskeleton, Soft Robotics Vol. 4, No. 2, pp. 135-146, 2017.

de los exoesqueletos a las enfermedades neurológicas más complejas, como la Parálisis Cerebral Infantil, donde ATLAS 2030 ha demostrado ya su uso clínico, regulando el tono muscular de los pacientes, incluso los espásticos. Hasta la fecha, los SEA y VSA son los actuadores que mejor emulan el comportamiento del músculo humano en robots.

Paralelamente al diseño y desarrollo del sistema adaptativo ARES investigué sobre nuevos conceptos totalmente disruptivos de actuación, basados en materiales inteligentes o en su hibridación. Este fue el objetivo del proyecto HADE[20], que dirigí centrándome en la hibridación de diversas tecnologías compatibles cuyo resultado fueran actuadores controlables en fuerza, de alta densidad de par y potencia, acomodables, rápidos y con autonomía energética[21]. Para ello creé un Laboratorio de Nuevos Actuadores en el que se caracterizaban los nuevos desarrollos, basados en el acoplamiento de tecnología convencional y materiales inteligentes como *los actuadores MS*M-piezo-hidráulicos[22], basados en la combinación de aleaciones con memoria de forma ferromagnética con ayuda acústica de sistemas piezoeléctricos, también patentado, capaces de proporcionar la potencia demandada por un robot ágil[23].

Para dotar al robot de cierta adaptabilidad al medio e incorporarlo al mundo que nos rodea, lo ideal sería que el robot estuviera hecho de materiales parecidos a los biológicos en lo que a sus propiedades físicas se refiere. Materiales blandos, conformables y con la capacidad de modificar sus propiedades físicas para adaptarse al entorno con el que contactan. Sería ideal que estos materiales incluyeran una funcionalidad, con lo que la construcción de robots inteligentes sería más sencilla y robusta. Por ejemplo, los robots podrían estar hechos de huesos que midan la carga, músculos que se

---

[20] Diseño y experimentación de nuevos sistemas de actuación para robótica de servicios mediante fusión de tecnologías complementarias (Hybrid Actuator Development — HADE). CSIC Proyecto Intramural Especial - I3 (200750I009).

[21] J. Pestana, R. Bombín, J.C. Arevalo and E. Garcia, Characterization of emerging actuators for empowering legged robots, 13rd Int. Conf. Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Nagoya, Japan 2010.

[22] R. Bombin, J. Pestana and E. Garcia, Characterization of Magnetic Shape Memory Alloys (MSMA) Oriented to Hydraulic Actuation Technology, 12th Int. Conf. On New Actuators, ACTUATOR 2010, Bremen, Germany, 2010.

[23] J.C. Arevalo, J. Pestana, F. Sanchez, J.F. Sarria and E. Garcia, Impedance control of an agile-locomotion robotic leg, 13rd Int. Conf. Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Nagoya, Japan 2010.

muevan, piel que proporcione al robot información sobre el tipo y la ubicación de las sensaciones táctiles, desde la presión hasta la textura y el posible daño, ojos que extraigan información de alto nivel y materia gris que proporcione información de forma escalable. Estos materiales no se asemejarían a ningún material de ingeniería existente, sino a los componentes heterogéneos de los que están hechos sus homólogos naturales. Pues bien, existe un campo de investigación que trata de alcanzar este ambicioso objetivo, comenzando con el estudio de los **materiales inteligentes**, en los que ya se han hecho progresos, aunque todavía queda mucho camino por recorrer en esta materia, y conduciéndonos hacia los **robots blandos**.

Un material inteligente es un material que muestra un cambio observable en una de sus propiedades físicas (rigidez, viscosidad, forma, color, etc.) cuando es estimulado desde otra. Pero que a su vez provoca ese determinado estímulo si se modifican sus propiedades físicas. De tal manera que pueden funcionar simultáneamente como sensor y actuador si el efecto es controlable.

La investigación en materiales inteligentes cubre todas las propiedades físicas: la mecánica, la eléctrica, la química, la óptica, la térmica. Por ejemplo, un material termocromático muestra un cambio de color cuando se calienta, mientras que un polímero electroactivo genera un cambio mecánico (es decir, se expande o se contrae) cuando recibe una estimulación eléctrica[24]. Los materiales inteligentes pueden añadir nuevas capacidades a la robótica si los integramos como parte de su estructura mecánica, dotando al robot de un cuerpo blando con capacidad de cambiar de rigidez y por tanto de adaptarse al medio; como parte de su sistema sensorial, o de actuación. Dotando al robot de propiedades que imitan las propiedades físicas de los organismos naturales, como su elasticidad o su adaptabilidad, los haremos adecuados para interaccionar con elementos tan delicados como el propio cuerpo humano.

Podemos clasificar los materiales inteligentes en función del tipo de respuesta que presentan ante un estímulo externo en materiales electro y magnetoactivos y materiales con memoria de forma. Los materiales con memoria de forma tienen la capacidad de deformarse ante un estímulo externo. Esta deformación es cien veces mayor que la que presentan los electro y magnetoactivos. Entre la familia de

[24] Bar-Cohen, Y. (2001): Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges. SPIE Press.

materiales con memoria de forma se encuentran los **polímeros electroactivos**, también conocidos como músculos artificiales[25].

Los polímeros electroactivos se fundamentan en una serie de tecnologías emergentes y diferentes entre sí, con principios de funcionamiento distintos, como la reorientación de carga eléctrica y la electrostricción, consiguiendo funcionalidades variadas. El factor común es un material que responde a los estímulos eléctricos con cambios en su forma o tamaño, de forma muy similar a los músculos naturales. Como actuadores, son capaces de sufrir grandes deformaciones mientras soportan esfuerzos moderados. Estos materiales aún no han conseguido la capacidad de carga necesaria para generar el movimiento en la mayoría de los robots de servicio para aplicaciones reales, pero prometen.

Existe otro tipo de actuadores que varían las propiedades dinámicas del robot. Son los actuadores basados en fluidos electro y magneto-reológicos[26]. Son fluidos inteligentes que modifican sus propiedades reológicas, como su viscosidad, ante la acción de un campo eléctrico o magnético[27]. Se trata de una suspensión de partículas ferromagnéticas en una base oleosa. En presencia de un campo eléctrico o magnético las partículas se reagrupan en cadenas paralelas al campo. La nueva estructura modifica las propiedades del fluido, concretamente su viscosidad y esfuerzo de corte (que viene a ser la fuerza que puede soportar), convirtiéndose en un fluido no newtoniano. Esto significa que el fluido no se comporta como un fluido, sino como un sólido, pero únicamente mientras la fuerza a la que se le someta sea menor que un determinado valor. A partir de ese valor de fuerza máxima que puede soportar, el material vuelve a fluir con un comportamiento viscoso. El coeficiente de viscosidad depende de la base oleosa con una ligera dependencia del campo. El valor de la fuerza que puede soportar sin fluir depende de la intensidad del campo aplicado y son, por tanto, variables controlables. Utilizando estas propiedades se han desarrollado actuadores resistivos en los que el fluido reológico proporciona un amortiguamiento controlado.

---

[25] Y. Bar-Cohen, "Electroactive polymers as artificial muscles - capabilities, potentials and challenges," in Handbook on Biomimetics, Osada, Ed. NTS Inc., 2000, ch. 8, sec. 11, pp. 299–342.

[26] J.-H. Yoo, J. SIROHI, and N. M.Wereley, "A magnetorheological piezohydraulic actuator," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 16, pp. 945–954, 2005.

[27] D.Carlson, D.M.Catanzarite, and K. Clair, "Commercial magneto-rheological fluid devices," in Proceedings of ACTUATOR 2004, Bremen, Germany, 2004.

Para construir el actuador, el fluido se hace circular por canales esculpidos en el pistón de un cilindro. Entre el pistón y la carcasa se provoca un campo eléctrico o magnético que hace solidificar el fluido dentro de los surcos, lo que bloquea o frena el movimiento del pistón. Variando el valor del campo aplicado se puede controlar la fuerza de rozamiento que ejerce el fluido. Son, por tanto, actuadores resistivos, es decir, amortiguadores del movimiento. Estos **amortiguadores magneto-reológicos** se usan en prótesis de rodilla activas para conseguir movimientos más naturales, así como ortesis para dar estabilidad a la rodilla durante la marcha, como la ortesis C-Brace que comercializa Ottobock. También se emplean en la suspensión de tractores y vehículos autónomos, para conseguir controlar la suspensión de forma activa.

De toda la gama de actuadores basados en materiales inteligentes, los actuadores **piezoeléctricos** son los más maduros y mejor establecidos en el mercado. Los materiales piezoeléctricos, poseen la capacidad para convertir la energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. Es decir, experimentan deformaciones mecánicas en su estructura cristalina ante la acción de un campo eléctrico, pero también se polarizan al ejercer presión sobre ellos. Se aplican ampliamente como sensores y actuadores. Existe una amplia gama de materiales piezoeléctricos que presentan muy diferentes propiedades y que no voy a comentar por cuestiones de tiempo. Un actuador piezoeléctrico genera movimiento aprovechando la piezoelectricidad. Se comercializan desde hace más de 20 años en todas las formas y tamaños, y han revolucionado el posicionamiento de precisión con una resolución por debajo del nanómetro.

Los piezoeléctricos se sitúan en el mapa de características de los actuadores en lugares privilegiados tanto en potencia específica, como en frecuencias y fuerzas. El único inconveniente para muchas aplicaciones de robótica de servicio es el recorrido microscópico que presentan, lo que los hace inviables como actuadores por sí mismos, haciendo necesaria algún tipo de transmisión que amplifique su recorrido. En cambio, en otras aplicaciones de robótica, como prótesis de manos, para mover las falanges de los dedos robóticos o en micro-robótica, los motores piezoeléctricos son una solución muy adecuada.

Tanto los piezos, como otros materiales inteligentes (magnetostrictivos, aleaciones con memoria de forma, etc) reúnen características de potencia específica y velocidad muy deseables en las aplicaciones de ro-

Figura 5. Prototipo de pata de caballo con actuación biomimética basada en SEAs. Proyecto HADE[20].

bótica de servicio, pero poseen una desventaja insalvable: su imperceptible recorrido. Sin embargo, es viable utilizarlos como elemento de potencia para mover un fluido que al mismo tiempo desplace un pistón. De esta manera, a través del pistón obtenemos el recorrido que necesitamos. Es lo que se denomina **actuadores híbridos**, que combinan la tecnología convencional con los materiales inteligentes para conseguir mejorar las prestaciones de ambas tecnologías. Es el caso de los actuadores piezohidráulicos[28]. La idea de combinar actuadores elásticos, con amortiguadores magnetoreológicos, o bien actaudores piezohidraulicos, o piezo –músculos artificiales, puede conducirnos al funcionamiento versátil del músculo natural que tanto ambicionamos en robótica. Éste fue el objetivo del proyecto HADE, que dio lugar a

[28] E. H. Anderson, G. L. Bales, and E. V. White, "Application of smart material-hydraulic actuators," in Proceedings of SPIE Industrial and Commercial Applications of Smart Structures and Materials, vol. 5054, Mountain View, CA, 2003, pp. 73–84.

actuadores piezo-hidráulicos con elasticidad en serie[29], consiguiendo grandes potencias junto con etapas de almacenamiento energético, que implementamos en una pata de caballo robótica[30] y cuyo objetivo era alcanzar la locomoción ágil y energéticamente eficiente de los grandes mamíferos[31].

Esta investigación fundamental llevada a cabo en los primeros años de mi carrera como investigadora principal abrió la puerta a la investigación aplicada que continuó para resolver problemas reales de la sociedad, los **retos sociales**. Estas aplicaciones sociales y asistenciales de la robótica tienen y tendrán un impacto relevante en la sociedad del futuro.

El sector salud está liderando estas aplicaciones, siendo uno de los principales mercados de robots profesionales para uso civil. Los robots permiten minimizar el riesgo de la cirugía gracias a las características de precisión y repetibilidad que aportan.

Desde hace más de una década están instalados en nuestros hospitales los robots cirujanos que son sofisticadas herramientas de asistencia al cirujano, que amplían sus capacidades, reducen imperfecciones y por tanto minimizan el riesgo de la operación, salvando vidas humanas. Los robots asisten al cirujano, manteniendo éste el conocimiento y la maestría en la operación, pero minimizando imprecisiones, efectos del pulso y ampliando la precisión a la escala micro y nanométrica.

O robots que sustituyen a miembros amputados, brazos, piernas, permitiendo recuperar una vida en sus actividades diarias. La aplicación de la robótica al ámbito de la salud es muy significativa entre las aplicaciones profesionales de esta tecnología, ya que permite complementar las capacidades humanas para compensar un déficit causado por una enfermedad o un accidente.

Una de las aplicaciones con mayor crecimiento es la rehabilitación, donde los robots pueden aportar su fuerza, precisión y repeti-

---

[29] Garcia, E., Arevalo, J.C., Muñoz, G. and Gonzalez de Santos, P. Combining series-elastic actuation and magneto-rheological damping for the control of agile locomotion. Robotics and Autonomous Systems, Vol. 59, No. 10, pp. 827–839, 2011.

[30] Garcia, E., Arevalo, J.C., Muñoz, G. and P. Gonzalez de Santos. On the Biomimetic Design of Agile-Robot Legs. Sensors, Special Issue "Biomimetic sensors, actuators and integrated systems" Vol 11, No. 11, pp. 11305-11334, 2011.

