Diseño electromecánico y control de un exoesqueleto para la mano basado en actuadores modulares compactos de centro remoto

# Introducción

## Motivación

## Objetivos

## Resumen

# Estado del arte

Los seres humanos utilizamos las manos en la mayoría de las interacciones con nuestro entorno, pero sus capacidades se pueden ver afectadas por patologías neurológicas (p.ej. secuelas de un infarto), musculo-esqueletales (p.ej. lesiones por traumatismo) o trastornos musculares (p.ej. atrofia muscular). Las personas que han perdido la movilidad en las manos o la capacidad de controlarlas adecuadamente se ven **impedidas o limitadas para realizar gran parte de las actividades de su vida diaria**. Por ello, continúan aumentando los esfuerzos para **proveer rehabilitación y/o asistencia a estas personas utilizando dispositivos robóticos** como exoesqueletos. [1]

**Un exoesqueleto es una estructura que funciona conjuntamente con el cuerpo del usuario para asistir o aumentar sus capacidades** [[Iberdrola](https://www.iberdrola.com/innovation/what-are-exoskeletons#:~:text=Humans%20have%20limited%20physical%20capabilities,or%20augment%20their%20physical%20capabilities.)] , [[exoskeleton report](https://exoskeletonreport.com/what-is-an-exoskeleton/)]. Existe una cantidad considerable de literatura sobre exoesqueletos para la mano y muchos de los diseños se pueden encontrar reunidos enpublicaciones dedicadas específicamente al estado del arte, tendencias y retos sobre los exoesqueletos para la mano [2], [3], [1], [4], [5], [6], [7], [8], [9]. A su vez, en las publicaciones sobre cada exoesqueleto en concreto se suele incluir un breve apartado de estado del arte para aportar contexto. En este capítulo se ha reunido la información encontrada tanto en **publicaciones dedicadas al estudio y revisión del estado del arte** como en **publicaciones sobre diseños específicos**.

En la literatura, esta tecnología se clasifica aludiendo a distintas características, tal y como se puede observar en la Figura 2.1: clasificaciones aludiendo a distintas características de un exoesqueleto para la mano (Noronha & Accoto, 2021)[1]. Entre estos métodos de clasificación, los más comunes son según finalidad CITATION Pet20 \l 3082 [5], según topología CITATION Pil12 \l 3082 [8] y según método de actuación CITATION Tal18 \l 3082 [6], CITATION Qia17 \l 3082 [7]. El resto de las características se han considerado secundarias para el desarrollo de este trabajo de fin de grado (TFG) y, por tanto, no se exponen en detalle.

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Figura .: clasificaciones aludiendo a distintas características de un exoesqueleto para la mano CITATION Nor21 \l 3082 [1]

## Finalidades

Aunque los exosqueletos para la mano puedan parecer un nicho muy específico, existe una variedad de finalidades que dan paso a multitud de diseños dispares. Estas finalidades van desde la potenciación de la mano, para otorgar al usuario capacidades de las que no dispondría de forma natural, como ser capaz de agarrar herramientas en actividades espaciales extra vehiculares durante extensos periodos de tiempo sin fatigarse [], hasta sentir objetos presentes en un entorno virtual [], pasando, desde luego, por la ayuda en las actividades diarias [] y rehabilitación []. Las distintas finalidades para exoesqueletos para la mano que se han identificado en la literatura son las siguientes:

* **Potenciación**: proporcionar capacidades mayores a las que tendría un ser humano de forma natural.
* **Rehabilitación**: asistir en la recuperación de capacidades perdidas.
* **Asistencia**: proporcionar externamente ciertas capacidades para compensar una pérdida total o parcial de estas.
* **Sensoria háptica**: simular la sensación de contacto con un objeto que no está presente, aportando mayor realismo en aplicaciones de realidad virtual.
* **Tele operación**: : tomar datos del movimiento de la mano para utilizarlos como señal de control de un sistema distinto, como por ejemplo en un robot de cirugía.

## Topología

Una de las principales características de un exoesqueleto para la mano es su topología. La topología se refiere al **tipo de estructura adoptada para trabajar adecuadamente junto al cuerpo** y es la cualidad principal que define la geometría, el rango de movimiento y lo más importante, la forma de lidiar con el problema de los ejes coincidentes del exoesqueleto.

El **problema de los ejes coincidentes** consiste en lo siguiente: para que un exoesqueleto controle adecuadamente los grados de libertad sobre los que actúa, este debe provocar rotaciones predecibles en las articulaciones CITATION Pet20 \l 3082 [5]. Sin embargo, cuando **el mecanismo del exoesqueleto no gira respecto a los mismos ejes que las articulaciones** de la mano, aparecen interferencias mecánicas entre el exoesqueleto y la mano, como la que se muestra en la REF \_Ref124236392 \h Figura 2.2, lo que conlleva posibles lesiones y otros efectos no deseados CITATION Hon09 \l 3082 [10].

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Figura .:interferencia mecánica por el problema de los ejes coincidentes CITATION Shu05 \l 3082 [11]

Dada la importancia del problema de los ejes coincidentes y la falta de consenso en la literatura para clasificar las distintas topologías, en este TFG se propone la siguiente clasificación de la topología de los exoesqueletos para la mano basada en el método de resolución del problema de los ejes coincidentes:

* Ejes de rotación del mecanismo del exoesqueleto **directamente coincidentes** con los de la mano. REF \_Ref124236409 \h Figura 2.3 (a)
* Ejes de rotación del mecanismo coincidentes con los de la mano mediante **mecanismos de centro remoto** (MCRs). REF \_Ref124236409 \h Figura 2.3 (b)
* Uso de las propias articulaciones de la **mano como parte del mecanismo** del exoesqueleto. REF \_Ref124236409 \h Figura 2.3(c) y (f)
* Aplicación de fuerza mediante **mecanismos flexibles,** permitiendo tanto a la mano como al mecanismo **adaptarse a la forma necesaria**, ajustando automáticamente los ejes de rotación (*compliant mechanisms*). REF \_Ref124236409 \h Figura 2.3 REF \_Ref124236409 \h Figura 2.3(d) y (e)

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Figura .: ejemplos de mecanismos de exoesqueleto y distintas topologías CITATION Pil12 \l 3082 [8]

### Mecanismos directamente coincidentes

En esta solución se hacen coincidir los ejes de rotación del mecanismo del exoesqueleto con los de la mano colocándolos paralelos a las articulaciones, tal y como se puede apreciar en la REF \_Ref124236621 \h Figura 2.4.

Aunque sencilla, esta solución crea la necesidad de un espacio entre los dedos para colocar estas articulaciones, normalmente bisagras CITATION Bir20 \l 3082 [12], CITATION Dar19 \l 3082 [13], CITATION Jit11 \l 3082 [14]. Limitar este espacio es crucial para la aceptación del exoesqueleto por parte del usuario y varía dependiendo de la incomodidad que pueda causar en cada persona, afectando en mayor medida a aquellas con poco espacio entre los dedos. CITATION Bir20 \l 3082 [12]

### Mecanismos de centro remoto

Dado un cierto mecanismo, si una de sus partes puede rotar alrededor de un punto fijo distante del mecanismo sin una articulación física presente en dicho punto, el mecanismo se puede considerar de centro remoto (MCR o en inglés, RCM de *Remote Center Mechanism*) CITATION SJB01 \l 3082 [15].

En esta solución se hacen coincidir los ejes de rotación del mecanismo con los de la mano sin necesidad de un espacio al lado de las articulaciones. Este tipo de mecanismos se colocan encima de los dedos, lo que implica la necesidad de un espacio en ese lugar. Cabe destacar que el tamaño de un mecanismo de centro remoto es considerablemente superior al de uno de centro coincidente.

