

Comunicación

Exoesqueletos en la industria: Avances, desafíos y perspectivas futuras

Miralles, Mónica Teresita¹⁻²; **Oleari, Cristina Vivian**³, **Florentin,
Raúl**²⁻⁴, **Danieli, Juliana**⁵

monica_miralles@uca.edu.ar; cristina.oleari@gmail.com;
rfloren@fi.uba.ar; julidanieli@hotmail.com

¹ Universidad de Buenos Aires. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Centro de Investigación en Diseño Industrial de Productos Complejos (UBA-FADU-CIDI). Buenos Aires. Argentina.

² Pontificia Universidad Católica Argentina. Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias. Laboratorio de Biomecánica e Ingeniería para la Salud (UCA-FICA-LaBIS). Buenos Aires. Argentina.

³ Universidad de Buenos Aires. Facultad de Medicina. Cátedra de Biomecánica y Anatomía Funcional (UBA-FM). Buenos Aires. Argentina.

⁴ Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería. Departamento de Electrónica (UBA-FI). Buenos Aires. Argentina.

⁵ Fundación Argentina de Ergonomía (FADE). Buenos Aires. Argentina.

Palabras clave

Exoesqueleto, Ergonomía, Biomecánica Ocupacional, Fatiga.

Resumen

Los exoesqueletos pueden ayudar a los trabajadores a reducir hasta el 70% de la fatiga muscular y a aumentar la productividad en la

industria hasta un 30%, dependiendo del entorno específico de trabajo. Se trata de un desarrollo que requiere investigación, ya que presenta muchos desafíos ergonómicos ligados al diseño centrado en el usuario.

Este trabajo presenta las conclusiones de una revisión exhaustiva a partir de interrogantes acerca del uso de exoesqueletos en la industria tales como: ¿cuáles son los principales beneficios? ¿cuáles sus desafíos?, ¿cómo resolver el alto costo de implementación?, ¿en qué reside la complejidad del entrenamiento de los usuarios?, ¿cuáles son las limitaciones motrices de los trabajadores durante su uso?, ¿cómo lograr una mayor comodidad para minimizar la fatiga durante el uso prolongado?, ¿cómo adecuarlo a tareas específicas?, ¿qué rol juega la personalización?, ¿puede haber rechazo cultural o resistencia por parte de los trabajadores?

Para responder a estos interrogantes se tendrán en cuenta aspectos tales como el ajuste y la personalización al cuerpo de los usuarios, la distribución uniforme de la carga física, la movilidad y la flexibilidad para ser adaptables a una amplia gama de movimientos en entornos de trabajo dinámicos, la comodidad de uso, la minimización de la fatiga, la seguridad, la prevención de lesiones, la concepción de interfaces hombre-máquina intuitivas, la visibilidad y la capacidad de respuesta del exoesqueleto frente a cambios inesperados, entre otras dimensiones relevantes a abordar.

Esta investigación surge a partir del hecho que la Argentina no cuenta con desarrollos nacionales en este campo, pero ha comenzado a transitar las primeras etapas de implementación. Es por ello, por lo que será necesario concebir el desarrollo de protocolos que garanticen que los exoesqueletos sean seguros, efectivos y cómodos a los trabajadores y avanzar sobre la adecuación de estándares y regulaciones internacionales al entorno local.

Introducción

Los exoesqueletos son una realidad y todo nuevo desafío conlleva a nuevas oportunidades. En este caso, los sistemas robóticos de miembros inferiores, de los cuales los exoesqueletos son un subconjunto, se presentan como una incipiente tecnología que recorre un amplio abanico de aplicaciones fuertemente ligadas a la biomecánica humana.

Estos artefactos están pensados para la mejora en la producción industrial (trabajos manuales exigentes en tareas de construcción y manufactura). Son los productos más recientes cuyo interés reside, además, en aportar soluciones tecnológicas a otros problemas, como el crecimiento mundial de la población adulta mayor, para lograr la independencia funcional de los ancianos, mejorar sus condiciones de vida y bajar los altos costos médicos. La rehabilitación es otro objetivo en el campo de la salud, que atraviesa todas las edades y abarca desde la rehabilitación después de una cirugía, a complejos sistemas diseñados para el reentrenamiento neural, luego de un accidente cerebrovascular, o lograr la marcha funcional después de una amputación, entre otros propósitos. El diseño de exoesqueletos en el campo de la recreación se orienta a productos que puedan ayudar a escalar o a caminar largas distancias o, incluso, ser incluidos en actividades deportivas extremas como el alpinismo. Así podemos hablar de exoesqueletos para la industria manufacturera, militar, terapéutica, asistencial o recreacional. Si bien se puede hacer clasificaciones entre los diversos tipos de exoesqueleto por su propósito, o por otros criterios, cualquier división se desdibuja ya que, los productos pueden solaparse. Ello se debe a que cada prototipo exitoso suele generar un linaje que, luego, es reconsiderado total o parcialmente, por otros desarrolladores, para su aplicación en otro campo específico.

