

Universidad Internacional de La Rioja (UNIR)

ESIT

Máster Universitario en Industria 4.0

**Diseño, fabricación y
divulgación del
prototipo de una
prótesis robótica**

Trabajo Fin de Máster

presentado por: Casademont Ferrés, Enric

Director/a: Rainer Granados, José Javier

Índice

1. Resumen.....	7
2. Introducción	8
2.1. Motivación.....	8
2.2. Planteamiento del trabajo.....	9
2.3. Estructura.....	9
3. Contexto y estado del arte.....	10
3.1. Precursores.....	10
3.2. Breve historia de las prótesis	11
3.3. La actualidad de las prótesis	14
3.4. Movimiento <i>maker</i>	14
3.4.1. Proyectos sin ánimo de lucro	14
3.5. Propuestas parecidas a este proyecto	15
4. Contribución.....	16
4.1. Objetivos.....	16
4.2. Metodología	16
4.3. Partes y componentes de la propuesta	18
5. Anatomía de la prótesis.....	19
5.1. Concepción del brazo	19
5.2. Muñeca	20
5.3. Mano.....	22
6. Diseño de los componentes mecánicos	24
6.1. Muñeca	24
6.2. Mano	25
7. Componentes electrónicos.....	27
7.1. Motores.....	27
7.2. Control	30
7.3. Alimentación	32
8. Diseño de la electrónica	33

8.1. Realización del programa.....	34
8.1.1. Mano.....	34
8.1.2. Muñeca.....	35
8.1.3. Programa.....	36
9. Fabricación	37
9.1. Laminado	37
9.2. Impresión	39
10. Ensamblaje.....	42
11. Control cerebral	44
11.1. OpenBCI.....	44
11.2. Tecnología útil para la prótesis	45
12. Presupuesto	46
12.1. Presupuesto para la construcción del prototipo desenvuelto en este proyecto ..	46
12.1.1. Material de mecanizado.....	47
12.1.2. Material electrónico	47
12.1.3. Fabricación.....	48
12.1.4. Presupuesto total.....	48
13. Divulgación de la tecnología	50
14. Conclusiones	51
15. Trabajo futuro	52
16. Bibliografía	53
A. Arduino.....	57
B. Servomotores.....	58
C. Programa.....	59
D. Fotografías de pruebas.....	61
E. Piezas finales	64
F. Fotografías de los pasos de montaje.....	70

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: El hombre de Vitruvio, de Leonardo Da Vinci.	11
Ilustración 2: Prótesis de Tabaketenmut.	12
Ilustración 3: Ambroise Paré.	13
Ilustración 4: Prótesis tipo hook.	13
Ilustración 5: Flexor superficial de los dedos.	19
Ilustración 6: Yaw, Pitch y Roll referenciados en una mano.	20
Ilustración 7: robot colaborativo UR3e de CFZ Cobots.	21
Ilustración 8: compliant mechanism.	22
Ilustración 9: Esquema de un manipulador paralelo esférico.	22
Ilustración 10: Pinza industrial.	23
Ilustración 11: modelo de manipulador esférico paralelo en thingverse.	24
Ilustración 12: Diseño propio del mecanismo de la muñeca.	25
Ilustración 13: modelo de pinza en varios formatos parametrizados disponible en la plataforma GrabCad.	26
Ilustración 14: diseño del mecanismo de la mano.	26
Ilustración 15: Esquema conceptual del propósito de la electrónica.	27
Ilustración 16: Servomotor usado para el prototipo.	28
Ilustración 17: Ciclo PWM que requieren los servomotores elegidos para despenalizarse hasta un ángulo concreto.	29
Ilustración 18: Soportes de los servomotores en la muñeca y ubicación de estos.	29
Ilustración 19: Soportes de los servomotores en la mano y ubicación de estos.	30
Ilustración 20: rueda dentada con barra y con orificio para poder adquirir la tracción del servomotor.	30
Ilustración 21: Arduino UNO.	31
Ilustración 22: Esquema electrónico.	33
Ilustración 23: Esquema de las comunicaciones.	34
Ilustración 24: Posición 0º.	35
Ilustración 25: Posiciones extremas de la mano.	35
Ilustración 26: ejemplos de zonas que auto sustentadas de las piezas del diseño.	38
Ilustración 27: diferentes tipos de infill.	38
Ilustración 28: tiempo de impresión, y cantidad de PLA necesario para la fabricación de todas las piezas de la muñeca menos la base y la plataforma superior.	40
Ilustración 29: Captura de la aplicación Kasa de tp-link donde informa del consumo del enchufe inteligente HA110.	40
Ilustración 30: Ensamblaje de todo el mecanismo con los motores.	42
Ilustración 31: Electroencefalograma.	44

