

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UN EXOESQUELETO DE MIEMBRO SUPERIOR PARA SOPORTE DE CARGAS

Blanco, A., Díez J.A., López, D., Badesa, F.J., García-Aracil, N.
Universidad Miguel Hernández de Elche, ablanco@umh.es

Ignacio Sánchez, M.
Movilfrio S.L.

Resumen

El presente artículo describe el proceso de diseño de un exoesqueleto de miembro superior dentro del marco del proyecto ExIF, el cual tiene como objetivo dar soporte al operador en tareas de instalación y mantenimiento de instalaciones. Además, se pretende estudiar las características técnicas que deberán cumplir los motores que se seleccionen para accionar dicho dispositivo, con el objetivo de que se cumplan con las especificaciones técnicas y requerimientos de las tareas objetivo seleccionadas.

Palabras Clave: Exoesqueleto, miembro superior, diseño, actuadores, TME.

1 INTRODUCCIÓN

Los trastornos músculo esqueléticos (TME) son un conjunto de lesiones inflamatorias o degenerativas de músculos, tendones, ligamentos, etc., de más o menos gravedad, que abarcan desde incomodidad, molestias o dolores, hasta cuadros médicos más graves que obligan a solicitar la baja laboral e incluso a recibir tratamiento médico.

Una parte de estos TME se encuentran registrados como accidentes causados por sobreesfuerzos, por la realización de movimientos repetitivos o por someter al cuerpo a posturas forzadas o mantenidas.

En España [1], en su conjunto, los TME se sitúan entre las primeras tres causas de baja laboral en la última década, y se ha situado en el primer puesto en cuanto a la duración media de los procesos por incapacidad laboral temporal. Esta situación implica un fuerte impacto económico, social y laboral para las personas que padecen este tipo de trastornos.

El proyecto ExIF (Exoesqueleto Robótico Inteligente y Sistemas Avanzados de Interface Hombre Máquina para tareas de mantenimiento en las Industrias del Futuro), surge de la necesidad de eliminar o reducir los trastornos músculo esqueléticos causados por el

movimiento manual de cargas pesadas, las malas posturas y la repetición de movimientos asociados a los trabajos de instalación y mantenimiento de instalaciones industriales.

Este proyecto propone el desarrollo de un exoesqueleto robótico de miembro superior que será soportado por una estructura de tipo exoesqueleto para los miembros inferiores con el fin amplificar la fuerza propia del usuario, permitiendo la fácil y eficiente manipulación de cargas y evitando los movimientos repetitivos y la adopción de posturas fatigantes o dolorosas durante la realización de trabajos de mantenimiento industrial. El proyecto propone también el desarrollo de un sistema avanzado de interface hombre-máquina basado en técnicas de Realidad Aumentada enlazado con un sistema informático de mantenimiento integral. El interface hombre-máquina dispondrá de capacidades cognitivas que le permitan ser proactivo en función del análisis del contexto y del entorno.

En el presente artículo se abordará concretamente el diseño de un primer prototipo de exoesqueleto de miembro superior, así como se pretende dar una idea de la selección de motores necesarios para que dicho exoesqueleto cumpla las funciones especificadas en las bases del proyecto.

2 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL DISPOSITIVO

2.1 MOVIMIENTOS DEL MIEMBRO SUPERIOR DEL SER HUMANO

Antes de abordar el diseño del exoesqueleto, resulta necesario conocer los movimientos propios de la zona del cuerpo a la que se pretende dar soporte, el miembro superior.