Existen distintos tipos de MCRs CITATION Gua08 \l 3082 [16]. Los más utilizados en el ámbito de los exoesqueletos para la mano los siguientes:

* Raíl curvo, mostrado en la REF \_Ref124236418 \h
* Doble paralelogramo (no confundir con paralelogramo articulado), también conocido en la literatura como MCR de 6 barras, MCR de 4 barras (cuando no se tiene en cuenta la bancada ni la pieza a rotar), o simplemente MCR de paralelogramo, msotrado en la REF \_Ref124236642 \h **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**
* Piñón cremallera simétrico, al que se refieren en CITATION Shu05 \l 3082 [11] como “*circuitous joint”, mostrado en la* REF \_Ref124236646 \h **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Un dibujo de una persona

Descripción generada automáticamente con confianza bajaImagen que contiene esquiando, aire, hombre, vistiendo

Descripción generada automáticamente

Figura .: exoesqueleto desarrollado en [38] con ejes coincidentes.

Figura .: MCR de doble paralelogramo [10]

Diagrama

Descripción generada automáticamenteDiagrama

Descripción generada automáticamente

Figura .: Figura 2.5: MCR de raíl curvo [16]

Figura .: MCR de piñón cremallera paralelo [11]

### Articulaciones de la mano como parte del mecanismo

En esta solución se diseña un mecanismo considerando las falanges como barras conectadas por articulaciones rotativas que pertenecen al propio mecanismo en lugar de intentar actuar sobre ellas como agente externo, tal y como se ve en la REF \_Ref124236661 \h Figura 2.8. El resto de componentes del mecanismo se dimensionan de tal forma que las falanges sigan una cierta trayectoria.

Imagen que contiene persona, hombre, sostener, moto

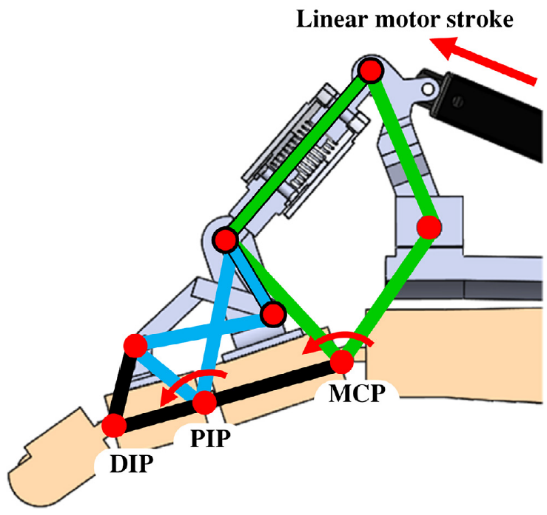
Descripción generada automáticamenteEsta topología es común entre los diseños infra actuados de barras, así como los diseños base-distal como el presentado en la REF \_Ref124236654 \h Figura 2.9.

Figura .: exoesqueleto con topología base-distal [28]

Figura .: mecanismo de barras incluyendo dedos en el diseño [26]

### Mecanismos flexibles

Del inglés *compliant mechanism*. Esta solución se basa en el uso de mecanismos parcial o totalmente flexibles que se deforman para ejercer una fuerza sobre la mano sin restringir totalmente la forma que esta adopta como en la REF \_Ref124237432 \h Figura 2.10 (A), siendo capaces de adaptarse a las geometrías resultantes de distintos patrones de agarre, tal y como se muestra en la REF \_Ref124237432 \h Figura 2.10 (B). Este posicionamiento laxo, en comparación con el riguroso de los mecanismos rígidos evita el problema de los ejes coincidentes y aporta una seguridad inherente a cambio de un control poco preciso. Cabe destacar que, para aprovechar sus ventajas, el mecanismo flexible debe estar conectado solidariamente a la mano.

Zapatos deportivos negros

Descripción generada automáticamente con confianza mediaEste tipo de mecanismo incluye la actuación por cables, tanto tendones artificiales como *bowden* a tracción, así como actuadores de deslizamiento constreñido e inflables.

Figura .: exoesqueleto con topología flexible [49]

## Actuación

Se define el **método de actuación de un exoesqueleto para la mano como la manera física de modificar, potenciar o limitar una cierta capacidad de la mano**. P.ej. mover un dedo para que realice una trayectoria determinada. Limitar el movimiento para simular la sensación de agarrar un objeto que realmente no se encuentra en ese espacio o ejercer fuerza sobre la mano para asegurar un agarre firme.

Las características elegidas para clasificar los métodos de actuación son las siguientes:

* **Generación de fuerza o movimiento**: creación de la fuerza o movimiento con un transductor y desplazamiento hasta el punto de aplicación mediante una transmisión.
* **Aplicación de fuerza o movimiento**: tirando (a tracción) o empujando (a compresión).
* **Grados de libertad** (GdLs): actuación sobre una articulación específica o sobre varias a la vez, simplificando el sistema a cambio de perder capacidades (infra actuación).
* **Interfaz mano-exoesqueleto**: un exoesqueleto puede ser o no solidario a la parte de la mano sobre la que actúa.
* **Estorbo**: del inglés *encumbrance*. Indicación de la molestia resultante de utilizar el dispositivo, ya sea por volumen, peso o interferir en otras actividades del usuario.

Los **métodos de actuación identificados** son:

* Inflables (*bladders*)
* Deslizamiento constreñido (*constrained sliding*)
* Mecanismo infra actuado
* Mecanismo completamente actuado
* Base-distal
* Cable a compresión (*bowden*)
* Cable a tracción

Esta revisión de la literatura **se centra en presenta**r las distintas tecnologías de **exoesqueletos para la mano desde el punto de su método de actuación**. A continuación, se expone en detalle el funcionamiento de cada tipo de actuación, así como ejemplos recientes y/o relevantes de la aplicación de cada una de estas tecnologías.

### Inflables

Se basan en **cámaras colocadas encima de los dedos que al inflarse con aire u otro fluido, modifican su forma** tal que aparece una curvatura como se observa en REF \_Ref124237432 \h Figura 2.10. Esto empuja al dedo, creando un movimiento y asistiendo al agarre.

Esta tecnología es de las más populares en la literatura gracias al poco estorbo sobre los dedos, una inherente seguridad y una capacidad de adaptación la geometría del dedo, a cambio de un control poco preciso y la necesidad de válvulas y un fluido, ya sea aire comprimido o fluido hidráulico. Esta necesidad trae consigo la necesidad de un depósito o un compresor, lo que aumenta el estorbo en gran medida, aunque no necesariamente sobre la mano. Como ejemplos recientes se encuentran CITATION Min19 \l 3082 [17], CITATION Hou17 \l 3082 [18] y CITATION Hon17 \l 3082 [19]

### Deslizamiento constreñido

Considerada como una actuación híbrida entre tecnología blanda y dura, la actuación por deslizamiento constreñido consiste en dos **láminas flexibles que se mantienen paralelas con el uso de guías y se unen solidariamente en uno de los extremos** a través de una tercera pieza. **Al deslizar una se las láminas y mantener la otra fija ambas se curvan** debido a la diferencia de longitud que aparece en una respecto a la otra. Una explicación más visual sobre el funcionamiento del mecanismo se puede encontrar en la REF \_Ref124238868 \h Figura 2.11.

