# Introducción

## Motivación

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. (2)

Este trabajo de fin de grado (TFG), presenta un diseño de exoesqueleto para la mano basado en actuadores modulares de mecanismo de centro remoto, y se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 3: buena salud, que se describe como “garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades” e incluye que “es necesario promover las medidas de prevención e intensificación de discapacidades, reduciendo el impacto sobre la salud de la persona, su calidad de vida y su integración en las actividades de la sociedad”.

## Objetivos

Los objetivos de este TFG son diseñar y fabricar un prototipo de exoesqueleto que cumpla con las siguientes características

* Coste < 500€.
* Usar tecnología accesible, excluyendo materiales nuevos y métodos de fabricación que requieren equipamiento específico y/o costoso.
* Peso < 500g, preferiblemente alrededor de los 200g [].
* Volumen < Xcm3 [].
* Minimizar inconveniencias provocadas por su uso 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 necesidad de una interfaz solidaria a la mano.
* Control en posición y en fuerza, Así como la capacidad de cambiar de uno a otro de forma intuitiva cuando se vaya a realizar el agarre, tal y como se muestra en la figura [].
* Velocidad de cierre de la mano al completo de 1s, preferiblemente 0,5s.
* Rango de movimiento de 90 grados por articulación.
* Proporcionar un grado de libertad a cada articulación sobre la que actúa.
* Fuerza por falange de “x” N [].
* Permitir aducción y abducción de los dedos de la mano

Diagrama

Descripción generada automáticamente

## Resumen

# Estado del arte

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 en publicaciones dedicadas específicamente al estado del arte, tendencias y retos sobre los exoesqueletos para la mano (3), (4), (2), (5), (6), (7), (8), (9), (10). 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). Entre estos métodos de clasificación, los más comunes son según finalidad (6), según topología (9) y según método de actuación (7), (8). 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 2.1: clasificaciones aludiendo a distintas características de un exoesqueleto para la mano (Noronha & Accoto, 2021)

## 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 (Ferguson, Shen, & Rosen, 2020). 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 Figura 2.2, lo que conlleva posibles lesiones y otros efectos no deseados (Fang, Xie, & Liu, 2009).

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Figura 2.2:interferencia mecánica por el problema de los ejes coincidentes (Nakagawara, Kajimoto, Kawakami, & Tachi, 2005)

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. Figura 2.3 (a)
* Ejes de rotación del mecanismo coincidentes con los de la mano mediante mecanismos de centro remoto (MCRs). Figura 2.3 (b)
* Uso de las propias articulaciones de la mano como parte del mecanismo del exoesqueleto. 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*). Figura 2.3 Figura 2.3(d) y (e)

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Figura 2.3: ejemplos de mecanismos de exoesqueleto y distintas topologías (Heo, Gu, Lee, Rhee, & Kim, 2012)

### 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 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)

### Mecanismos de centro remoto

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). Los más utilizados en el ámbito de los exoesqueletos para la mano los siguientes:

* Raíl curvo, mostrado en la
* 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 ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.
* Piñón cremallera simétrico, al que se refieren en (Nakagawara, Kajimoto, Kawakami, & Tachi, 2005) como “*circuitous joint”, mostrado en la* ¡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 2.4: exoesqueleto desarrollado en (Cempini, Cortese, & Nicola Vitiello, 2014) con ejes coincidentes.

Figura 2.5: MCR de doble paralelogramo (Fang, Xie, & Liu, 2009)

Diagrama

Descripción generada automáticamenteDiagrama

Descripción generada automáticamente

Figura 2.6: Figura 2.5: MCR de raíl curvo (Zong, Pei, Yu, & Bi, 2008)

Figura 2.7: 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 2.8. 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

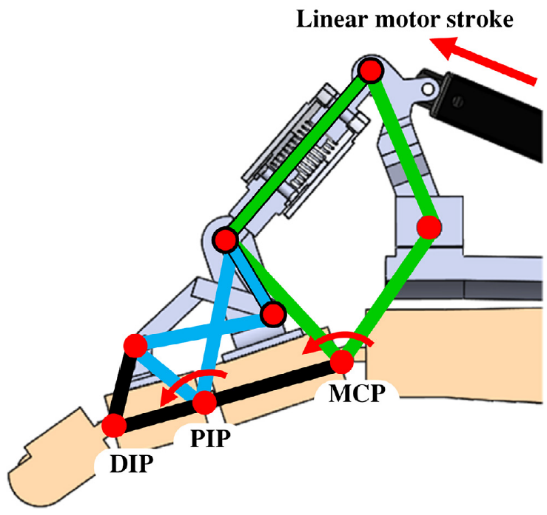
Descripción generada automáticamenteEsta topología es común entre los diseños infra actuados de barras, así como los diseños base-distal como el presentado en la Figura 2.9.

Figura 2.8: exoesqueleto con topología base-distal (Sarakoglou, Brygo, Mazzanti, & Garcia-Hernandez, 2016)

Figura 2.9: mecanismo de barras incluyendo dedos en el diseño (Jo, Park, Lee, & Bae, 2019)

### 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 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.

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 2.10: exoesqueleto con topología flexible (Polygerinos, Wang, Galloway, Wooda, & Walsh, 2015)

## 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 presentar 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)

### 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 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 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).

### 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 (Figura 2.9) o ser completamente independientes, empujando sobre este (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 (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).