[31] E. Garcia and P. Gonzalez de Santos, "Biomimetic design and control of a robotic leg for agile locomotion," in Proc. Int. Conf. Climbing and Walking Robots, Istambul, Turkey, Sept 2009.

bilidad para ayudar a recuperar el estado de salud. La robótica para rehabilitación está cobrando un gran protagonismo en el mundo por su tremendo impacto social y económico.

En concreto, la robótica aplicada a la rehabilitación de las enfermedades neurológicas es, a día de hoy, uno de los grandes campos de trabajo. Gracias a la tecnología robótica podemos realizar movimientos repetitivos para la rehabilitación funcional, complementar la capacidad de caminar perdida por una lesión tiene un impacto incalculable en la calidad de vida de una persona.

Entre ellos, los **exoesqueletos de marcha y ortesis activas** son mecanismos robóticos con los que el usuario se "viste" y que operan en paralelo con las propias piernas del usuario. Estos mecanismos son la perfecta integración entre humano y robot, en la que la máquina aporta al usuario aquellas capacidades físicas que la persona ha perdido o no ha adquirido y es una de las aplicaciones de la robótica más próxima al transhumanismo.

Los exoesqueletos son robots que se acoplan al cuerpo de una persona, aportándole la marcha. La tecnología, que se había iniciado ya en los años 1970 por el Prof. Vukovratovich en Belgrado[32], se ha desarrollado definitivamente gracias al enorme impulso que el programa *Exoskeletons for Human Performance Augmentation* financiado por el Departamento de Defensa Americano dio a esta investigación en la primera década de siglo 21. La investigación se centraba en aumentar la potencia y resistencia física de los soldados, y al mismo tiempo aportar una solución a los veteranos que habían perdido la capacidad de andar. Los resultados de la investigación se materializaron en los primeros exoesqueletos que llegaron al mercado en la última década[33].

Estos avances científicos y tecnológicos en defensa tratan de transferirse después al mundo civil para aplicaciones en el ámbito de la salud, dando lugar en este caso a exoesqueletos de asistencia y rehabilitación de la marcha humana.

La robótica aplicada al entrenamiento de la marcha consigue explotar los principios de la rehabilitación neurológica (o neuro-reha-

---

[32] Vukobratovic M, Hristic D, Stojiljkovic Z. Development of active anthropomorphic exoskeletons. Med Biol Eng. 1974 Jan;12(1):66-80. doi: 10.1007/BF02629836. PMID: 4465554.

[33] Kazerooni, H., and Steger, R. (September 17, 2005). "The Berkeley Lower Extremity Exoskeleton." ASME. J. Dyn. Sys., Meas., Control. March 2006; 128(1): 14–25. https://doi.org/10.1115/1.2168164

bilitación) basados en la neuroplasticidad[34]. Ésta defiende que el cerebro humano tiene la capacidad de adaptarse a cambios a través de conexiones neuronales. Cuando el cerebro sufre un daño, es posible repararlo enseñando al cerebro a rehacer las conexiones. Esto es lo que se conoce por neuro-rehabilitación. Las grandes cualidades de la robótica de repetibilidad, intensidad y especificidad se adaptan perfectamente a los principios de la neuro-rehabilitación. Otras claves para una neuro-rehabilitación eficiente son el inicio temprano, el desafío o reto al paciente para aprender en niveles crecientes de dificultad, la generalización de los ejercicios a la vida cotidiana, y la motivación del paciente.

Los exoesqueletos de miembro inferior para entrenamiento de la marcha constituyen un campo creciente de la investigación internacional de robótica. Los primeros dispositivos robotizados de entrenamiento de la marcha (RGT, del inglés Robotic Gait Training) son para uso hospitalario y en centros de rehabilitación; dispositivos tales como Lokomat[35], comercializado por Hocoma. Tales exoesqueletos explotan los principios de repetibilidad y especificidad, imprimiendo el movimiento de caminar en las piernas de un paciente que está suspendido a través de un arnés sobre una cinta de marcha. El robot se acopla a sus piernas y mueve sus articulaciones según un patrón de marcha predefinido. Vale la pena señalar que estos dispositivos no son portables, por lo que su uso está restringido a la rehabilitación periódica en el hospital y carece de interacción con el entorno. Resolver el problema de la portabilidad, aunque tecnológicamente difícil, permitiría mejorar las capacidades de esta rehabilitación, explotando los principios de tiempo (un dispositivo portable podría empezar a movilizar al paciente en la cama del hospital el mismo día de la lesión), motivación (al facilitarle la movilidad espacial para realizar actividades retantes), y generalización o transferencia de los ejercicios a la vida real, durante las actividades diarias, contribuyendo así mismo a la mejora de su calidad de vida.

---

[34] de Sousa Fernandes MS, Ordônio TF, Santos GCJ, Santos LER, Calazans CT, Gomes DA, et al. Effects of Physical Exercise on Neuroplasticity and Brain Function: A Systematic Review in Human and Animal Studies. Hess G, editor. Neural Plast [Internet]. 2020 Dec 14;2020:1–21.

[35] Kwon, N. K. K. H., & Robot-assisted, P. J. L. H. (2017). gait training (Lokomat) improves walking function and activity in people with spinal cord injury: a systematic review. Journal of Neuroengineering and Rehabilitation, 14, 24-24.

Figura 6. Sistema robotizado Lokomat para entrenamiento de la marcha (cortesía Hocoma).

Con el fin de poder explotar estos principios, en la última década se ha producido un avance muy importante en el desarrollo de **exoesqueletos portables o vestibles**[36]. Estos exoesqueletos llevan integrados en su estructura tanto los actuadores como la fuente de alimentación, lo que conlleva un aumento significativo del peso del dispositivo, y uno de sus principales retos tecnológicos: reducir su peso y volumen manteniendo sus prestaciones. Actualmente los exoesqueletos portables tienen un peso que varía según el fabricante entre 14 y 80 kg. La tecnología está todavía en proceso de maduración y son varios los retos a superar. Aun así, ya existen desarrollos comerciales que aportan un gran valor añadido a la práctica clínica.

Actualmente existen 17 exoesqueletos vestibles comerciales, de los que cabe destacar el Ekso de Ekso Bionics (EEUU), actualmente líder en el mercado de la neuro-rehabilitación; Indego de Parker (EEUU), ReWalk de Argo Medical Technologies (Israel), Rex de Rex Bionics (Nueva Zelanda), Atalante de Wondercraft (Francia) que destacan por sus aproximaciones al mercado doméstico o asistencial.

[36] Alberto Plaza, Mar Hernandez, Gonzalo Puyuelo, Elena Garces, Elena Garcia Lower-limb medical and rehabilitation exoskeletons: A review of the current designs. IEEE Reviews on Biomedical Engineering 2021.

Son dispositivos destinados a asistir en la marcha de pacientes con paraplejia, y muy específicamente a aquellos parapléjicos en edad adulta con movilidad de tronco (lesión medular por debajo de la octava vértebra T8). Desde junio de 2021, ATLAS 2030 de Marsi Bionics (España) destaca por ser el único indicado para la neuro-rehabilitación de niños desde los 3 años, habiendo recibido aprobación de la Agencia Europea del Medicamento para su uso en Parálisis Cerebral y Atrofias Musculares[37]. ATLAS, además de ser el primero pediátrico con certificación como dispositivo médico, es el único con articulaciones adaptables a la sintomatología del paciente[38].

Aun así, se plantean cinco retos tecnológicos principales que limitan la escalabilidad de estos robots en el sector médico y en un uso cotidiano: (1) autonomía energética, (2) potencia específica, (3) destreza en el control del movimiento y estabilización, (4) seguridad y cooperación con el humano y (5) adaptación al entorno. Los exoesqueletos de rehabilitación y asistencia a la marcha existentes en el mercado en la fecha en la que empezaba mi investigación en este campo, estaban indicados para la rehabilitación de personas adultas con lesión medular, debido a su concepción en el diseño original para su uso en militares, usuarios sanos. Como dispositivo médico están únicamente indicados para adultos que han quedado parapléjicos en accidentes: tráfico, deportes de riesgo, etc y cuya lesión sea lo suficientemente reciente como para no haber generado complicaciones musculares o articulares, como la espasticidad, un elevado tono muscular que afecta al 80% de las lesiones medulares, así como a la gran mayoría de las enfermedades neurológicas.

Porque la necesidad real es mucho más amplia que la paraplejia. Cada año en el mundo se producen 15 millones de ictus[39], de los que sobreviven 9 millones de personas que se enfrentan a un proceso de rehabilitación complejo y no siempre efectivo, junto con otras enfermedades neuromusculares como la Esclerosis múltiple o la ELA,

---

[37] Cumplido, C; Delgado, E; Ramos, J; Puyuelo, G; Garcés, E; Destarac, MA; Plaza, A; Hernández, M; Gutiérrez, A; García, E. Gait Assisted Exoskeletons for Children with Cerebral Palsy or Spinal Muscular Atrophy: A Systematic Review NeuroRehabilitation, Jun 24, 2021.

[38] Sanz-Merodio D., Cestari, M., Arevalo, J.C. and Garcia, E. (2012): "A lower-limb exoskeleton for gait assistance in quadriplegia," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Guangzhou, China.

[39] Global, regional, and national burden of stroke, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. The Lancet Neurology March 11, 2019 DOI:https://doi.org/10.1016/S1474-4422(19)30034-1.

suponen las enfermedades más caras para los sistemas nacionales de salud, y lamentablemente con una incidencia creciente[40].

Y estas enfermedades neuromusculares no solo afectan a los mayores. Nosotros aprendemos a caminar de forma natural, en un proceso realmente rápido. Un niño sano inicia la marcha autónoma entre los 12 y los 18 meses de vida.

Sin embargo, no todos los niños adquieren la capacidad de andar, y otros que la adquieren, progresivamente la pierden. Esto se debe a enfermedades neurológicas o neuromusculares. Algunas son de origen genético, otras adquiridas. Y si bien la silla de ruedas les proporciona la movilidad espacial para ir de un lado para otro, lo cierto es que esta sedestación permanente provoca complicaciones muy graves en la salud de estos niños.

Deformidades articulares, atrofias y problemas circulatorios y respiratorios son comunes en todas estas enfermedades, principalmente por el factor común en todas ellas de no caminar, y es que somos seres bípedos y nuestro cuerpo necesita caminar para mantenerse sano. En las enfermedades neuromusculares más graves, como la Atrofia Muscular Espinal (AME), la escoliosis que se genera por la progresiva debilidad de los músculos torácicos debido a esta inmovilidad, agrava la disfunción respiratoria y condiciona la esperanza de vida de los niños[41].

Actualmente estos niños realizan una terapia multidisciplinar que aglutina terapia física, respiratoria, nutricional, psicológica y en ocasiones cirugía, para corregir la espalda. Esta terapia está enfocada a mantener un estado de salud y contrarrestar las complicaciones que aparecen debido a la falta de capacidad de marcha, ya que estas enfermedades hoy por hoy no tienen cura, aunque se está avanzando en el desarrollo de nuevos fármacos capaces de reducir la severidad de algunas de estas enfermedades.

Según los especialistas clínicos en rehabilitación y neurología pediátrica, caminar sería una terapia extraordinaria pues podría evitar o al menos retrasar estas complicaciones, fortalecer o mantener el tono en los músculos que sustentan la espalda, y en definitiva, mejorar su estado de salud y su calidad de vida. Estudios científicos en laboratorio refuerzan estas hipótesis al demostrar que el ejercicio fí-

---

[40] Disabled World: World facts and statistics on disabilities and disability issues (2010).

[41] A. Febrer; M. Vigo; J. Fagoaga; J. Medina- Cantillo; N. Rodriguez; E. Tizzano; Rev Neurol 2011; 53 (11): 657-663.

sico no extenuante aumenta la esperanza de vida en AME hasta en un 50%[42].

Así que ¿por qué no utilizar un exoesqueleto para la terapia de estos niños? El día que una familia se acercó al Centro de Automática y Robótica y nos hizo esta pregunta, mi respuesta fue: porque los retos tecnológicos no se han resuelto. Los actuadores que utilizan los exoesqueletos comerciales que están indicados para adultos con lesión medular son actuadores rígidos, de baja potencia específica, sin capacidad de adaptación a la sintomatología compleja de un niño con una patología neurológica. Pero nosotros llevábamos casi una década dedicada a la investigación en actuadores elásticos, eficientes y de elevada potencia específica, por lo que estábamos en la mejor posición para desarrollar la tecnología que estos 17 millones de niños necesitaban.

El exoesqueleto ATLAS es el resultado de nuestra investigación en exoesqueletos pediátricos, pionera internacionalmente. No se trata de exoesqueletos de talla pequeña. Son exoesqueletos que se adaptan de forma inteligente a la sintomatología articular de un niño: desde la hipotonía generalizada de la AME hasta la rigidez espasmódica de una parálisis cerebral. Hasta llegar a este exoesqueleto ya industrializado y comercializado por Marsi Bionics, han sido necesarias una serie de actividades de I+D, y adicionalmente un proceso de transferencia tecnológica al mercado.

La tecnología innovadora desarrollada en este Proyecto se ha protegido mediante 3 patentes extendidas internacionalmente a EEUU y Europa, y una de ellas ha recibido reciéntemente el European Inventor Award de la Oficina Europea de Patentes[43].

Como fundadora y promotora de esta empresa de base tecnológica, participada por el CSIC, he liderado todo el proceso de creación de la empresa, de industrialización y certificación de la tecnología como producto sanitario, siguiendo la regulación internacional. Para ello he recibido formación en el Instituto de Empresa y me he dejado asesorar por aquellos que conocen mejor que yo el mundo financiero y empresarial. La fundación de Marsi Bionics me permitió continuar con una doble actividad: (i) una investigación

---

[42] Grondard C, Biondi O, Armand A, Lécolle S, Della Gaspera B, Pariset C, Li H, Gallien C, Vidal P & Chanoine C (2005). Regular exercise prolongs survival in a type 2 spinal muscular atrophy model mouse. J Neurosci 25, 7615– 7622.

