# Introducción

## Motivación

Este es mi tío Julián Mateo

\*selfie con él\*

Julián tuvo un accidente…

Tiene movilidad, pero no fuerza en el agarre.

Según la onu, le población envejecida blablaba…

## Objetivos

Según [X] se define un agarre sano como uno con las capacidades de…

Diseño electromecánico y control del sistema de actuación de un exoesqueleto para **la asistencia al agarre**, con el objetivo de llevar un agarre patológico a niveles equivalentes de funcionalidad en las tareas diarias de un agarre sano.

Mínimamente intrusivo en la somato sensación (sensibilidad de la mano).

Reducir el volumen y peso (encumbrance) de los actuadores

Reducir el coste

Accesibilidad de materiales y tecnología

Hacer un sistema completamente actuado, no infraactuarlo

Cubrir los mvtos de [tal cual y pascual]

## Resumen de caps

this paper is organized as follows, in ch. 1…

# Estado del arte

La mano es un sistema extremadamente complejo, con un gran número de grados de libertad en un espacio significativamente reducido. (Chen Chen, y otros, 2011)

Las capacidades de la mano 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. (Noronha & Accoto, 2021)

**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 publicaciones que reúnen el estado del arte**, tendencias y retos sobre los exoesqueletos para la mano (Tran, Jeong, Herrin, & Desai, 2021), (Plessis, Djouani, & Oosthuizen, 2021), (Noronha & Accoto, 2021), (Favetto, Chen, Ambrosio, Manfredi, & Calafiore, 2010), (Ferguson, Shen, & Rosen, 2020), (Shahid, Gouwanda, Nurzaman, & Gopalai, 2018), (Meng, Xiang, & Yu, 2017), (Heo, Gu, Lee, Rhee, & Kim, 2012), (Foumashi, Troncossi, & Castelli, 2011), así como breves **estudios incluidos en publicaciones específicas en forma de apartado inicial** para aportar contexto, al igual que se hace en esta memoria de tfg.

En la literatura, esta tecnología se clasifica aludiendo a distintas características, tal y como se puede observar en la Figura 2.1(Noronha & Accoto, 2021). Entre estos métodos de clasificación, los más comunes son según finalidad (Ferguson, Shen, & Rosen, 2020), según topología (Heo, Gu, Lee, Rhee, & Kim, 2012), que define el método por el cual el exoesqueleto resuelve el problema de los ejes coincidentes (expuesto más adelante) y según método de actuación (Shahid, Gouwanda, Nurzaman, & Gopalai, 2018), (Meng, Xiang, & Yu, 2017). El resto de las características por las que se pueden clasificar los exoesqueletos para la mano se han considerado secundarias para el desarrollo de este 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 (Noronha & Accoto, 2021)

## Finalidades

Las **finalidades identificadas** son las siguientes:

* **Potenciación**: proporcionar capacidades mayores.
* **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 sensaciones.
* **Tele operación**: tomar inputs.

## Topología

Se define como topología de un exoesqueleto para la mano como el **tipo de estructura adoptada para trabajar adecuadamente junto al cuerpo**. En este apartado se propone una breve clasificación en cuatro tipos que engloba todos los casos identificados en la literatura.

Para que un exoesqueleto controle adecuadamente los grados de libertad sobre los que actúa **debe provocar rotaciones predecibles en las articulaciones** (Ferguson, Shen, & Rosen, 2020). Cuando el mecanismo del exoesqueleto no gira respecto a los mismos ejes que las articulaciones de la mano, aparece el fenómeno conocido como **problema de los ejes coincidentes**. Este fenómeno se debe resolver para evitar interferencias mecánicas entre el exoesqueleto y la mano como la que se muestra en la Figura 2.2, evitando así posibles lesiones y otros efectos no deseados (Fang, Xie, & Liu, 2009).

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Figura .:interferencia mecánica por el problema de los ejes coincidentes (Nakagawara, Kajimoto, Kawakami, & Tachi, 2005)

En esta revisión de la literatura se han identificado cuatro formas distintas formas de lidiar con el problema de los ejes coincidentes:

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

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Figura .: ejemplos de mecanismos de exoesqueleto y distintas topologías (Heo, Gu, Lee, Rhee, & Kim, 2012)

### Mecanismos directamente coincidentes

Imagen que contiene esquiando, aire, hombre, vistiendo

Descripción generada automáticamenteEn 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 Figura 2.4.