El miembro superior del cuerpo humano engloba desde la mano hasta el hombro. Sin contar con los movimientos propios de la mano, que no se incluye dentro del proyecto, el miembro superior cuenta con 7 grados de libertad:

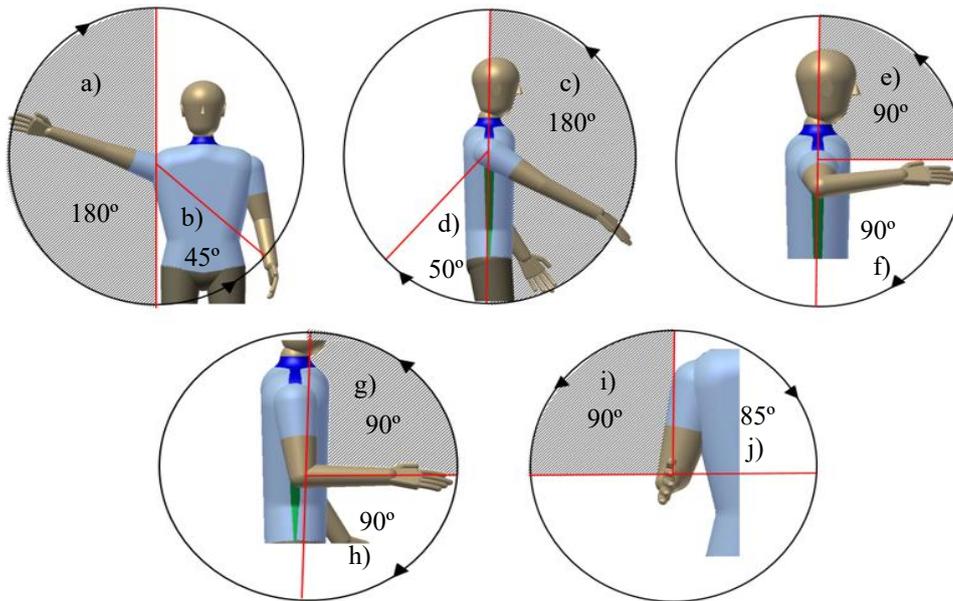


Figura 1: Rangos máximos de movimientos en el miembro superior, donde: a) abducción, b) aducción, c) flexión del hombro, d) extensión del hombro, e) rotación externa, f) rotación interna, g) flexión codo, h) extensión codo, i) supinación y j) pronosupinación

- Abducción/aducción del hombro
- Flexión/extensión del brazo
- Rotación externa/interna del hombro
- Flexión/extensión del codo
- Pronación/supinación de la muñeca
- Flexión/extensión de la muñeca
- Desviación cubital/radial de la muñeca

Para el caso que se describe en el presente artículo no se tendrán en cuenta la flexión/extensión de la muñeca ni la desviación cubital/radial, movimientos que se añadirán al exoesqueleto en prototipos futuros en caso de ser necesario.

Los rangos máximos de cada uno de estos movimientos se han definido en base a la información recopilada en [2], mostrados en la Figura 1. Sobredimensionando el diseño del mecanismo a estos rangos máximos nos posicionaremos del lado de la seguridad, puesto que el operario no llegará en ningún caso a estos límites mecánicos al realizar las tareas propias de su puesto de trabajo.

2.2 DISEÑO CONCEPUAL

En primer lugar, se ha realizado un primer diseño de concepto donde el mecanismo es capaz de seguir las trayectorias realizadas por el operario mediante articulaciones pasivas, como puede observarse en la Figura 2.

Este dispositivo se ha diseñado de forma que pueda adaptarse a distintas dimensiones de brazo, por lo que

un mismo exoesqueleto puede ser empleado por distintos usuarios, sin importar su complejión.

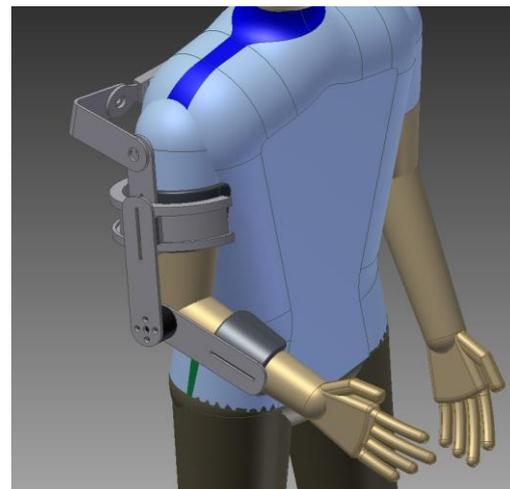


Figura 2: Diseño inicial del exoesqueleto de miembro superior

Las dimensiones antropométricas que se han tomado como referencia para el diseño del mecanismo están recogidas en el artículo de Antonio Carmona Benjumea [3].