[43] E. García M. Cestari, D. Sanz-Merodio, X. Carrillo de Hijes Exoesqueleto para asistencia al movimiento humano. Patente P201431763 US 20170340504ª1 / EU EP15862885.

Figura 7. Neuro-rehabilitación con el exoesqueleto pediátrico ATLAS 2030 de Marsi Bionics (Patente CSIC-Marsi Bionics).

científica muy centrada en ampliar las indicaciones de uso a más y más amplios grupos de pacientes a través de la optimización de la tecnología, y (ii) liderar la industrialización y la certificación de los dispositivos para el marcado CE como productos sanitarios.

Tras 9 años de transferencia tecnológica al mercado a través de Marsi Bionics, este exoesqueleto robótico ATLAS aporta la marcha funcional, movilizando articulaciones, tonificando la musculatura y realizando un trabajo neuromuscular diario a los niños en sus centros de rehabilitación, en España y en varios países de Europa y Latinoamérica[44]. Es una terapia muy valiosa. Más aun, la autonomía que le aporta en la realización de actividades de la vida diaria tiene un impacto psicológico tremendo. Es una solución a una necesidad real de millones de familias.

[44] Delgado E, Cumplido C, Ramos J, Garcés E, Puyuelo G, Plaza A, Hernández M, Gutiérrez A, Taverner T, Destarac MA, Martínez M, García E. ATLAS2030 Pediatric Gait Exoskeleton: Changes on Range of Motion, Strength and Spasticity in Children With Cerebral Palsy. A Case Series Study. Front Pediatr. 2021 Nov 24;9:753226 DOI: 10.3389/fped.2021.753226..2021;49(3):333-348.

La actividad física ha demostrado tener una relación muy importante con la calidad de vida física y social en niños con parálisis cerebral (PC) y, también, una asociación con la felicidad[45], así como con cambios neuroplásticos. Las investigaciones clínicas en esta materia muestran que tras varios protocolos de ejercicio físico, se observa un incremento de la sustancia blanca y gris en varias regiones cerebrales. Adicionalmente, el ejercicio promueve mejoras en la función cognitiva, en el aprendizaje y en la memoria[46].

Todo tratamiento de neurorrehabilitación debe de seguir los principios de la neuroplasticidad descritos por J. Robbins et al. en 2008[47] para ser lo más efectivo posible:

1. Úsalo o piérdelo
2. Aumento de la dificultad del ejercicio
3. Entrenamiento de tareas específicas
4. Repetición
5. Intensidad alta
6. Intervención precoz
7. Motivación del paciente
8. Mejor cuanto más joven
9. Transferencia de lo aprendido a otros entornos
10. Evitar aprendizajes maladaptativos

Caminar ha demostrado tener beneficios fisiológicos y funcionales, incluyendo la prevención de las contracturas musculares, el mantenimiento de la densidad ósea y la mejora del sistema cardiovascular.

Booth et al., en su metaanálisis, viene a indicar que la terapia de la marcha produce un efecto más beneficioso en los niños con PC que la terapia convencional[48]. Además, una movilidad efectiva y funcional, donde podemos incluir la deambulación con o sin ayuda de

---

[45] Maher CA, Toohey M, Ferguson M. Physical activity predicts quality of life and happiness in children and adolescents with cerebral palsy. Disabil Rehabil. 2016;38(9):865–9.

[46] de Sousa Fernandes MS, Ordônio TF, Santos GCJ, Santos LER, Calazans CT, Gomes DA, et al. Effects of Physical Exercise on Neuroplasticity and Brain Function: A Systematic Review in Human and Animal Studies. Hess G, editor. Neural Plast [Internet]. 2020 Dec 14;2020:1–21.

[47] Robbins J, Butler SG, Daniels SK, Lazarus CL, Mccabe D. Rehabilitation : Translating Principles. Hear Res. 2008;51(February):276–3.

[48] Booth ATC, Buizer AI, Meyns P, Oude Lansink ILB, Steenbrink F, van der Krogt MM. The efficacy of functional gait training in children and young adults with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis. Dev Med Child Neurol. 2018;60(9):866–83.

sistemas de apoyo beneficia las habilidades de los niños para interactuar y explorar el entorno[49]. En el tratamiento de enfermedades neuromusculares (ENM) el ejercicio de bajo impacto resulta muy beneficioso[50], como puede ser la deambulación con soporte.

La rehabilitación de la marcha asistida por dispositivos robóticos consiste en la inclusión de estos sistemas electromecánicos en la rehabilitación de los pacientes. egún Calderón et al., entre los beneficios de la terapia robótica se encuentran en la posibilidad de aumentar el volumen de entrenamiento, disminuyendo la fatiga por parte del paciente y de los terapeutas; lo cual, permite aumentar el número de repeticiones, la continuidad y la calidad de los tratamientos, además de tener en cuenta la seguridad. También cabe destacar que permiten una reeducación de la marcha de forma precoz[51]. Datos con los que concuerda Bruni et al.[52] y añadiendo que puede ser considerada como una herramienta muy útil para mejorar la marcha, reduciendo la discapacidad con la consecuente mejora de la calidad de vida de los pacientes[53].

El beneficio psicológico también es un aspecto importante a tener en cuenta cuando se utiliza un exoesqueleto de marcha[54]. Hopkins et al.[55] en su revisión sistemática se hizo eco de múltiples testimonios de pacientes recogidos en estudios clínicos:

---

[49] Wiart L, Rosychuk RJ, Wright FV. Evaluation of the effectiveness of robotic gait training and gait-focused physical therapy programs for children and youth with cerebral palsy: A mixed methods RCT. BMC Neurol [Internet]. 2016;16(1):1–10.

[50] Anziska Y, Sternberg A. Exercise in neuromuscular disease. Muscle and Nerve. 2013;48(1):3–20.

[51] Calderón-Bernal AM, Cano-De La Cuerda R, Alguacil-Diego IM, Molina-Rueda F, Cuesta-Gómez A, Miangolarra-Page JC. Terapia robótica para la rehabilitación de la marcha en patología neurológica. Rehabilitacion. 2015;49(3):177–92.

[52] Bruni MF, Melegari C, De Cola MC, Bramanti A, Bramanti P, Calabrò RS. What does best evidence tell us about robotic gait rehabilitation in stroke patients: A systematic review and meta-analysis. J Clin Neurosci [Internet]. 2018 Feb;48:11–7.

[53] Bruni MF, Melegari C, De Cola MC, Bramanti A, Bramanti P, Calabrò RS. What does best evidence tell us about robotic gait rehabilitation in stroke patients: A systematic review and meta-analysis. J Clin Neurosci [Internet]. 2018 Feb;48:11–7.

[54] Cumplido C, Delgado E, Ramos J, Puyuelo G, Garcés E, Destarac MA, Plaza A, Hernández M, Gutiérrez A, García E. Gait-assisted exoskeletons for children with cerebral palsy or spinal muscular atrophy: A systematic review. NeuroRehabilitation. 2021;49(3):333-348.

[55] Kinnett-Hopkins D, Mummidisetty CK, Ehrlich-Jones L, Crown D, Bond RA, Applebaum MH, Jayaraman A, Furbish C, Forrest G, Field-Fote E, Heinemann AW. Users with spinal cord injury experience of robotic Locomotor exoskeletons: a qualitative study of the benefits, limitations, and recommendations. J Neuroeng Rehabil. 2020 Sep 11;17(1):124.

a. "Según mi experiencia, es lo que más me ha ayudado. Soy capaz de mantener el equilibrio durante más tiempo, de estar de pie durante más tiempo, incluso de subir las escaleras y estar de pie sin ayuda. Y todo eso ha sido gracias al exoesqueleto".
b. "Inmediatamente fui capaz de dar 30 y pico pasos el primer día y yo estaba como, wow, eso es genial, y ahora estamos trabajando más allá de los 1200 o algo así, es un buen día…".
c. "… si puedes verte caminando, creo que es algo realmente bueno para tu mente verte, de nuevo, dando esos pasos más naturales, y con esa retroalimentación positiva que te da esperanza".
d. "Caminar es calidad de vida, ¿sabes? Es estar de pie. Es hacer ejercicio y el simple hecho de caminar fue genial. Muy esperanzador para seguir trabajando para tratar de caminar, incluso sin los aparatos ortopédicos, así que personalmente, creo que es un gran constructor mental a mi capacidad".
e. "Me sentí como si fuera madre de nuevo. Y luego cuando alcancé a mirar a mi marido, y honestamente, recuerdo que estaba allí con mi marido, él me besó de pie, y tenía lágrimas en los ojos".
f. "Lo más importante para mí es poder hablar con alguien cara a cara de pie, porque estando en una silla no es gran cosa, te sigues comunicando de la misma manera, pero mirarlos a los ojos mientras les hablas es algo muy importante".

El exoesqueleto pediátrico ATLAS 2030 es el primer exoesqueleto pediátrico portátil que brinda la posibilidad de una mayor integración e interacción del paciente con el entorno, mejorando, ya no solo las habilidades motoras del paciente, sino sus habilidades sociales, emocionales y cognitivas[56]. Es una herramienta de trabajo muy versátil que ofrece al clínico un dispositivo seguro y eficaz con el que se puede individualizar completamente la terapia y con el que integrar distintas tareas motoras o cognitivas para maximizar los resultados de la terapia.

---

[56] C. Cumplido-Trasmonte, J. Ramos-Rojas, E. Delgado-Castillejo, E. Garcés-Castellote, G. Puyuelo-Quintana, M. A. Destarac-Eguizabal, E. Barquín-Santos, A. Plaza-Flores, M. Hernández-Melero, A. Gutiérrez-Ayala, M. Martínez-Moreno and E. García-Armada. Effects of ATLAS 2030 Gait Exoskeleton on Strength and Range of Motion in Children with Spinal Muscular Atrophy II: A Case Series. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2022;19:75 DOI: https://doi.org/10.1186/s12984-022-01055-x.

Una de las principales diferencias entre el ATLAS 2030 y otros exoesqueletos es la movilidad por el entorno. Esta movilidad efectiva y funcional beneficia las habilidades de los niños y de las niñas para interactuar y explorar el entorno, así como mejorar la participación en la sociedad[57], aumentando su motivación y adhesión al tratamiento. Actualmente, no existe ningún exoesqueleto pediátrico para la rehabilitación clínica comercializable[58] similar al dispositivo ATLAS 2030. Tan sólo existe el exoesqueleto Lokomat pediátrico (Hocoma) el cual, está fijo anclado al suelo y moviliza las piernas del paciente sobre una cinta de marcha rodante. Este dispositivo no permite una interacción con el entorno y requiere de grandes espacios para su instalación. El tiempo de ajuste del dispositivo Lokomat conlleva en torno a 20-45 minutos con necesidad de asistencia de dos personas, suponiendo una falta de eficiencia en la administración del tratamiento. Además, todo ello puede conllevar a la falta de motivación de los menores la cual, es imprescindible en la rehabilitación pediátrica.

Como se ha dicho con anterioridad, con el uso del ATLAS 2030 es posible trabajar varios objetivos terapéuticos durante el mismo tiempo de sesión. Por ejemplo, se podrían ejecutar actividades bimanuales mientras el paciente camina con el exoesqueleto, ya que éste le permite mantener las extremidades superiores libres, facilitando la participación en el entorno a través de tareas y/o actividades manuales. Además, el terapeuta podría interactuar de frente al paciente en una terapia lúdica.

Por otra parte, fomentando las habilidades motrices a través del uso del dispositivo, sería interesante estudiar si se producen efectos beneficiosos en las dimensiones de "contractura", y "alineación", para las cuales actualmente las intervenciones quirúrgicas y farmacológicas han demostrado los resultados más significativos. Si esto ocurriese, podrían ser utilizadas como apoyo o alternativa a este tipo de intervenciones, pudiendo en algunos casos evitar la intervención quirúrgica, conllevando una mejora del coste-beneficio del exoesqueleto ATLAS 2030.

---

[57] Olmos-Gómez R, Gómez-Conesa A, Calvo-Muñoz I, López-López JA. Effects of Robotic-Assisted Gait Training in Children and Adolescents with Cerebral Palsy: A Network Meta-Analysis. J Clin Med [Internet]. 2021 Oct 24;10(21):4908.

[58] Delgado E, Cumplido C, Ramos J, Garcés E, Puyuelo G, Plaza A, Hernández M, Gutiérrez A, Taverner T, Destarac MA, Martínez M, García E. ATLAS2030 Pediatric Gait Exoskeleton: Changes on Range of Motion, Strength and Spasticity in Children With Cerebral Palsy. A Case Series Study. Front Pediatr. 2021 Nov 24;9:753226.

En cuanto al aparato respiratorio, Novak et al.[59] refieren que el ejercicio físico es una herramienta fundamental para el manejo de las complicaciones pulmonares en estos pacientes. Dado que hay pacientes que no tienen posibilidad de marcha o que necesitan apoyos importantes, el exoesqueleto ATLAS 2030 puede facilitarles una alternativa para realizar actividad física desplazándose en bipedestación, opción que con los medios actuales no tienen o tienen muy limitada.

Por último, en relación a las dimensiones de autocuidado y/o función, el exoesqueleto ATLAS 2030 puede utilizarse como apoyo en el entrenamiento dirigido a objetivos o como terapia enfocada en el contexto.