Ilustración 32: Elementos del DIY Neurotechnologist's Starter Kit de OpenBCI.....	45
Ilustración 33: ROBSG HS3230 30KG 25T.	47
Ilustración 34: Imprimiendo piezas de prueba.	61
Ilustración 35: Una de las primeras versiones del mecanismo de la muñeca.	61
Ilustración 36: Pruebas de los soportes de los motores.....	62
Ilustración 37: Versión próxima a la final de la muñeca.	62
Ilustración 38: Primera versión funcional de la muñeca.....	63
Ilustración 39: Primera versión de la mano.....	63
Ilustración 40: Barra con agujero hexagonal.....	64
Ilustración 41: Barra simple.....	64
Ilustración 42: Base de la mano.	64
Ilustración 43: Base de la muñeca.....	65
Ilustración 44: Conector de 90º	65
Ilustración 45: Conector del nivel 1.....	65
Ilustración 46: Conector del nivel 2.....	66
Ilustración 47: Conector del nivel 3.....	66
Ilustración 48: Dedo de la mano.	66
Ilustración 49: Plataforma superior de la muñeca.	67
Ilustración 50: Rueda central del nivel 1.....	67
Ilustración 51: Rueda central del nivel 2.....	67
Ilustración 52: Rueda central del nivel 3.....	68
Ilustración 53: Rueda esclava de la mano.	68
Ilustración 54: Rueda tractora de la mano.	68
Ilustración 55: Rueda de los motores de la muñeca.	69
Ilustración 56: paso 1.....	70
Ilustración 57: Paso 2.1.....	70
Ilustración 58: paso 2.2.	70
Ilustración 59: Paso 3.	71
Ilustración 60: Paso 4.	71
Ilustración 61: Paso 5.	71
Ilustración 62: paso 6.	72
Ilustración 63: Paso 7.	72
Ilustración 64: Paso 8.	72
Ilustración 65: Paso 9.	73
Ilustración 66: Paso 10.1.	73
Ilustración 67: Paso 10.2.	73
Ilustración 68: Paso 11.	74

Índice de tablas

Tabla 1: Cronograma del desarrollo del proyecto	17
Tabla 2: Parámetros importantes de laminado.	39
Tabla 3: costes de fabricación.	41
Tabla 4: Material de mecanizado.....	47
Tabla 5: Material electrónico.	48
Tabla 6: Costes de fabricación.	48
Tabla 7: Presupuesto total.....	49
Tabla 8: Especificaciones Arduino UNO.....	57
Tabla 9: Especificaciones de los servomotores.	58

1. Resumen

En este proyecto se plasma el proceso de diseño y fabricación de un prototipo de una **prótesis robótica** cuya característica principal es que esté al alcance de cualquier persona que tenga conocimientos básicos de **impresión 3D** y de programación de microcontroladores.

Primero se detalla el procedimiento de diseño de los elementos mecánicos. Seguidamente se explica la elección de los componentes electrónicos. También se justifica la posibilidad real de poder construir la prótesis final por un precio muy por debajo de las existentes en el mercado y, finalmente, se divultan los resultados en una plataforma de **democratización de tecnologías**.

Además, se explica el recorrido que han tenido las prótesis a lo largo de la historia de la humanidad y se hace un breve estudio sobre las tecnologías necesarias para poder controlar la prótesis final mediante el pensamiento.

2. Introducción

Una prótesis es un dispositivo diseñado para reemplazar una parte faltante del cuerpo o para hacer que una parte del cuerpo trabaje mejor («Prótesis», s. f.). Una prótesis ortopédica es aquella que busca no solo reemplazar un miembro del cuerpo, sino cumplir lo más fielmente posible su función. Entre estas últimas encontramos las prótesis robóticas que, en este proyecto, se entiende que su peculiaridad es que contienen una mínima electrónica y usan mecanismos típicos de la robótica.