Aunque sencilla, esta solución crea la necesidad de un espacio entre los dedos para colocar estas articulaciones, normalmente bisagras (Birouas, Catalin, Dzitac, & Dzitac, 2020), (Marconi, y otros, 2019), (Li & Zhang, 2011). 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. (Birouas, Catalin, Dzitac, & Dzitac, 2020)

Figura .: exoesqueleto desarrollado en (Cempini, Cortese, & Nicola Vitiello, 2014) con ejes coincidentes.

### 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*) (Blumenkranz & Rosa, 2001).

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 (Zong, Pei, Yu, & Bi, 2008), siendo los más populares para esta aplicación los siguientes:

* Raíl curvo. Figura 2.5
* 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. Figura 2.6
* Piñón cremallera simétrico, al que se refieren en (Nakagawara, Kajimoto, Kawakami, & Tachi, 2005) como “*circuitous joint”.* Figura 2.7

Un dibujo de una persona

Descripción generada automáticamente con confianza baja

Figura .: MCR de raíl curvo (Zong, Pei, Yu, & Bi, 2008)

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Figura .: MCR de doble paralelogramo, adaptado de (Fang, Xie, & Liu, 2009)

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Figura .: MCR de piñón cremallera paralelo (Nakagawara, Kajimoto, Kawakami, & Tachi, 2005)

### 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 Figura 2.9. 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

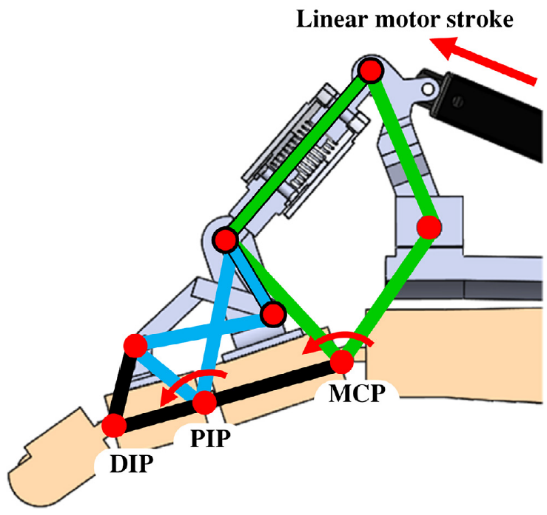
Descripción generada automáticamenteEsta topología es común entre los diseños infra actuados de barras, así como los diseños base-distal como el presentado en la Figura 2.8.

Figura .: exoesqueleto con topología base-distal (Sarakoglou, Brygo, Mazzanti, & Garcia-Hernandez, 2016)

Figura .: mecanismo de barras incluyendo dedos en el diseño (Jo, Park, Lee, & Bae, 2019)

### Mecanismos flexibles

Imagen que contiene tabla, hombre, puesto, sostener

Descripción generada automáticamenteDel 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 Figura 2.10 (a), siendo capaces de adaptarse a las geometrías resultantes de distintos patrones de agarre, tal y como se muestra en la 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.

Figura .: exoesqueleto con topología flexible. Adaptado de (Polygerinos, Wang, Galloway, Wooda, & Walsh, 2015)

Este tipo de mecanismo incluye la actuación por cables, tanto tendones artificiales como bowden a tracción, así como actuadores de deslizamiento constreñido e inflables.

## 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 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 (Li, y otros, 2019), (Li & Cheng, 2017) y (Yap, Lim, Nasrallah, & Yeow, 2017)

### Diagrama Descripción generada automáticamenteDeslizamiento 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 Figura 2.11.

Figura .: diagrama del funcionamiento del mecanismo de deslizamiento constreñido (Bützer, Lambercy, Arata, & Gassert, 2020)

Imagen que contiene persona, hombre, exterior, sostener

Descripción generada automáticamenteEsta 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 Figura 2.12.

Esta tecnología lleva en desarrollo al menos desde 2013 (Arata, y otros, 2013), ganando popularidad en los últimos años, con ejemplos recientes como (Bützer, Lambercy, Arata, & Gassert, 2020), (Lin, Zhang, & Fu, 2021), (Nycz, y otros, 2016) y modificaciones en el diseño como (Li, y otros, 2019).