Teniendo en cuenta que todas las personas con PC tienen alteraciones motoras y que éstas consisten en debilidad muscular, tono muscular anormal, contracturas, fatiga, y todo lo relacionado con la marcha, se han llevado a cabo 3 estudios clínicos con PC con las siguientes instituciones: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Hospital Universitario La Paz, y Fundación NIPACE (Guadalajara), en los que hasta el momento han participado 16 niños y niñas con PC de edades entre 3 y 11 años.

El promedio de tiempo de colocación del exoesqueleto al/a la paciente es de 5 minutos, colocado con la asistencia de una única persona. Por otro lado, el promedio de tiempo de retirada del/de la paciente del exoesqueleto es de 1 minuto. Todas las sesiones de los estudios fueron llevadas a cabo con la presencia de una única fisioterapeuta responsable del tratamiento.

La terapia con el exoesqueleto ATLAS 2030 ha permitido un aumento del número de pasos realizados mejorando su cadencia (número de pasos por minuto) durante la marcha.

Las patologías de estos niños se caracterizan por una disminución de la fuerza muscular, lo que interfiere en sus actividades del día a día. El trabajo de la fuerza suele ser un objetivo básico en el tratamiento rehabilitador de los menores con PC, tanto para evitar deformidades como para ganar capacidad funcional, además de ser fundamental en el entrenamiento de la marcha (10). Por ello, la fuerza es una variable fundamental a medir en los ensayos clínicos.

---

[59] Alonso-Coello P, Schünemann HJ, Moberg J, Brignardello-Petersen R, Akl EA, Davoli M, et al. GRADE Evidence to Decision (EtD) frameworks: a systematic and transparent approach to making well informed healthcare choices. 1: Introduction. BMJ. 2016;353:i2016.

En nuestra investigación clínica se ha observado un aumento de la fuerza, tanto en los músculos de las piernas como de los brazos y musculatura del tronco; lo que puede tener implicaciones importantes en el día a día de estos niños al permitirle hacer muchas más cosas, y realizarlas con mejor calidad, sin fatigarse tanto. La fuerza en miembros inferiores al mes de uso del exoesqueleto ATLAS 2030 se incrementó hasta en un 200% en algunos grupos musculares tras la finalización del estudio. Todos los grupos musculares vieron incrementada su fuerza tras 9 sesiones de exoesqueleto[60].

La espasticidad es el síntoma más frecuente en menores con PC[61]. La espasticidad es un aumento del tono muscular basal el cual, limita tanto el rango de movimiento pasivo como activo y contribuye a la formación de contracturas las cuales, suelen ser intervenidas quirúrgicamente. El 85%-91% de los menores con PC presentan espasticidad. Ésta puede ser unilateral (hemiplejia) (38%) o bilateral, donde se incluye la diplejía (37%) y la cuadriplejia (24%). La espasticidad puede originar disfunciones motoras e incluso pérdida en la calidad del movimiento, disminuyendo la capacidad funcional del niño o niña[62]. Por todo lo anterior, entre los objetivos de rehabilitación para los menores con PC se encuentra el de reducir la espasticidad o normalizar el tono muscular para evitar deformidades, disminuir el dolor y aumentar la capacidad funcional. Por ello, se evaluaron los efectos del exoesqueleto ATLAS 2030 tras 1 mes de uso (9 sesiones) en la espasticidad de los participantes del estudio. Pudimos observar que, según avanzaba el tratamiento, descendió el nivel de espasticidad en estos menores que se redujo un 90% tras un mes de uso de exoesqueleto.

---

[60] Delgado E, Cumplido C, Ramos J, Garcés E, Puyuelo G, Plaza A, Hernández M, Gutiérrez A, Taverner T, Destarac MA, Martínez M, García E. ATLAS2030 Pediatric Gait Exoskeleton: Changes on Range of Motion, Strength and Spasticity in Children With Cerebral Palsy. A Case Series Study. Front Pediatr. 2021 Nov 24;9:753226.

[61] Sadowska M, Sarecka-Hujar B, Kopyta I. Cerebral Palsy: Current Opinions on Definition, Epidemiology, Risk Factors, Classification and Treatment Options. Neuropsychiatr Dis Treat. 2020 Jun 12;16:1505-1518.

[62] Novak I, Morgan C, Adde L, Blackman J, Boyd RN, Brunstrom-Hernandez J, Cioni G, Damiano D, Darrah J, Eliasson AC, de Vries LS, Einspieler C, Fahey M, Fehlings D, Ferriero DM, Fetters L, Fiori S, Forssberg H, Gordon AM, Greaves S, Guzzetta A, Hadders-Algra M, Harbourne R, Kakooza-Mwesige A, Karlsson P, Krumlinde-Sundholm L, Latal B, Loughran-Fowlds A, Maitre N, McIntyre S, Noritz G, Pennington L, Romeo DM, Shepherd R, Spittle AJ, Thornton M, Valentine J, Walker K, White R, Badawi N. Early, Accurate Diagnosis and Early Intervention in Cerebral Palsy: Advances in Diagnosis and Treatment. JAMA Pediatr. 2017 Sep 1;171(9):897-907.

La PC produce desequilibrios entre los diferentes grupos musculares, generando deformidades articulares disfuncionales a nivel de miembros inferiores y de columna vertebral[63]. Además, la carencia de las tracciones musculares y tendinosas provocadas por la carga durante la marcha agrava la aparición de las mismas[64]. Debido a ello, los menores con PC suelen ser intervenidos con cirugía multinivel (denominada SEMLS por sus siglas en inglés) en la fase de pre-pubertad y pubertad, generando largos y costosos procesos de rehabilitación pre y postquirúrgica[65]. Es fundamental que los programas de rehabilitación para menores con PC incluyan objetivos de prevención y tratamiento de deformidades donde el mantenimiento o la disminución de las deformidades articulares, así como el equilibrio en la fuerza entre los diferentes grupos musculares, formen parte. Debido a lo descrito con anterioridad, se ha evaluado el ROM en diferentes estudios a través de goniometría. Principalmente, el relativo a los flexos en las articulaciones los cuales, se definen como el número de grados necesario para posicionar una determinada articulación en su posición anatómica. Los flexos de cadera, rodilla y tobillo son los que frecuentemente aparecen en menores con PC.

Tras una sola sesión de uso del exoesqueleto ATLAS 2030, el promedio del tamaño de los flexos se redujo. El flexo de cadera se redujo un 50% y la rodilla en torno a un 31%. Tras un mes de uso de exoesqueleto, se redujo la limitación de movimiento de las articulaciones, aumentando su movilidad.

Los niños se están beneficiando del uso del exoesqueleto independientemente de su nivel en la escala Gross Motor Function Classification System (GMFCS). Sin embargo, se están observando que las mejoras van mucho más allá de un incremento en la fuerza o una mejora del patrón de marcha. Tanto las familias de los pacientes como los terapeutas han observado que el trabajo con el exoesqueleto ha potenciado la musculatura estabilizadora del tronco y de la

---

[63] Bache C, Selber P, Graham HK. The management of spastic diplegia. Current Orthop 2003; 17:88-104.

[64] Gage, James R., Michael H. Schwartz, and Steven E. Koop. The Identification and Treatment of Gait Problems in Cerebral Palsy , 2nd Edition. 2nd ed. London: Mac Keith Press, 2009.

[65] Martínez Caballero I, Lerma Lara S, Ferullo M, Ramírez Barragán A, Castillo Sanz A. Cirugía multinivel para las alteraciones de la deambulación en PC infantil. Evaluación cuantitativa, funcional y de satisfacción de los resultados obtenidos. Trauma (Spain). 2013;24(4):224–9.

cabeza. Tras el trabajo de marcha en posición erguida ha mejorado la capacidad ventilatoria de los pacientes, produciendo en algunos casos un incremento en el tono de voz. También, tras un trabajo intenso de tareas duales de marcha y manipulación, se han conseguido resultados muy prometedores en la capacidad funcional del miembro superior.

Han aparecido cambios tras el uso del exoesqueleto ATLAS 2030 en las escalas de función motora gruesa (GMFM) y en escalas de valoración de la calidad de la extremidad superior (QUEST). Los participantes han mostrado mejoría en la valoración de los movimientos en diferentes posiciones: tumbados, sentado, gateando y de rodillas, de pie o en aquellos que pueden caminar, correr y saltar. Debido a la restricción de movimiento causada por sus diferentes patologías, estas mejoras implican un aumento de la calidad de vida y la autonomía en estos niños, al tener capacidad para hacer más cosas. También los movimientos específicos de miembros superiores han mejorado, en aquello relacionado con poder coger objetos, mantener el equilibrio mientras trabajan con las manos, con mayores rangos de movimiento y mejor calidad. Esto influye de manera positiva en el día a día de los niños, al permitirle hacer actividades de la vida diaria como pudiera ser comer por sí solos, coger un lápiz, o en la higiene, lo que significará cambios positivos en su ámbito doméstico o en el colegio.

En relación a las puntuaciones en la escala Hammersmith (HMFM) para niños con AME, se están consiguiendo mejoras en esta escala de funcionalidad motora gruesa, además. También se están consiguiendo avances en la escala Revised Upper Limb Module (RULM) de los participantes en el presente proyecto. Además, se evalúan las capacidades respiratorias de los participantes con ENM de manera trimestral. Estas evaluaciones las llevan a cabo profesionales especializados en neumología.

Mediante el análisis de fotogrametría con un sistema tridimensional de cámaras Vicon®, se evaluó el movimiento realizado por el exoesqueleto con los participantes, corroborando que el exoesqueleto sigue un patrón de marcha funcional que ayuda a la correcta rehabilitación de los participantes, minimizando así los efectos derivados de su patología.

La PC en España es una de las patologías neurológicas con una mayor incidencia en la población, en concreto la padecen 2-3 de cada

1.000 nacidos vivos[66]. El coste sanitario puede variar en función de la gravedad y de la afectación del paciente, desde los 1.757$ anuales medios que se estimó en un estudio de coste sanitario realizado por Deloitte en Australia[67] en 2018, a los 40.265€ anuales en casos severos de PC que fueron determinados en un estudio realizado en Holanda en 2007[68].

Cada paciente tiene un nivel de afectación y autonomía diferente; por lo que resulta complicado establecer una media de costes. Sin embargo, todos los y las autores coinciden que, al aumentar la severidad de la enfermedad, los costes se incrementan de manera exponencial.

El impacto positivo derivado de la utilización del exoesqueleto ATLAS 2030 en los costes relacionados con la PC se basa principalmente en dos hipótesis:

1. El uso del exoesqueleto en menores con PC en edades tempranas y en fase de desarrollo previene o mitiga los problemas de salud o complicaciones derivados de la enfermedad y de la pérdida de la marcha, disminuyendo así su coste elevado.
2. La terapia con el exoesqueleto ATLAS 2030 supone un aumento de la eficiencia en los servicios de rehabilitación al optimizar los recursos humanos necesarios y mejorando de manera sustancial la atención a los pacientes y las condiciones de realización de esta terapia para los profesionales.

Dentro de los problemas de salud y complicaciones que la PC genera en los menores que la padecen, las cirugías son las intervenciones que más coste generan debido a la propia intervención. Pero también por el tiempo de hospitalización necesario tras la cirugía, las comorbilidades asociadas a la misma, la pérdida de productividad de los cuidadores y la pérdida de calidad de vida de los pacientes y sus cuidadores.

La presencia de escoliosis genera un impacto negativo en la calidad de vida en los pacientes que no deambulan, conllevando defor-

---

[66] Poo P. Parálisis cerebral infantil. En: J. Campistol, H.J. Arroyo, P. Póo, V. Ruggieri (editores). Neurología para pediatras, enfoque y manejo práctico. Editorial Médica Panamericana. Madrid 2011, pp. 93-109.

[67] Deloitte Access Economics. The cost of cerebral palsy in Australia in 2018 [Internet]. 2019.

[68] Hoving MA, Evers SMAA, Ament AJHA, van Raak EPM, Vles JSH. Intractable spastic cerebral palsy in children: a Dutch cost of illness study. Vol. 49, Developmental medicine and child neurology. England; 2007. p. 397–8.

midades y problemas en el sistema cardiorrespiratorio y digestivo. La incidencia de escoliosis en PC está entre 61% y el 77%[69]. La deambulación supone una actividad fundamental en el desarrollo motor del/de la paciente. Pero, como muestran los datos, los beneficios físicos asociados a esta actividad repercuten de manera muy beneficiosa para ralentizar la progresión de la escoliosis. Sin embargo, los pacientes con poca o nula capacidad de marcha no podrán obtener estos beneficios a menos de que se tenga una herramienta adecuada. Las complicaciones cardíacas y respiratorias derivadas de la escoliosis pueden surgir debido a la deformidad en la caja torácica y descompensaciones asimétricas[70], y están asociadas a una rápida progresión, a riesgo de debilidad, complicaciones, interferencia en las actividades de la vida diaria y en la integridad física hace que la cirugía sea el tratamiento de elección[71].

El exoesqueleto ATLAS 2030 ofrece una terapia en la que los músculos del tronco se ven fortalecidos por lo que su utilización puede generar un impacto muy positivo en el control de la escoliosis, en la mejora funcional del/de la paciente, en la rehabilitación pre y post operatoria y, si es aplicado en edades tempranas, el retraso de las cirugías, pudiendo reducir el número de cirugías a lo largo de su vida o incluso evitarlas con la reducción de costos que esto conlleva.

La cirugía multinivel es una cirugía habitual en los pacientes con PC. Es la corrección en una sola cirugía del desequilibrio muscular y de la alineación esquelética centrándose en diferentes segmentos y estructuras del miembro inferior[72]. Esta cirugía supone una reducción de los costes frente a la realización de manera individual de cada una de las intervenciones. Sin embargo, supone una cirugía con un coste elevado que puede llegar a los 75.000€ (40).