Con este objetivo de adaptabilidad, tal y como puede observarse en la Figura 3, se han utilizado ranuras en los eslabones que componen el sistema robótico de manera que sea posible alinear los ejes de rotación de los motores con las articulaciones del brazo del usuario.

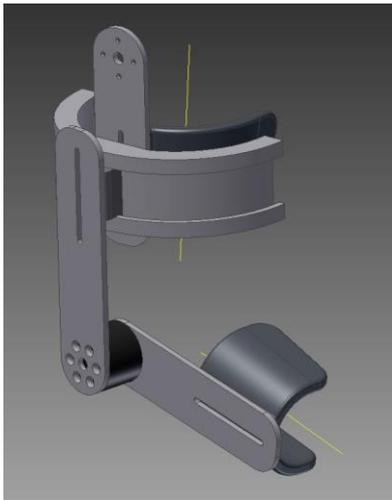


Figura 3: Placas con ranura para aportar adaptabilidad

Por otro lado, se han colocado dos deslizaderas lineales comerciales en la zona de la espalda con el fin de facilitar la colocación del exoesqueleto sobre el operario, y permitir hacer coincidir el eje de giro del hombro del trabajador con el eje de giro del exoesqueleto. Además, como se muestra en la Figura 4, cada una de estas guías está provista de un freno para hacer cómoda la manipulación y el transporte del dispositivo.

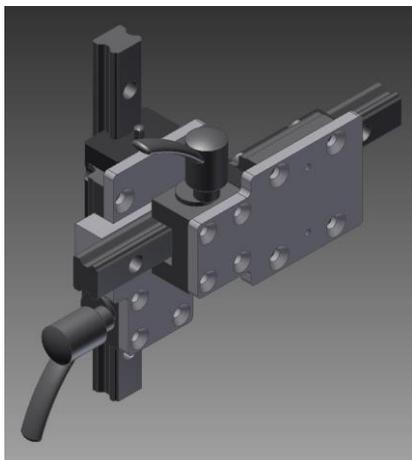


Figura 4: Guías lineales para ajustar la posición del hombro

Como se ha comentado brevemente en la introducción, este exoesqueleto de miembro superior será soportado por una estructura para los miembros inferiores de tipo exoesqueleto, que transmitirá el peso del exoesqueleto superior y las cargas/herramientas portadas por el operario directamente al suelo. Puesto que esa estructura se encuentra en una fase de desarrollo inicial, de forma provisional se ha previsto que las guías lineales vayan ancladas a una placa que irá en la zona de la

espalda como si se tratara de una mochila. En la Figura 5 se puede observar esta solución provisional, así como el anclaje de las guías con las placas que permiten los movimientos del hombro.

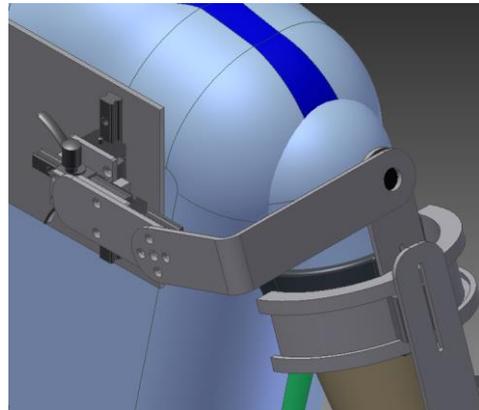


Figura 5: Anclaje de las guías lineales con el exoesqueleto

Con la solución presentada, el sistema cuenta con 4 grados de libertad, 3 correspondientes a los movimientos del hombro comentados en el apartado anterior, y un último correspondiente a la flexión/extensión del codo. Obsérvese que para el movimiento de rotación interna/externa del hombro se ha provisto al mecanismo de una deslizadera circular. La parte fija de dicha guía se encuentra anclada a la zona del brazo, mientras que la parte móvil se fija a la órtesis del antebrazo, permitiendo así realizar el movimiento deseado.