Figura .: exoesqueleto por deslizamiento constreñido y mochila con actuadores encontrado en (Bützer, Lambercy, Arata, & Gassert, 2020)

### Mecanismo infra actuado

Imagen que contiene luz, tabla, computadora, remoto

Descripción generada automáticamenteEl 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 (Figura 2.9) o ser completamente independientes, empujando sobre este (Figura 2.13).

Figura .: exoesqueleto infra actuado con mecanismo independiente de los dedos (Cui, Phan, & Allison, 2015)

Esta tecnología se suele orientar rehabilitación aprovechando sus trayectorias predefinidas y por su elevado estorbo. Es con diferencia la más abundante en la literatura (Noronha & Accoto, 2021), contando con ejemplos en los últimos años como (Moreno-SanJuan, Cisnal, Fraile, Pérez-Turiel, & de-la-Fuente, 2021), (Cisnal, y otros, 2018) y (Jo, Park, Lee, & Bae, 2019).

### Mecanismo completamente actuado

Imagen que contiene interior, gato, tabla, juguete

Descripción generada automáticamenteEsta 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 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.

Figura .: exoesqueleto con los dedos completamente actuados (Yun, Agarwal, Fox, Madden, & Deshpande, 2016)

Como ejemplos de esta tecnología se encuentran (Li & Zhang, 2011), (Marconi, y otros, 2019) y (Yun, Agarwal, Fox, Madden, & Deshpande, 2016)

### 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 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 (Sarakoglou, Brygo, Mazzanti, & Garcia-Hernandez, 2016), (Iqbal & Tsagarakis, 2010) y (Iqbal, Khan, Tsagarakis, & Caldwell, 2014).

### Cable a compresión (*bowden*)

Imagen que contiene persona, hombre, interior, ventana

Descripción generada automáticamenteEl 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, como se muestra en la Figura 2.15, proporcionando fuerza y confiando en que el dedo se adaptará a la forma necesaria para el agarre.

Figura .: exoesqueleto actuado mediante cable bowden (Randazzo, Iturrate, Perdikis, & Millán, 2017)

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.

Esta tecnología se aplica en exoesqueletos como (Randazzo, Iturrate, Perdikis, & Millán, 2017), (Ghassemi & Kamper, 2019) y se observan nuevas técnicas de fabricación como la desarrollada en (Araujo, Silva, Netto, Morya, & Brasil, 626).

### Zapatos deportivos negros Descripción generada automáticamenteCable a tracción

Esta tecnología utiliza cables para **tirar del extremo de las falanges**, ejerciendo de tendones artificiales como se muestra en la 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 (Burns, Orden, Patel, & Vinjamuri, 2017), (Liu, y otros, 2018) y (Rudd, Dal, Jovanovic, & Cuckov, 2019)

Figura .: exoesqueleto actuado por tendones artificiales (Liu, y otros, 2018)

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 Figura 2.4.

Como ejemplos recientes de esta tecnología encontramos (Chiri, y otros, 2011) y (Cempini, Cortese, & Nicola Vitiello, 2014)

## Casos en detalle

Tras una evaluación de los distintos sistemas en el Capítulo 3, se decidió utilizar uno completamente actuado con MCR.

Imagen 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 Tabla 2.1.

Figura .: diseño del exoesqueleto desarrollado en (Hernández-Santos, y otros, 2021)

### Hérnández-Santos y otros, 2021 (Hernández-Santos, y otros, 2021)

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 (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 (Figura 2.18).

Figura .: mecanismo del exoesqueleto desarrollado en (Hernández-Santos, y otros, 2021)

### Un arma de fuego Descripción generada automáticamente con confianza mediaSandison y otros, 2020

(Sandison, y otros, 2020)

Imagen que contiene lego, juguete, tabla, pieza

Descripción generada automáticamenteHandMATE (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.

Figura .: HandMATE. Exoesqueleto desarrollado en (Sandison, y otros, 2020)

### Birouas y otros, 2020

Figura .: exoesqueleto desarrollado en (Birouas, Catalin, Dzitac, & Dzitac, 2020)

(Birouas, Catalin, Dzitac, & Dzitac, 2020)

Diagrama, Dibujo de ingeniería

Descripción generada automáticamenteExoesqueleto 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 (Figura 2.20).