Otra intervención quirúrgica habitual en pacientes con PC es la cirugía de cadera debido a una gran deformidad, subluxación o lu-

---

[69] Weigl DM. Scoliosis in non-ambulatory cerebral palsy: Challenges and management [Internet]. Vol. 21, Israel Medical Association Journal. Israel Medical Addociation Journal; 2019. p. 752–5.

[70] Koop SE. Scoliosis in cerebral palsy. Dev Med Child Neurol. 2009 Oct;51 Suppl 4:92–8.

[71] Hägglund G, Pettersson K, Czuba T, Persson-Bunke M, Rodby-Bousquet E. Incidence of scoliosis in cerebral palsy. Acta Orthop [Internet]. 2018 Jul 4;89(4):443–7.

[72] Martínez Caballero I, Lerma Lara S, Ferullo M, Ramírez Barragán A, Castillo Sanz A. Cirugía multinivel para las alteraciones de la deambulación en PC infantil. Evaluación cuantitativa, funcional y de satisfacción de los resultados obtenidos. Trauma (Spain). 2013;24(4):224–9.

xación que normalmente vienen acompañadas de un gran dolor. Se estima que entre el 10 y el 30% de los pacientes con subluxación de cadera sufren dolor y que, en algunos casos, puede ser muy limitante. El dolor es la primera indicación para la cirugía[73]. El riesgo de desplazamiento de la cadera asciende hasta el 90% en pacientes con PC con una afectación severa[74].

Por todo esto, el exoesqueleto ATLAS 2030 puede jugar un papel importante en el desarrollo motor del niño/niña como elemento preventivo de la cirugía, dando la posibilidad de trabajar la deambulación desde edades muy tempranas, con la consecuente mejora en la fuerza y movilidad. Esta mejoría en fuerza y movilidad podría llegar a evitar las cirugías y los problemas a futuro que pueden tener estos pacientes. En pacientes que ya posean patología articular, el uso del ATLAS 2030 ayudaría a mejorar la condición física evitando el progreso de las complicaciones derivadas de la pérdida de la marcha y de la debilidad del sistema musculoesquelético incrementando las capacidades funcionales del paciente y su independencia, mejorando su calidad de vida y retrasando la necesidad de las cirugías y tratamientos derivados de las mismas. En el caso de que no se consiguiese mediante rehabilitación frenar este avance, el exoesqueleto ATLAS 2030 es un dispositivo seguro y eficaz de acondicionamiento físico preoperatorio y postoperatorio, imprescindible para el éxito de la cirugía.

Gracias a la versatilidad del dispositivo ATLAS 2030, podremos trabajar de manera eficiente múltiples regiones y habilidades motoras, como puede ser la deambulación, la precisión en los movimientos, manipulación fina, la fuerza de los miembros inferiores y superiores, el control de tronco y de cabeza y un largo etcétera. Todos estos beneficios en el paciente podrían favorecer un mayor grado de independencia en personas con PC, lo que podría contribuir a facilitar su desarrollo desde edades muy tempranas y con ello mejorar la inserción social y una mayor inserción laboral posteriormente. El impacto sería mayor en aquellas personas activas, con una mayor integración a nivel social (aquellos afectados/afectadas que se encuentran en edad escolar o está iniciando la transición de unidades pediátricas a adultas).

---

[73] Boldingh EJ, Bouwhuis CB, van der Heijden-Maessen HCM, Bos CF, Lankhorst GJ. Palliative hip surgery in severe cerebral palsy. J Pediatr Orthop B [Internet]. 2014 Jan;23(1):86–92.

[74] Kiapekos N, Broström E, Hägglund G, Åstrand P. Primary surgery to prevent hip dislocation in children with cerebral palsy in Sweden: a minimum 5-year follow-up by the national surveillance program (CPUP). Acta Orthop. 2019;90(5):495–500.

No se debe olvidar el impacto que la mejora de la capacidad funcional y del estado de salud de los pacientes tendrían en los cuidadores, normalmente los padres y madres, que habitualmente se ven obligados a renunciar parcial o totalmente a su carrera profesional y reducir su jornada laboral para poder cuidar a sus hijos. En este caso podría ser posible que pudieran reincorporarse al mercado laboral o mejorar su productividad (también se debe tener en cuenta la mejoría en las variables psicológicas de los cuidadores).

La actividad física juega un papel de alta importancia en la maximización del bienestar en los menores con PC, además de sus beneficios más que reconocidos a nivel físico y de salud[75]. La rehabilitación robótica ha demostrado tener un impacto muy positivo en la mejora de la calidad de vida de estos niños. [76]

Tras el uso del dispositivo ATLAS 2030, hemos podido comprobar objetivamente resultados positivos a nivel de funcionalidad, fuerza, espasticidad y ROM en los menores con PC. Estos beneficios obtenidos con el uso del dispositivo suponen una mejora en las capacidades físicas de los niños y niñas y, por consiguiente, suponen una mejora en su calidad de vida e inclusión social, haciéndoles más independientes. Cuando un paciente gana independencia, reduce la necesidad de cuidado, potenciando su autonomía y su autoestima. Pero, a la vez, potencia la satisfacción de sus cuidadores y reduce la carga física y emocional de estos.

En los estudios que hemos realizado hasta la fecha, hemos tenido hallazgos mucho más esperanzadores al margen de las variables medidas objetivamente. Los padres y madres de los menores que participaron en el estudio refirieron mejoras en la autoestima de sus hijos y en la confianza en sí mismos. Pudieron observar una mayor facilidad en las relaciones sociales con otros menores y una mayor atención en la escuela. También en algunos casos, al fortalecer la musculatura respiratoria, los menores mejoraron su potencia de voz. Mejorando las capacidades emocionales de los menores se logra un mayor desarrollo y una menor dependencia de sus padres y madres lo que conlleva a un gran beneficio para la sociedad. Todas estas me-

---

[75] Maher CA, Toohey M, Ferguson M. Physical activity predicts quality of life and happiness in children and adolescents with cerebral palsy. Disabil Rehabil. 2016;38(9):865–9.

[76] Fang C-Y, Tsai J-L, Li G-S, Lien AS-Y, Chang Y-J. Effects of Robot-Assisted Gait Training in Individuals with Spinal Cord Injury: A Meta-analysis. Biomed Res Int. 2020;2020:2102785.

joras son subjetivas e intangibles, pero no hay duda de que suponen un importante valor para los menores y sus familias.

La rehabilitación y la reeducación de la marcha suele ser una terapia imprescindible en la rehabilitación neurológica. Habitualmente el terapeuta necesita dispositivos para aligerar el peso soportado. Pero, aun así, exigen al profesional trabajar en posiciones poco ergonómicas (agachados aguantando el peso del niño, de rodillas moviendo las piernas, soportando todo el peso con flexión lumbar…) con un alto gasto energético. Gracias al ATLAS 2030, estos profesionales podrán estimular al paciente o incluso trabajar distintas áreas al mismo tiempo, reduciendo drásticamente su esfuerzo físico, reduciendo el riesgo de lesión laboral y maximizando los resultados en la terapia con los pacientes.

Mi visión de futuro

La investigación en exoesqueletos de asistencia al movimiento humano, y en general en la robótica asistencial ha evolucionado durante las últimas décadas gracias a la propia investigación y evolución de tecnologías facilitadoras. Estas tecnologías han permitido resolver algunos de los principales retos que presentaban estos robots para su plena aplicación en escenarios reales. Las líneas de investigación continúan evolucionando para abordar usos o aplicaciones cada vez más complejas, en entornos menos controlados.

Las investigaciones más recientes en el campo de los exoesqueletos de marcha, promovidas por los usuarios finales, se enfocan en diseñar exoesqueletos no sólo con fines de rehabilitación en entornos clínicos, sino también como dispositivos de asistencia para su uso diario en casa y en la comunidad, aunando terapia y autonomía personal. Se les denomina robots asistenciales, que incluyen prótesis robotizadas y exoesqueletos de asistencia al movimiento, cuyo objeto es devolver o restaurar la movilidad en las actividades de la vida diaria, de una persona afectada por debilidad muscular, o algún tipo de patología crónica, ayudando en la ejecución de las actividades de la vida diaria.

Las prótesis robotizadas son miembros artificiales que sustituyen al miembro biológico, tras una amputación. Los avances en el desarrollo de prótesis robotizadas han sido exponenciales, destacando

los desarrollos del Prof. Hugh Herr en el MIT Media Lab[77]. Herr desarrolla prótesis con actuadores elásticos que dotan al miembro artificial de una mejor adaptación al usuario y a la diferentes superficies. Herr fundó la spin-off iWalk en 2007 para transferir sus innovaciones al mercado. La startup fue adquirida por la alemana Ottobock en 2017, que ya muestra en su catálogo algunas de las innovaciones de Herr. La investigación de Herr en el MIT continúa en varias líneas: en primer lugar, conectar los robots de forma bidireccional y con alta fidelidad, al sistema nervioso periférico o a los músculos y nervios, tanto para percibir la intención motora del sistema nervioso central, como para obtener sensaciones aferentes desde el dispositivo que se lleva puesto. La segunda es comprender cómo se pueden acoplar mecánicamente los robots y las máquinas al cuerpo de forma segura y cómoda. Y la tercera es cómo se pueden construir robots que reflejen la dinámica, la masa y el volumen de un miembro biológico.

Los exoesqueletos de asistencia a la movilidad también son un campo de aplicación que deriva directamente del de exoesqueletos para neuro-rehabilitación, pero con un enfoque parecido al de las prótesis, tratando de minimizar peso y volumen, para conseguir dispositivos cada vez más imperceptibles.

Sin embargo, hasta el momento, los exoesqueletos portátiles que se comercializan o los que están en fase de desarrollo distan mucho de cumplir las características necesarias para permitir la plena integración de las personas con discapacidad física en la comunidad. Cabe decir que, a pesar de las limitaciones que presentan los exoesqueletos vestibles de última generación, cuatro de ellos ya han obtenido luz verde por parte de las agencias reguladoras para ser utilizados en el hogar y, por tanto, fuera de los entornos clínicos. Aunque se consideran seguros, no se ha demostrado su utilidad y eficacia durante las actividades de la vida diaria (AVD). En el caso de ReWalk Personal 6.09, un estudio reciente con pacientes revela algunas limitaciones como dispositivo de asistencia durante la vida diaria. La necesidad de apoyo en las extremidades superiores (los usuarios se ayudan de bastones o muletas para mantener el equilibrio), la dependencia de un cuidador cualificado para su manejo, o la reducida versatilidad de movimientos (sentarse, levantarse y ca-

[77] Herr recibió el Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica en 2017.

minar) son los principales puntos débiles. Se esperan resultados similares con Indego y su versión personal del dispositivo, ya que sus características son similares a las que presenta ReWalk.

ATLAS 2030, el único para uso pediátrico, también ha recibido la autorización CE para su uso clínico y para su uso en el hogar, siempre que un cuidador cualificado supervise su uso, como en los casos anteriores. Aunque ATLAS permite un funcionamiento sin manos, el exoesqueleto lleva siempre un marco de seguridad, lo que impone restricciones para su uso en terrenos irregulares, escaleras o en presencia de obstáculos. El REX para uso personal, aunque es un exoesqueleto de manos libres, presenta también importantes inconvenientes como el elevado peso del dispositivo (pesa 38 Kg), la muy baja velocidad y el movimiento antinatural de la marcha (marcha cuasi-estática). Por último, Wandercraft está trabajando para lanzar una versión personal de Atalante, con la promesa de ser el primer exoesqueleto sin necesidad de uso de bastones, que se mueve de forma estable en la comunidad. Aunque es prometedor, sin una gran reducción de peso (actualmente pesa 80Kg) y volumen, su utilidad como dispositivo de asistencia en la comunidad parece limitada, pues de momento, debido a su peso, las autoridades sanitarias le obligan a funcionar con un arnés de seguridad atado a una grúa fija en el techo.

Proyectos de investigación como el proyecto BALANCE del Séptimo Programa Marco de la UE, cuyo objetivo era realizar un exoesqueleto que mejorara el rendimiento del equilibrio de los pacientes que se enfrentaban a condiciones que suponían un reto para el equilibrio o que sufrían una falta de capacidad para caminar o mantener el equilibrio durante la marcha, terminaron con resultados interesantes sobre la medición de la pérdida de equilibrio, pero lamentablemente sin su implementación en un exoesqueleto de marcha vestible. La rigidez de las extremidades del robot y las interferencias electromagnéticas fueron los principales obstáculos encontrados. Sin embargo, se logró entender algunos enfoques de equilibrio y se consiguió un traje de captura de movimiento. Como medidas paliativas, el traje implementado para la captura de movimiento se probó en dispositivos de entrenamiento de marcha robótica estacionaria, como LOPES II, y los resultados parciales pueden aplicarse en los entornos de rehabilitación clínica. El problema de la asistencia a la marcha en el mundo real sigue abierto.

Es evidente el gran potencial de este campo y la inversión en investigación en robótica de rehabilitación y asistencial puede suponer un auge en la calidad de vida de millones de ciudadanos en el mundo.