Para aumentar dichos grados de libertad, se le ha acoplado un mecanismo de pronosupinación realizado por el grupo nBio dentro del marco del proyecto europeo AIDE [4]. La versión actual de este mecanismo de pronosupinación se presenta en la Figura 6.

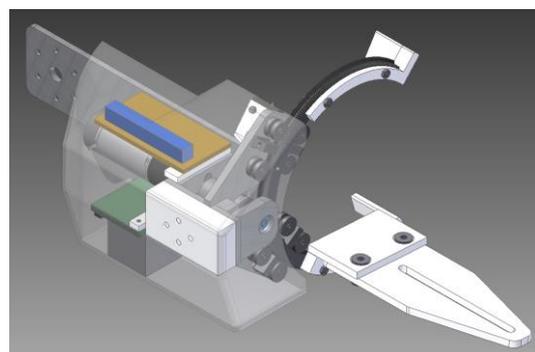


Figura 6: Mecanismo de pronosupinación de la muñeca

Resulta interesante hacer hincapié en el desacoplamiento de las articulaciones, lo que permite

mover cada articulación con independencia de las demás. De esta forma, el control del movimiento del exoesqueleto será más exacto. Además, esta configuración permite bloquear alguna articulación si se desea.

Por todo ello se ha conseguido un exoesqueleto capaz de seguir las trayectorias producidas por los movimientos naturales del brazo que se enumeran en el apartado anterior.

2.3 SELECCIÓN DE MOTORES

Puesto que el exoesqueleto está pensado para ayudar al operario en tareas de instalación y mantenimiento de instalaciones industriales, no será suficiente con que el mecanismo sea capaz de seguir los movimientos del trabajador, sino que deberá soportar parte de la carga con la que se trabaja. Es por ello por lo que será necesario que el dispositivo cuente con unos accionamientos determinados de tipo motor-reductor que cumplan unas características y requerimientos específicos.

Para la selección de dichos actuadores es necesario saber el par de fuerzas al que van a estar sometidas cada una de las articulaciones.

En primer lugar, importaremos el ensamblaje del exoesqueleto incorporado al usuario que se ha modelado en Inventor al programa Anybody, software que permite realizar la simulación de la mecánica del cuerpo. Este programa resulta muy útil para estudiar cómo se comportará el cuerpo humano ante diversas situaciones, lo que nos permite conocer los esfuerzos soportados por las articulaciones al realizar diversas tareas.

Con este fin, se ha llevado a cabo la grabación de una serie de trayectorias del miembro superior de un usuario durante la realización de movimientos típicos de las actividades propias del entorno de trabajo al que está destinado el mecanismo objeto del presente artículo, como puede ser la manipulación de herramientas de montaje o herramientas de corte. De esta manera, se ha intentado simular de la manera más fielmente posible los esfuerzos articulares necesarios para llevar a cabo este tipo de actividad.

La grabación de estas trayectorias se ha realizado mediante el uso de la cámara V120:Trio de Optitrack, que se trata de un sistema de cámaras de tracking de tecnología infrarroja de muy alta precisión. Permite realizar el seguimiento en tres dimensiones, tanto en posición como en orientación, de trackers fijos formados por reflectores infrarrojos esféricos. Para grabar el movimiento realizado por el miembro superior se ha empleado un traje especialmente diseñado para adherir este tipo de trackers

reconocibles por el sistema de cámaras, al cual se le han colocado los trackers de forma estratégica en base a los puntos de reconstrucción cinemática que hay definidos en Anybody, como se muestra en la Figura 7.