Esta solución presenta un estorbo mínimo en la mano ya que permite colocar los actuadores en otra parte del cuerpo y utilizar una por cables o similar, lo que implica la aparición de estorbo en otra parte del cuerpo, además de los cables entre los actuadores y la mano, como se aprecia en la REF \_Ref124239001 \h Figura 2.12.

Esta tecnología lleva en desarrollo al menos desde 2013 CITATION Jum13 \l 3082 [20], ganando popularidad en los últimos años, con ejemplos recientes como CITATION Tob20 \l 3082 [21], CITATION Leg21 \l 3082 [22], CITATION Chr16 \l 3082 [23] y modificaciones en el diseño como CITATION Min19 \l 3082 [17].

### Mecanismo infra actuado

El mecanismo infra actuado aporta un solo grado de libertad a un conjunto de articulaciones, desde un dedo hasta la mano entera. **Sus componentes se dimensionan de tal forma que la trayectoria se asemeja a la del dedo en ciertos tipos de agarre**. Su estorbo es elevado debido a la transmisión, que debe transmitir distintos movimientos desde un único transductor hasta varias partes de la mano. Estos mecanismos pueden incluir el dedo ( REF \_Ref124236654 \h Figura 2.9) o ser completamente independientes, empujando sobre este ( REF \_Ref124240223 \h Figura 2.13).

Diagrama

Descripción generada automáticamenteImagen que contiene persona, hombre, exterior, sostener

Descripción generada automáticamenteEsta tecnología se suele orientar rehabilitación aprovechando sus trayectorias predefinidas y por su elevado estorbo. Es con diferencia la más abundante en la literatura CITATION Nor21 \l 3082 [1], contando con ejemplos en los últimos años comoCITATION Vic01 \l 3082 [24], CITATION Ana18 \l 3082 [25] y CITATION Ins19 \l 3082 [26].

Figura .: exoesqueleto por deslizamiento constreñido y mochila con actuadores encontrado en [21]

Figura .: diagrama del funcionamiento del mecanismo de deslizamiento constreñido [21]

### Mecanismo completamente actuado

Esta tecnología proporciona **un grado de libertad para cada articulación**. Como resultante, se pueden realizar una amplia variedad de movimientos y se tiene un gran control sobre el dedo. El estorbo general aumenta por un mayor número de transductores, sus respectivas transmisiones, como se puede apreciar en la REF \_Ref124241325 \h Figura 2.14, y su mayor demanda energética, que se traduce en una mayor fuente de alimentación.

En este acercamiento se utilizan tanto MCRs como ejes coincidentes con piezas tiradas por cable bowden o mecanismos redundantes que incluyen al dedo y se suelen aplicar a rehabilitación por a su precisión y nivel de estorbo.

Como ejemplos de esta tecnología se encuentran CITATION Jit11 \l 3082 [14], CITATION Dar19 \l 3082 [13] y CITATION You16 \l 3082 [27]

### Base-distal

En la actuación base-distal, el mecanismo de transmisión suele ir anclado al reverso de la mano o antebrazo y **actúa solamente sobre la punta del dedo**, es decir, la falange distal, de ahí su nombre. Aunque su estorbo es elevado, como se puede apreciar en la REF \_Ref124236661 \h Figura 2.8, es efectivo a la hora de limitar el movimiento de los dedos y simular una sensación se agarre, lo que lo hace popular entre las aplicaciones de sensórica háptica, donde el estorbo no es de tanta importancia. Se encuentran ejemplos de esta tecnología en CITATION Ioa16 \l 3082 [28], CITATION Jam10 \l 3082 [29] y CITATION Jam14 \l 3082 [30].

### Cable a compresión (*bowden*)

El mecanismo bowden consiste en un cable guiado a través de un tubo flexible. Aplicado al caso del exoesqueleto para la mano, la actuación mediante bowden se utiliza para **guiar un cable rígido para empujar** una falange, proporcionando fuerza y confiando en que el dedo se adaptará a la forma necesaria para el agarre.

Las ventajas y limitaciones del bowden son muy similares a las del deslizamiento constreñido, añadiendo que no es necesario transformar el tipo de movimiento generado por los motores si se usa el propio bowden como transmisión desde un principio. Presenta un diseño robusto gracias al reducido número de piezas móviles y resistencia de los cables frente a golpes y zarandeos. El estorbo sobre el dedo varía según el diseño.

Imagen que contiene luz, tabla, computadora, remoto

Descripción generada automáticamenteImagen que contiene interior, gato, tabla, juguete

Descripción generada automáticamenteEsta tecnología se aplica en exoesqueletos como CITATION Luc17 \l 3082 [31], CITATION Gha19 \l 3082 [32] y se observan nuevas técnicas de fabricación como la desarrollada en CITATION Rom26 \l 3082 [33].

Figura .: exoesqueleto con los dedos completamente actuados [27]

Figura .: exoesqueleto infra actuado con mecanismo independiente de los dedos [50]

### Cable a tracción

Esta tecnología utiliza cables para **tirar del extremo de las falanges**, ejerciendo de tendones artificiales como se muestra en la REF \_Ref124244332 \h Figura 2.16. El estorbo en la mano es reducido, pero Interfiere en gran medida con la sensación somática, ya que deben ir anclados a la palma. Como ejemplos recientes de esta tecnología encontramos CITATION Mar17 \l 3082 [34], CITATION Ziw18 \l 3082 [35] y CITATION Gra19 \l 3082 [36]

El cable también puede **tirar de una pieza colocada encima de la falange** para que esta ejerza fuerza sobre la falange. Para utilizar este método de actuación se debe guiar al cable hasta la conexión de la pieza. Dado que la tensión del cable debe pasar por debajo del eje de rotación para que la pieza empuje hacia abajo, se debe guiar el cable por la palma, interfiriendo con la sensación somática, o por el lado, ensanchando el espacio necesario entre los dedos, tal y como se aprecia en la REF \_Ref124236621 \h Figura 2.4.

Zapatos deportivos negros

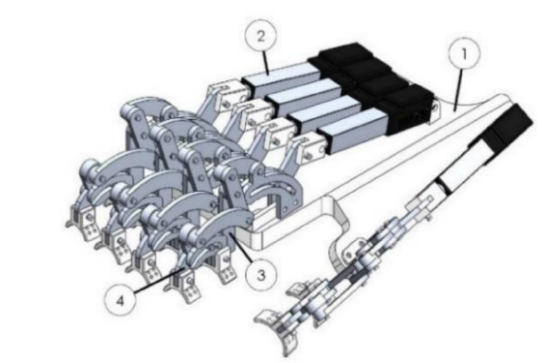
Descripción generada automáticamenteComo ejemplos recientes de esta tecnología encontramos CITATION ACh09 \l 3082 [37] y CITATION Mar14 \l 3082 [38]

Figura .: diseño del exoesqueleto desarrollado en [39]

Figura .: exoesqueleto actuado por tendones artificiales [35]

## Casos en detalle

Tras una evaluación de los distintos sistemas en el REF \_Ref124244686 \r \h \\* MERGEFORMAT 4, se decidió utilizar uno completamente actuado con MCR.

Un arma de fuego

Descripción generada automáticamente con confianza mediaImagen que contiene persona, foto, mano, secadora

Descripción generada automáticamenteA continuación, se presentan los exoesqueletos encontrados en la literatura similares a la solución mecánica implementada en este tfg, independientemente de su finalidad. Un resumen de sus características se puede encontrar en la REF \_Ref124245754 \h Tabla 2.1.