Figura 2.11: exoesqueleto por deslizamiento constreñido y mochila con actuadores encontrado en (Bützer, Lambercy, Arata, & Gassert, 2020)

Figura 2.12: diagrama del funcionamiento del mecanismo de deslizamiento constreñido (Bützer, Lambercy, Arata, & Gassert, 2020)

### 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 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 (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*)

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 (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).

Figura 2.13: exoesqueleto con los dedos completamente actuados (Yun, Agarwal, Fox, Madden, & Deshpande, 2016)

Figura 2.14: exoesqueleto infra actuado con mecanismo independiente de los dedos (Cui, Phan, & Allison, 2015)

### Cable 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)

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.

Zapatos deportivos negros

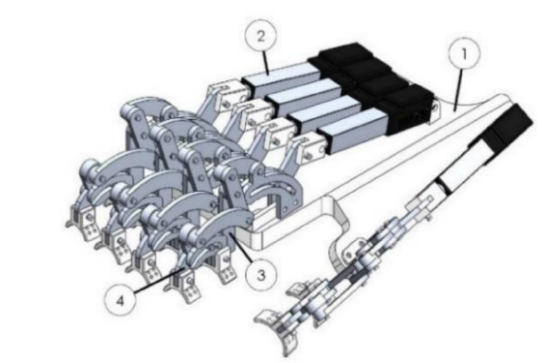
Descripción generada automáticamenteComo ejemplos recientes de esta tecnología encontramos (Chiri, y otros, 2011) y (Cempini, Cortese, & Nicola Vitiello, 2014)

Figura 2.15: diseño del exoesqueleto desarrollado en (Hernández-Santos, y otros, 2021)

Figura 2.16: exoesqueleto actuado por tendones artificiales (Liu, y otros, 2018)

## Casos en detalle

Tras una evaluación de los distintos sistemas en el capítulo 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 Tabla 2.1.

Figura 2.17: HandMATE. Exoesqueleto desarrollado en (Sandison, y otros, 2020)

Figura 2.18: mecanismo del exoesqueleto desarrollado en (Hernández-Santos, y otros, 2021)

En (Hernández-Santos, y otros, 2021) 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 (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).

En (Sandison, y otros, 2020) se presenta *HandMATE* (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 2.19: exoesqueleto desarrollado en (Birouas, Catalin, Dzitac, & Dzitac, 2020)

Figura 2.20: exoesqueleto desarrollado en (Zhang, Lin, Yang, & Fu, 2019)

En (Birouas, Catalin, Dzitac, & Dzitac, 2020) 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 (Figura 2.20).

Imagen que contiene interior, tabla, par, pequeño

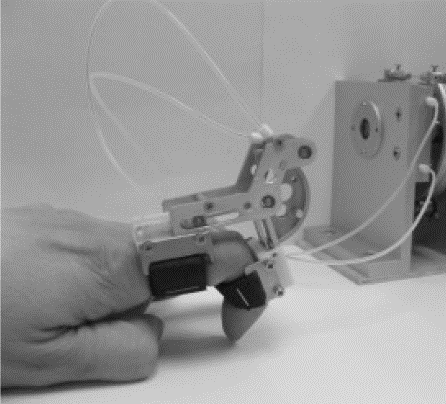
Descripción generada automáticamenteImagen que contiene tabla

Descripción generada automáticamenteEn (Zhang, Lin, Yang, & Fu, 2019) 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 2.21: propuesta de mecanismo para exoesqueleto desarrollada en (Battezzato, 2014)

Figura 2.22: diseño (arriba) y prototipo (abajo) del exoesqueleto desarrollado en (Enriquez, Narváez, & Vivas, 2014)

En (Battezzato, 2014) 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 (Enriquez, Narváez, & Vivas, 2014) se presenta un exoesqueleto para rehabilitación de la mano (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 2.23: mecanismo del exoesqueleto desaroolado en (Wang, Li, Zhang, & Wang, 2009)

Figura 2.24: exoesqueleto desarrollado en (Fontana, Fabio, Marcheschi, & Bergamasco, 2013)

Imagen que contiene motor

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

Descripción generada automáticamenteEn (Fontana, Fabio, Marcheschi, & Bergamasco, 2013)se presenta el 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.

Figura 2.25: exoesqueleto desarrollado en (Nakagawara, Kajimoto, Kawakami, & Tachi, 2005)

Figura 2.26: exoesqueleto desarrollado en (Fang, Xie, & Liu, 2009)

En (Wang, Li, Zhang, & Wang, 2009) se presenta un exoesqueleto completamente actuado, con 4 grados de libertad para actuar el dedo índice (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 (Fang, Xie, & Liu, 2009) 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 (Nakagawara, Kajimoto, Kawakami, & Tachi, 2005) se presenta una 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.

Imagen que contiene interior, tabla, pequeño, cuarto

Descripción generada automáticamenteEn (Shields, Main, Peterson, & Strauss, 1997) Se presenta un exoesqueleto 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 2.27: exoesqueleto desarrollado en (Shields, Main, Peterson, & Strauss, 1997)

Tabla 2.1: 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 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

## Biomecánica de la mano

Para comprender adecuadamente el desarrollo de este TFG, conviene familiarizarse con la anatomía de la mano, en particular con su estructura musculoesquelética y patrones de agarre.

### Estructura ósea y articulaciones

La mano humana está compuesta por 27 huesos. 8 de ellos son huesos cárpales que componen la muñeca, 5 son meta cárpales que componen la palma y 14 son falanges que componen los dedos. La distribución de estos huesos, así como sus nombres se pueden encontrar en la [].

Estos huesos se agrupan en dos unidades estructurales: la unidad fija y la móvil. Los huesos de la unidad móvil se mueven respecto a aquellos de la unidad fija, que hacen de base o bancada. La unidad fija se compone de los cuatro huesos cárpales distales (aquellos que no hacen de interfaz con el cúbito y radio para el movimiento de la muñeca), así como el segundo y tercer metacarpiano, mientras que el resto de los huesos son componentes móviles.

Esto implica que la palma de la mano no es capaz de moverse o adaptarse en la zona de los dedos índice y corazón, ya que los huesos metacarpianos que la componen son fijos, mientras que sí es capaz en la zona del anular y corazón, y desde luego, en la zona del pulgar, que permite la oposición de este dedo. La oposición del pulgar es posible gracias a la articulación trapeciometacarpiana, una articulación bicóncava en forma de silla de montar que permite un amplio rango de movilidad.

Fig[]

Cada uno de los dedos índice, corazón, anular y meñique están compuestos por 3 falanges: la falange proximal, la medial y la distal, mientras que el pulgar consta solo de dos: la medial y la distal. Estas falanges están unidas entre sí mediante articulaciones de tipo troclear, que permiten un movimiento de bisagra y son se denominan articulación proximal interfalángica (PIF) y distal interfalángica (DIF) tal y como se ve en la [].

Por otro lado, los dedos se unen a la palma mediante la articulación metacarpofalángica (MF), uniendo las falanges proximales de cada dedo a su respectivo metacarpiano. Esta articulación es de tipo condílea, es decir, que permite el movimiento en dos ejes, por lo que además del movimiento de bisagra, el dedo se puede mover lateralmente permitiendo separar o juntar los dedos unos de los otros. Cabe destacar que esta capacidad se pierde al flexionar la mano.

### Musculatura

El movimiento de los dedos ex provocado por dos tipos de músculos: intrínsecos y extrínsecos. Los músculos intrínsecos son aquellos que se encuentran en la mano y su principal función es la de configurar la disposición de los dedos, mientras que los extrínsecos se encuentran en el antebrazo y su principal función es proporcionar fuerza.

Los músculos extrínsecos a su vez se dividen en flexores (para cerrar la mano), que se encuentran mayormente en la parte delantera del antebrazo, y extensores (para abrir la mano) que se encuentran mayormente en la parte trasera.

Los músculos extrínsecos se dividen en tenares, que actúan sobre el pulgar, hipotenares, que actúan sobre el meñique y los músculos de la región palmar media, que actúan sobre todos los dedos a excepción del pulgar.

### Funcionamiento mecánico

Los músculos extrínsecos de la mano transmiten su movimiento a través de tendones que llegan hasta las falanges. Estos tendones son guiados a través de poleas naturales hechas de vainas fibrosas para transmitir el par desde el antebrazo hasta la falange en cuestión, conectándose por la parte inferior para flexión y por la superior para extensión, tal y como se muestra en la []. Estas poleas se encuentran en cada dedo y pueden ser anulares, numeradas A1-A5 o cruciformes, numeradas C1-C3.

### Patrones de agarre

Los patrones de agarre de la mano se pueden dividir en dos grupos: agarres de fuerza y agarres de precisión. En los agarres de fuerza, el objeto agarrado se sujeta firmemente contra la palma y se asegura flexionando los dedos sobre éste. Mientras tanto, en los agarres de precisión los objetos se sujetan entre el pulgar, que se aduce y opone, y las caras flexoras (interiores) de uno o más de los dedos restantes.

## Máquinas y mecanismos

Un mecanismo es una serie de cuerpos unidos entre sí que transmiten movimiento de una manera predeterminada. Uno de estos cuerpos se inmoviliza y toma el nombre de bancada, soporte o bastidor. Existen multitud de tipos de mecanismos, por ejemplificar algunos de los más comunes podemos nombrar los de barras, también llamados de barras articuladas o simplemente mecanismos articulados, los mecanismos de levas, los engranajes, las ruedas de fricción, los de cables, cadenas y correas, aquellos deformables con muelles, resortes o ballestas, frenos y embragues, rodamientos y cojinetes… sin embargo, para este TFG aquellos de mayor interés son los de barras.

Para el estudio cinemático y dinámico de los mecanismos, se sustituyen las formas reales de sus eslabones, es decir de las piezas o conjuntos solidarios de piezas que los componen, por representaciones esquemáticas donde solamente se indican los puntos de interés. En la figura [] se puede observar la representación del mecanismo biela-manivela.

Según los grados de libertad (GdLs) de los que disponga un mecanismo, este se puede considerar ligado o bloqueado si tiene 0, es decir, si a efectos prácticos es una estructura, desmodrómico si tiene 1, es decir, si con un solo movimiento de entrada se pueden impulsar todos sus eslabones, o libres si tiene más de 1, lo que significa que se necesitarán aplicar varios movimientos de entrada. En este TFG, aquellos de mayor interés son los mecanismos desmodrómicos.

Otra característica de interés a la hora de estudiar y comparar mecanismos es el espacio en el que está contenido su movimiento. Si el movimiento de sus eslabones está contenido en un solo plano o en planos paralelos, se le denomina mecanismo plano, mientras que si existe movimiento en un espacio tridimensional se les denomina espaciales.

### Cuadrilátero articulado

El mecanismo de cuadrilátero articulado es uno de los mecanismos más destacados dentro de los mecanismos de barras. Este mecanismo consiste en cuatro barras, colocadas en una disposición de cuadrilátero, unidas mediante articulaciones rotativas por sus vértices, tal y como se muestra en []. Este mecanismo tiene un caso particular. Si ambas barras verticales son de la misma longitud, y ambas horizontales también, es decir, tenemos un rectángulo o un cuadrado articulado, el movimiento que aparecerá en la salida del mecanismo será igual que el de entrada, creando a efectos prácticos una transmisión 1:1. A partir de este mecanismo se obtiene el mecanismo utilizado como base de este TFG.

### Mecanismos de centro remoto

Existe un cierto tipo de mecanismos en los cuales una de sus partes puede rotar alrededor de un punto fijo distante del mecanismo sin una articulación física presente en dicho punto, estos mecanismos reciben el nombre de mecanismos de centro remoto (MCR o en inglés, RCM de *Remote Center Mechanism*) (Blumenkranz & Rosa, 2001).

### Doble paralelogramo

El doble paralelogramo es un MCR obtenido del caso particular del paralelogramo articulado del cuadrado o rectángulo articulados. Para comprender cómo gira una de sus barras respecto a un centro remoto, observemos en primer lugar la []. En ella se muestra cómo un movimiento en la barra de entrada [] provoca un movimiento igual en la barra de salida []. Ahora, si se modifica el mecanismo añadiendo una barra vertical como se muestra en la [], añadiendo una barra [], se puede ver que el mecanismo sigue funcionando de la misma manera. Lo mismo ocurre cuando se modifica tal y como se muestra en la [], añadiendo una barra horizontal. Ahora, si se modifica el mecanismo acortando las barras [] y [], se puede observar que la nueva barra de salida [] sigue rotando respecto a [], sin embargo, ahora no hay una conexión física en dicho punto. Este mecanismo se sigue comportando de esta manera si acortamos las barras [] y [].

Este mecanismo de doble paralelogramo resultante se comporta, por tanto, como una transmisión 1:1. 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.

### Configuración singular

La configuración singular de un mecanismo consiste en la pérdida de grados de libertad debido a la alineación de sus barras. Este fenómeno es de gran importancia en la robótica serial, aunque también aparece en otro tipo de mecanismos.

## Electrónica de control

Microcontrolador

Un microcontrolador es una placa electrónica que consta de un microprocesador para procesar datos y ejecutar distintas órdenes con o sin ellos, así como entradas y salidas para recibir dichos datos, como por ejemplo de sensores, o enviarlos a sistemas externos, como por ejemplo actuadores. El microcontrolador contiene además los componentes auxiliares necesarios para el correcto funcionamiento del microprocesador y las entradas y salidas, como pueden ser reguladores de tensión, relojes de cuarzo, botones de encendido, apagado y reset o diodos para proteger los puertos de entrada.

Los microcontroladores se encargan de controlar una determinada función o grupo de funciones relacionadas con una tarea específica, a diferencia de un ordenador, que tiene un carácter mucho más genérico.

Arduino

Arduino es un conocido microcontrolador open-source accesible, de bajo coste, fácil de aprender y sencillo de utilizar basado en el microprocesador ATmega328P. Gracias a su popularidad, se han desarrollado multitud de herramientas para integrar fácilmente Arduino con una amplia variedad de herramientas, tanto hardware, con un un amplio repertorio de código para facilitar la implementación de módulos electrónico, algunos desarrollados específicamente para usar junto a una placa Arduino, como software, con programas como Matlab que ofrecen soporte para la integración de este microcontrolador. Estas características hacen de él la elección favorita del gran público para empezar hacer proyectos electrónicos y electromecánicos, ya sea como pasatiempos o con un fin educativo.

Modulación por ancho de pulso PWM

La modulación de ancho de pulso (PWM, del inglés Pulse With Modulation) es una técnica utilizada para variar la cantidad de energía entregada a un dispositivo mediante la variación del ancho de los pulsos en un tren de pulsos. El ancho de los pulsos se modula en relación con una frecuencia fija, y la relación entre el tiempo de encendido (el ancho del pulso) y el tiempo de apagado (el tiempo entre pulsos) se conoce como ciclo de trabajo. Al cambiar el ciclo de trabajo, se puede variar el valor promedio del tren de pulsos.

Conversor analógico digital ADC

Un convertidor analógico digital (ADC) es un dispositivo que convierte señales analógicas en una representación digital. Muestrea una señal analógica a intervalos regulares, convirtiendo cada muestra en un valor digital y produciendo un flujo de valores digitales que representan la señal analógica. Estos dispositivos tienen un rango de resolución limitado, generalmente expresado en bits, que determina el número de valores digitales distintos que se pueden producir. Por ejemplo, un ADC de 8 bits puede producir 256 (2^8) valores digitales diferentes, mientras que un ADC de 12 bits puede producir 4096 (2^12) valores digitales diferentes.

Potenciómetro

Un potenciómetro es un tipo de resistencia variable. La resistencia se puede ajustar girando una dial o deslizando un contacto a lo largo de una pista.

Un potenciómetro tiene tres terminales: los terminales finales están conectados a los extremos de una pista resistiva y el terminal central está conectado a un contacto que se mueve a lo largo de la pista. La resistencia entre los terminales de los extremos es fija, pero la resistencia entre el terminal central y cualquiera de los terminales de los extremos se puede ajustar.

Los potenciómetros se clasifican por el valor de la resistencia, el material de la pista, la potencia nominal y otros parámetros. Algunos potenciómetros tienen una pista lineal en la que la resistencia cambia uniformemente y otros tienen una pista logarítmica en la que la resistencia cambia a un ritmo diferente dependiendo de la posición.

Dado que en este TFG se utilizarán como sensores de posición angular, los potenciómetros rotativos lineales son aquellos que resultan de mayor interés para esta aplicación.

Divisor de tensión

Un divisor de tensión es un circuito simple que consta de dos resistencias conectadas en serie, tal y como se puede apreciar en la figura []. El circuito se usa para reducir el voltaje a través de una de las resistencias, creando un voltaje de salida más pequeño. La relación entre el voltaje de salida y la tensión de entrada está determinada por la relación de los valores de resistencia de las dos resistencias. Los divisores de tensión se usan comúnmente en aplicaciones como la medición de voltaje, el ajuste de la ganancia de los amplificadores y la creación de voltajes de referencia. En este TFG, se utilizarán para el acondicionamiento de resistencias variables, creando así sensores resistivos cuya salida es una tensión medible por el microcontrolador.

## Electrónica de potencia

Puente H

Un puente H es un tipo de circuito que se utiliza para controlar la dirección del flujo de corriente en un motor de CC u otra carga. Se llama puente H porque normalmente se parece a la letra "H" cuando se representa en un diagrama esquemático.

Un puente H se compone de cuatro interruptores electrónicos, como transistores o MOSFET. Dos de los interruptores están conectados al suministro de voltaje positivo y los otros dos están conectados al suministro de voltaje negativo. Los interruptores están conectados de tal manera que pueden usarse para controlar la dirección del flujo de corriente a través de la carga, lo que permite que la carga funcione tanto hacia una dirección como hacia la otra.

Cuando el interruptor de arriba a la izquierda y el interruptor de abajo a la derecha están encendidos y los interruptores de arriba a la derecha y de abajo a la izquierda están apagados, la corriente fluye a través de la carga en una dirección, lo que hace que corra en una dirección. Cuando el interruptor de arriba a la derecha y el interruptor de abajo a la izquierda están encendidos y los interruptores de arriba a la izquierda y abajo a la derecha están apagados, la corriente fluye a través de la carga en la dirección opuesta, lo que hace que corra en la otra dirección.

Motor DC con escobillas

Un motor de CC con escobillas es un tipo de motor eléctrico que funciona con corriente continua (CC). Utiliza un conjunto de escobillas de grafito para transferir energía eléctrica al rotor, que es la parte giratoria del motor.

El motor consta de un estator, que es la parte estacionaria del motor que aloja los devanados, y un rotor, que es la parte móvil del motor. El estator tiene dos componentes principales: el devanado de campo y el devanado de armadura. El devanado de campo está conectado a una fuente de alimentación de CC y crea un campo magnético. El devanado del inducido está conectado al rotor y es responsable de generar un par que hace que el rotor gire.

Las escobillas de grafito están ubicadas en el estator y hacen contacto con el conmutador, una parte giratoria del rotor, para transferir energía eléctrica al rotor. A medida que gira el rotor, el conmutador gira con él, lo que hace que las escobillas de carbón se deslicen a lo largo del conmutador, manteniendo el contacto con el rotor. Esto permite que la energía eléctrica se transfiera al rotor y mantiene el flujo de corriente en la dirección correcta, lo que hace que el rotor gire.

Sin embargo, las escobillas de los motores de CC son el eslabón débil del motor, ya que se desgastan con el tiempo, lo que da como resultado un rendimiento deficiente y posibles daños al motor. También crean chispas y generan mucho ruido eléctrico.

## Entorno

Matlab

Matlab (acrónimo de matrix laboaratory) es un entorno de computación numérica y un lenguaje de programación desarrollado por MathWorks y se usa comúnmente en ingeniería, ciencia y economía. Matlab proporciona una amplia gama de herramientas para el análisis de datos, incluidas funciones matemáticas, herramientas de visualización de datos y un lenguaje de programación de alto nivel para escribir scripts y desarrollar algoritmos. También incluye una gran biblioteca de funciones predefinidas, denominadas cajas de herramientas de MATLAB, que se pueden utilizar para tareas como el procesamiento de señales, los sistemas de control y el procesamiento de imágenes.

MATLAB también cuenta con una potente interfaz gráfica de usuario que permite a los usuarios interactuar fácilmente con los datos, crear gráficos y visualizaciones y ejecutar scripts y funciones. Además, permite a los usuarios conectarse a otros lenguajes de programación como C, C++ y Python, lo que la convierte en una herramienta versátil para una amplia gama de aplicaciones.

MATLAB se usa ampliamente en el mundo académico, la industria y la investigación para una variedad de tareas, que incluyen cálculo numérico y análisis de datos, modelado y simulación, desarrollo de algoritmos, visualización de datos, gráficos científicos y de ingeniería así como desarrollo de aplicaciones, incluida la creación de interfaces gráficas de usuario.

Simulink

Simulink es un entorno de diseño basado en modelos y simulación con diagramas de bloques que se utiliza para simular, modelar y analizar sistemas dinámicos. Está desarrollado por MathWorks y se usa a menudo junto con MATLAB.

En Simulink, un modelo se representa mediante una colección de bloques interconectados, que pueden representar varios componentes de un sistema, como operaciones matemáticas, funciones de transferencia y otros elementos a nivel del sistema. Los usuarios pueden crear diagramas de bloques arrastrando y soltando bloques de una biblioteca, conectándolos entre sí y configurando sus propiedades.

Simulink admite una amplia gama de capacidades de modelado y simulación, incluidos sistemas lineales y no lineales, modelados en tiempo continuo, tiempo muestreado o un híbrido de los dos. También admite el modelado, la simulación y el análisis de sistemas integrados y enlaces a otras herramientas CAD, como MATLAB, Stateflow, SimHydraulics, SimPowerSystems, SimRF, SimDriveline y SimRF.

Simulink también proporciona una amplia gama de herramientas de análisis, incluido el análisis en el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia, la linealización y la optimización, así como la capacidad de generar código para sistemas integrados.

Simulink se usa ampliamente en una variedad de industrias, incluidas la aeroespacial, automotriz, comunicaciones, sistemas de control, finanzas, procesamiento de imágenes y procesamiento de señales. También se utiliza en el mundo académico para la enseñanza y la investigación en sistemas de control, comunicaciones y otros campos.

# Desarrollo

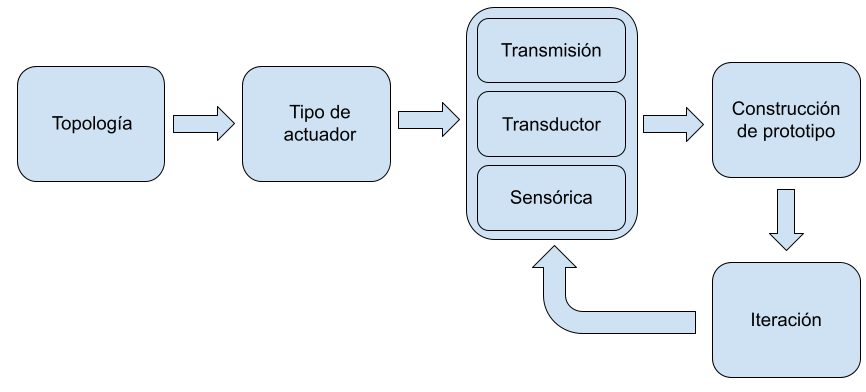
Para diseñar un exoesqueleto que cumpla los objetivos presentados en el apartado de Objetivos se ha optado por definir primero los aspectos generales del exoesqueleto, lo que se puede entender como el “qué es”, siendo estos su topología y tipo de actuación, y después los aspectos específicos, lo que 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 Figura 4.1.

Figura 4.1: diagrama de flujo del diseño y desarrollo del prototipo

## Elección de topología

En este apartado se comparan las topologías identificadas en el capítulo Estado del arte frente a los objetivos definidos en el capítulo 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 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 Figura 4.3 (E) y (F) y en la 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 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 4.2: 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 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 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 4.3: comparación de estorbo entre exoesqueletos con Raíl curvo (izquierda) y doble paralelogramo (derecha)

Figura 4.4: 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 (Shields, Main, Peterson, & Strauss, 1997).

El proceso para sintetizar el mecanismo de doble se muestra en la 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 4.5: 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 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 4.7: guante sensorizado con sensores de flexión

Figura 4.6: colocación de los electrodos del sensor de electromiografía superficial (Atzori, Gijsberts, Elsig, & Hager, 2012)

### 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 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 (Figura 4.11) se obtiene el diseño mostrado en la Figura 4.12.

Figura 4.8: iteraciones de piezas de bancada (izquierda) y barras del mecanismo MCR (derecha) del actuador fabricado

Figura 4.9: actuador de 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 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 4.10: Actuadores MCR modulares colocados en la base del prototipo sobre el reverso de la mano

# Modelado y control

## Ecuaciones de un péndulo invertido gobernado por motor DC con escobillas

Partiendo del sistema mostrado en la figura [], modelar este sistema puede parecer una tarea complicada. Sin embargo, tal y como se vio en el capítulo [], el MCR de doble paralelogramo se puede modelar como una transmisión 1:1 entre la barra de entrada y de salida, que rota respecto al centro remoto. De tal forma, el sistema es equivalente al observado en la figura [].

Fig[], fig[]

El sistema resultante es un péndulo gobernado por un motor DC con escobillas y una reductora.

Las ecuaciones del motor DC con escobillas son [] – []

La reductora del motor transforma el par y la velocidad tal y como se muestra en las ecuaciones [] y [] respectivamente.

El rozamiento se modela como rozamiento viscoso. Los distintos rozamientos se agrupan en el coeficiente de rozamiento b. Las inercias del eje del motor y de la reductora se agrupan en la constante Jm. Por tanto, en la articulación rotativa del péndulo tenemos la ecuacion [], mientras que la velocidad será la misma que la de salida del vástago del motor, como muestra la ec [].

## Linealización del modelo alrededor de un punto de trabajo

Una vez modelado el sistema, se debe linealizar alrededor del punto de trabajo. En este caso contamos con dos puntos distintos, el primero cuando el mecanismo se encuentra en movimiento, y el segundo cuando se encuentra en loqueo, ejerciendo fuerza sobre la mano. Se tomará la mitad del rango de movimiento, es decir, 45 grados como punto alrededor del que linealizar el sistema en movimiento.

#### Motor en movimiento

#### Motor en bloqueo

En el control de fuerza, la pieza estará colocada sobre la mano y se limitará a ejercer presión. Esto implica que la posición no cambiará, por lo que se considera el eje de salida del motor en bloqueo, es decir, el ángulo es constante y tanto su velocidad como aceleración angular son cero. Esto impone las siguientes condiciones:

Por último, la fuerza que ejerce el extremo del brazo del péndulo no es la fuerza que se desea controlar directamente, sino que es la que se ejerce sobre el dedo. Esta fuerza estará compuesta por la componente de la fuerza del brazo perpendicular a la superficie de contacto entre el dedo y el exoesqueleto, mostrada es la figura [], y una componente de la fuerza peso de las propias piezas. Esta fuerza resultante sobre el dedo viene definida por la ecuación [].

Por tanto, el sistema en bloqueo se rige por las ecuaciones [] – [].

## Modelo en Laplace

Una vez lienalizado el modelo alrededor de cada punto de trabajo, se pasan las ecuaciones al dominio de Laplace.

## Identificación de parámetros del modelo

Dado que la mayoría de los componentes no cuentan con una hoja de características con los datos deseados, muchos de ellos se identificaron de forma empírica con el uso de bancos de prueba.

### Identificar motor

Para caracterizar el motor se deben conocer R, L y Kp o Kv. R se midió con un multímetro en modo óhmetro.

L se midió de forma indirecta midiendo el tiempo de carga y descarga de la inductancia, colocando una resistencia en serie con el motor e introduciendo una señal cuadrada, se midió la respuesta, tal y como se muestra en la figura [] y se obtuvo la inductancia L mediante el método del 63.2%.

Figura[]

### Identificar potenciómetro

Aunque la expresión teórica que rige el comportamiento del potenciómetro es sencilla, el modelo elegido carecía de los parámetros necesarios en su hoja de especificaciones para calcular dicha expresión, véase, la resistencia en el ángulo máximo y el valor de dicho ángulo.

Por tanto, se identificaron empíricamente las características del potenciómetro. Para ello se creó un banco de pruebas, msotrado en la figura [] que consiste en colocar el potenciómetro solidario a una plataforma en el centro de una cuadrícula polar, y conectar al el dial un brazo. Al mover el brazo a una cierta posición, se mide el ángulo en la cuadrícula polar y se compara frente a la señal obtenida. Tras un ajuste por mínimos cuadrados, se observa que el comportamiento del potenciómetro es lineal, como cabía esperar, y se obtiene una relación con un coeficiente de correlación extremadamente cercano a 1, tal y como se muestra en la figura [].

### Identificación del sensor de flexión

Estos sensores, al igual que el potenciómetro, carecen de una caracterización adecuada en su hoja de características, por tanto, se procede a crear un bancode pruebas , mostrado en la figura [], para obtener una relación entre señal y posición.

Este sensor se condiciona mediante un divisor de tensión, y es la señal de salida de este divisor de tensión los que se caracteriza. El proceso consistió en comparar la señal obtenida del divisor de tensión con el ángulo de flexión en el que se encontraba el sensor. A su vez, esta posición angular se midió con un potenciómetro rotativo adecuadamente caracterizado, conectado solidariamente al eje de rotación del banco de pruebas.

## Modelado empírico

Una vez identificado el sistema, se compara su comportamiento al comportamiento teórico.

Como se puede observar en la figura [], el comportamiento no es el mismo, mientras que en el modelo teórico, la posición del péndulo aumenta cada vez más lento hasta converger en un valor, empíricamente se observa un aumento constante de la posición que tiende a infinito. Esto se debe a que, en este sistema, la masa del péndulo es tan reducida que el motor eléctrico es capaz de moverla sin problema. Si se desprecia el efecto de la masa en el modelo teórico, se obtiene la respuesta en forma de rampa mostrada la figura [], en la que se observa que el comportamiento teórico es similar al real.

Dadas estas diferencias entre el prototipo real y el modelo teórico, se decide identificar el sistema tomando muestras y utilizando la toolbox de identificación de Matlab, tal y como se muestra en la figura [].

Figura []

## Diseño de controladores

### Consideraciones

En primer lugar, para el control en posición de cada actuador no se toma directamente la posición de una falange, sin que a esta posición se le suma un offset, de tal forma que el exoesqueleto “sigue” al dedo, pero mantiene una distancia con este. De lo contrario, el exoesqueleto seguiría al dedo en el movimiento de flexión, pero impediría la extensión, por lo que los sensores de flexión no podrán registrar una señal para extender el exoesqueleto. Esto causaría que el exoesqueleto solo asistiría para cerrar la mano, pero una vez cerrada resultaría imposible abrirla de nuevo.

Este offset se puede calibrar en función de el retardo del actuador o/y de la sobre oscilación provocada por el controlador. Respecto al retardo, este offset debe ser tal que si se extiende el dedo a máxima velocidad, el dedo no llegue a chocar contra el actuador, que aún no se ha movido. Por otro lado, según la sobre oscilación, este margen debe ser lo suficientemente grande para que al sobre oscilar, la pieza quede dentro del margen, sin llegar a chocar contra el dedo.

En segundo lugar, se desea controlar el sistema en posición, pero a efectos prácticos, este sistema es de tipo 1, es decir, la consigna controla la velocidad. Para controlarlo en posición, se realimenta unitariamente el sistema, como se muestra en la figura[], tomando este bucle como la planta sobre la que se va a trabajar, tal y como se muestra en la figura [], y aquella para la que se van a diseñar los controladores.

Por tanto, el sistema pasa a tener la respuesta mostrada en la figura []. Sobre esta nueva respuesta se pueden aplicar los métodos de diseño de controladores empíricos escogidos, siendo estos Ziegler-Nichols a través de la respuesta ante escalón y Chien-Hrones-Reswick.

Figura []

### Parámetros de diseño

Los parámetros de diseños son comunes para los distintos controladores y se derivan de los objetivos de este TFG, vistos en el capítulo de indtorucción [], así como de observaciones del prototipo construido. Estos parámetros son los siguientes:

* Tiempo de respuesta los más rápido posible
* Oscilación mínima (<10%), preferiblemente nula
* Constante Integrativa de PI o PID baja, preferiblemente nula debido a una zona muerta del actuador al recibir una señal de control reducida. La componente integral iría aumentando el valor de la señal de control cada vez más hasta que sea una señal suficientemente grande como para superar la zona muerta. Al mover el actuador con una señal más grande de lo debido, este se pasa de la posición deseada y vuelve a empezar este ciclo.

## Control en posición

### Lugar de las raíces

Utilizando el lugar de las raíces (LDR) del modelo, mostrado en la figura [], se diseña un control de tipo P tal que la velocidad de respuesta sea máxima y no exista oscilación. Esta constante P será la que provoque que los polos se encuentren en el punto de dispersión y viene dada por la expresión [].

### Ziegler-Nichols con entrada escalón

A partir de la tabla [] y la respuesta ante escalón del sistema, se obtienen las constantes para un control P, PI y PID. Comparando estas respuestas, tal y como se muestra en la imagen [] se determina que las más satisfactoria será tal.

### Chien-Hrones-Reswick

El método Chien-Hrones-Reswick (CHR) de diseño empírico de controladores de la familia PID es una variante del método Ziegler-Nichols que permite una rápida respuesta con una reducida sobre oscilación tomando como criterios de diseño una sobre oscilación deseada de un 20% o un 0%. Dado que estas características coinciden en un principio con los requisitos del controlador del exoesqueleto, se calculan las constantes para controladores P, PI y PID con una sobre oscilación del 0% utilizando la [].

Como se puede observar en la [], en este caso específico el controlador no es capaz de conseguir un 0% de sobre oscilación, sin embargo, se consigue una sobre oscilación menor que en Ziegler-Nichols y con una respuesta más rápida con un controlador tipo PID.

## Control de fuerza

La fuerza que ejerce un actuador sobre la mano se mide indirectamente a través de la intensidad que consume el motor. Tomando una medida cruda de esta intensidad obtenemos una señal muy ruidosa, como se muestra en la figura []. Para poder trabajar con esta señal, se procede a diseñar un filtro de paso bajo. Se puede observa que a menor frecuencia de corte… por lo que se optas por un filtro con las siguientes características:

…

Una vez aplicado este filtro, la señal es más tratable, tal y como muestra la figura []. Para controlar la intensidad se diseña un controlador tipo P mediante el lugar de las raíces, siguiendo el mismo procedimiento que aquel diseñado para el control en posición.

# Resultados

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

Los resultados de este TFG se muestran en dos apartados: diseño y control. El apartado de diseño consiste en los logros a nivel electromecánico, de estorbo y coste. El apartado de control muestra una evaluación de los distintos controladores diseñados según su respuesta transitoria, y de manera anecdótica, un estudio de la respuesta en frecuencia del controlador elegido finalmente.

## Diseño

### Funcionalidades

El exoesqueleto es capaz de aportar X N de fuerza y asistir en un rango de movimiento de 90 grados para cada falange de la mano.

El exoesqueleto es capaz de cambiar entre los modos de seguimiento de posición y asistencia al agarre mediante una señal EMG.

### Estorbo

El volumen de cada actuador es de cm3. Nótese que, concatenando varios actuadores, parte del volumen que ocupa uno se superpone con el volumen del otro, por lo que el uso de dos actuadores no equivale al doble de volumen ocupado, sino menos.

Cada actuador independiente pesa 20g y se estima que la electrónica y la batería pesarían en conjunto 150g. Esto resulta en un total de 390g, que se encuentra dentro del rango propesto en el apartado de objetivos [].

Por último, los actuadores del exoesqueleto presentan un estorbo de 2FWs, sin embargo, debido a la plataforma para fijarlos al reverso de la mano, el exoesqueleto como conjunto presenta un estorbo de unos 3FWs.

### Coste

El coste de cada actuador independiente fue de x €, cada falange sensorizada del guante añade un coste de x € y la electrónica x€. Estimando un coste de batería de x € el total de un guante completamente actuado sería de X ; X de base + X por cada falange. Aunque no sería necesario actuar todas las falanges en todos los casos de uso, ya que su naturaleza modular permite elegir qué dedos actuar y adaptarse a las necesidades específicas de cada usuario.

## Control

### Tipo P mediante lugar de las raíces

### Tipo P mediante Ziegler-Nichols con respuesta ante escalón

### Tipo PID mediante Chien-Hrones-Reswick

### Comparación de controladores de posición

### Tipo P para intensidad mediante lugar de las raíces

### Respuesta en frecuencia

Cabe destacar la importancia de la respuesta en frecuencia en esta aplicación, ya que se puede observar de forma inmediata la representación física de la respuesta en frecuencia abriendo y cerrando la mano, cada vez más deprisa. Llegada a una cierta frecuencia en este movimiento, el sistema pierde ganancia, lo que hace que el exoesqueleto deje de seguir adecuadamente a la mano, tal y como se puede observar en la figura [].

Figura[]

## Conclusiones

Se ha diseñado y construido un sistema de actuadores modulares de centro remoto con un peso, tamaño y coste reducidos para ejercer fuerza sobre los dedos de la mano, así como asistir al movimiento de flexión y extensión.

Se ha diseñado un controlador tipo P para controlar en posición y otro para controlar en fuerza dichos actuadores.

Se ha diseñado la estructura del exoesqueleto de tal forma que sea un sistema modular, reduciendo su potencial coste y estorbo.

Se ha creado un guante sensorizado que, en conjunto con un sensor de EMG, capta de las señales de control del sistema, tanto la detección de intencionalidad como la posición de las falanges de los dedos.

# Bibliografía