Y es que sustituir un miembro perdido por un aparato que ayude al perjudicado es algo que se hace desde los tiempos antiguos. A pesar de eso, salvo algunas excepciones, es relativamente reciente que se consigan realizar prótesis que realicen las funciones originales. En la actualidad, este campo involucra no solo la medicina, sino también varias ramas de la ingeniería y ciencias de materiales. Además, como pasa con la mayoría de los ámbitos tecnológicos, avanza a una gran velocidad con nuevos descubrimientos cada poco tiempo.

2.1. Motivación

La realización de este proyecto en primer lugar viene de la gran curiosidad hacia el mundo de las prótesis robóticas. De saber acerca de ellas, como está la situación actual y como de avanzadas están las tecnologías que permiten recrear con la máxima calidad posible la anatomía humana. Además, sin profundizar en el tema, puede parecer que sea un ámbito que tecnológicamente no avance al ritmo que lo hacen otros sectores como el industrial.

En segundo lugar, por poder llevar a la práctica conocimientos teóricos adquiridos en el máster sobre la fabricación aditiva, terreno muy interesante y claramente clave en los próximos años.

Además, durante el periodo de pandemia vivido durante el 2020 se han visto públicamente muchas de las posibilidades que ofrece la impresión 3D, e incluso ha sido un excelente ejemplo de su uso desinteresado, viendo la gran cantidad de personas que han ayudado mediante la fabricación de equipos de protección individuales para los profesionales y voluntarios que lo necesitaban.

Finalmente, una gran motivación ha sido trabajar en un proyecto cuyo fin es ayudar a personas que ven limitadas sus posibilidades de actuación normal por causa de una amputación añadiendo a ello la idea de que esta ayuda sea desinteresada, pues en el caso de que el proyecto llegue a su ejecución final no se prevé una obtención de beneficios lucrativos para el ingeniero diseñador.

2.2. Planteamiento del trabajo

Lo que se quiere conseguir con este proyecto es el diseño de un prototipo, teniendo en cuenta que el mismo terminaría cumpliendo las especificaciones de precio, funcionalidades y simplicidad que se quieren conseguir.

En cada apartado se hace referencia a como se aplicarían las determinaciones incluidas en el mismo a la prótesis final, con lo cual se quiere tener constantemente como punto de referencia la utilidad de todas las soluciones que se van proponiendo de caras a la viabilidad del prototipo.

2.3. Estructura

Este proyecto se va a estructurar siguiendo el orden por el que se han ido empezando las distintas secciones.

Se va a empezar por una introducción teórica, y una explicación de los objetivos que se persiguen.

Seguidamente se va a tratar el planteamiento mecánico de la prótesis y luego el electrónico. Como último apartado aplicado se va a hablar de la fabricación de las piezas y de su montaje.

A continuación, se van a tratar temas para tener en cuenta si se quisiera continuar trabajando en el proyecto como es el control neuronal de la prótesis y el presupuesto esperado de su fabricación (en el apartado 15 Trabajo futuro se resumen estos apartados).

Finalmente, antes de las conclusiones, se explica el proceso que se ha seguido para divulgar el prototipo resultante al finalizar este proyecto, fase esta que, tal como se después se desarrolla, se considera de suma importancia.

3. Contexto y estado del arte

Actualmente empieza a ser posible el desarrollo de prótesis funcionales que puedan sustituir casi el 100% de las funciones de las extremidades perdidas. El concepto más genérico de una prótesis es una extensión artificial diseñada con el fin de mejorar o reemplazar una función, una parte o un miembro completo del cuerpo humano afectado.

La capacidad de fabricar dichas prótesis es, en gran parte, debido a las nuevas tecnologías de fabricación, a nuestro amplio y específico conocimiento sobre la anatomía humana y al descubrimiento de nuevos materiales. Pero también juega un papel muy importante toda la experiencia que ha ido adquiriendo el ser humano a lo largo de su historia referente a la construcción de elementos sustituyentes de miembros extirpados.