Figura .: HandMATE. Exoesqueleto desarrollado en [40]

Figura .: mecanismo del exoesqueleto desarrollado en [39]

En CITATION Her21 \l 3082 [39] se presenta un exoesqueleto de dedo para rehabilitación después de un trauma neurológico, como un accidente cerebrovascular. Consta de un mecanismo de un grado de libertad que genera el movimiento de flexión y extensión de las falanges proximal, medial y distal ( REF \_Ref124246127 \h Figura 2.17). Se tomaron medidas anatómicas y antropométricas de la mano para definir el diseño del mecanismo. Se obtienen las ecuaciones representativas para el análisis cinemático directo e inverso de los dedos, también se presenta un análisis dinámico. Se desarrolló el análisis estructural y se fabricó un prototipo con ABS mediante fabricación aditiva ( REF \_Ref124246133 \h Figura 2.18).

En CITATION San20 \l 3082 [40] se presenta *HandMATE* ( REF \_Ref124246556 \h Figura 2.19), acrónimo de *Hand Movement Assisting Therapy Exoeskeleton*; para terapia en el hogar después de un accidente cerebrovascular. El cada dedo es actuado por un único actuador lineal que proporciona flexión y asistencia de extensión. Utiliza resistencias sensibles a la fuerza para medir durante el agarre y extensión. Proporciona asistencia basada en control de admitancias y su rango de error en fuerza es <1%; comparable a una mano sana. Se comunica de forma inalámbrica con una tableta Android que cuenta con ejercicios guiados, juegos terapéuticos y retroalimentación del desempeño.

Diagrama, Dibujo de ingeniería

Descripción generada automáticamenteImagen que contiene lego, juguete, tabla, pieza

Descripción generada automáticamente

Figura .: exoesqueleto desarrollado en [12]

Figura .: exoesqueleto desarrollado en [41]

En CITATION Bir20 \l 3082 [12] se presenta un exoesqueleto Infra actuado que confía en la capacidad natural de adaptación del cuerpo para el posicionamiento adecuado de las falanges. Orientado a rehabilitación con un diseño asimétrico de par, posición y trayectoria. Prototipo impreso en 3D ( REF \_Ref124246790 \h Figura 2.20).

Imagen que contiene interior, tabla, par, pequeño

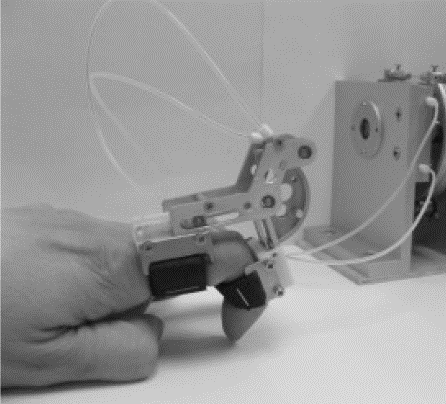
Descripción generada automáticamenteImagen que contiene tabla

Descripción generada automáticamenteEn CITATION Zha19 \l 3082 [41] se presenta un exoesqueleto programado en FPGA cuenta con modos de control activo y pasivo para rehabilitación neuronal (). Cuneta con un control PD para rehabilitación pasiva basada en cinemática inversa y control de impedancias para rehabilitación activa, cambiando de modo con un sensor en la punta del dedo. Se comunica con una app de Android.

Figura .: propuesta de mecanismo para exoesqueleto desarrollada en [42]

Figura 2.22: diseño (arriba) y prototipo (abajo) del exoesqueleto desarrollado en [43]

En CITATION Bat14 \l 3082 [42] se realiza el análisis kineoestático y optimización estocástica de un mecanismo infra actuado basado en dos dobles paralelogramos para el aumento de la fuerza orientado a actividades espaciales extra vehiculares (EVAs).

Imagen que contiene moto, tabla, cuarto, hombre

Descripción generada automáticamenteEn CITATION Enr14 \l 3082 [43] se presenta un exoesqueleto para rehabilitación de la mano ( REF \_Ref124247778 \h Figura 2.25) en personas que hayan sufrido un accidente cerebrovascular, en el cual la movilidad de la mano haya sido afectada, impidiendo la realización de actividades de la vida cotidiana. Consta de un mecanismo infra actuado, con un grado de libertad activo en la articulación metacarpo falángica (MCP) y un grado de libertad pasivo en la articulación interfalángica distal (PIP) y en la articulación MCP para cada uno de los dedos. Se utilizan transductores neumáticos.

Figura .: mecanismo del exoesqueleto desaroolado en [45]

Figura .: exoesqueleto desarrollado en [44]

Imagen que contiene motor

Descripción generada automáticamenteImagen que contiene interior, juguete, tabla, azul

Descripción generada automáticamenteEn CITATION Fon13 \l 3082 [44]se presenta el diseño y caracterización experimental de un exoesqueleto para interacción háptica en el contexto de la realidad virtual y la tele operación ( REF \_Ref124247930 \h Figura 2.24). El dispositivo permite ejercer fuerzas controladas sobre las yemas de los dedos del índice y pulgar del operador. Optimiza la precisión y resolución de la fuerza. Mejora de la transmisión gracias a la integración de la reducción de velocidad en las articulaciones MCR. Utiliza un sensor de fuerza diseñado a medida y electrónica integrada.

Figura .: exoesqueleto desarrollado en [11]

Figura .: exoesqueleto desarrollado en [10]

En CITATION Wan09 \l 3082 [45] se presenta un exoesqueleto completamente actuado, con 4 grados de libertad para actuar el dedo índice ( REF \_Ref124248642 \h Figura 2.23). Consta de un movimiento bidireccional para cada articulación mediante transmisión por cable. Utiliza dos juntas prismáticas y una rotativa para la coincidencia de ejes de rotación del dedo y exoesqueleto.

En CITATION Hon09 \l 3082 [10] se presenta una mano maestra para telepresencia programada en FPGA. Usa el MCR de doble paralelogramo para mantener una transmisión adecuada durante todo el rango de movimiento. Funciona en flexión y extensión. Consta de dos modos de operación: control de posición en modo sin contacto y control de posición en modo con contacto, dependiendo de si se desea un movimiento libre o limitado.

En CITATION Shu05 \l 3082 [11] se presenta una mano maestra para telepresencia ( REF \_Ref124249187 \h Figura 2.27). Utiliza MCR de piñón cremallera simétrico, refiriéndose a éste como “*circuitous joint*”. Cuenta con realimentación de fuerza por detección de contacto y una arquitectura maestro-esclavo experimetnal.

Imagen que contiene interior, tabla, pequeño, cuarto

Descripción generada automáticamenteEn CITATION Shi971 \l 3082 [46] Se presenta un exoesqueleto para actividades extra vehiculares reducido a 3 dedos, meñique y anular actuados en conjunto ( REF \_Ref124249191 \h Figura 2.28). Utiliza sensores de presión en los dedos como input. Caracteriza el MCR de doble paralelogramo.