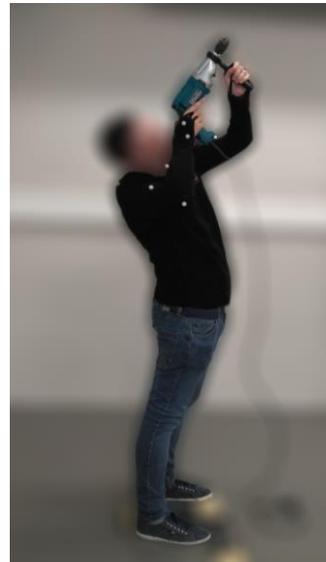


Figura 7: Grabación de trayectorias simulando la tarea a realizar por el operario

En la Figura 8 se muestra una captura de la simulación realizada en Anybody al insertar la trayectoria grabada.

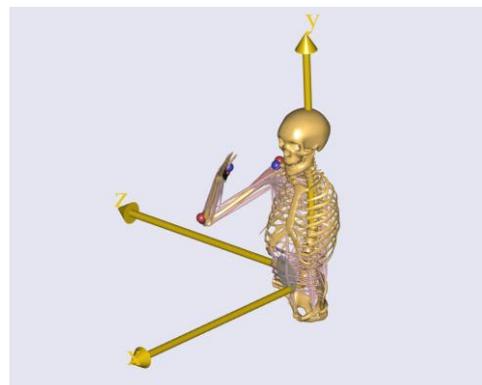


Figura 8: Captura de imagen de la trayectoria grabada

Las trayectorias grabadas nos permiten definir cuál es el movimiento natural que describe el brazo cargando un determinado peso y a una velocidad determinada. De esta manera, podemos utilizar esta información para calcular los esfuerzos que son necesarios en las articulaciones del dispositivo mecánico para llevar a cabo las trayectorias grabadas, pudiendo estimar así cuál es el par que debe realizar cada actuador para compensar la carga que debería soportar el trabajador sin la ayuda del exoesqueleto. En las Figura 9 y 10

podemos ver, respectivamente, los pares y la potencia necesaria en cada articulación para realizar la tarea deseada con éxito. En este caso, como se muestra en la Figura 7, la tarea consiste en levantar un taladro de 3 kg, donde la mano derecha soporta 2 kg y la mano izquierda el kilo restante, actuando ésta como soporte de la primera. La duración de la tarea es de 2 segundos.

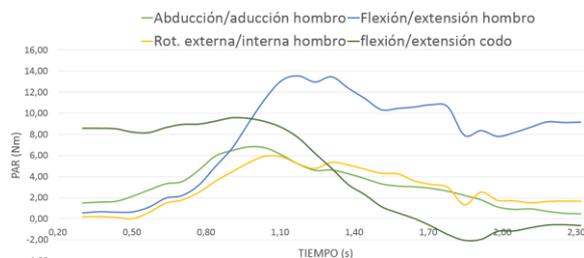


Figura 9: Pares necesarios en cada articulación al realizar la tarea

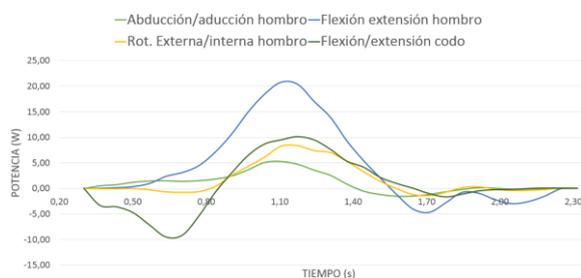


Figura 10: Potencia necesaria en cada articulación para realizar la tarea

Según las gráficas anteriores, podemos determinar el par máximo realizado por cada articulación, así como la potencia máxima necesaria. Estos datos quedan recogidos en las tablas 1 y 2, respectivamente.