A continuación, se abordan diferentes aspectos de esta novedosa tecnología para, luego, entrar al campo de los exoesqueletos de sistemas de uso industrial a los que se consagra el presente trabajo. Se sigue con una clasificación en cuatro grandes fases, donde los exoesqueletos de miembros inferiores para aplicaciones industriales corresponderán a la última etapa.

¿Qué es un exoesqueleto?

Los exoesqueletos son un tipo de sistema robótico portable (en inglés *weareable robotic system*) concebidos para intercambiar energía con el entorno y el cuerpo humano con el objetivo de aumentar el rendimiento, ya sea con propósitos de rehabilitación, protésicos o asistivos. Se trata de extender, complementar, sustituir o potenciar funciones y capacidades humanas, o bien empoderar o reemplazar los segmentos humanos para lograr eficiencia. Una definición de este tipo de tecnología es considerar que se trata de "dispositivos con actuadores que se llevan en el cuerpo y que interactúan mecánicamente con el sistema sensoriomotor de un usuario humano con el fin de aumentar, asistir o sustituir las funciones motoras humanas" (Bai, Virk, & Sugar, 2018)¹.

¹ Traducción de la cita original en inglés, por parte de los autores.

Estamos frente a un nuevo tipo de sistemas robóticos, ya que, el desarrollo de exoesqueletos depende de la inteligencia del usuario humano, y por ello, los tipos de controladores son bastante diferentes a los usados en robots autónomos.

¿Cómo se conforma un exoesqueleto?

Para comprender la definición anterior es necesario conocer los diferentes sistemas que integran un exoesqueleto. Para ello, es fundamental considerar seis sistemas integrados en constante evolución e innovación. A saber:

a) La estructura mecánica; b) el sistema de control, c) el sistema de sensores, d) el sistema de energía, e) los elementos de seguridad y confort, y finalmente, f) el software y los algoritmos de control.

La estructura mecánica, el armazón, es quien va a proporcionar el soporte físico al exoesqueleto. Se trata de una estructura integrada a los actuadores. Éstos son los motores hidráulicos/neumáticos o eléctricos que proporcionan el movimiento articular al exoesqueleto (cadera, rodillas y tobillos en el caso que sean de miembros inferiores). Es decir, depende de los actuadores los grados de libertad concebidos para cada articulación del exoesqueleto, que pueden coincidir o no, con el número y posición de las articulaciones anatómicas homólogas del usuario. Son también los grandes consumidores de potencia durante el movimiento, así como también de la energía necesaria para alimentar la electrónica y al sistema de control. El peso de los actuadores es una variable central ya que del mismo dependerá el costo metabólico del usuario durante su uso.

En cuanto al sistema de control, se trata de los controladores/procesadores centrales, que procesan las señales que reciben de los sensores y controlan los actuadores para mover las articulaciones de manera precisa. A este sistema se suman las interfaces de usuario, es decir, los múltiples mecanismos que permiten al usuario interactuar con el exoesqueleto. Ejemplos son las interfaces cerebrales, botones manuales o aplicaciones móviles. El exoesqueleto HAL (Hayashi T., Kawamoto H., Sankai, Y., 2005) se hizo popular por presentar señales de electromiografía para procesar la intención humana y luego amplificar estas señales para aplicar un torque a la cadera.

El sistema de sensores registra la fuerza y los torques, tanto del usuario como del exoesqueleto. Una gran variedad de sensores (acelerómetros, giróscopos, etc.) permite, además, detectar la posición y la velocidad de las articulaciones, para ajustar la orientación y el movimiento del exoesqueleto en tiempo real.

El sistema de energía comprende la elección de las baterías para suministrar la energía necesaria para el funcionamiento de los actuadores y los sistemas electrónicos del exoesqueleto. Hay diseños que cuentan con fuentes de alimentación portátil híbrida (hidráulico-eléctrica). A ello se suma los sistemas de almacenamiento y gestión de la energía para asegurar una distribución eficiente y segura a todas las partes del exoesqueleto.

El exoesqueleto se sujeta al cuerpo del usuario mediante el diseño de arnés o sistemas equivalentes. Ello permite brindar seguridad y confort al usuario mediante sujeciones acolchadas, diseñadas para una eficiente distribución del peso, y así evitar cualquier limitación al movimiento natural de las articulaciones. Estos diseños suelen contar con mecanismos de desacople rápido para poder ser quitados en caso de emergencia. El análisis de la amplia variedad de materiales para estas prestaciones es otro campo de investigación que busca lograr la flexibilidad, entre otras propiedades específicas requeridas.

Finalmente, el último sistema es el de los algoritmos de control y de software. Se trata de programas informáticos que establecen cómo los actuadores deben moverse en respuesta a las entradas de los sensores y a las órdenes del usuario. La interfaz de control es el software que permite a los usuarios ajustar los parámetros del exoesqueleto según el propósito deseado.

Todos los interrogantes planteados en el resumen de este trabajo, salvo el que refiere a los aspectos culturales, pasan por la eficiente articulación de estos sistemas entre sí, la mejora de cada uno de ellos y la disminución del costo de los mismos.