3.1. Precursores

El conocimiento del cuerpo humano ha avanzado exponencialmente durante los últimos años construyendo una nueva rama en las ciencias, la biónica. La biónica es la ciencia que estudia los sistemas naturales y puede encontrar principios aplicables a la ingeniería, transferibles, a su vez, al ámbito artificial (*Miralles y Giuliano - 2008 - Biónica eficacia versus eficiencia en la tecnolog.pdf*, s. f., p. 1).

En los años 1970 ya se utiliza este concepto (*González - 2005 - ROBÓTICA Y PRÓTESIS INTELIGENTES.pdf*, s. f.), lo encontramos en las series de televisión “El hombre nuclear” y “La mujer biónica” donde los protagonistas habían perdido alguna extremidad y estos fueron sustituidos por elementos artificiales que les permitían tener poderes sobrehumanos.

Leonardo da Vinci fue el primer ingeniero biónico en estudiar los principios de funcionamiento de los seres vivos para aplicarlos en el diseño de máquinas. Uno de los estudios más populares es “El hombre de Vitruvio”, un dibujo de un hombre desnudo con los brazos y piernas sobreimpresas en dos posiciones diferentes, una de ellas dentro de un círculo, y la otra dentro de un cuadrado. Este dibujo pretende estudiar las proporciones naturales del cuerpo humano y está acompañado de notas anatómicas del propio autor.

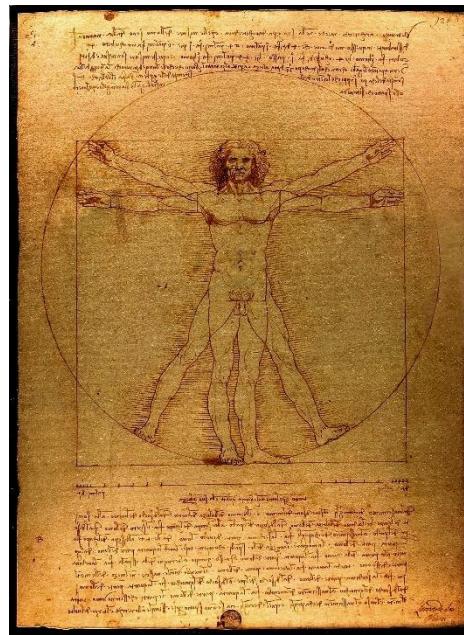


Ilustración 1: *El hombre de Vitruvio*, de Leonardo Da Vinci.

Fuente: («Hombre de Vitruvio», 2013).

Es necesario también hacer mención a la biomecánica, una disciplina científica que estudia el movimiento del cuerpo humano y sus diferentes circunstancias. El análisis del movimiento del cuerpo humano es un estudio imprescindible para la construcción de prótesis.

Mientras la anatomía humana nos muestra, en reposo y en un momento dado, las formas de un proceso fisiológico, la biomecánica permite que comprendamos el funcionamiento de las fuerzas internas y externas sobre las estructuras.

La biomecánica ha tenido grandes avances desde su origen con Galileo Galilei, dividiéndose en dos ramas: biomecánica experimental y biomecánica computacional. La biomecánica computacional ha sido beneficiosa en muchas áreas de la medicina, permitiendo aplicar la mecánica como herramienta de análisis (Garzón-Alvarado *et al.* - *Sobre la aparición de la biomecánica y la mecanobi.pdf*, s. f.). No obstante, la mayor aplicación ha sido en solucionar problemas ortopédicos.

3.2. Breve historia de las prótesis

A lo largo de la historia, el principal motivo para fabricar piezas que remplazaran la ausencia de algún miembro ha acostumbrado a ser por razones estéticas, luchando así contra la apariencia de “no estar completo”. Sin embargo, en esta breve introducción histórica hablaremos del recorrido de los elementos que su propósito era el de realizar la tarea (total o parcial) de la parte ausente.

La primera prótesis funcional de la cual se tiene constancia está datada entre el 950 y el 750 a.C. Se trata de un dedo gordo encontrado en el pie de una momia (Finch, 2011). Parece que dicha prótesis, más que dar una imagen completa al pie, ayudaba a caminar correctamente a su dueña.



Ilustración 2: Prótesis de Tabaketenmut.