Mi visión acerca de la evolución del campo es que su aplicación asistencial va a depender del desarrollo de una inteligencia Cinestésica. Existe una tendencia reciente a aumentar la inteligencia de los robots para que tomen decisiones rápidas, lo que se está abordando mediante técnicas de Inteligencia Artificial[78]. Pero los expertos en IA también señalan las dificultades de evolucionar hacia una IA de propósito general (o IA fuerte) sin un hardware robusto que facilite la interacción física con el mundo. La IA dota a las máquinas de una inteligencia lógica y matemática, pero lo que queda por resolver es otro tipo de inteligencia, denominada cinestésica. Sólo con la unión de ambas inteligencias conseguiremos sistemas de interacción hombre-máquina-entorno robustos, eficaces y ágiles. Y esa inteligencia cinestésica es la capacidad de utilizar el cuerpo con gran precisión e implica coordinación, habilidad de equilibrio, velocidad, fuerza y destreza. Todo esto está relacionado con el hardware.

Los sistemas de control de movimiento de los exoesqueletos más modernos se componen de controladores centralizados que ejecutan la cinemática del robot, siguen la trayectoria de referencia y ordenan los actuadores de las articulaciones basándose en las variables de las articulaciones detectadas (principalmente el par y la posición). La capacidad de reacción ante los cambios en las condiciones operativas está limitada por la velocidad de computación, la velocidad de procesamiento de las señales y la velocidad de actuación (dominada por la inercia y la fricción del motor y el sistema de engranajes). Cuando se prevé un riesgo de caída del paciente, la electrónica mencionada no puede reaccionar con la suficiente rapidez para evitarla sin la ayuda externa de muletas para estabilizarse. Este reto se hace aún más complejo en la comunidad en la que es frecuente encontrar perturbaciones imprevistas (por ejemplo, terreno variable, obstáculos, perturbaciones por la manipulación de objetos). El uso de servidores externos de supercomputación o de sistemas de decisión tiene poco que resolver aquí. Es hora de dar un salto cualitativo en la inteligencia cinestésica.

---

[78] Duan Y, Edwards JS, Dwivedi YK. Artificial intelligence for decision making in the era of Big Data – evolution, challenges and research agenda. Int J Inf Manage. 2019;48:63-71. doi:10.1016/j.ijinfomgt.2019.01.021.

Este desarrollo depende de tres áreas facilitadoras, algunas de las cuales pueden hoy sonar a ciencia ficción, que son (i) el desarrollo de sistemas de control del equilibrio estable no solo en la locomoción, sino en la interacción del sistema humano-robot con su entorno; (ii) la investigación en robótica blanda que aporte cuerpos robóticos adaptables y (iii) el desarrollo de actuadores biocompatibles para su implantación dentro del cuerpo humano.

El objetivo de abrir nuevos caminos en la tecnología de exoesqueletos (y por extensión a la comunidad robótica) basado en la investigación y el desarrollo de una Inteligencia Cinestésica que prediga con antelación las perturbaciones de la interacción con el usuario y el entorno proporcionando respuestas ágiles es desafiante pero realista. Uno de los principales retos de este objetivo es el equilibrio necesario entre un profundo conocimiento científico de la dinámica de interacción de los robots y la capacidad de evolucionar hacia una implementación en la vida real, más allá de las simulaciones y maquetas, aprovechando la evolución de la tecnología del hardware.

Todos los conocimientos y la experiencia adquirida durante mi trayectoria hacen factible abordar con éxito este reto científico que consiste en resolver los paradigmas que definen al robot: percepción, decisión, acción:

1. Cómo percibir anticipadamente toda la información involucrada en los mecanismos de equilibrio. En este sentido, mi experiencia en la investigación básica sobre los fundamentos de la estabilidad dinámica en los robots caminantes y en la biomimética de la locomoción será un peldaño más hacia un análisis más profundo y completo de los mecanismos que subyacen al control humano del equilibrio y la interacción. Sin embargo, el trabajo que hay que realizar es todavía complejo y multidisciplinar, y requiere la contribución de colaboraciones en los campos de la neurología y la ciencia que subyace al sistema sensorial vestibular. Este objetivo requerirá un refuerzo importante con aportaciones multidisciplinares de diversos campos de investigación (neurología, biomecánica, IA, percepción artificial).
2. Cómo caracterizar y hacer uso de dicha información para decidir unívocamente cómo y qué mover para mantener el equilibrio durante las interacciones. Aquí es donde mi experiencia científica en la modelización de la dinámica de los robots con patas, la identificación y la modelización de la impedancia en

el contacto entre el robot y el suelo[79] sentará las bases para la modelización multicuerpo de los comportamientos a partir de la percepción anticipatoria. El estudio de la estabilidad dinámica de los robots caminantes ha sido el tema principal de mi tesis doctoral[80], cuyos resultados se han incluido y citado en el Springer Handbook of Robotics (ed. 2008)[81]. Esta experiencia es la que hace viable un objetivo tan complejo.

3. Cómo proporcionar una respuesta rápida y precisa del sistema de control del hardware para reaccionar ante cualquier perturbación imprevista. En este sentido, mi experiencia como experto en el control de la locomoción robótica, junto con los conocimientos científicos y técnicos de mi equipo sobre el desarrollo y el control de actuadores elásticos en serie y actuadores de impedancia variable14, sumados a los conocimientos de Marsi Bionics sobre los sistemas de control distribuido en exoesqueletos y sobre la instanciación tecnológica y la industrialización de prototipos, sentarán las bases para conseguir sistemas de control distribuido rápidos y energéticamente eficientes[82].

Las recientes investigaciones sobre robótica blanda han llevado al desarrollo de exoesqueletos ligeros o exotrajes que mejoran la comodidad del usuario y no impiden sus movimientos[83]. La fuerza se aplica para proporcionar un apoyo adicional a los músculos mientras se mueven, haciendo uso de cables o tejidos que se tensan mediante pequeños actuadores situados normalmente en una mochila. El primer exosuit blando de su clase fue desarrollado en el Instituto Wyss, que se asoció con ReWalk para la licencia de un exosuit blando para

---

[79] Arevalo, J.C and Garcia, E. Impedance Control for Legged Robots: An insight into the Concepts Involved. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetic Part C- Applications and Reviews, Vol. 42, No. 6, pp. 1400-1411, 2012.

[80] Garcia E, de Santos PG. On the improvement of walking performance in natural environments by a compliant adaptive gait. IEEE Trans Robot. 2006;22(6):1240-1253

[81] Siciliano B, Khatib O, Kröger T. Springer Handbook of Robotics. Chapter 17. Limbed Systems. Vol 200. Springer; 2008.

[82] Plaza A, Hernandez M, Ramos J, Puyuelo G, Garces E, Garcia E. Adaptive Central Pattern Generator to Control a Modular Lower Limb Rehabilitation Exoskeleton. In: 2021 10th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER). IEEE; 2021:377-380.

[83] Baker L, Lee S, Long A, et al. Ankle optimization with a soft exosuit reduces metabolic cost of loaded walking. In: 2017 International Symposium on Wearable Robotics and Rehabilitation (WeRob). IEEE; 2017:1.

el soporte del tobillo. Estos prometedores desarrollos están bien indicados para ayudar a las personas que ya pueden ponerse de pie y caminar, pero que necesitan un pequeño apoyo para reducir la fatiga, o para una ayuda para el pie caído. Sin embargo, para todos aquellos pacientes afectados por enfermedades neuromusculares crónicas, incapaces de sostener su propio peso, el enfoque totalmente blando es insuficiente. No obstante, la robótica blanda puede ser parte de una solución híbrida a la adaptabilidad del hardware.

Las investigaciones sobre materiales inteligentes han abierto el camino hacia estructuras más complejas y heterogéneas, integradoras de múltiples tecnologías, conformando un robot en el que las deseadas características de seguridad y adaptabilidad intrínsecas están incorporadas a nivel de material. Es lo que se denomina **robótica blanda**, que se caracteriza por la integración de áreas de sistemas distribuidos, ciencia de los materiales, comunicación y energía.

Estos robots se caracterizan por contener materiales deformables capaces de cambiar de forma y comportamiento y permiten un contacto físico conformable, por ejemplo para la manipulación. Sin embargo, la introducción de materiales blandos y estirables en los sistemas robóticos conlleva un sinfín de retos para la integración de sensores, el control preciso del movimiento o la fuerza.

La conformidad intrínseca de los materiales de los robots blandos puede proteger tanto al robot como al entorno de daños cuando interactúan con entornos no estructurados. Esta propiedad hace que los robots blandos sean atractivos en contextos de interacción entre robot y humano, donde la seguridad alrededor de objetos frágiles y de las propias personas es importante. Las pieles artificiales tienen un gran potencial para permitir que los robots blandos interactúen de forma inteligente con su entorno.

Para que los robots blandos sigan avanzando es necesario contar con una electrónica de alto rendimiento y con sensores que puedan estirarse continuamente con su cuerpo. La investigación reciente sobre la piel artificial se ha centrado principalmente en la fabricación de sensores individuales con mejores prestaciones, como la sensibilidad, la capacidad de estiramiento y la fiabilidad a lo largo de muchos ciclos de uso. Para conseguir una piel totalmente biomimética para la robótica blanda, la piel artificial debe contener conjuntos de sensores que sean estirables, cubran grandes áreas con una alta resolución espacio-temporal y tengan múltiples funciones que imiten

diversos receptores de la piel humana. Estas características deberían permitir a los robots utilizar métodos basados en datos para extraer información rica sobre su entorno.

En la piel humana, la estimulación de los receptores se convierte en una serie de pulsos de tensión que se envían a los nervios. Esto inspiró a los investigadores a desarrollar receptores artificiales y nervios aferentes para convertir la información táctil en pulsos digitales en el lugar de la sensación. La señal podría ser percibida por los nervios y el cerebro del usuario, vinculando así directamente el cerebro humano con las prótesis robóticas blandas. Por ejemplo, Kim y su equipo[84] han desarrollado recientemente un nervio aferente artificial flexible que puede recoger eficazmente información sobre la presión procedente de conjuntos de sensores de presión y convertirla en potenciales de acción para activar los músculos biológicos. Concretamente conectaron un nervio aferente artificial a los nervios motores de una cucaracha. Estas investigaciones tienen un grandísimo potencial para evolucionar las neuroprótesis y exoesqueletos de ayuda a la movilidad hacia la realimentación sensorial desde el dispositivo a la persona, pudiendo percibir el tacto, la presión a través del elemento robótico y provocar el movimiento del mismo a través de su intención.

La evolución definitiva de la robótica asistencial requiere finalmente, además del desarrollo de sistemas de control cinestésico, de sistemas de percepción vestibular que aporten información rica y de robótica blanda como parte activa de la estructura robótica, el aporte motor que sustituya o complemente al músculo humano. A pesar de los esfuerzos realizados por los investigadores y los fabricantes para desarrollar dispositivos portátiles de asistencia con características que permitan el uso comunitario, los dispositivos siguen siendo lentos y pesados. Además, algunos de los dispositivos portátiles de asistencia actuales son complejos y voluminosos, difíciles de poner y quitar y que a menudo necesitan la ayuda de los cuidadores[85]. No pueden usarse bajo la ropa, lo que repercute negativamente en la fa-

---

[84] Y. Kim, A. Chortos, W. Xu, Y. Liu, J. Y. Oh, D. Son, J. Kang, A. M. Foudeh, C. Zhu, Y. Lee, S. Niu, J. Liu, R. Pfattner, Z. Bao, T.-W. Lee (2018), A bioinspired flexible organic artificial afferent nerve. Science 360, 998–1003.

[85] Gurriet T, Finet S, Boeris G, et al. Towards Restoring Locomotion for Paraplegics: Realizing Dynamically Stable Walking on Exoskeletons. Proc - IEEE Int Conf Robot Autom. Published online 2018:2804-2811. doi:10.1109/ICRA.2018.8460647.

cilidad de uso y la comodidad de los pacientes cuando se utilizan como dispositivos de asistencia. Teniendo en cuenta todo esto, el uso de dispositivos portátiles de asistencia para los pacientes crónicos no ambulatorios y las personas mayores está todavía muy lejos de convertirse en una realidad. El futuro reside en una familia pionera de dispositivos médicos implantables capaces de restablecer la marcha durante las actividades de la vida diaria o, al menos, de reducir la dependencia de la silla de ruedas de las personas con una discapacidad motriz, abriendo un nuevo horizonte para las personas mayores y los pacientes afectados por problemas de movilidad de origen neurológico y de carácter crónico. Estos problemas de movilidad están causados por diferentes enfermedades como el ictus, el traumatismo craneoencefálico, la parálisis cerebral o la lesión medular incompleta con debilidad de la fuerza del cuádriceps, que suelen provocar rigidez muscular continua, espasmos y espasticidad, contracciones involuntarias, problemas de equilibrio, pérdida de la función motora, problemas para caminar, estar de pie, subir y bajar escaleras o debilidad y fatiga del cuádriceps, entre otros.

En la mayoría de los casos los tratamientos actuales se centran en ejercicios, fisioterapia, tratamiento médico o incluso cirugía, lo que conlleva importantes costes económicos, sociales y de salud humana (tanto mental como física). Para cambiar la situación actual y mejorar la movilidad de las extremidades inferiores de todos estos pacientes, el desarrollo de dispositivos médicos implantables activos que proporcionen movimientos de rodilla y cadera y desbloqueen la inactividad de las extremidades puede ser la solución a su movilidad.

Al entrar en el cuerpo humano, una ventaja principal desde el punto de vista técnico es que ya no se necesita el peso y el tamaño de una estructura de soporte para transmitir fuerzas sustanciales, ya que el esqueleto humano puede cumplir esta tarea. Ponerse y quitarse el exoesqueleto deja de ser un problema. La carga de los huesos también evita las complicaciones secundarias derivadas del desuso, lo que es favorable desde el punto de vista médico. Sin embargo, sigue existiendo el reto ingenieril de los requisitos de par-peso y par-volumen de los actuadores. Como nuevos retos, surgen la biocompatibilidad y las restricciones de los materiales utilizados, y también cobran importancia las cuestiones de suministro de energía y disipación del calor.