### Zhang y otros, 2019

(Zhang, Lin, Yang, & Fu, 2019)

Imagen que contiene tabla

Descripción generada automáticamenteEste 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 .: exoesqueleto desarrollado en (Zhang, Lin, Yang, & Fu, 2019)

### Battezzato, 2014

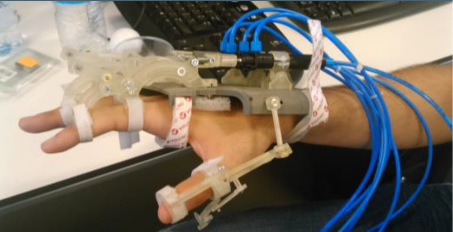
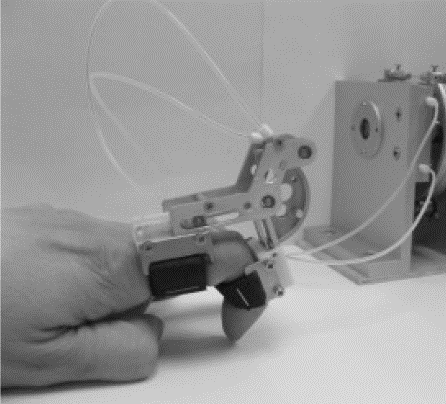
(Battezzato, 2014)

Análisis kineoestático y optimización estocástica de un mecanismo infra actuado basado en dos dobles paralelogramos para el aumento de la fuerza orientado a actividades extra vehiculares (EVAs).

Figura .: propuesta de mecanismo para exoesqueleto desarrollada en (Battezzato, 2014)

### Enríquez y otros, 2014

(Enriquez, Narváez, & Vivas, 2014)

Imagen que contiene moto, tabla, cuarto, hombre

Descripción generada automáticamenteImagen que contiene motor

Descripción generada automáticamenteExoesqueleto para rehabilitación de la mano (Figura 2.23) 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.

Figura .: mecanismo del exoesqueleto desaroolado en (Wang, Li, Zhang, & Wang, 2009)

Figura .: exoesqueleto desarrollado en (Fontana, Fabio, Marcheschi, & Bergamasco, 2013)

Figura .: diseño (arriba) y prototipo (abajo) del exoesqueleto desarrollado en (Enriquez, Narváez, & Vivas, 2014)

Figura .: exoesqueleto desarrollado en (Fang, Xie, & Liu, 2009)

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.

### Fontana y otros, 2013

(Fontana, Fabio, Marcheschi, & Bergamasco, 2013)

Diseño y caracterización experimental de un exoesqueleto para interacción háptica en el contexto de la realidad virtual y la tele operación (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.

### Wang y otros 2009

(Wang, Li, Zhang, & Wang, 2009)

Exoesqueleto completamente actuado, con 4 grados de libertad para actuar el dedo índice (Figura 2.25). 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.

### Fang y otros, 2009

(Fang, Xie, & Liu, 2009)

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.

### Imagen que contiene interior, juguete, tabla, azul Descripción generada automáticamenteNakagawara y otros, 2005

Figura .: exoesqueleto desarrollado en (Nakagawara, Kajimoto, Kawakami, & Tachi, 2005)

(Nakagawara, Kajimoto, Kawakami, & Tachi, 2005)

Mano maestra para telepresencia (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.

### Shields y otros, 1997

(Shields, Main, Peterson, & Strauss, 1997)

Imagen que contiene interior, tabla, pequeño, cuarto

Descripción generada automáticamenteExoesqueleto para actividades extra vehiculares reducido a 3 dedos, meñique y anular actuados en conjunto (Figura 2.28). Utiliza sensores de presión en los dedos como input. Caracteriza el MCR de doble paralelogramo.