Figura .: exoesqueleto desarrollado en [46]

Tabla .: comparativa de exoesqueletos con MCR

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Referencia** | **GdLs** | **Interfaz** | **Coincidencia de ejes** | **Transductor** | **Estorbo (FWs\*)** | **Notas** |
| CITATION Her21 \l 3082 [39] | 1/dedo | Solidaria | Raíl curvo | Lineal | 4 | -- |
| CITATION San20 \l 3082 [40] | 1/dedo | Solidaria | Doble paralelogramo | Lineal | 3 | 1/3 del estorbo por la conexión entre actuador lineal y RCM |
| CITATION Bir20 \l 3082 [12] | 1/dedo | Libre | Doble paralelogramo, coincidencia directa | Cable con polea + bowden | 4 | -- |
| CITATION Zha19 \l 3082 [41] | 1/articulación | Solidaria | Piñón cremallera simétrico | bowden | 2 | -- |
| CITATION Díe18 \l 3082 [47] | 1/dedo | Solidaria | Dedo como parte del mecanismo | Servomotor | 4 | -- |
| CITATION Bat14 \l 3082 [42] | 1/ 2 articulaciones (MCP, PIP) | N/A | Doble paralelogramo | N/A | 2,5 | Optimización del mecanismo |
| CITATION Enr14 \l 3082 [43] | 1/ 2 articulaciones (MCP, PIP) | Solidaria | Raíl curvo | Neumático | 2,5 | -- |
| CITATION Wan09 \l 3082 [45] | 1/ articulación () | Solidaria | Dedo como parte del mecanismo | Cabestrante | 3 | -- |
| CITATION Hon09 \l 3082 [10] | 1/dedo | Libre | Doble paralelogramo | Motor DC con transmisión trapezoidal | 2 | -- |
| CITATION Shu05 \l 3082 [11] | 1/dedo | Libre | Piñón cremallera simétrico | Cable + muelle | 2,5 | -- |
| CITATION Shi971 \l 3082 [46] | 1/ 2 articulaciones (MCP, PIP), reducido a 3 dedos | Solidario | Doble paralelogramo | Cable + muelle | 2 | -- |

\*FWs, del inglés *Finger Widths.* Medida propuesta en este TFG para la estimación el estorbo de un exoesqueleto para la mano. Espacio ocupado por el exoesqueleto encima de la mano, medido respecto al ancho aproximado del dedo sobre el que actúa. 1 FW equivale a un exoesqueleto del mismo ancho que un dedo, colocado encima de este. A menos FWs, menor es el estorbo.

# Fundamentos generales

# Desarrollo

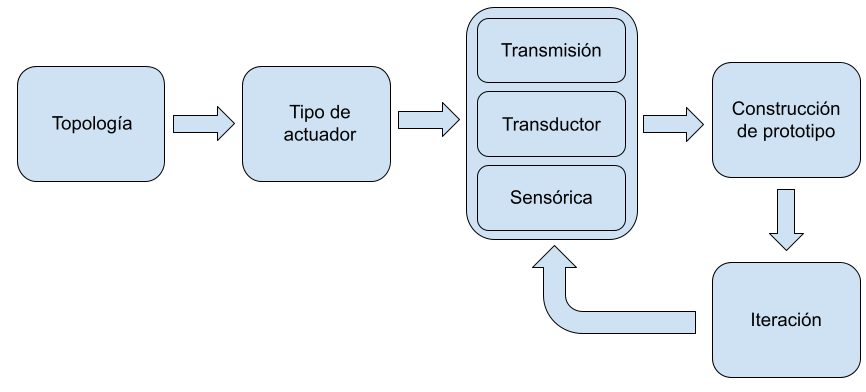
Para diseñar un exoesqueleto que cumpla los objetivos presentados en el apartado de REF \_Ref124788274 \h \\* MERGEFORMAT Objetivos se ha optado por definir primero los aspectos generales del exoesqueleto, lo que se puede entender como el “qué es”, siendo estos su topología y tipo de actuación, y después los aspectos específicos, lo que se entender como el “cómo es”, siendo estos los sensores, actuadores y control a utilizar. Una vez escogidos estos aspectos del diseño, se construye un prototipo, iterando sobre los aspectos específicos, modificando características como la geometría de las piezas, materiales o modelos de componentes electrónicos hasta que se obtiene un resultado satisfactorio. Un diagrama de esta metodología de diseño se muestra en la REF \_Ref124788488 \h \\* MERGEFORMAT Figura 4.1: diagrama de flujo del diseño y desarrollo del prototipo.

Figura .: diagrama de flujo del diseño y desarrollo del prototipo

## Elección de topología

En este apartado se comparan las topologías identificadas en el capítulo REF \_Ref124788553 \h \\* MERGEFORMAT Estado del arte frente a los objetivos definidos en el capítulo REF \_Ref124788274 \h \\* MERGEFORMAT Objetivos del tfg para escoger la solución óptima.

### Ejes directamente coincidentes

Los ejes directamente coincidentes **se descartan** debido a la escasez de espacio en los laterales de los dedos, dificultando la conexión del transductor más allá del alcance de este tfg, lo que implicaría el uso de un mecanismo adicional. Con la necesidad de este mecanismo adicional, se opta por otra topología que ya lo incluya de por sí y no necesite espacio en el lateral de los dedos.

### Mano como parte del mecanismo

La mano como parte del mecanismo **se descarta** por su limitación en la realización de trayectorias, así como limitación de cualquier movimiento de la mano a la hora de moverla sin actuación del exoesqueleto debido a una interfaz inherentemente solidaria. Además de esto, los cálculos requeridos para la dinámica y cinemática, tanto directa como indirecta son extensos, altamente no lineales y computacionalmente pesados.

### Mecanismos flexibles

Los mecanismos flexibles **se descartan** debido, de nuevo, a la limitación de cualquier movimiento de la mano a la hora de moverla sin actuación del exoesqueleto provocada por una interfaz inherentemente solidaria. Además de esto, el modelado de este tipo de mecanismos escapa a los alcances de este tfg y su control es poco preciso.

### Mecanismos de centro remoto

Los mecanismos de centro remoto **presentan la mejor opción** en cuanto a objetivos y alcance de este tfg se refiere.

A diferencia de la mano como parte del mecanismo o los mecanismos flexibles, la interfaz con este tipo de mecanismo no debe ser solidaria a la mano, permitiendo así el uso libre de la mano y, a diferencia de los ejes coincidentes, no necesita espacio al lado de los dedos, sino encima de ellos, lo que permite una conexión más sencilla o incluso directa con el transductor.

## Elección de método de actuación

**Se descartan los métodos de actuación inflables, de deslizamiento constreñido y bowden** por implicar una topología flexible, descartada en el apartado anterior. También se descarta **cable a tracción** por su alta interferencia en la sensación somática y los mecanismos **infra actuados y de base-distal** por su gran estorbo e infra actuación, que impediría la realización de ciertos patrones de agarre.

**Se adopta un mecanismo completamente actuado**, que no limita el tipo de agarre y es aplicable con la topología escogida.

## Emplazamiento de los transductores

Junto a la elección del método de actuación se debe elegir otra característica más: el emplazamiento de los transductores.

En este diseño, se ha optado por **colocar los transductores directamente la estructura del exoesqueleto** para evitar la transmisión desde otras partes del cuerpo, como una mochila, riñonera, cinturón o brazalete que contenga los actuadores. De esta forma se evitan juegos y rozamientos indeseados y se reduce el número de piezas, reduciendo el coste y aumentando la fiabilidad y robustez del diseño.

## Características finales del exoesqueleto

La solución resultante es un exoesqueleto **completamente actuado basado en mecanismos de centro remoto movidos por transductores eléctricos en la propia mano**. Nótese que, en este contexto, el término “completamente actuado” no se refiere a que se actúen todos los grados de libertad de la mano, sino que para cada grado de libertad de la mano sobre el que se decida actuar, se dedique un grado de libertad del exoesqueleto. En otras palabras, no infra actuar las articulaciones de la mano, aunque no se actúen todas y cada una de ellas.

## Elección del MCR

El diseño del actuador comienza eligiendo el mecanismo de centro remoto. Tras una breve comparación de los distintos MCRs encontrados en el capítulo de REF \_Ref124788553 \h Estado del arte basada en la complejidad del mecanismo frente a utilidad en esta aplicación, las opciones se reducen a dos: el raíl curvo y el doble paralelogramo. Se puede ver una comparación rápida de ambos mecanismos en la REF \_Ref124790268 \h Figura 4.3 (E) y (F) y en la REF \_Ref124791604 \h Figura 4.5.