Los actuales actuadores vestibles tienen un rendimiento diferente ante estas limitaciones adicionales. El aceite hidráulico estándar supone un alto riesgo dentro del cuerpo humano debido a su toxicidad, a pesar de su invariabilidad a las grandes variaciones de temperatura. En el interior del cuerpo humano, la variación de temperatura es mucho menor, lo que facilita el uso de soluciones biocompatibles basadas en el agua. Sin embargo, las fugas de este fluido pueden seguir suponiendo un riesgo de infección debido a la proliferación de bacterias. Existen accionamientos fluídicos cerrados y sin fugas, por ejemplo, cilindros con sellado de diafragma rodante. Las soluciones neumáticas podrían funcionar como un sistema "parcialmente implantado" con "endo-actuación" y "exo-actuación", pero hay que tener en cuenta el riesgo de fuga de esta solución. También podría servir como almacenamiento cíclico de energía, como se hace en un muelle de gas. Los sistemas hidráulicos pueden ser totalmente cerrados y potencialmente pueden implantarse en su totalidad.

El suministro de energía es un reto importante para cualquier actuador implantado. Los actuadores fluídicos convencionales suelen depender de un compresor, una bomba y un depósito de aire comprimido, y los actuadores electromecánicos requieren una batería o un condensador. Aunque la recolección de energía del movimiento humano (por ejemplo, de los impactos) podría ser suficiente para alimentar sensores o válvulas, no es realista generar una energía sustancial, como la necesaria para alimentar completamente la locomoción humana. Para reducir las necesidades de energía, se han propuesto varias soluciones:

1. Emplear tendones elásticos que puedan almacenar y liberar energía durante el ciclo de la marcha y también transferir energía entre las articulaciones. Sin embargo, los experimentos han demostrado hasta ahora que los tendones elásticos controlados no alcanzan más que porcentajes de un solo dígito en la reducción del coste metabólico en los usuarios humanos[86];
2. Aplicar métodos comúnmente utilizados de transferencia de energía sin contacto, como la inductancia, que sólo suministra energía a niveles adecuados para sensores o actuadores en miniatura[87]. Sin embargo, prevemos que la potencia en el rango

[86] van Dijk, W., et al. 2014. IEEE Robot. Autom. Mag. 21, 56–61.

[87] Garraud, N., et al. 2018. In Journal of Physics: Conference Series vol. 1052 12023 (IOP Publishing).

necesario para la asistencia locomotora podría transferirse utilizando el concepto de acoplamiento magneto-dinámico[88], una tecnología de baja frecuencia, que está alcanzando la madurez,

3. Emplear energía disipadora. En este sentido, una de las soluciones más exitosas y comercialmente viables son las exoprótesis de rodilla controladas por microprocesador, como la C-Leg y Genium (Otto Bock) o la RheoKnee (Össur). Aunque técnicamente no son actuadores, ya que sólo disipan energía, reproducen la funcionalidad más importante del cuádriceps humano durante la marcha. Al mismo tiempo, son muy compactos y ligeros. Las personas con amputación unilateral pueden alcanzar un rendimiento asombroso con las exoprótesis de rodilla controladas por microprocesador, como la subida de escaleras alternas. Es previsible que los pacientes con debilidad de cuádriceps podrían beneficiarse igualmente de esta asistencia si se les implantara.

Como primer paso, mi propuesta es desarrollar una solución disipadora para la rodilla, montada dentro del cuerpo humano. Se trata de una novedad disruptiva en cuanto a su ubicación. La solución puede ser, por ejemplo, un amortiguador hidráulico controlado, similar a las exoprótesis disponibles en el mercado. Se dará gran preferencia a los materiales no ferromagnéticos, de modo que los usuarios puedan seguir sometiéndose a una exploración por resonancia magnética[89]. Con esta restricción adicional en cuanto a los materiales, el principal reto sigue siendo la electrónica, para controlar las válvulas, por lo que nos esforzaremos por conseguir una solución pre-mecánica que se controle a través de la cinemática de la extremidad, utilizando la lógica mecánica.

Una vez que hayamos adquirido más conocimientos sobre la colocación de elementos generadores de fuerza adaptables en el interior del cuerpo, investigaremos más articulaciones y más grados de libertad, en particular la cadera y la rodilla, ya que es posible caminar con ortesis pasivas de tobillo-pie. Aprovecharemos los conocimientos adquiridos con las soluciones vestibles, como el acoplamiento

---

[88] Li, W. 2009. High efficiency wireless power transmission at low frequency using permanent magnet coupling.

[89] Hollnagel, C., et al. 2001. J. Neurosci. Methods 201, 124–130.

multiarticular[90], las prótesis electromecánicas[91] o fluídicas adaptables o la captación de energía mediante diferenciales y embragues. Para el suministro de energía, nos esforzaremos de nuevo por no necesitar un suministro de energía externo. Sin embargo, si es necesario, buscaremos una solución totalmente implantada y una transferencia de energía inalámbrica mediante un acoplamiento magneto-dinámico. Avanzaremos también más allá del estado del arte en el sistema sensorial y de control. Cambiando las tendencias actuales en las que los sensores se diseñan por separado de los actuadores, aquí integramos sensores y actuadores en la medida de lo posible para reforzar la autonomía de los roles y la compacidad. Esto mejora la modularidad y la autoconciencia de los componentes. Como el objetivo es crear un sistema escalable que pueda ampliarse si el paciente lo necesita, los controladores también deben sincronizarse automáticamente para que los componentes paralelos puedan cooperar y escalar con el tiempo. Este concepto está estrechamente relacionado con el control distribuido con capacidad de autoaprendizaje, superando el estado actual de los controladores aislados sin capacidad de reacción ante condiciones operativas cambiantes o que requieren infraestructuras externas masivas, como servidores centralizados, para la toma de decisiones inteligentes. Por ello, la estrategia de control de la marcha propuesta se basa en los Generadores Centrales de Patrones (CPGs), inspirados en el funcionamiento biológico de los movimientos cíclicos, entre otros la marcha humana. Estos algoritmos se han considerado los más adecuados, ya que cada uno de los actuadores articulares será capaz de imitar el comportamiento de una neurona y podrá relacionarse con otras articulaciones si existen, vinculando su comportamiento al del resto de la misma forma que ocurre en una red neuronal biológica[92].

Una visión tan holística es fruto del equilibrio de conocimientos científicos y prácticos/técnicos entre los que mi carrera profesional ha ido evolucionando, desde la ciencia básica (estudiando los fundamentos de la dinámica de los robots y la estabilidad de los robots

---

[90] Van der Helm, S. G., et al. 2020. Vallery, H. & Smit, G. Energy recovering knee-ankle prosthesis.

[91] Pfeifer, S., et al. 2012. Vallery, H., Riener, R., Keller, U. & Lutz, P. Powered Prosthesis with Serial and/or Parallel Compliance.

[92] Plaza, A., et al. 2021. In 2021 10th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER) (pp. 377-380).

dinámicos con patas) pasando por la ciencia aplicada (biomimética del control de movimiento de robots y actuadores novedosos para la locomoción ágil aplicada a necesidades sociales como la salud y la búsqueda y rescate), y convergiendo en la transferencia de tecnología a la sociedad y el emprendimiento (fundando y liderando Marsi Bionics, una startup para el desarrollo, industrialización y comercialización de exoesqueletos de marcha para rehabilitación y asistencia). En cada una de estas etapas, los resultados han sido el fruto de un trabajo en equipo salpicado de colaboraciones externas.

Toda mi actividad científica como investigadora científica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas me ha llevado a obtener resultados destacados en el campo de los exoesqueletos de marcha, pero fue la enorme demanda de la sociedad (familias, clínicos, asociaciones) para hacer uso de los resultados de la investigación lo que me empujó a tender un puente desde el laboratorio al mercado. Tras lograr no solo la creación de la empresa Marsi Bionics, sino su supervivencia y crecimiento, la creación de nuevo conocimiento y su transferencia a la vida real se mantienen en constante interacción en una espiral de creación tecnológica al servicio de la sociedad. Creación de robots que complementan las capacidades humanas, y a veces salvan vidas.

En esta espiral hacia la integración de humano y robot con el fin de complementar las capacidades humanas surge la ética de hasta dónde debemos llegar.

En la evolución actual de la tecnología los límites entre la robótica, los materiales inteligentes, la inteligencia artificial, la biología y la medicina se están volviendo difusos. Cabe esperar que con una evolución tecnológica semejante, la incursión de los robots en nuestro mundo genere un impacto tal que, de alguna forma, los robots van a marcar nuestra propia evolución, la del ser humano. Los robots van complementar algunas capacidades humanas, aquellas que por causa de un accidente o una enfermedad hemos perdido: la capacidad de andar, la de recordar, la de ver… Pero, ¿dónde está el límite con la ampliación de las capacidades humanas? ¿Podemos crear super-humanos? Otros robots nos ayudarán a controlar enfermedades, como los nano-robots para controlar y eliminar las células cancerosas. Robots de compañía que nos salvarán de la soledad en la edad avanzada. Su presencia en nuestras vidas supondrá una influencia de la robótica en el futuro del ser humano y esto genera pre-

ocupaciones de diversa índole, lo que por otro lado constituye una reacción típica a las nuevas tecnologías.

Algunas tecnologías, como la energía nuclear, los coches o los plásticos, han provocado un debate ético y político y un importante esfuerzo político para controlar la trayectoria de estas tecnologías. Esto está sucediendo también en el caso de las nuevas tecnologías que giran en torno a la robótica, además del temor de que "puedan poner fin a la era del control humano en la Tierra".

No todas las corrientes son detractoras de la evolución de la tecnología. El transhumanismo es un movimiento sobre la creencia de que los humanos deben utilizar la tecnología y la ciencia para rediseñarse más allá de los límites de nuestras limitaciones biológicas. El término transhumanismo fue acuñado por primera vez por el biólogo evolutivo Julian Huxley en un ensayo de 1957, pero las ideas que lo sustentan no empezaron a cobrar verdadera fuerza hasta la década de 1970.

Aunque el número de transhumanistas actuales sigue siendo relativamente pequeño (y el movimiento está dividido en varias facciones), muchos investigadores y magnates de la tecnología de primera línea están invirtiendo importantes recursos en el potencial del "aumento" humano. Entre estos defensores se encuentran multimillonarios como Peter Thiel, el director general de Tesla, Elon Musk, y el futurista Ray Kurzweil (famoso por sacar a la luz la idea de "la Singularidad"). Y el transhumanismo se ha convertido incluso en una fuerza política, con el defensor del transhumanismo Zoltan Istvan que fue candidato a la presidencia de Estados Unidos en 2016.

El avance científico más importante del siglo XXI hasta ahora es la edición genética, no la robótica ni la IA. Gracias a la tecnología CRISPR Cas-9 y a las nuevas formas de modificar el ADN, se están descubriendo nuevos métodos para curar el cáncer o enfermedades de origen genético actualmente sin cura. Pero estos avances también alientan a los transhumanistas para imaginarse en el famoso bar de Tatooine en StarWars lleno de criaturas alienígenas.

Mejorar nuestra calidad de vida, curar enfermedades, ayudarnos a envejecer de forma activa es sin duda el objetivo del avance de la ciencia y la tecnología. Sin embargo, son muchos los que creen fundamentalmente que el cuerpo y la mente humanos no deben ser manipulados, lo que pondría en entredicho todos los avances de la medicina occidental. Si damos por bueno el progreso de la ciencia y la tecnología con un fin terapéutico, o para el bienestar, estamos en-

tonces de acuerdo también con el avance de la robótica en esta dirección. Pero la tecnología puede utilizarse para otros fines: armas automáticas, super-soldados, super-personas ¿es posible el aumento de las capacidades más allá de lo humano? ¿se hace necesario legislar el uso de la tecnología?

El debate está servido.

Para tratar de proponer un orden donde aún hay poco, surge dentro de la ética aplicada, el campo de la ética de la robótica. Es un campo muy joven con una dinámica importante[93]. Algunos de los avances en esta materia relacionados principalmente con la interacción de los robots con los humanos se encuentran en los robots asistenciales, terapéuticos o para el cuidado de personas, donde ha suscitado una serie de preocupaciones por un futuro distópico de atención deshumanizada[94]. El envejecimiento activo asistido por robots plantea supuestos problemáticos, como que con la prolongación de la vida las personas necesitarán más cuidados y que no será posible atraer a más seres humanos a las profesiones asistenciales.

Estos planteamientos ignoran la naturaleza de la automatización, que no consiste simplemente en sustituir a los humanos, sino en permitirles trabajar de forma más eficiente. No está muy claro que haya realmente un problema aquí, ya que el debate se centra sobre todo en el miedo a que los robots deshumanicen los cuidados, pero los robots actuales y previsibles en los cuidados son robots de asistencia para la automatización clásica de tareas técnicas, complementando y asistiendo al cuidador. El robot es una herramienta para el cuidador, que sigue siendo la parte humana del cuidado. Quizá sentirse atendido por una máquina, en cierta medida, sea un progreso para los pacientes.

El robot es una herramienta altamente cualificada. El uso que hagamos de ella es una decisión totalmente humana.

Termino mi discurso con un guiño a la ingeniería industrial, con permiso del resto de ingenierías. Vivimos tiempos de digitalización, llevamos tiempo oyendo hablar de la importancia de la digitalización y la sostenibilidad del sector industrial en nuestra economía. Y sin duda es necesaria la transformación de la industria en este sen-

---

[93] European Group on Ethics in Science and New Technologies 2018.