Figura .: exoesqueleto desarrollado en (Shields, Main, Peterson, & Strauss, 1997)

Tabla .: comparativa de exoesqueletos con MCR

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Referencia** | **GdLs** | **Interfaz** | **Coincidencia de ejes** | **Transductor** | **Estorbo (FWs\*)** | **Notas** |
| (Hernández-Santos, y otros, 2021) | 1/dedo | Solidaria | Raíl curvo | Lineal | 4 | -- |
| (Sandison, y otros, 2020) | 1/dedo | Solidaria | Doble paralelogramo | Lineal | 3 | 1/3 del estorbo por la conexión entre actuador lineal y RCM |
| (Birouas, Catalin, Dzitac, & Dzitac, 2020) | 1/dedo | Libre | Doble paralelogramo, coincidencia directa | Cable con polea + bowden | 4 | -- |
| (Zhang, Lin, Yang, & Fu, 2019) | 1/articulación | Solidaria | Piñón cremallera simétrico | bowden | 2 | -- |
| (Díez, y otros, 2018) | 1/dedo | Solidaria | Dedo como parte del mecanismo | Servomotor | 4 | -- |
| (Battezzato, 2014) | 1/ 2 articulaciones (MCP, PIP) | N/A | Doble paralelogramo | N/A | 2,5 | Optimización del mecanismo |
| (Enriquez, Narváez, & Vivas, 2014) | 1/ 2 articulaciones (MCP, PIP) | Solidaria | Raíl curvo | Neumático | 2,5 | -- |
| (Wang, Li, Zhang, & Wang, 2009) | 1/ articulación () | Solidaria | Dedo como parte del mecanismo | Cabestrante | 3 | -- |
| (Fang, Xie, & Liu, 2009) | 1/dedo | Libre | Doble paralelogramo | Motor DC con transmisión trapezoidal | 2 | -- |
| (Nakagawara, Kajimoto, Kawakami, & Tachi, 2005) | 1/dedo | Libre | Piñón cremallera simétrico | Cable + muelle | 2,5 | -- |
| (Shields, Main, Peterson, & Strauss, 1997) | 1/ 2 articulaciones (MCP, PIP), reducido a 3 dedos | Solidario | Doble paralelogramo | Cable + muelle | 2 | -- |

\*FWs, del inglés *Finger Wides.* Medida propuesta del 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 (Lo q necesitaré saber para el desarollor)

## Biomecánica de la mano

De dentro a fuera

* Huesos
* Músculos y tendones
* Piel
* Tipos de agarre y + comunes

## Microcontrolador

* Por ahora un Arduino, más adelante un st en placa custom

Se hará uso de

* PWM
* ADC
* Se probó i2c

## Entorno

IDE de arduino

Matlab-simulink

## Mecánica

Mecanismos de barras en general

Mecanismo de centro remoto

Comparación:

Ofrece un gran compromiso entre facilidad de modelado, control, accesibilidad a materiales y tecnología, estorbo (encumbrance) e interferencia con la somato sensación de la palma.

Principios de funcionamiento

Síntesis

# Desarrollo

## Diseño del prototipo

Proceso, datos, diagramas de flujo

Proceso: elegir mecanismo, elegir transductor, elegir sensores, construir, iterar.

Elegir método de actuación: debe cumplir las siguientes condiciones:

* Coste reducido
* Usar tecnología accesible, a.k.a. nada de materiales nuevos ni métodos de fabricación que requieren equipamiento específico y/o costoso
* Minimizar el estorbo total, no solamente sobre la mano
* Maximizar la sensación de naturalidad en el uso, lo que implica minimizar la interferencia con la sensación somática, así como evitar la cenesidad de una interfaz solidaria a la mano.
* Maximizar la precisión del control

Comparando estos cuatro requerimientos con las tecnologías de actuación y topologías existentes se observa lo siguiente:

* Se descartan los mecanismos flexibles, tanto inflables, como a cables a compresión y de deslizamiento constreñido, dado a su complejo modelado, control poco preciso y necesidad de interfaz solidaria.
* Se descartan mecanismos infra actuados, por su limitación en cuanto a posibles trayectorias.
* Se descarta base-distal por su gran estorbo.
* Se descartan los cables a tracción por su gran interferencia con la sensación somática
* Se descartan los materiales novedosos como SMAs quedan descartados por no ser fácilmente accesibles
* Se descarta topología de ejes coincidentes por su requerimiento de espacio entre los dedos
* Se descarta la colocación de motores en otras partes del cuerpo y su posterior transmisión de movimiento mediante cables.