### Raíl curvo

Este tipo de articulación cuenta con dos piezas: el raíl y el bloque deslizante. Considerando el raíl como la bancada, esta opción tiene una sola pieza móvil. Este mecanismo, aunque interesante por su simplicidad y efectividad, **presenta un aumento de estorbo según va girando**, como se puede apreciar en el paso de la REF \_Ref124790268 \h Figura 4.3 (A) a (B), dado que el bloque deslizante emerge del raíl, dando paso a la aparición de material en zonas donde antes no lo había.

Interfaz de usuario gráfica, Aplicación

Descripción generada automáticamentePor último, este mecanismo cuenta con una limitación adicional: **la porción de circunferencia que compone el raíl curvo debe tener suficiente recorrido** como para alcanzar al dedo en todo el rango de movimiento angular. **Esto hace imposible minimizar el mecanismo** para estar lo más pegado al dedo posible, ya que cabe la posibilidad de que la posición del raíl curvo completamente extendido sea insuficiente. Por tanto, se debe diseñar como parte de una circunferencia considerablemente amplia. Este factor hace que el raíl curvo presente un estorbo inherente relativamente elevado.

Figura .: comparación entre raíl curvo y doble paralelogramo. (A) Raíl curvo contraído (B) Raíl curvo extendido (C) Doble paralelogramo contraído (D) Doble paralelogramo extendido (E) Ambos contraídos (F) Ambos extendidos

### Doble paralelogramo

El mecanismo de doble paralelogramo cuenta con 6 barras. Tomando una como bancada, tiene 5 piezas móviles, un número relativamente elevado, sin contar rodamientos o cojinetes y otras partes auxiliares.

La principal ventaja es que, al extenderse, este mecanismo se “aplana”, modificando su geometría a una más compacta que **reduce su estorbo cuanto mayor es su ángulo de rotación**, tal y como se puede apreciar en el paso de la REF \_Ref124790268 \h \\* MERGEFORMAT Figura 4.3 (C) a (D), siendo este comportamiento el contrario que el del raíl curvo.

Otra de sus características es la posibilidad de **acoplar transductor directamente** a una de sus articulaciones para proporcionar el movimiento y par de entrada, evitando así la necesidad de transmisiones adicionales.

Mano de una persona

Descripción generada automáticamente con confianza mediaCabe destacar que cuanto más alejado está este mecanismo de su configuración singular, mayor es el estorbo. A su vez, el estorbo es mínimo cuando se alinean todas las barras y el mecanismo queda completamente “plano” o doblado sobre sí mismo. Esto presenta un ***tradeoff* entre margen de seguridad hasta la configuración singular y el estorbo del mecanismo**. Este margen fue elegido empíricamente para permitir al dedo moverse libremente en todo su rango de movimiento y a su vez maximizando la distancia hasta la configuración singular.

Gráfico, Gráfico de líneas

Descripción generada automáticamenteEl mecanismo se simuló a escala en SAM, obteniendo los resultados mostrados en la REF \_Ref124792248 \h \\* MERGEFORMAT Figura 4.4. Como se puede apreciar, para ejercer una presión constante en una parte de la barra de salida, modelada como una fuerza puntual en el centro de la superficie de aplicación, el motor debe proporcionar un par constante a lo largo de todo el rango de movimiento, exceptuando el momento en el que se llega a la configuración singular. Momento en el que el mecanismo pierde la capacidad de ejercer fuerza. A su vez, también se observa que la relación entre el ángulo de entrada y salida es una recta de 45 grados de inclinación. Estos dos resultados confirman que se trata de una transmisión 1:1.

Figura .: comparación de estorbo entre exoesqueletos con Raíl curvo (arriba) y doble paralelogramo (abajo)

Figura .: resultados de la simulación del mecanismo en el programa SAM. Par (línea roja) y ángulo de salida (línea azul)

### Síntesis del doble paralelogramo

Dado que la caracterización, optimización en función de las dimensiones de este mecanismo escapa a los alcances de este TFG, se utiliza el diseño encontrado en CITATION Shi971 \l 3082 [46].

El proceso para sintetizar el mecanismo de doble se muestra en la REF \_Ref124857424 \h \\* MERGEFORMAT Figura 4.5. Los datos necesarios son la estimación del centro de rotación deseado “O”, así como la distancia “D”, compuesta por el ancho del dedo desde “O” hasta la superficie superior del dedo más un margen para el ancho de las piezas del exoesqueleto. Con estos datos, se crea la línea “S” perpendicular al segmento vertical desde “O” con distancia “D” y de ahí se obtiene la única medida necesaria para este mecanismo: la longitud “L”. Esta longitud se obtiene de la intersección de una recta que parte desde “O” con una inclinación de 45º y la recta “S”. De manera inmediata se obtiene se obtiene la ecuación (4.1).

Una mano muestra un objeto en la mano

Descripción generada automáticamente con confianza baja

Figura .: síntesis del mecanismo de doble paralelogramo

## Elección de transductor

Como transductor se eligió un **motor eléctrico de corriente continua con escobillas**. Esta opción es económica, de reducido estorbo, de modelado sencillo y fácil de alimentar. Además, los modelos suelen contar con una gran variedad de reductoras disponibles, incluyendo de salida perpendicular, lo que en este caso resulta ventajoso, así como modelos con sensores integrados.

Evaluando las distintas opciones de motores se disponía de 2 características a la hora de elegir el modelo específico: reductora y velocidad angular máxima a tensión nominal. Dado que se disponía de una fuente de tensión de 12V o 5v, se encontró una opción que cumple con la velocidad angular necesaria a 12V, otra que cumple tanto a 5V como a 12V y otra que cumple a 5V, eligiendo el modelo intermedio que podía operar tanto a 5V como a 12V por proporcionar una mayor versatilidad.

## Elección de sensores

### Sensor de posición para el MCR

Como sensor de posición se escogió un **potenciómetro rotatorio** *trimmer* o de calibrado utilizado a modo de divisor de tensión. Estos potenciómetros son comúnmente utilizados para ajustar una resistencia variable en un circuito. En este caso, se usan para medir la posición angular del MCR.

### Sensor de posición para las falanges

Para la obtención de la consigna de posición se creó un guante sensorizado a partir de **sensores de flexión resistivos**, acondicionadas mediante un divisor de tensión. El sensor de flexión se coloca en los bolsillos cosidos en el guante de tela para medir el ángulo de giro de las distintas falanges de los dedos, tal y como se muestra en la REF \_Ref124796731 \h Figura 4.9. Este guante de tela permite fijar los sensores a las articulaciones de la mano presentando una interferencia mínima con la sensación somática.

Imagen que contiene par, puesto, tabla, gato

Descripción generada automáticamenteImagen que contiene ropa, mujer, tabla, par

Descripción generada automáticamente

Figura .: guante sensorizado con sensores de flexión

Figura .: colocación de los electrodos del sensor de electromiografía superficial [52]

### Sensor para detección de la intencionalidad

La detección de intencionalidad del agarre se obtiene mediante una medida de **EMG superficial** colocada como se muestra en la REF \_Ref124796349 \h Figura 4.10. Esta medida es un valor analógico relacionado con la señal nerviosa de flexión de los dedos. La señal obtenida se compara con un valor de calibración del usuario, considerando que existe una intención de agarre cuando el valor supera dicho umbral.