Fuente: (Finch, 2011).

En la edad media se extendió el típico y conocido uso de la pata de palo o del garfio, sus funciones eran muy básicas ya que lograban poco más que poder sostener el individuo de pie o poder sujetar ciertos objetos respectivamente. También se tiene constancia de unos miembros que eran capaces de sostener un escudo en el campo de batalla.

En el Renacimiento, Ambroise Paré, para muchos, conocido como el “padre de la cirugía moderna” (Puerta, Solá, & García, 2018) trabajó con miembros artificiales (“piernas de palo o metal; brazos y manos capaces de sostener una pluma; narices y ojos de oro y plata; dentaduras postizas con dientes de tiburón o trazos de marfil” (Maxit, s. f., p. 3)) y se dice que confeccionó una mano de hierro con articulación móvil en el codo y los dedos.

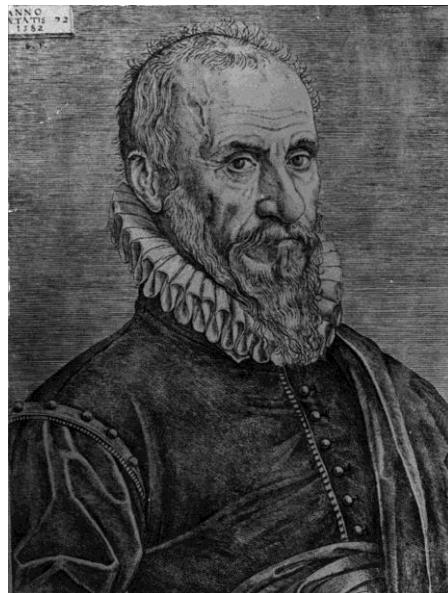


Ilustración 3: Ambroise Paré.

Fuente: (Redacción, 2018).

El hecho de evitar perder empleados operativos, durante el siglo XX se perfeccionaron las técnicas como el hook, que permitía la acción de abrir y cerrar la mano mediante movimientos en la cadera, pudiendo devolver así el amputado a la vida laboral (Loaiza y Arzola - 2011 - *EVOLUCIÓN Y TENDENCIAS EN EL DESARROLLO DE PRÓTESIS.pdf*, s. f., p. 2).



Ilustración 4: Prótesis tipo hook.

Fuente: («99P - Prótesis de mano con control motor by Fillauer | MedicalExpo», s. f.).

A partir de allí, hasta llegar a nuestros días se han ido introduciendo mejoras como implementar motores alimentados por baterías y conseguir reacciones a estímulos naturales del cuerpo como las basadas en lecturas mioeléctricas de las contracciones musculares (Loaiza Bernal, 2012, p. 17).

3.3. La actualidad de las prótesis

Actualmente, la aparición de nuevos materiales, el avance en las formas de fabricación y la invención de nuevas formas de transmisión de movimiento, han significado un gran avance en la fabricación de prótesis.

Existen prótesis ortopédicas simples altamente extendidas en todo el mundo, desde grandes laboratorios pretendiendo recrear un elemento estrictamente fiel al original hasta instrucciones en internet para construir tu propia prótesis con piezas de Lego (*Building a Prosthetic Arm With Lego*, s. f.).

En este proyecto se entiende como prótesis robótica a un elemento sustitutivo de un órgano que sea capaz de desempeñar funciones del miembro perdido usando una fuente de energía propia que le permita excitar actuadores e incluso reaccionar a sensores.

3.4. Movimiento maker

Gracias la fabricación aditiva o la impresión 3D se han abierto las posibilidades en el mundo de “crear” en casa. Todo el terreno que el abaratamiento de los microcontroladores y los microprocesadores ya habían dejado preparado se ha consolidado con la bajada de precios de dichas impresoras.

Existen infinidad de portales web donde encontrar instrucciones, archivos, videos, ejemplos y otras utilidades para realizar todo tipo de proyectos que pueden ir desde cosas con fin decorativo hasta sistemas completamente funcionales para darle una función útil en casa.

Es posible, así pues, imprimir una prótesis simple des de casa, aún que sea meramente estética.