La solución restante, por tanto, sería un exoesqueleto **completamente actuado basado en actuadores de mecanismo de centro remoto movidos por un transductor eléctrico** en la propia mano.

Una vez elegida la topología y método de actuación, tomamos los datos necesarios para el diseño. Estos se componen de tamaño del dedo, fuerza a ejercer sobre este, peso total del exoesqueleto y velocidad de respuesta. [][][][]. Tras esto, se comienza el diseño del prototipo.

Selección de funcionalidades

Control en posición y en fuerza, cambio de uno a otro mediante

Mecanismo de centro remoto

El diseño comienza eligiendo el mecanismo de centro remoto a utilizar en el prototipo. Tras una breve comparación de los distintos mecanismos de centro remoto [], las opciones se reducen a dos: el raíl curvo y el doble paralelogramo. Se seleccionan estas dos opciones por su reducida complejidad y facilidad de modelado.

Raíl curvo

El modelado del raíl curvo, tanto dinámico como cinemático de este mecanismo es inmediato. En este caso específico se contempla la utilización de una junta prismática curva.

Este tipo de articulación cuenta con dos piezas: el raíl y el bloque deslizante (¿). Considerando el raíl como bancada, tiene una sola pieza móvil. Este mecanismo, aunque interesante por su simplicidad y efectividad, presenta un aumento de estorbo según va girando [], dado que el bloque deslizante va emergiendo del raíl, lo que da paso a la aparición de material en zonas donde antes no lo había.

Otra dificultad es la transmisión de movimiento al raíl. Una forma sencilla es hacer del raíl una cremallera y colocar una rueda dentada que transmita el movimiento desde el transductor, sin embargo con esto aparecen juegos y fricciones no deseados.

Doble paralelogramo

El diseño básico del mecanismo de doble paralelogramo se puede modelar a nivel cinemático como una transmisión 1:1 entre la entrada y el centro remoto de rotación []. A nivel cinemático el modelado complica debido al cambio de geometría que sufre el mecanismo al girar sobre el centro remoto, lo que modifica su centro de masas. Teniendo en cuenta su ligero peso, en este tfg se consideran despreciables las posibles variaciones dinámicas provocadas por este fenómeno.

Este tipo de articulación cuenta con 6 barras. Tomando una como bancada, tiene 5 piezas móviles. La principal ventaja es que, al extenderse, se aplana, modificando su geometría y reduciendo su estorbo cuanto mayor es su ángulo de rotación, al contrario que el raíl curvo. Otra de sus características es la posibilidad de acoplar directamente a una de sus articulaciones el transductor para proporcionar el movimiento de entrada, evitando así la necesidad de transmisiones adicionales.

A continuación, se muestra la síntesis de este mecanismo. Dado que la caracterización y optimización en función de las dimensiones de este mecanismo escapan a los alcances de este tfg, se utiliza el diseño encontrado en [].

El ángulo inicial de la barra determina en parte la posición del centro remoto de rotación, así como la carrera (el recorrido) del mecanismo. Se creó una pieza específica para calibrar esta dimensión, eligiendo empíricamente un valor que permitiese al dedo libre movimiento en todo su rango de movimiento, y que a su vez maximizara terminara el recorrido del mecanismo lo más alejado posible de la posición particular (¿). Cabe destacar que cuanto más alejado de la posición particular, mayor es el estorbo, siendo mínimo cuando se alinean todas las barras, momento en el que el mecanismo deja de funcionar adecuadamente.

El mecanismo se simuló en SAM, obteniendo los siguientes resultados

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.

Una vez diseñada la articulación, se procede a elegir los sensores, así como el motor.

Una vez diseñado el mecanismo, se itera varias veces para corregir juegos, fricciones, asegurar una robustez adecuada de las conexiones y otras características mecánicas.

El diseño se iteró 8 veces [], sintetizando un mecanismo con las siguientes características:

* Cojinetes de PTG(¿)
* Una pieza a presión, otra con holgura, luego anilla a presión
* Chaveteros para motor y potenciómetro
* La bancada no se tiene solo como barra, se aprovecha como zócalo del motor.

Elección de motores

Como transductor eléctrico se eligió el motor N20. Este motor se presenta como una opción económica (alrededor de 3 euros la unidad), de reducido estorbo (dimensiones, peso) así como fácil de alimentar por trabajar a tensiones estándar (3, 6 ,12V) y tener una gran variedad de reductoras disponibles, incluyendo con salida perpendicular, lo que en este caso resultó ventajoso para reducir el estorbo, así como la existencia de modelos con sensores integrados.

Mediante pruebas empíricas se estimó que una velocidad de cierre de la mano en 0.5s sería un resultado más que satisfactorio. Simplificando el rango de cierre de la mano a 90º por dedo, esto implica una velocidad angular necesaria de 90/0.5 = 180º/s o 30 rpm. Evaluando las distintas opciones de motor N20 se observa que hay 2 grados de libertad a la hora de elegir: reductora y tensión. A 12V, que sería la tensión que dan unas baterías tal… o a 5v, que sería alimentarlo a la misma tensión que la electrónica. Se encontraró un motor a aproximadamente 30 rpms a 12v, uno que cumple tanto a 5 como a 12, y otro que cumple a 5. Se hizo una interpolación para sacar la velocidad a 5v en vez de 6. Estos tres motores eran contiguos en cuanto a modelos de reductora. Se eligió el del centro por proporcionar una mayor versatilidad.

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 cumplir las siguientes características:

* Posibilidad de medición de la intensidad que atraviesa el motor, independientemente de la dirección
* Soportar la intensidad máxima del motor, en este caso, la intensidad en bloqueo

Tras sopesar varios modelos de puentes H que cumplen estas características, se eligió el L…

Este modelo incluye la posibilidad de utilizar una resistencia de drenado (shunt resistor) para medir la intensidad que consume unos de los canales del puente H, en este caso, uno de los motores N20. Además, este integrado se encuentra en un módulo de uso común en proyectos de Arduino, y por tanto, es muy accesible. Este módulo no ofrece la posibilidad de instalar una resistencia de drenado, sin embargo, al ser posible por el integrado en el que se basa, se puede hacer una sencilla modificación para permitirlo[].

Medida indirecta de intensidad

En un principio se probó con el sensor de corriente INA, pero edbido a su trabajosa implementación en simulink se terminó ustilizando el propio ADC de arduino.

Desacoplo de etapa de potencia y sensores

Ruido por tal y cual entonces se pusieron los sensores a una tierra lejana a la que utiliza la etapa de potencia, estando esta conectada por un solo punto para el correcto funcionamiento.

Obtención de consigna

guante sensorizado a partir de sensores resistivos de flexión.

Para caracterizar estos sensores (cuya hoja de especificaciones se queda algo escueta) se creó un banco de prueba.

Este banco de pruebas consiste en…

Tras varias pruebas, se extrajo una función de transferencia del sensor de flexión colocado en un divisor de tensión.

Detección de la intencionalidad con EMG

Sensor de EMG superficial para cambiar entre modos de seguimiento de posición y agarre.

Plataforma para colocar los módulos hecha a medida.

## Modelado y control

Identificar motor

* Modelo teórico
* Banco de pruebas
* Tratamiento de resultados, razones etc…

Identificar potenciómetro

* “ “

Modelado del sistema: péndulo invertido gobernado por motor dc con reductora

Ecuaciones en el tiempo

Trabajo en movimiento libre alrededor de x angulo

Trabajo en bloqueo

Identificación empírica

Ñapa del lazo para controlar la posición y que converja en vez de trabajar en velocidad omg.

Control en posición

Diseño de reguladores: requisitos

* Overshoot mínimo, preferiblemente nulo
* Menor tiempo de reacción

Diseño por LDR

Diseño por ZN-Escalon

Chreswick

Todo/nada

Diseño a ojo sobre la maqueta: punto de separación en el LDR

Control de fuerza. Medida indirecta a través de la intensidad del motor

# Resultados

Resp. Transitoria ante escalón, ante rampa, en frecuencia, tolerancia a ruido, tolerancia ante cargas. Simulado VS empírico. Oof…

## Conclusiones

“se ha conseguido..:”

# Bibliografía

(numerada respecto a caps)

## Fuentes

## Figs

## Tablas

## Imgs

# Anexos

## Código

## Planos

## Glosario

…