### Sensor de intensidad

Se utiliza una **resistencia de drenado (*shunt resistor*)**, leyendo la caída de tensión en la resistencia través del ADC de 10 bits del microcontrolador y obteniendo la intensidad mediante la ley de ohm.

### Desacoplo de etapa de potencia y sensores

Para evitar ruido en los sensores debido a las intensidades elevadas (en comparación) a las que trabaja la etapa de potencia, **los circuitos de retorno a tierra se separaron**, uniéndose en un solo punto para asegurar la conexión eléctrica, manteniendo así una mínima interferencia provocada los armónicos y los consumos de intensidad erráticos de los motores de escobillas escogidos.

## Elección de etapa de potencia

Dado que se desea medir la intensidad del motor para realizar una media indirecta de la fuerza que se está ejerciendo sobre el dedo, la etapa de potencia debe facilitar la medición de la intensidad que atraviesa el motor, independientemente de la dirección, así como soportar la intensidad máxima del motor, en este caso, la intensidad en bloqueo.

Tras sopesar varias opciones se eligió un integrado de doble **puente H** que incluye la posibilidad de utilizar una resistencia de drenado para medir la intensidad que consume unos de los canales.

## Fabricación del actuador

Imagen que contiene tabla, par, remoto, juego

Descripción generada automáticamenteUna vez elegidos los componentes del exoesqueleto, se diseñan las piezas necesarias para el actuador en CAD, se fabrica mediante fabricación aditiva con una impresora 3D en PLA y se itera varias veces para corregir juegos, fricciones, asegurar una robustez adecuada y otras características mecánicas. Tras varias iteraciones tanto de piezas de la bancada como de los segmentos en si del mecanismo ( REF \_Ref124795786 \h \\* MERGEFORMAT Figura 4.11) se obtiene el diseño mostrado en la REF \_Ref124795817 \h \\* MERGEFORMAT Figura 4.12.

Figura .: iteraciones de piezas de bancada (izquierda) y barras del mecanismo MCR (derecha) del actuador fabricado

Figura .: actuador basado en MCR construido para el prototipo del tfg

Imagen que contiene papel, tabla, joven, cuarto

Descripción generada automáticamente

## Base del exoesqueleto

Por último, para la colocación de los actuadores sobre el reverso de la mano, se fabrica una base **a partir de medidas antropométricas** para una adecuada colocación y los movimientos de abducción y aducción.

## Exoesqueleto completo

El exoesqueleto resultante, mostrado en la REF \_Ref124860476 \h Figura 4.13, es un **sistema modular de actuadores que permite elegir sobre qué articulaciones de los dedos se actúa y concatenar varios módulos** para actuar las articulaciones media y distal en los movimientos de flexión y extensión. Los módulos son ligeros y económicos, unidos para crear un **exoesqueleto completamente actuado con un estorbo similar a aquellos encontrados en la literatura**, siendo la única opción más compacta aquellos basados en mecanismos flexibles.

Imagen que contiene interior, pequeño, tabla, perro

Descripción generada automáticamente

Figura .: Actuadores MCR modulares colocados en la base del prototipo sobre el reverso de la mano