Cualquiera sea el objetivo final, todos los sistemas robóticos de miembros inferiores requieren para su concepción y desarrollo, grupos de trabajo interdisciplinarios que incluyen: usuarios, médicos, fisioterapeutas, ingenieros (electrónicos, mecánicos, informáticos, bioingenieros), ergónomos y, sobre todo, diseñadores industriales especializados en este tipo de tecnología.

El nivel de complejidad que reúnen estos productos es tal, que tanto en América Latina, como en los países desarrollados del mundo se crean grandes redes para su producción, conformadas, tanto por instituciones públicas como privadas, académicas o empresariales.

La portabilidad es un concepto clave que se relaciona con el peso del dispositivo y éste está, a su vez, ligado directamente a la carga metabólica demandada al usuario. Este rasgo conlleva al problema de los actuadores que deberían ser ligeros, suministrar un alto torque a bajas velocidades, ser suaves y flexibles y, por supuesto, robustos y seguros. También el peso físico de los sistemas de almacenamiento de energía, como el de las baterías, debe ser minimizado, al mismo tiempo que se debe maximizar el tiempo de autonomía.

La necesidad de un diseño centrado en el usuario conlleva a cuestiones ligadas directamente al uso del exoesqueleto y a la mejora de las interfaces humano-robot, que deberían ser intuitivas, fluidas y no intrusivas.

Para ello se requiere nuevos sensores y controladores (de amortiguación negativa, de tipo reflejo, de señales de fase, entre otros) que se ajusten a las cambiantes dinámicas del movimiento humano y que permitan que los actuadores se muevan sincronizadamente con las articulaciones del usuario. Esto puede lograrse, por ejemplo, a partir de las propias señales de electromiografía, como señales de entrada al sistema de control.

Para lograr estos niveles de interacción será necesario, en primer término, una mejor comprensión del complejo y cambiante control neuro-motor de la marcha humana, para luego, abordar el estudio del gesto motor específico con el uso del exoesqueleto. Es decir, se trata de un beneficio recíproco entre la ciencia básica y la aplicada. Este tema será desarrollado en el ítem en el que se discuten los desafíos de esta tecnología.

¿Cuál es el origen de los exoesqueletos de uso industrial?

Los antecedentes para el desarrollo de exoesqueletos siempre estuvieron ligados a la mejora de la eficiencia de la marcha, la carrera o el salto. Los estudios de impacto con el suelo se iniciaron con la llegada de las pistas de atletismo flexibles, luego siguieron los zapatos flexibles como el Springbuck con entresuela elástica de carbono (Herr. H., Gamow R.I., 1997), pero todavía quedaba mucho por mejorar con respecto al gasto metabólico.

Usualmente cuando se habla de sistemas robóticos de miembros inferiores se hace referencia a ortesis motorizadas de pie (para rehabilitación), prótesis motorizadas (caminar, correr, saltar) u otros diferentes tipos de exoesqueletos. Por ejemplo, los exoesqueletos para lesiones de médula espinal (que permiten a los usuarios caminar durante un par de horas al día) y cuentan con motores en la cadera, rodilla y tobillo. Otros son los exoesqueletos de cadera asistivos (para accidentes cerebrovasculares destinados a personas mayores o individuos frágiles), o bien, los exoesqueletos blandos (para mejorar el confort y la usabilidad).

En este trabajo la atención se centra en los llamados exoesqueletos de sistema completos (full exoskeletons) los cuales están diseñados para diversas aplicaciones médicas, pero sobre todo industriales.

Se han excluido las prótesis, las ortesis (como la ortesis activa de tobillo-pie), ciertos tipos de exoesqueletos de cuerpo entero como los de la serie HAL (Hybrid Assistive Limb), el exoesqueleto de Cyberdyne (Kawamoto, H., Lee S., Kanbe, S., & Sankai, Y., 2003) y los de uso estrictamente militar como el XOS 2 (Second-Generation Robotics Suit) (Mono, 2008). Algunos están diseñados para asistir una articulación, otros, en cambio, tienen en cuenta a todo el miembro inferior. Cada uno de ellos corresponde a una tipología que sigue en evolución.

El desarrollo de exoesqueletos robóticos comenzó en la segunda mitad del siglo XX y hoy se pueden analizar fases muy claras, que se solapan entre sí. A saber:

Fase 1: La amplificación de la fuerza humana

La idea de desarrollar exoesqueletos de cuerpo completo se remonta a fines del siglo XIX, pero la que tiene impacto en la actualidad podemos ubicarla a partir de 1965, con el desarrollo de Hardiman (General Electric) (Moshe, 2010), diseñado para aumentar la fuerza del usuario y permitir el levantamiento de objetos pesados.

Fase 2: Área médica y salud

A fines de los años 60 se comienzan a desarrollar los primeros exoesqueletos de miembros inferiores para asistencia en la marcha (Instituto Mihajlo Pupin). Sin embargo, los grandes avances en sistemas robóticos se dieron a principios del siglo XXI, siendo la rehabilitación de la marcha en pacientes con accidentes cerebrovasculares y lesiones de la médula espinal, uno de los propósitos centrales. En 2010, se introdujeron gradualmente en el mercado varios exoesqueletos de asistencia y restauración de la marcha. La mayoría de ellos diseñados para permitir que los usuarios parapléjicos dejen la silla de ruedas y caminen erguidos, con el apoyo del dispositivo Rewalk (Rewalk Robotics) (Talaty, L., Esquenazi, A., Briceño, J., 2023) y el exoesqueleto Indego de Parker Hannifin (Ekosbionic, 2019), con sensores y motores para detectar el movimiento del usuario y proporcionar asistencia en la marcha, son ejemplos icónicos. Pueden controlarse de forma intuitiva, permitiendo al usuario caminar de manera natural. En particular, Indego (puede utilizarse en entornos clínicos para evaluar la función motora y la marcha en pacientes con lesiones neurológicas, sin embargo, hasta la fecha el sistema aún no ha sido aprobado por la FDA, según lo declarado en su ficha técnica hasta la fecha.

Fase 3: Área industrial: Los exoesqueletos de miembros superiores

Para muchas empresas, los exoesqueletos desarrollados en el área médica fueron el antecedente necesario para poder desarrollar exoesqueletos destinados al área industrial, como es el caso de la empresa EksoBionics.

Con sus dos propuestas, desde 2015, la empresa (EksoBionics, 2024) propone el EksoWorks para trabajadores de la construcción, como enlucido de paredes y techos. El EksoEVO está pensado para trabajadores de la industria manufacturera (instalación de paneles solares, servicios públicos y telecomunicaciones, logística, mecánica automotriz, procesamiento de alimentos, instalación de paneles de yeso, construcción naval, operación de equipos de cine, gas natural y petróleo, instalación y reparación de sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado). El EksoVest fue diseñado para ayudar a los trabajadores a levantar y sostener cargas pesadas de manera más segura y con menos fatiga. Varios videos se encuentran en internet disponibles para mostrar el producto en diferentes empresas como Ford, (Motorvard, 2019), (Adecom, 2021), que permiten observar la facilidad de uso. Están hechos principalmente de textiles y se pueden usar como una prenda. Contienen actuadores neumáticos en las articulaciones, son suaves y livianos.

El traje Realive Power Assist de Panasonic (Velsid, 2007) con musculatura de goma permite estimular los nervios cerebrales afectados. También puede ser utilizado para el área laboral como es el caso del desarrollo de E. Yagi (Yagi, E., Harada, D., Kobashi, M., 2009) para tareas de fabricación y trabajos de agricultura.

Los exoesqueletos de sistema completo pueden alimentar la cadera, la rodilla y el tobillo. Los exoesqueletos de extremidades en paralelo se han desarrollado para aumentar la capacidad de carga de los humanos (Walsh, 2006). Este tipo

de exoesqueleto fue concebido para personas que cargan peso y están destinados a aumentar la capacidad de carga, reducir, la probabilidad de lesiones en las piernas o la espalda, mejorar la economía metabólica locomotora y/o reducir el nivel percibido de dificultad.

El exoesqueleto de extremidad inferior de Berkeley (BLEEX) (Kazerooni, H., Steger, R., 2006) fue uno de los primeros de este tipo. Una de sus características distintivas es ser energéticamente autónomo, ya que porta su propia fuente de energía.

El RB3D Hercule (Borja, 2012) fue desarrollado por el Ministerio de Defensa Francés, pero tuvo una buena difusión en el mundo del trabajo para la elevación y el transporte de cargas, con el modelo Hercule V3 (RB3D, 2010).

En esta fase se ha presentado una serie de productos comerciales o prototipos, que se consideran los más relevantes dentro de la cronología reciente destinada a enfocarse en exoesqueletos para la producción industrial. Otros, más orientados al desarrollo de piernas robóticas u ortesis activas pueden encontrarse en trabajos de revisión (Viteckova S., Kutilek, P., Jirina, M, 2013).

¿Cuáles son los beneficios de utilizar exoesqueletos?

Los futuros desarrollos, podrán concebir exoesqueletos robóticos y ortesis motorizadas que permitan redistribuir óptimamente la carga de trabajo del cuerpo sobre un mayor volumen muscular, maximizando la eficiencia con la que el cuerpo puede realizar trabajo mecánico y aumentar significativamente la resistencia humana.

¿Cuáles son los desafíos?

Los exoesqueletos están en pleno desarrollo, sin embargo, se enfrentan a la resolución de amplias problemáticas. A continuación, se presentan algunas de las más relevantes:

a) La relación entre el costo metabólico y la mecánica motora

Un objetivo de diseño compartido para la mayoría de los exoesqueletos robóticos de extremidades inferiores es reducir el costo metabólico muscular (costo energético) de los movimientos de todo el cuerpo (relación de fuerza isométrica y trabajo -positivo negativo-). Para ello, hay que entender primero el costo de la locomoción humana (ciclo de estiramiento-acortamiento) dependiente de variables físicas (como la frecuencia y la forma del ciclo), pero también de variables biológicas asociadas a la naturaleza de las fibras musculares y a las formas de almacenamiento y recuperación de energía que, en la marcha, pueden dar una eficiencia de todo el cuerpo entre un 10% y el 80%, dependiendo de la tarea (Ferris D. P., 2009).

Este diseño supone que el trabajo articular se relaciona directamente con el trabajo muscular, de modo que un exoesqueleto puede reducir la potencia metabólica neta hasta en un 25%, tomando el promedio de los porcentajes anteriores. Pero esta asociación es discutible. Se sabe que el conocimiento de

los torques articulares y los cambios angulares durante la locomoción es insuficiente para determinar la dinámica muscular subyacente, sobre todo cuando se trata de músculos biarticulares -que transfieren potencia a ambas articulaciones- y cuando entra en juego el rol del almacenamiento de energía en los tendones flexibles (ciclo de energía elástica en los tendones), aún no completamente esclarecido.

En efecto, es erróneo afirmar que la mecánica humana está directamente relacionada con el uso de la energía metabólica. Los fisiólogos suelen dividir el costo energético de caminar y correr en subfases, que se correlacionan con aquellas del ciclo natural del gesto, como el balanceo de las piernas (10–33%), el apoyo del peso corporal, la propulsión hacia adelante (67–90%) y el movimiento del centro de masa.

Para aumentar la comprensión se realizan pruebas con gravedad reducida, fuerzas horizontales, inclinaciones y cargas añadidas para perturbar la mecánica locomotora a nivel de todo el cuerpo y proporcionar información sobre el costo relativo a partir de ponderar diferentes factores. Otro indicador para tener en cuenta es la tasa de flujo sanguíneo, ya que ella indica con precisión la entrega de energía a los tejidos y permite detectar los músculos específicos de las extremidades inferiores que se reclutan preferentemente en tareas como el transporte de carga y el movimiento cuesta arriba. Con este conocimiento se puede enfocar la acción de los exoesqueletos para minimizar de manera más efectiva el gasto de energía metabólica, si se enfocan en músculos específicos asociados con la tarea locomotora deseada.

De la comprensión de estos aspectos fisiológicos y gracias a comparaciones con y sin el exoesqueleto, van surgiendo soluciones como son hoy las aportadas por los exotendones elásticos pasivos (conexiones poliarticulares con brazos de momento y propiedades de rigidez óptimas), las abrazaderas elásticas para tobillos/rodillas, las órtesis y prótesis con conexiones multiarticulares para transferir energía y los actuadores en serie con resortes flexibles para almacenar y devolver energía. Todas estas soluciones surgen del conocimiento básico logrados gracias a procedimientos de ingeniería inversa.

a) La dinámica pasiva

La dinámica pasiva (McGeer, 1990) se basa en el principio de que la locomoción estable puede lograrse con un mínimo aporte de energía. Las extremidades no requieren una propulsión constante por parte de actuadores (músculos o motores), ya que el movimiento natural y el control estable pueden mantenerse con una sincronización estratégica y un aporte energético mínimo del actuador. Esto permitiría simplificar el control de la locomoción y mejorar su eficiencia energética.

b) Revisión del modelo de péndulo invertido

Este clásico modelo para la marcha humana ha sufrido muchas redefiniciones, pero sigue siendo útil para el estudio de los exoesqueletos, teniendo como principales variables la frecuencia, la amplitud del balanceo y la distribución de

masa de la extremidad inferior (necesidad de reducir carga en exoesqueletos). Se sabe que el costo energético aumenta al alejarse de la frecuencia natural y que el costo metabólico del balanceo de la pierna podría representar hasta un tercio del costo metabólico total de caminar (Doke, J., Donelan, J.M.; Kuo, A. D., 2005).

Es por ello que, a diferencia del péndulo invertido ideal, para mantener una marcha constante, se requiere que la energía perdida en el impacto contra el piso sea reemplazada por trabajo muscular. El costo metabólico de las transiciones de paso podría representar hasta un 70% del costo metabólico total de caminar (Donelan J.M., Kram, R & Kuo A. D., 2002).

Los diseñadores de exoesqueletos deben saber que cualquier interrupción del mecanismo natural de péndulo durante la marcha, resultará en un aumento de la activación muscular y del costo metabólico.

Los diseñadores de hardware deben evitar el movimiento de las extremidades de manera que cause pasos más anchos o largos de lo que elegiría libremente el usuario.

Los diseñadores también deben limitar la masa distal del exoesqueleto ya que aumenta los costos del balanceo de la pierna debido a la inercia adicional y los costos debidos al impacto del pie en el suelo, ya que, incluso, la forma del pie afecta el costo metabólico al caminar (Adamczyk, P. G. , Collins, S.H. & Kuo, A. D., 2006) y debería ser considerada.

c) Sistemas de control:

Si el sistema nervioso del usuario tuviese la capacidad de controlar la actuación del exoesqueleto, es probable que este último adapte su patrón motor y que minimice el uso de la dinámica pasiva. Integrar señales de electromiografía en los algoritmos de control es, entonces, una de las primeras ideas que está siendo explorada con sus diversas posibilidades dentro y fuera del control biomimético proporcional. La electromiografía permite evaluar los cambios en la sincronización y amplitud de la activación muscular durante el uso de exoesqueletos de extremidades inferiores. Permite detectar las activaciones más significativas frente a una tarea y posibles estrategias compensatorias indicativas de la adaptación metabólica, imposibles de detectar solo con la observación de la cinemática articular (Kawamoto, H., Lee S., Kanbe, S., & Sankai, Y., 2003).

Discusión: Más interrogantes a los interrogantes

A partir de todo lo analizado queda claro que:

a) Uno de los principales desafíos en el desarrollo de exoesqueletos es la necesidad de comprender la fisiología y la biomecánica del cuerpo humano en relación con el consumo de energía metabólica. Este conocimiento es fundamental para programar algoritmos de cooperación eficientes, diseñados para optimizar la recolección de energía motora, un aspecto clave que aún requiere mayor investigación. Todas estas investigaciones inauguran un nuevo

estudio dentro del capítulo de la biomecánica humana, que es el de la locomoción asistida con sistemas robóticos en general, incluyendo diferentes situaciones normales y patológicas. La obtención de datos experimentales será central para avanzar hacia otros gestos motores más complejos, incluso, en otras gravedades para la conquista espacial. Es decir, se requiere, por un lado, la reducción del gasto energético metabólico del usuario mientras usa el dispositivo, y por el otro, la minimización de potencia del sistema accionador del exoesqueleto (Ferris, D. P.; Sawicki J. S., Daley, M. A., 2007).

b) El hecho de que las innovaciones provengan de grupos de ingeniería de grandes empresas o institutos hace que las mismas se centren en temas específicos. Por ejemplo: algoritmos de control, bucles de retroalimentación, ancho de banda de los actuadores y densidad de potencia, entre otros. Ello debería ir acompañado, con en el mismo énfasis, en la comprensión de aspectos fundamentales de la fisiología locomotora humana (como generadores de patrones centrales, modelos internos, propiocepción, mecánica muscular y consumo de oxígeno). Hay que entender que se trata de un beneficio recíproco ya que, comprender el costo energético con exoesqueletos motorizados, servirá para concebir nuevos modelos fisiológicos que, a su vez, contribuirán a la mejora de los desarrollos previos.

c) Los exoesqueletos son desarrollos estratégicos de alto valor económico global y por ello están ligados a fuertes intereses económicos y a la protección de la propiedad intelectual. En consecuencia, la difusión abierta de resultados obtenidos queda en el mayor de los secretismos, dificultando los avances y cooperación científica.

d) Es necesario explorar estrategias biomiméticas en el sentido de utilizar mecanismos elásticos para realizar trabajo negativo y positivo emparejado; transferir energía entre articulaciones (por ejemplo usando enlaces biarticulares); utilizar electromiografía, análisis de dinámica inversa y gasto de energía metabólica; armonizar la dinámica pendular pasiva durante el balanceo y la postura, o bien, reducir los costos de apoyo del pie mediante la activación del despegue en el tobillo, entre otros aspectos..

e) La mejora en términos de componentes del hardware, en particular de las baterías, permitirá la autonomía requerida.

d) Hay un reducido número publicado de comparaciones en tareas, con y sin exoesqueletos, que arrojan una disminución del 13% del costo energético, en comparación con caminatas sin asistencia robótica. Estos hallazgos ponen en evidencia que el sistema nervioso puede alterar selectivamente la activación muscular para producir dinámicas mecánicamente eficientes. Se trata de un nuevo descubrimiento de la fisiología neural aportado por la robótica y del cual debe extraerse provecho.

e) Queda mucho por mejorar en la estética de los dispositivos.

f) La tecnología de actuadores deberá explorar el campo de posibilidades que abren los actuadores musculares artificiales (polímeros electroactivos)

necesarios para el campo de los dispositivos portátiles, permitiendo la integración de la impedancia articular y la controlabilidad de la fuerza motriz, lograr la operación silenciosa y concebir morfologías de dispositivo que sean más antropomórficas. En síntesis, para desarrollar modelos con músculos artificiales se requiere una mayor comprensión de la fisiología del complejo músculo-tendinoso.

g) Será necesario mejorar la durabilidad y la vida útil del actuador a niveles altos de rendimiento, aumentar el tamaño del actuador para satisfacer las necesidades de fuerza y recorrido de los dispositivos exoesqueléticos/ortopédicos, y avanzar en la eficiencia y compacidad de la electrónica de control (Yang Z., Gu, W., Zhang J., Gui., 2017).

h) Aún es necesario profundizar en la investigación sobre la comunicación bidireccional de información entre el sistema nervioso del usuario y el exoesqueleto. En el futuro, los sistemas de control podrían incluir sensores periféricos colocados en la superficie muscular para medir señales electromiográficas o sensores centrales en la corteza motora para evaluar la intención motora. Asimismo, el desarrollo de implantes neurales podría permitir la retroalimentación sensorial hacia los nervios o el cerebro, proporcionando al usuario información cinética y cinemática del dispositivo. Sin embargo, es fundamental considerar los aspectos éticos y las regulaciones legales que rigen este tipo de investigaciones.

i) Las interfaces mecánicas deberán lograr una mayor comodidad y eficiencia.

j) En cuanto al diseño industrial, la incorporación de nuevas técnicas como el escaneo 3D será una forma rápida para poder disponer de un registro digital de la forma externa del cuerpo humano. A ello se puede agregar información anatómica, y datos clínicos en regiones específicas. De este modo, puede hallarse un perfil personalizado para un exoesqueleto, al punto que sea una segunda piel, adaptando su rigidez, punto a punto, a las cualidades de la superficie para evitar roces o úlceras debidas a las tensiones de corte entre la piel y la superficie del dispositivo. Los sensores y la electrónica sensible pueden ser insertados dentro del exoesqueleto para darle protección completa a la acción de agentes externos.