Es fácil encontrar modelos de prótesis con mecanismos parecidos al hook que permiten adquirir la opción de abrir y cerrar la mano con el movimiento vertical del brazo o parecido (*Impresoras 3D crean prótesis de manos y brazos / Tecnología*, 2018).

En este proyecto, por impresión 3D se va a entender como las técnicas de fabricación aditiva que pueden adquirirse en un entorno doméstico estándar, como las impresoras que utilizan FDM o SLA.

3.4.1. Proyectos sin ánimo de lucro

De todo este movimiento han salido organizaciones que se dedican a dar la posibilidad de adquirir prótesis simples impresas mediante impresoras 3D sin coste alguno para el usuario final. Existen entidades sin ánimo de lucro que se dedican a fabricar y divulgar prótesis a personas sin recursos como por ejemplo *Atomic Lab* (Pelusso, s. f.). Se les puede encargar

la prótesis requerida y ellos se encargan de buscar un embajador cercano al lugar de residencia del demandante que le pueda fabricar y proporcionar el pedido. Hablando siempre de prótesis simples

3.5. Propuestas parecidas a este proyecto

Existe una organización que se dedica a vender prótesis impresas en 3D llamada Open Bionics («Open Bionics Labs», s. f.). La similitud física es muy lograda y utilizan sensores de estímulos musculares para poder mover a voluntad la prótesis. El precio aproximado al mercado de un brazo de Open Bionics ronda los 3000€.

Hay dos principales diferencias básicas del proyecto ahora presentado respecto la propuesta de *Open Bionics*:

- Este proyecto está orientado al diseño de una prótesis que se pueda fabricar en un entorno doméstico mediante una impresora 3D y unos conocimientos básicos de electrónica de microcontroladores. Al contrario de las fabricadas por dicha organización, donde son sus propios operarios quienes se encargan de la fabricación.
- El coste final de la prótesis del proyecto debe de ser bastante menor al que ofrece *Open Bionics*.

También existen proyectos mucho más humildes como es el caso de Gerónimo Cabrera y su padre que desde su casa se dedican a crear prótesis no robóticas muy simples para entregarlas sin ningún tipo de coste a las personas necesitadas (*TE DOY UNA MANO - emprendimiento solidario*, 2019).

4. Contribución

Con este proyecto se pretende la creación de un prototipo de una prótesis robótica, que, en su máximo desarrollo, pueda ser controlada neuronalmente, dando así una solución congruente con la era de máximo avance tecnológico que estamos viviendo, al problema que representa la pérdida de un miembro del cuerpo humano, en este caso el conjunto que representa el antebrazo y la mano, sin obviar que muchos de los perjudicados por dicha pérdida no podrán nunca beneficiarse de la existencia de una prótesis como la que se propone, si no puede conseguirse la misma a un precio muy bajo.

4.1. Objetivos

Como objetivo general se busca diseñar un prototipo de prótesis que se pueda imprimir con una impresora 3D doméstica, sin buscar una alta similitud, sino más bien una buena funcionalidad y comodidad. Es importante que el proyecto se oriente a que la tecnología resultante pueda ser divulgada para ser fabricada en un entorno doméstico.

Como objetivos específicos se propone:

1. Encontrar un modo de fabricar una muñeca y una mano eficientes.
2. Diseñar y programar la electrónica adecuada.
3. Plantearlo para que el diseño final sea de presupuesto asequible.
4. Desarrollar un pequeño estudio sobre hardware y software teórico para el control cerebral.
5. Democratizar los resultados.

4.2. Metodología

Este proyecto se puede dividir en secciones que tienen un orden lógico, pero atacar una sección posterior casi siempre implica hacer cambios en las anteriores, debido a que surgen problemas que deben solucionarse con modificaciones de partes ya pensadas previamente.

Primeramente, como en todo proyecto ha habido una fase de documentación.

Después, se ha empezado por el diseño mecánico del brazo, cómo debe ser físicamente y las partes que debe tener. Y también abordar qué mecanismos utilizar y como adaptarlos a las necesidades del proyecto.

Los mecanismos deben imprimirse varias veces en cada iteración ya que debe comprobarse que el proceso de fabricación mediante FDM es posible para las piezas que los componen. Del mismo modo que se debe comprobar que dichas piezas encajan las unas con las otras, así como con los otros componentes no impresos (como los tornillos).

Seguidamente se ha trabajado con el ensamblaje de todo para comprobar que encaje bien, y que las dimensiones sean coherentes con los de un miembro real.

Luego se ha trabajado con la electrónica necesaria para mover el sistema, haciendo las debidas modificaciones para que los nuevos elementos se puedan sustentar en los soportes apropiados.

También se han realizado pruebas y modificaciones para garantizar que los actuadores desempeñan el trabajo deseado con las piezas mecánicas.

El último paso práctico ha sido desarrollar el programa completo con el envío de órdenes, su procesamiento y la actuación correcta de los motores.

En este punto el proyecto se transforma en estudio teórico sobre la tecnología que sería necesaria y adecuada para poder mover la prótesis a voluntad del individuo, es decir, siguiendo las órdenes de su pensamiento, y cuáles serían los elementos indicados para el objetivo deseado.

Finalmente, aparte de un pequeño presupuesto teórico para poder cuantificar los importes por los cuales oscilaría el precio del prototipo, se han publicado los archivos y la información necesaria para construir el brazo en una plataforma de democratización de proyectos, para que así esté al alcance de todo el mundo.

Paralelamente a todo esto se ha ido documentado y redactando la memoria del proyecto.

En la tabla siguiente se muestra el tiempo dedicado a cada sección, por semanas:

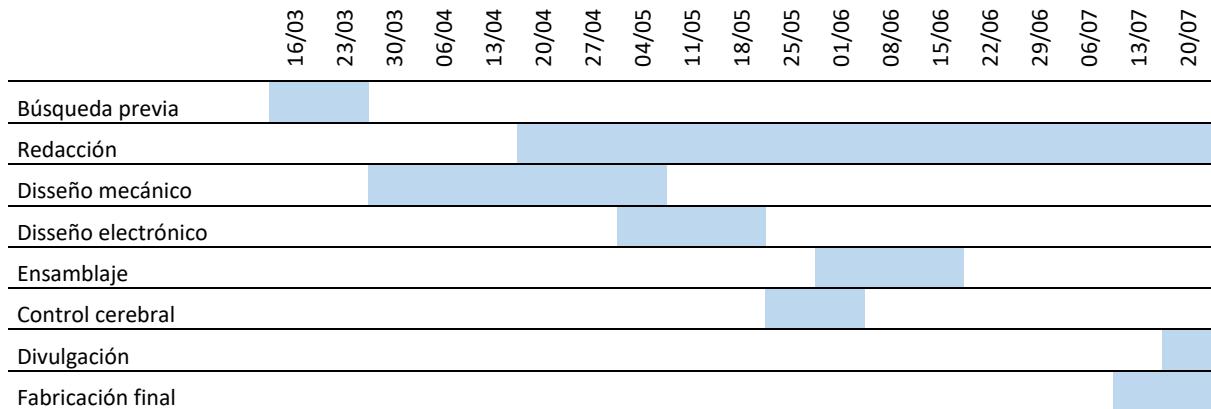


Tabla 1: Cronograma del desarrollo del proyecto.

Fuente: propia.

4.3. Partes y componentes de la propuesta

Se considera parte de este proyecto el desarrollo de un prototipo de la prótesis robótica de un antebrazo, pensado para que sea posible su fabricación con una impresora 3D en un entorno doméstico. También se incluye la divulgación del prototipo resultante.

No forma parte del proyecto la implementación de las tecnologías de control neuronal. Como tampoco el testeo en sujetos reales.

5. Anatomía de la prótesis

El objetivo de este proyecto es diseñar el prototipo de la prótesis robótica de un antebrazo, centrándose en las partes móviles de el mismo, así que el primer paso es pensar cómo va a ser físicamente este brazo.

5.1. Concepción del brazo

Primeramente, se debe hablar sobre como es, anatómicamente hablando, un brazo humano.

La parte del brazo que se trata en este proyecto es el conjunto formado por antebrazo, muñeca y mano, por debajo pues del codo, y la solución se va a centrar en el desarrollo de la muñeca y la mano por ser, como se ha dicho, las partes móviles. El resto del antebrazo consistiría en un elemento de sujeción del conjunto formado por la muñeca y la mano con el muñón existente debajo del codo.