# Modelado y control

# Resultados

# Bibliografía

BIBLIOGRAPHY

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | B. Noronha y D. Accoto, «Exoskeletal devices for hand assistance and rehabilitation: A comprehensive analysis of state-of-the-art technologies,» *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics,* pp. 525-538, 2021. |
| [2] | P. Tran, S. Jeong, K. R. Herrin y J. P. Desai, «A Review: Hand Exoskeleton Systems, Clinical Rehabilitation Practices, and Future Prospects,» *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics,* 2021. |
| [3] | T. d. Plessis, K. Djouani y C. Oosthuizen, «A review of active hand exoskeletons for rehabilitation and assistance,» *Robotics,* pp. 10(1), 40, 2021. |
| [4] | A. Favetto, F. C. Chen, E. P. Ambrosio, D. Manfredi y G. C. Calafiore, «Towards a hand exoskeleton for a smart EVA glove,» de *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2010. |
| [5] | P. W. Ferguson, Y. Shen y J. Rosen, «Upper limb exoskeleton systems—overview,» *Wearable Robotics,* pp. 1-22, 2020. |
| [6] | T. Shahid, D. Gouwanda, S. G. Nurzaman y A. A. Gopalai, «Moving toward Soft Robotics: A Decade Review,» *Biomimetics,* pp. 3(3), 17, 2018. |
| [7] | Q. Meng, S. Xiang y H. Yu, «Soft robotic hand exoskeleton systems: review and challenges surrounding the technology,» de *2nd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2017)*, 2017. |
| [8] | P. Heo, G. M. Gu, S.-j. Lee, K. Rhee y J. Kim, «Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering.,» *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing,* pp. 13(5), 807-824, 2012. |
| [9] | M. M. Foumashi, M. Troncossi y V. P. Castelli, «State-of-the-art of hand exoskeleton systems,» *Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni Meccaniche, Nucleari, Aeronautiche e di Metallurgia,* 2011. |
| [10] | H. Fang, Z. Xie y H. Liu, «An exoskeleton master hand for controlling DLR/HIT hand,» de *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009. |
| [11] | S. Nakagawara, H. Kajimoto, N. Kawakami y a. S. Tachi, «An encounter-type multi-fingered master hand using circuitous joints,» de *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005. |
| [12] | F. I. Birouas, R. Catalin, S. Dzitac y I. Dzitac, «Preliminary Results in Testing of a Novel Asymmetric,» *Symmetry,* pp. vol 12, no 9, p 1470, 2020. |
| [13] | D. Marconi, A. Baldoni, Z. McKinney, M. Cempini, S. Crea y N. Vitiello, «A novel hand exoskeleton with series elastic actuation for modulated torque transfer,» *Mechatronics,* pp. 61, 69-82, 2019. |
| [14] | J. Li y Y. Zhang, «iHandRehab: An interactive hand exoskeleton for active and passive rehabilitation,» de *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2011. |
| [15] | S. Blumenkranz y D. Rosa, «Manipulator positioning linkage for robotic surgery,» *U.S. Patent and Trademark Office,* p. 6246200, 2001. |
| [16] | G. Zong, X. Pei, J. Yu y S. Bi, «Classification and type synthesis of 1-DOF remote center of motion mechanisms,» *Mechanism and machine theory,* pp. 43(12), 1585-1595, 2008. |
| [17] | M. Li, B. He, Z. Liang, C.-G. Zhao, J. Chen, Y. Zhuo, G. Xu, J. Xie y K. Althoefer, «An attention-controlled hand exoskeleton for the rehabilitation of finger extension and flexion using a rigid-soft combined mechanism,» *Frontiers in neurorobotics,* pp. 13, 34, 2019. |
| [18] | H. Li y L. Cheng, «Preliminary study on the design and control of a pneumatically-actuated hand rehabilitation device,» de *Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC)* , 2017. |
| [19] | H. K. Yap, J. H. Lim, F. Nasrallah y C.-H. Yeow, «Design and preliminary feasibility study of a soft robotic glove for hand function assistance in stroke survivors,» *Frontiers in neuroscience,* pp. 11, 547, 2017. |
| [20] | J. Arata, K. Ohmoto, R. Gassert, O. Lambercy, H. Fujimot y I. Wada, «A new hand exoskeleton device for rehabilitation using a three-layered sliding spring mechanism,» de *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013. |
| [21] | T. Bützer, O. Lambercy, J. Arata y R. Gassert, «Fully wearable actuated soft exoskeleton for grasping assistance in everyday activities,» *Soft robotics,* pp. 8(2), 128-143, 2020. |
| [22] | L. Lin, F. Zhang y L. Y. Fu, «Design and modeling of a hybrid soft-rigid hand exoskeleton for poststroke rehabilitation,» *International Journal of Mechanical Sciences,* pp. 212, 106831, 2021. |
| [23] | C. J. Nycz, T. Bützer, O. Lambercy, J. Arata, G. S. Fischer y R. Gassert, «Design and characterization of a lightweight and fully portable remote actuation system for use with a hand exoskeleton,» *IEEE Robotics and Automation Letters,* pp. 1(2), 976-983, 2016. |
| [24] | V. Moreno-SanJuan, A. Cisnal, J.-C. Fraile, J. Pérez-Turiel y E. de-la-Fuente, «Design and characterization of a lightweight underactuated RACA hand exoskeleton for neurorehabilitation,» *Robotics and Autonomous Systems,* pp. 143, 103828, 2021. |
| [25] | A. Cisnal, V. Lobo, V. Moreno, J. C. Fraile, R. Alonso y J. P. Turiel, «Robhand, un exoesqueleto de mano para la rehabilitación neuromotora aplicando terapias activas y pasivas,» de *XXXIX Jornadas de Automática*, 2018. |
| [26] | I. Jo, Y. Park, J. Lee y J. Bae, «A portable and spring-guided hand exoskeleton for exercising flexion/extension of the fingers,» *Mechanism and Machine Theory,* pp. 135, 176-191, 2019. |
| [27] | Y. Yun, P. Agarwal, J. Fox, K. E. Madden y A. D. Deshpande, «Accurate torque control of finger joints with UT hand exoskeleton through Bowden cable SEA,» de *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2016. |
| [28] | I. Sarakoglou, A. Brygo, D. Mazzanti y N. Garcia-Hernandez, «Hexotrac: A highly under-actuated hand exoskeleton for finger tracking and force feedback,» de *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016. |
| [29] | J. Iqbal y N. G. Tsagarakis, «A portable rehabilitation device for the hand,» de *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*, 2010. |
| [30] | J. Iqbal, H. Khan, N. G. Tsagarakis y D. G. Caldwell, «A novel exoskeleton robotic system for hand rehabilitation – conceptualization to prototyping,» *Biocybernetics and biomedical engineering,* pp. 34(2), 79-89, 2014. |
| [31] | L. Randazzo, I. Iturrate, S. Perdikis y J. d. R. Millán, «mano: A wearable hand exoskeleton for activities of daily living and neurorehabilitation,» *IEEE Robotics and Automation Letters,* pp. 3(1), 500-507, 2017. |
| [32] | M. Ghassemi y D. G. Kamper, «A Hand Exoskeleton for Stroke Survivors’ Activities of Daily Life,» de *43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society*, 2019. |
| [33] | R. S. Araujo, C. R. Silva, S. P. N. Netto, E. Morya y F. L. Brasil, «Development of a low-cost EEG-controlled hand exoskeleton 3D printed on textiles,» *Frontiers in Neuroscience,* p. 2021, 626. |
| [34] | M. K. Burns, K. V. Orden, V. Patel y R. Vinjamuri, «Towards a wearable hand exoskeleton with embedded synergies,» de *39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2017. |
| [35] | Z. Liu, L. Zhao, P. Yu, T. Yang, N. Li, Y. Yang y L. Liu, «Wearable Bionic Soft Exoskeleton Glove for Stroke Patients,» de *IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems*, 2018. |
| [36] | G. Rudd, L. Dal, V. Jovanovic y F. Cuckov, «A Low-Cost Soft Robotic Hand Exoskeleton for Use in,» *Applied Sciences,* pp. 9(18), 3751, 2019. |
| [37] | A. Chiri, F. Giovacchini, N. Vitiello, E. Cattin, S. Roccella, F. Vecchi y M. Carrozza, «Mechatronic design and characterization of the index finger module of a hand exoskeleton for post-stroke rehabilitation,» *IEEE/ASmE Transactions on mechatronics,* pp. 17(5), 884-894, 2011. |
| [38] | M. Cempini, M. Cortese y Nicola Vitiello, «A powered finger–thumb wearable hand exoskeleton with self-aligning joint axes,» *IEEE/ASME Transactions on mechatronics,* pp. 20(2), 705-716, 2014. |
| [39] | C. Hernández-Santos, Y. A. Davizón, A. R. Said, R. Soto, L. Félix-herrán y A. Vargas-Martínez, «Development of aWearable Finger Exoskeleton for Rehabilitation,» *Applied Sciences,* p. 4145, 2021. |
| [40] | M. Sandison, K. Phan, R. Casas, L. Nguyen, M. Lum, M. Pergami-Perie y P. S. Lum, «HandMATE: Wearable Robotic Hand Exoskeleton and Integrated,» de *42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society*, 2020. |
| [41] | F. Zhang, L. Lin, L. Yang y Y. Fu, «Design of an active and passive control system of hand exoskeleton for rehabilitation,» *Applied Sciences,* pp. vol. 9, no 11, p. 2291, 2019. |
| [42] | A. Battezzato, «Towards an underactuated finger exoskeleton: Anoptimization process of a two-phalange device based on kinetostatic analysis,» *Mechanism and Machine theory,* pp. vol. 78, p. 116-130, 2014. |
| [43] | S. Enriquez, Y. Narváez y O. Vivas, «Sistema robótico de tipo exoesqueleto para rehabilitación de la mano,» de *Jornadas de Automática*, 2014. |
| [44] | M. Fontana, S. Fabio, S. Marcheschi y M. Bergamasco, «Haptic Hand Exoskeleton for,» *Journal of Mechanisms and Robotics,* pp. vol. 5, no 4, p. 041014, 2013. |
| [45] | J. Wang, J. Li, Y. Zhang y S. Wang, «Design of an Exoskeleton for Index Finger Rehabilitation,» de *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2009. |
| [46] | B. L. Shields, J. A. Main, S. W. Peterson y A. M. Strauss, «An Anthropomorphic Hand Exoskeleton to Prevent Astronaut Hand Fatigue During Extravehicular Activities,» *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics-part A: systems and humans,* pp. 27(5) 668-673, 1997. |
| [47] | J. A. Díez, A. Blanco, J. M. Catalán, A. Bertomeu-Motos, F. J. Badesa y N. García-Aracil, «Mechanical design of a novel hand exoskeleton driven by linear actuators,» de *Iberian Robotics Conference*, 2018. |
| [48] | F. Chen Chen, A. M. M. Favetto, E. P. Ambrosio, S. Appendino, A. Battezzato, D. Manfredi, F. Pescarmona y B. Bona, «Human hand: kinematics, statics and dynamics,» de *41st International Conference on Environmental Systems*, Torino, Italy, 2011. |
| [49] | P. Polygerinos, Z. Wang, K. C. Galloway, R. J. Wooda y C. J. Walsh, «Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation,» *Robotics and Autonomous Systems,* pp. 73, 135-143, 2015. |
| [50] | L. Cui, A. Phan y G. Allison, «Design and fabrication of a three dimensional printable non-assembly articulated hand exoskeleton for rehabilitation,» de *37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2015. |
| [51] | Y. Fu, P. Wang y S. Wang, «Development of a multi-DOF exoskeleton based machine for injured fingers,» de *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008. |
| [52] | M. Atzori, A. Gijsberts, S. Elsig y A.-G. M. Hager, «Building the Ninapro database: A resource for the biorobotics community,» de *4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, 2012. |