La materialización podrá ser realizada por impresión 3D con la posibilidad de depositar diferentes materiales para dar las propiedades mecánicas requeridas a cada elemento de volumen del exoesqueleto. De este modo, se espera que el siglo XXI sea el siglo de las tecnologías antropomórficas con todo el impacto sociocultural que ello puede acarrear.

¿Qué ocurre en Latinoamérica con el desarrollo de exoesqueletos para la industria?

En Latinoamérica, los principales exoesqueletos de extremidades inferiores están siendo validados o en desarrollo bajo la Red Iberoamericana RE ASISTE (Red Iberoamericana de Rehabilitación y Asistencia de Pacientes con Enfermedades Neurológicas a través de Exoesqueletos Robóticos) (del Ama,

A. J. , Azorín J. M. & Pons J. L., 2019). De Argentina, participan en la red el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) y el Hospital José Néstor Lencinas. Argentina cuenta con antecedentes de desarrollos robóticos en el área de la salud de diferentes universidades nacionales, pero hasta la fecha los autores no encuentran ninguna publicación de prototipos de exoesqueletos de miembros inferiores para la industria. Los desarrollos en Latinoamérica corresponden a la fase 2 de este trabajo, es decir al área salud, debido a que las enfermedades neurológicas son una de las principales causas de discapacidad (11%) de la población iberoamericana.

Se trata de innovaciones basadas en algún producto inspirador previo, y presentan creciente complejidad como el exoesqueleto BioMot (proyecto FP7 de la UE), enfocado en la interacción humano-robot materializada en la integración de los bucles de control sensoriomotor humano, dentro de la estructura de control del robot (Moreno, J.C., Asin, G., Pons, J.L., Cuypers, H., Vanderborght, B., Lefeber, D., Ceseracciu., 2014). Las principales características que conforman el concepto del exoesqueleto BioMot son: a) actuadores elásticos en serie con rigidez variable; b) un modelo neuromuscular computacional para el análisis en tiempo real de la interacción humano-robot durante la marcha asistida y un controlador bioinspirado basado en el enfoque de control de aprendizaje tácito, con el objetivo de adaptarse a la capacidad de caminar del usuario; c) nuevos métodos de monitoreo y evaluación de la atención cognitiva a la tarea motora y, finalmente, d) métodos automatizados para la detección de eventos de la marcha basados en sensores inerciales y algoritmos adaptativos. Es decir, en BioMot, un modelo biomecánico computacional de la interacción humano-robot se integra dentro del bucle sensor-actuador del exoesqueleto. Este controlador se modula adicionalmente basándose en estimaciones de la atención del usuario durante la tarea de caminar.

Un tema abierto será el desarrollo de normativa y de estándares para su uso en el país en empresas manufactureras o de la construcción, donde los trabajadores deben manejar cargas pesadas en tareas repetitivas, con frecuente riesgo de lesiones, o bien, en el campo de la logística donde es necesario reducir la fatiga en tareas de levantamiento y de transporte de carga.

Conclusiones

Este trabajo presentó el recorrido iniciado a partir de una serie de interrogantes sobre los exoesqueletos de miembros inferiores utilizados en la industria. Se profundizó en los desafíos y en las dificultades actuales de este tipo de tecnologías.

Puede concluirse que la explosión de los sistemas robóticos, proclamada en 2004, y junto con ella la predicción de que para 2024 las diferentes clases de exoesqueletos serian una realidad insertada en las sociedades altamente desarrolladas, sigue siendo un objetivo por alcanzar.

Sin duda, los exoesqueletos ya son una realidad tecnológica evolutiva y expansiva, en la que converge la inteligencia natural y la artificial, la

microelectrónica más avanzada, los materiales electroactivos y demás innovaciones en proceso, al ritmo dictado por la célebre “Megamáquina” teorizada por Lewis Mumford (Mumford, 1967), refiriendo a la estructura social en su totalidad, generadora, financiadora y destinataria de esta nueva tipología de “herramientas” sin precedentes, sintetizadoras de múltiples saberes en la frontera de la investigación científico-tecnológica, de la que habrá que analizar oportunamente, su impacto socio-económico-cultural.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado parcialmente mediante el subsidio 20620190100005BA de la programación UBACyT 2020-2024 de la Universidad de Buenos Aires y contó con el apoyo económico de la Pontificia Universidad Católica Argentina en el marco de los proyectos en curso en el Laboratorio de Biomecánica e Ingeniería para la Salud (LaBIS-FICA-UCA).

Bibliografía

- Adamczyk, P. G. (2006). The advantages of a rolling foot in human walking. *J. Exp. Biol.* 209: 3953-3963.
- Bai, S., Virk, G. & Sugar, T. (Eds.). (2018). *Weareable Exoskeleton Systems. Design, Control and Applications*. Control, Robotics and sensors Series 108. London. The Institution of Engineering and Technology (IET).
- Borja, R. (2012). RB3D Hercule: El exoesqueleto francés. Recuperado de <https://elchapuzasinformatico.com/2012/02/rb3d-hercule-el-exoesqueleto-frances/> el 2/12/2023.
- del Ama, A. J. (2019). *Lower Limb Exoskeletons in Latin-America*. M. C. Carrozza et al. (Eds.), Vol 22 serie "Biosystems & Biorobotics" (pp. 206-209). Springer Nature. Disponible en línea desde el 14 de octubre de 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01887-0_40.
- Doke, J. D. (2005). Mechanics and energetics of swinging the human leg. *J. Exp. Biol.* 208, 439-445.
- Donelan J. M., Kram, R., Kuo, A. (2002). Mechanical Work for Step-to-Step Transitions is a Major Determinant of the Metabolic Cost of Human Walking. *J. Exp. Biol.* 205 (23): 3717-3727.
- EksoBionics. (2024). *Around, Oh man! It looks like we've been moving things*. Recuperado el 1 de mayo de 2024, de <https://eksobionics.com/eksoworks/>.
- Ferris, D. P. (2009). The exoskeletons are here. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 2009, 6 (17): 1-3.
- Ferris, D. P., & Sawicki, J. S. (2007). A physiologist's perspective on robotic exoskeletons for human locomotion. *International Journal of Humanoid Robotics*, 4 (3): 507-528. <https://doi.org/10.1142/S0219843607001138>.
- Hayashi, T., Kawamoto, H., & Sankai, Y. (2005). Control method of robot suit HAL working as operator's muscle using biological and dynamical information. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*: 3455-3460. <https://doi.org/10.1109/IROS.2005.1545505>.
- Herr, H., & Grabowski, R. (1997). *Shoe and foot prosthesis with bending beam spring structures* (U.S. Patent No. 5,701,686). U.S. Patent and Trademark Office.
- Kawamoto, H., & Lee, S. (2003). Power assist method for HAL-3 using EMG-based feedback controller. *Proceedings of the International*

- Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (pp. 1648-1653). Washington, DC: IEEE.
- Kazerooni, H., & Steger, J. (2006). The Berkeley lower extremity exoskeleton. *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 126 (1): 14-25.
- McGeer, T. (1990). Passive dynamic walking. *International Journal of Robotics Research*, 9(2), 62-82.
- Mono, G. (2008, April 9). Building the real Iron Man. *Popular Mechanics*. Recuperado el 10/04/2023 de <https://www.popsci.com/scitech/article/2008-04/buildingreal->.
- Moreno, J. A. (2014). Symbiotic wearable robotic exoskeletons: The concept of the BioMot. *Lecture Notes in Computer Science* (including subseries *Lecture Notes in Artificial Intelligence* and *Lecture Notes in Bioinformatics*), 8820: 72-83. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13500-7_6.
- Moshe, R. (2010, April). 1965-1971-G.E. Hardiman I Exoskeleton. *CYBERNETICZOO.COM*. Recuerado en mayo de 2024 <https://cyberneticzoo.com/man-amplifiers/1966-69-g-e-hardiman-i-ralph-mosher-american/>.
- Motorvard. (2019). *Ford Exoskeleton aka EksoVest in Action*. Recuperado el 01/05/2024 de: <https://www.youtube.com/watch?v=TdPqXliAh7g>.
- Mumford, L. (1967). *El mito de la máquina*. Barcelona: Emecé.
- RB3D, P. (2010). *Présentation de l'exosquelette Hercule V3 de RB3D*. Recuperado en marzo 2023 de: <https://www.youtube.com/watch?v=b0meDftFZJs>.
- Talaty, L, E. A. (2023). Differentiating ability in users of the rewalk powered exoskeleton. An analysis of walking kinematics. En *2013 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. Seattle, WA, USA*, .24-26 de junio.
- Velsid. (2007, junio 21). *Realive Power Assist, nuevo traje robótico que contribuye a la rehabilitación de las personas con parálisis*. Recuperado en mayo de 2024 de: <https://www.vitonica.com/enfermedades/realive-power-assist-nuevo-traje-robotico-que-contribuye-a-la-rehabilitacion-de-las-personas-con-paralisis>.
- Viteckova, S., & Krajnik, P. (2013). Wearable lower limb robotics: A review. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 33(2): 96-105.

- Walsh, C. J. (2006). *Biomimetic design of an underactuated leg exoskeleton for load-carrying augmentation* (Master's thesis). Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, MA, USA.
- Yagi., E. H. D. (2009). Upper-Limb Power-Assist Control for Agriculture Load Lifting. *Internatonal Journal of Automation Technology*. 3(6): 716-722.
- Yang, Z. G. (2017). *Force control theory and method of human load carrying exoskeleton suit*. Berlin: Springer.