Tabla 1: Par máximo esperado para cada sistema de actuación.

Movimiento	Par máximo (Nm)
Abducción/aducción hombro	7
Flexión/extensión hombro	14
Rot. Externa/interna hombro	6
Flexión/extensión codo	10

Tabla 2: Potencia máxima necesaria para cada sistema de actuación.

Movimiento	Potencia máx. (Nm)
Abducción/aducción hombro	6
Flexión/extensión hombro	21
Rot. Externa/interna hombro	9
Flexión/extensión codo	11

Puesto que el mecanismo de pronosupinación escogido ya tiene un motor que cumple con las especificaciones requeridas, no es necesario calcular de nuevo los esfuerzos en la zona de la muñeca.

Estos valores corresponden al esfuerzo del operario al realizar la tarea sin el exoesqueleto. Será necesario, por tanto, recalculados dichos valores cuando el trabajador realiza la tarea con el exoesqueleto, puesto que el peso, tanto de la estructura como de los motores, influyen a la hora de calcular los esfuerzos.

Para estar del lado de la seguridad, se han triplicado los valores anteriores, asumiendo que, en ningún caso, el exoesqueleto excederá un peso semejante. Es necesario calcularlo de forma aproximada puesto que, actualmente, se desconoce el diseño final y los materiales del sistema robótico, por lo que se sobredimensionan estos valores, mostrados en las tablas 3 y 4.

Tabla 3: Par máximo esperado para cada sistema de actuación, incluyendo el peso estimado del exoesqueleto.

Movimiento	Par máximo (Nm)
Abducción/aducción hombro	21
Flexión/extensión hombro	42
Rot. Externa/interna hombro	18
Flexión/extensión codo	30

Tabla 4: Potencia máxima necesaria para cada sistema de actuación, incluyendo el peso estimado del exoesqueleto.

Movimiento	Potencia máx. (Nm)
Abducción/aducción hombro	18
Flexión/extensión hombro	63
Rot. Externa/interna hombro	27
Flexión/extensión codo	33

Con estos valores, el paso siguiente será buscar aquellos actuadores (motor + reductor) que cumplan dichas características, intentando en la medida de lo posible reducir peso y tamaño, para evitar así posibles colisiones y facilitar la manipulación del dispositivo.

3 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El presente artículo introduce y describe el proceso de diseño de un exoesqueleto de miembro superior de 5-GDL que pretende dar soporte al operario durante la realización de trabajos de mantenimiento industrial.

Actualmente, el desarrollo del exoesqueleto se encuentra en una fase inicial, en la que se tiene un primer prototipo pasivo capaz de seguir las trayectorias realizadas por el usuario, así como una primera idea de las características técnicas que deberán cumplir los motores para actuar dicho sistema robótico.

El siguiente paso a seguir será estudiar un nuevo diseño donde el dispositivo lleve incorporados los actuadores escogidos previamente, además de avanzar en el anclaje del mecanismo al cuerpo del operario.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido en parte financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto DPI2015-70415-C2-2-R; y por Conselleria d'Educació, Investigació, Cultura i Esport de la Generalitat Valenciana, a través de la beca ACIF código 2016/216.

Referencias

- [1] Araña-Suárez, M., & Patten, S. B. (2011). Trastornos Musculo-Esqueléticos, Psicopatología y Dolor. *Trastornos Musculo-esqueléticos Psicopatología*, 1.
- [2] Norikin, C. C., & White, D. J. (2016). *Measurement of joint motion: a guide to goniometry*. FA Davis.
- [3] Benjumea, A. C. (2001) Datos antropométricos de la población laboral española, *Prevención, trabajo y salud: Revista del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*, 14, 22-30.
- [4] Díez, J. A., Blanco, A., Catalán, J. M., Badesa, F. J., Sabater, J. M., & Garcia-Aracil, N. (2017) Design of a Prono-Supination Mechanism for Activities of Daily Living, *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation II* (pp. 531-535). Springer International Publishing.