[94] Müller, Vincent C.(2021), "Ethics of Artificial Intelligence and Robotics", The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2021 Edition), Edward N. Zalta (ed.).

tido, optimizando procesos, cambiando esa visión que la sociedad tiene de la industria, como algo contaminante y vetusto. La digitalización es parte de la revolución industrial que estamos viviendo y que abre los ojos a las industrias hacia procesos limpios, sostenibles y óptimos. Pero por favor, no confundamos la digitalización de la industria con la sustitución de la industria por lo digital.

Es importante que la industria sea reconocida como el principal pilar de la innovación. Hace unas semanas tuve el gusto y la sorpresa de leer un artículo[95] de Pedro Mier, presidente de Ametic en el Diario CincoDías en el que, como principal representante del sector tecnológico digital en España, hacía un claro llamamiento a la defensa de la industria como la fuente más importante de creación de riqueza, empleo de calidad e innovación. En su artículo además citaba el testimonio de Nicolas Hayek, el hombre que transformó la industria relojera Suiza ante la amenaza de los relojes digitales asiáticos y generó The Swatch Group SA, hoy en día primer fabricante mundial de relojes. "Tenemos que fabricar productos donde vivimos, porque de la fabricación nacen la experiencia y el know-how, que son básicos para la innovación, de la que nacen la competitividad internacional, la capacidad financiera y como consecuencia, la soberanía". También citaba al profesor de ESADE, Esteve Almirall: "La ciencia es por su naturaleza global. La innovación está ligada al territorio".

Cito estos testimonios porque provienen de quien representa a la empresa digital, y reconoce la necesidad de que la transformación digital descanse sobre una industria propia y reforzada. Los vientos de digitalización están cambiado la naturaleza de las nuevas empresas. Las políticas públicas, el capital riesgo, los mercados, están priorizando la creación y el crecimiento de empresas digitales, más atractivas por su escalabilidad y menor riesgo, en detrimento de las empresas industriales. Por favor, no olvidemos que hasta la evolución de la propia tecnología digital depende de una industria física saludable.

Un análisis[96] publicado por la consultora alemana Roland Berger y la Venture Capital alemana Asgard recomienda un cambio en la

---

[95] Pedro Mier Albert, "¿Hace falta una vicepresidencia de reindustrialización e innovación? Recuperar las manufacturas es vital para la independencia económica", Diario CincoDías, 25 de agosto 2022, [online]https://cincodias.elpais.com/cincodias/2022/08/24/opinion/1661357912_015652.html.

[96] Roland Berger and Asgard: "Artificial Intelligence – A strategy for European startups Recommendations for policymakers", Berlin 2018: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_ai_strategy_for_european_startups.pdf.

política europea de promoción de startups tecnológicas de robótica e IA al reconocerse los principales motores de la economía y el progreso tecnológico.

"Para ganar una posición competitiva, los responsables políticos deben promover las empresas tecnológicas de nueva creación como los principales impulsores tecnológicos y económicos. Esto implica cambiar profundamente la forma de participación de la administración pública en el ecosistema de la innovación y adaptar los planes de apoyo específicamente para las empresas de nueva creación. Europa debería fortalecer rápidamente la competitividad de las nuevas empresas y apoyar el surgimiento de un ecosistema de innovación tecnológica."

Y el apoyo se traduce en inversión económica: "Las empresas que desarrollan tecnología necesitan mayores inversiones que sus homólogas digitales … Si Europa se toma en serio la idea de tener sus propios innovadores, no sólo debe facilitar la creación de nuevas empresas sino también permitir que las más prometedoras crezcan, se expandan y sigan siendo Europeas." La inversión en empresas tecnológicas de robótica en Europa es deficitaria.

Y cito de nuevo a Pedro Mier: "La innovación más importante es la innovación disruptiva. La que cambia los paradigmas. Para realizarla hacen falta no solo conocimiento, sino grandes dosis de emprendimiento y de asunción de riesgos, características propias del espíritu empresarial. Es propia de empresarias y empresarios… Y de sociedades y países emprendedores. Para su desarrollo hacen falta también políticas públicas inteligentes y estrategias de país a largo plazo..."

Me gustaría finalizar este discurso con una breve reflexión que no puedo dejar de mencionar en este camino a lo largo de toda mi trayectoria.

Como habrán podido comprobar, en este compendio de citas y referencias bibliográficas, hay un sesgo inevitable: los autores de los libros de los que he aprendido, mis profesores, maestros y referentes y la inmensa mayoría de los compañeros con los que he trabajado a lo largo de mi carrera son hombres. Hombres extraordinarios cuyo conocimiento y apoyo han sido clave en mi formación. Pero la ingeniería y, muy especialmente la robótica, ha sido construida con la ausencia y aportación que podemos hacer las mujeres.

Quiero expresar aquí mi admiración por esas mujeres que, con mucho arrojo, fueron capaces de abrirnos camino en la ciencia y, con especial cariño, mi madre, una verdadera fuente de inspiración. Puedo decir que he podido desarrollarme en plenitud en un ámbito en el que la presencia de mujeres es muy minoritaria porque he tenido la inmensa fortuna de verlo desde la normalidad del hogar.

María Pilar Armada, Doctora en Física en años en los que podría resultar inusual incluso para un hombre, me enseñó con su ejemplo que la ciencia no tenía género. Que una mujer puede tener una importante carrera profesional al tiempo que sostiene una familia. Que en el mundo en el que yo estaba creciendo ese esfuerzo doble se daba por supuesto. Pero que los techos de cristal - a veces blindados- estaban para ser rotos.

Ser precursora, en mi caso, sólo es una forma de seguir los pasos que mi madre me ha enseñado a dar y hoy quiero rendirle, también a ella, este pequeño homenaje.

CONTESTACIÓN

EXCMA. SRA. DÑA. MARÍA VALLET REGÍ

Señora
Ministra de Ciencia e Innovación
Excelentísimo Sr. Presidente
Excelentísimas Señoras y Señores Académicos
Amigos todos:

Para mí es un placer contestar al discurso de ingreso de Elena García Armada en la Real Academia de Ingeniería.

La medalla que recibirá Elena es el número XLIII, antes asignada a nuestro querido compañero y amigo Miguel Ángel Losada, ingeniero de caminos, que ha pasado a supernumerario por lo que su medalla quedo vacante y ahora la ocupara una ingeniera industrial.

Tengo el privilegio, de conocer a Elena, investigadora y emprendedora que ha logrado que la excelencia de nuestra ingeniería transcienda las fronteras de nuestro país, siendo ejemplo de innovación al servicio del progreso social. Y, por ello y por nuestra amistad, esta intervención tiene una doble satisfacción.

En primer lugar, científica, porque su presencia en esta Real Academia nos aportará la visión, solidez y experiencia de una mujer que ha abierto nuevos caminos en nuestra profesión.

Pero también, permítanme decirlo, siento un orgullo personal de que esta institución pueda contagiarse de su calidez, tesón y calidad humana.

Coincidimos por primera vez en 2015 en el Salón de Actos de la sede central del CSIC, junto con otros nueve científicos, vestidas con la camiseta roja de la Selección Española de la Ciencia.

Desde entonces hemos coincidido continuamente, como ponentes en conferencias de divulgación científica en Tenerife, como protagonistas de exposiciones sobre mujeres en la ingeniería en el Ministerio de Ciencia, en coloquios dedicados a fomentar vocaciones científicas en las más jóvenes –como aquél en el Salón de los Pasos

Perdidos del Congreso de los Diputados–, formando parte de tribunales científicos –como el Jurado de los Premios Princesa de Asturias de Investigación Científica y Técnica–.

Hemos compartido paseos por Oviedo, cafés sin un porqué, y nos hemos hecho amigas.

Entre nosotras hay una convergencia natural, quizá por simple química, o quizá por el paralelismo de nuestras profesiones: ambas hemos dedicado nuestra carrera profesional a la investigación científica, y hemos aplicado nuestra ciencia a mejorar la salud de las personas.

Las dos hemos hecho malabares para conciliar nuestra carrera profesional con la crianza y la educación de nuestros hijos.

Así recuerdo en aquel coloquio en el Salón de los Pasos Perdidos, en el que me sentí plenamente identificada cuando Elena confesaba ese complejo de "mala madre" por no haber podido estar en los talleres del colegio cuando sus hijas eran pequeñas, o por llegar corriendo y a veces tarde a la salida del cole a recogerlas.

Ese sentimiento de no hacer ni lo uno ni lo otro del todo bien…

Y también ambas hemos sentido cómo nuestros hijos se sentían orgullosos de nosotras cuando se iban haciendo mayores y entendían el doble sacrificio de sus madres.

Pero más allá de compartir las dificultades de ser mujer, madre e investigadora científica, mantengo con Elena García Armada una especial consideración por una carrera profesional y científica marcada por el sacrificio y el tesón.

Puedo decir, sin temor a equivocarme, que las cotas de éxito profesional que ha alcanzado serían impensables sin esa resiliencia que en Elena parece brotar de forma natural ante cualquier dificultad.

Resulta tremendamente admirable verla batallar contra las circunstancias sin perder ni un ápice del ánimo y ni apartarla ni un milímetro de sus objetivos.

Permítanme glosar brevemente algunos de esos hitos a los que me estoy refiriendo.

Elena García Armada tiene una formación intelectual sólida enriquecida con estancias internacionales de referencia.

Es Doctora Ingeniera Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid y forma parte de las Escalas de Investigadores Científicos del CSIC tras formarse en el ámbito de la investigación científica en centros de prestigio internacional como el Massachusetts Institute

of Technology (MIT) y el Laboratoire d'Automatique de Grenoble (ENSIEG).

Los resultados de su investigación predoctoral se citan en el prestigioso Springer Handbook of Robotics (ed. 2008).

Su audacia le ha llevado a centrar su contribución científica y técnica en el desarrollo de músculos artificiales –técnicamente actuadores de impedancia variable– que son capaces de adaptarse de forma inteligente a la dinámica articular y del entorno para integrarlos en exoesqueletos de asistencia a la marcha humana.

Se trata de una tecnología única que representa una importante aportación al campo de la robótica aplicada a la marcha de la que, en este momento, sólo se están explorando los primeros caminos de una tecnología llamada a ser una revolución.

El trabajo de Elena ha abierto una nueva forma de transitar hacia ese futuro donde la robótica aplicada a la marcha es más eficaz y es más humana en su más amplio concepto.

Una innovación española, que nace de la investigación pública, y de la que nuestro país debe sentirse muy orgulloso pues estamos hablando de que su aplicación práctica en el paciente pediátrico es única en el mundo.

Nunca antes, en ningún lugar del mundo, había logrado desarrollarse un exoesqueleto que pudiera dar respuesta a los miles, millones, de familias con hijos que no pueden o han perdido la capacidad de caminar.

Esta innovación es de tal calado que este año la Oficina de Patentes Europea le ha otorgado el prestigioso European Inventor Award.

Un reconocimiento que nace, además, del apoyo popular frente a grandísimas investigaciones e innovaciones de todo el mundo.

Esto es buena muestra de la importancia que todos otorgamos al trabajo que realiza Elena García Armada.

Este es el último de los premios que Elena ha recibido, pero no el único.

Su tecnología es reconocida desde ámbitos diversos, pero siempre destacando por su excelencia científico-técnica y social de su trabajo investigador y emprendedor.

Es una de las 30 mujeres más influyentes del mundo en el ámbito de la robótica reconocido por la plataforma internacional Robohub.

Reconocida con la Medalla de Oro de la Cruz Roja y el Premio Discapnet en la Fundación Once.

En el ámbito empresarial, ha sido distinguida por la Federación Española de Empresas de Tecnología Sanitaria y Confederación Española de la Pequeña y Mediana Empresa.

Como investigadora, ha recibido importantes premios como el Fermina Orduña a la Innovación Tecnológica de la Comunidad de Madrid y el Premio Durán Farrel de Investigación Tecnológica de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Pero también ha recibido relevantes reconocimientos institucionales como la Medalla de Oro de la Ciudad de Madrid; el Premio Beato de Liébana de la Cohesión Internacional del Gobierno de Cantabria o la Placa de Plata de la Sanidad Madrileña.

Una lista de premios de los que expongo una muestra, no sólo porque representan el prestigio de nuestra nueva académica, sino que ejemplifica muy bien que no sólo estamos ante una ingeniera sobresaliente sino también ante una brillante investigadora y pertinaz emprendedora cuyo trabajo tiene un enorme impacto en la vida de miles de personas.

Voy a terminar, precisamente, refiriéndome a algo más importante que el reconocimiento o la excelencia del trabajo de Elena García Armada: su capacidad para transformar las vidas de las personas que más necesitadas están de esperanza. Porque todos los calificativos de esta intervención son, sin duda, meritorios, pero se vuelven extraordinarios cuando todos ellos están empeñados en ayudar a los demás.

Y es ahí, cuando hablamos de los niños cuando conocemos a la verdadera Elena. Resulta imposible no emocionarse al escucharla contar con pura pasión cómo los niños y sus familias viven el momento de ponerse de pie y caminar.

Como también resulta imposible no empatizar con ella cuando sufre con las piedras del camino.

Porque, como decía al principio de mi intervención, Elena contagia su pasión y su energía y tiene el don de hacernos a todos compañeros de fatigas.

Hoy la Academia gana a una de las ingenieras más destacadas del mundo en su campo, pero, sobre todo y casi más importante, gana a una profesional de una gran talla humana que enriquecerá esta institución.

Doctora Elena García Armada, bienvenida a la Real Academia de Ingeniería.

GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN