# 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)

Reducir el coste

Accesibilidad de materiales y tecnología

Hacer un sistema completamente actuado, no infraactuarlo

Cubrir los mvtos de [tal cual y pascual]

## No objetivos

Optimización

Miniaturización de la electrónica

Cumplimiento de normativa

Potenciación más allá del uso estándar del agarre para aplicaciones del día a día

Sustitución de la mano

Eficiencia energética

## 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** [Alguien de [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, así como estudios más breves 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 FIG X:X. Entre estos métodos de clasificación, los más comunes son según finalidad [], según topología [], que define el método por el cual el exoesqueleto resuelve el problema de los ejes coincidentes, expuesto más adelante, y según método de actuación []. 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.

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 que trabaje conjuntamente con el cuerpo** de forma adecuada. Los tipos de topología identificados en estudios anteriores varían [][][], por lo que en este apartado se propone una breve clasificación 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 fig X:X, evitando así posibles lesiones y otros efectos no deseados. (Fang, Xie, & Liu, 2009)

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.
* Mecanismos de **centro remoto** (MCRs).
* Uso de las propias articulaciones de la **mano como parte del mecanismo**.
* Aplicar fuerza mediante **mecanismos flexibles** y dejar al dedo, junto al mecanismo, **adaptarse a la forma que necesite** (*compliant mechanisms*).

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. Aunque sencilla, esta solución crea la necesidad de un espacio entre los dedos para colocar estas articulaciones, normalmente bisagras. [][]

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, limitando a aquellas con dedos más anchos. (Birouas, Catalin, Dzitac, & Dzitac, 2020)

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 ese 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 suelen colocar 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 el raíl curvo, el 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, y el mecanismo de piñón cremallera simétrico, al que se refieren en (Nakagawara, Kajimoto, Kawakami, & Tachi, 2005) como “*circuitous joint”.*

Articulaciones de la mano como parte del mecanismo

Mecanismos flexibles

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:

* Actuadores fluídicos con *bladders*
* Deslizamiento constreñido (*constrained sliding*)
* Mecanismo infra actuado
* Mecanismo 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.

Actuadores fluídicos con bladders

Se basan en **cámaras elásticas 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 la figura XX. Esto empuja al dedo, creando un movimiento y asistiendo al agarre. Esta tecnología es de las más populares en la literatura debido al poco estorbo sobre los dedos y una inherente seguridad gracias a su flexibilidad y capacidad de adaptación la geometría del dedo. Como ejemplos recientes se encuentran [] [] []

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.

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 en (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.

Esta tecnología se suele orientar rehabilitación por las trayectorias anteriormente mencionadas y su elevado estorbo, y es con diferencia la más abundante en la literatura [], contando con ejemplos en los últimos años como [][][]

Mecanismo actuado

Esta tecnología proporciona **un grado de libertad para cada articulación**. Como resultante, se tiene un gran control sobre el dedo y se pueden realizar una amplia variedad de movimientos. El estorbo sobre el dedo es menor que en un mecanismo infra actuado gracias a la falta de elementos de transmisión entre falanges, pero le estorbo general aumenta por un mayor número de transductores, sus respectivas transmisiones y su mayor demanda energética, que se traduce en una mayor fuente de alimentación.

En este acercamiento se suelen utilizar RCMs o ejes coincidentes con piezas tiradas por cable bowden y se suelen aplicar a rehabilitación por a su precisión y nivel de estorbo.

Como ejemplos de esta tecnología se encuentran [][]][]

Base-distal

En la actuación base-distal, el mecanismo de transmisión suele ir anclado al reverso de la mano o antebrazo y **actua solamente sobre la punta del dedo**, es decir, la falange distal, de ahí su nombre. Aunque su estorbo es elevado, 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 [][][].

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, el 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. 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).

Cable a tracción

Esta tecnología utiliza cables para **tirar del extremo de las falanges**, ejerciendo de tendones artificiales como en (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, como en (Chiri, y otros, 2011) y (Cempini, Cortese, & Nicola Vitiello, 2014)

Comparativa:

Bladders: seguro, pero necesitas un compresor, ups, y despídete de la precisión

Constrained sliding: solución presenta un estorbo mínimo en la mano, aunque se suelen utilizar actuadores en otra parte del cuerpo y transmisión por cables, lo que implica estorbo en otra parte del cuerpo y cables entre. La interfaz mano-exoesqueleto debe ser solidaria para evitar el problema de los ejes coincidentes.

Bowden ventajas y limitaciones muy similares a constrained sliding, no necesitas converitr de cable a otro mecanismo si usas bowden desde el ppio, más encumbrance en el dedo pero muy ligero y menos frágil al tener -1 piezas móviles.

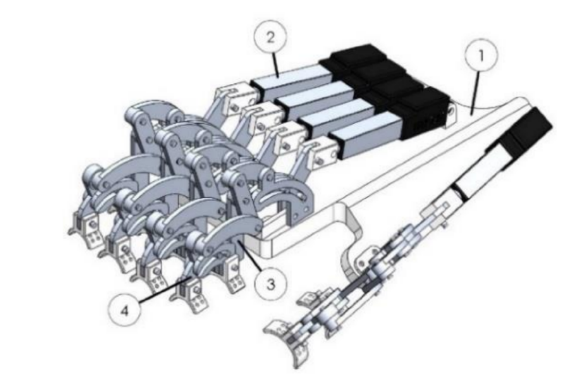
Cable a tracción inferior: igual que bowden pero menos estorbo. Interfieren bastante con la somatosensación ya que deben ir anclados por abajo.

Cable a tracción superior: se necesita guiar al cable hasta la conexión de la pieza. Ya que la tensión del cable debe pasar por debajo del eje de rotación si se desea que empuje hacia abajo, se debe llevar el cable por abajo, coincidiendo con la somatosensacion, o por el lado, ensanchando el espacio necesario entre los dedos.

Tras una evaluación de los distintos sistemas se decidió RCM. Esto se explica en detalle en el capítulo X

A continuación, se presentan los exoesqueletos encontrados en la literatura similares a la solución mecánica implementada en este tfg, independientemente de su finalidad. Sus características se encuentran resumidas en la tabla X.X.

(Hernández-Santos, y otros, 2021)

Exoesqueleto de dedo para rehabilitación después de un trauma neurológico, como un accidente cerebrovascular.

Mecanismo de un grado de libertad que genera el movimiento de flexión y extensión de las falanges proximal, medial y distal.

Imagen que contiene persona, foto, mano, secadora

Descripción generada automáticamenteMedidas 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.

La posición y el desplazamiento continuados para el análisis estructural se desarrollaron siguiendo un análisis estático para conocer la deformación que presentan los eslabones de la estructura cuando se aplica una carga externa en el mecanismo.

Se fabricó un prototipo con ABS mediante fabricación aditiva.

(Sandison, y otros, 2020)

Un arma de fuego

Descripción generada automáticamente con confianza mediaHandMATE (Hand Movement Assisting Therapy Exoeskeleton); para terapia en el hogar después de un accidente cerebrovascular.

Cada dedo es impulsado por un actuador lineal que proporciona flexión y asistencia de extensión.

Resistencias sensibles a la fuerza miden en el agarre y extensión.

Asistencia basada en control de admitancias.

Errores en la fuerza <1% y comparable a una mano sana sin asistencia.

Se comunica de forma inalámbrica con un Tableta Android que cuenta con ejercicios guiados, juegos terapéuticos y retroalimentación del desempeño.

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

Imagen que contiene lego, juguete, tabla, pieza

Descripción generada automáticamenteExoesqueleto para rehabilitación.

Diseño asimétrico de par, posición y trayectoria.

Infra actuado. Confía en la adaptación (*comilance*) del cuerpo para el posicionamiento adecuado de las falanges.

Impreso en 3D.

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

Diagrama, Dibujo de ingeniería

Descripción generada automáticamenteModos de control activo y pasivo para rehabilitación neural.

Hecho en FPGA

App Android

Control PD para rehabilitación pasiva basada en cinemática inversa, control de impedancias para rehabilitación activa, cambiando de modos con un sensor en la punta del dedo.

Imagen que contiene objeto, interior, tabla, bicicleta

Descripción generada automáticamente

(Díez, y otros, 2018)

Terapias de asistencia y rehabilitación.

Transmisión modular con enganches *snap-in* a presión.

Análisis dinámico y cinemático en simulación con software AnyBody y comparación con prototipo.

(Battezzato, 2014)

Imagen que contiene tabla

Descripción generada automáticamenteAnálisis kineoestático y optimización estocástica de mecanismo infraactuado basado en dos dos dobles paralelogramos para el aumento de la fuerza orientado a actividades extravehiculares.

(Enriquez, Narváez, & Vivas, 2014)

Imagen que contiene interior, persona, tabla, sostener

Descripción generada automáticamenteRehabilitación de mano en personas que hayan sufrido un Evento cerebrovascular, en el cual la movilidad de la mano haya sido afectada, impidiendo la realización de actividades de la vida cotidiana.

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 por cada uno de los dedos.

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

Imagen que contiene moto, tabla, cuarto, hombre

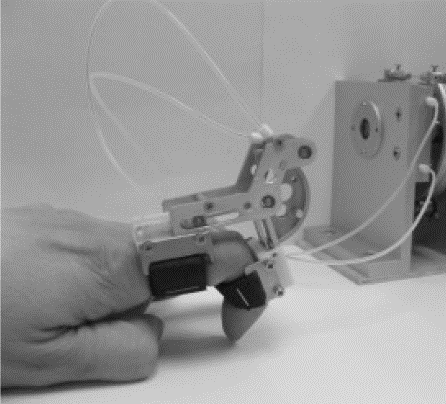
Descripción generada automáticamenteInteracción háptica en el contexto de la realidad virtual y la tele operación.

El dispositivo permite ejercer fuerzas controladas sobre las yemas de los dedos del índice y pulgar del operador.

Optimizar la precisión y resolución de la fuerza. Diseño compacto. Mejora de la transmisión gracias a la integración de la reducción de velocidad en las articulaciones.

Un sensor de fuerza diseñado a medida y electrónica integrada.

Caracterización experimental.



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

4 dosf para actuar el dedo índice.

Movimiento bidireccional para cada articulación mediante transmisión por cable.

Juntas prismáticas para la coincidencia de ejes de rotación del dedo y exoesqueleto.

(Fang, Xie, & Liu, 2009)

Imagen que contiene motor

Descripción generada automáticamenteMano maestra para telepresencia.

Doble paralelogramo para mantener la transmisión 1:1.4:1 durante todo el movimiento.

Flexión y extensión.

Uso de FPGA

Modos de operación con o sin contacto, dependiendo de si se desea un movimiento libre o limitado.

Control de posición en modo sin contacto, control de posición en modo con contacto.

Imagen que contiene interior, juguete, tabla, azul

Descripción generada automáticamente

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

Mano maestra para telepresencia.

Uso de “circuitous joint”

Realimentación de fuerza por detección de contacto.

Arquitectura maestro-esclavo experimetnal

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

Imagen que contiene interior, tabla, pequeño, cuarto

Descripción generada automáticamentePara actividades extra vehiculares.

Reducción a 3 dedos, meñique y anular actuados en conjunto.

Sensores de presión en los dedos como input.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 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 | -- |

## 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 de la maqueta

Proceso, datos, diagramas de flujo

Primero a elegir un motor, potenciómetro y diseñar el mecanismo de barras, así como la bancada. Identificación en apartado de modelado y control.

Elección de motores: velocidad de cierre de la mano en 0.5s (empírico). A 12V o 5V. Elección de reductora.

8 iteraciones hasta que estoy satisfecho

* Iteración 1: ejes como tuercas
* It2: clipsa
* It3: …
* Itn-1: cojinetes a base de boli bic
* Itn: ajuste de tolerancias

Etapa de potencia: elegida a partir del motor.

* Medida de I: hueco para poner resistencia shunt o amperímetro, vaya

Ruido en la sensórica: “desacoplo” de etapa de potencia y sensores

Obtención de setpoint: guante sensorizado

Concatenación de módulos.

Detección de la intencionalidad con EMG

Plataforma para colocar los módulos

## Modelado y control

Control en posición

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

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.

Diseño de reguladores: requisitos

* Overshoot mínimo
* Menor tiempo de reacción

Diseño por LDR

Diseño por ZN-Escalon

Diseño por ZN-frecuencia?

Diseño por el otro que no me acuerdo ahora como se llama

Todo/nada

Diseño a ojo sobre la maqueta

# Resultados

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

## Conclusiones

“se ha conseguido..:”

# Bibliografía

(numerada respecto a caps)

## Fuentes

## Figs

## Tablas

## Imgs

# Anexos

## Código

## Planos

## Glosario

…