El antebrazo humano tiene una rotación sobre su eje provocada por los dos huesos que lo sostienen (el cubito y el radio), movimiento que es posible gracias a la contracción y elongación de los músculos (extensores y flexores) que rodean dichos huesos. El mismo sistema de contracción y elongación de músculos es el que permite mover la mano en las dos direcciones posibles (de arriba abajo y de izquierda a derecha).

Es importante señalar los músculos que originan la mayoría de los movimientos de la muñeca y de los dedos se encuentran precisamente en el antebrazo, como por ejemplo el caso de uno de los flexores de los dedos:



Ilustración 5: Flexor superficial de los dedos.

Fuente: («Flexor Largo Superficial Común de los Dedos (FLSCD)», 2014)

Los músculos mecánicamente se pueden simplificar a la idea de un pistón, ya que realizan su función al extenderse o contraerse. Por tanto, es muy difícil conseguir que una pieza fabricada mediante impresión 3D doméstica (normalmente de plástico) pueda comportarse de dicho modo, así que se ha optado por buscar otro mecanismo para conseguir el movimiento deseado.

Observando cuales son los movimientos realmente útiles en la mano, (rotación, arriba-abajo y derecha-izquierda) deja de tener importancia que el movimiento se origine en el antebrazo ya que no hay mucha diferencia funcional en la extremidad si tienen la palma apuntando hacia arriba o hacia abajo. Así pues, podemos distinguir el **yaw**, el **pitch** y el **roll**:

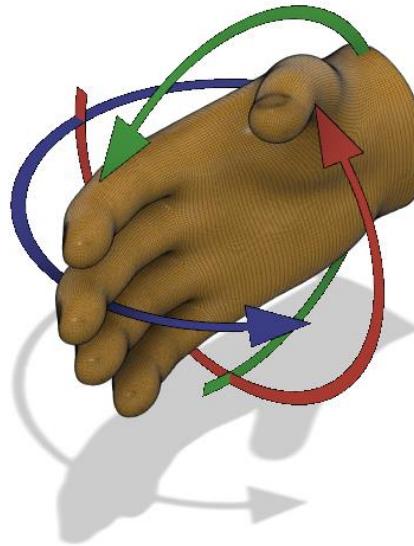


Ilustración 6: Yaw, Pitch y Roll referenciados en una mano.

Fuente: Propia.

Las partes para tener en cuenta para fabricar y testear en el prototipo son:

1. La muñeca. Se va a necesitar una articulación que permita las tres rotaciones que es capaz de realizar el conjunto avambrazo-muñeca (el yaw, el pitch y el roll).
2. La mano. En este proyecto solo constará de una figura con la forma aproximada de una mano que haga el movimiento de abrir y cerrar los dedos.

5.2. Muñeca

Como se ha explicado, en la muñeca se pueden concentrar las 3 rotaciones que se asocian a la mano. Estos movimientos los originan los músculos situados en el antebrazo que causan las flexiones en los ligamientos de la muñeca (para el yaw y el pitch) o rotan el cubito y el radio (para el roll).

La decisión de usar una única articulación con tres grados de libertad es el resultado de varias iteraciones buscando soluciones para realizar dichos movimientos:

- La primera posibilidad era realizar los tres movimientos en tres sitios distintos, como un robot antropomórfico industrial. Esta posibilidad se desestimó enseguida ya que el resultado de tener el yaw y el pitch en sitios diferentes difiere mucho de un brazo humano, estéticamente hablando.



Ilustración 7: robot colaborativo UR3e de CFZ Cobots.

Fuente: («Robots UR3e», s. f.).

- La segunda posibilidad era tener el roll a medio antebrazo, y luego poner una articulación con dos grados de libertad en la muñeca. Esta idea era factible estéticamente y se podía llevar a cabo con componentes fáciles de fabricar con una impresora 3D. En concreto se contempló la posibilidad de usar un mecanismo de dos grados de libertad como el que se ve en la siguiente imagen. Este mecanismo es llamado *compilant mechanism* y tiene la peculiaridad de estar compuesto por una sola pieza de un material con una cierta flexibilidad que le permite transportar los dos grados de libertad en un mismo punto:

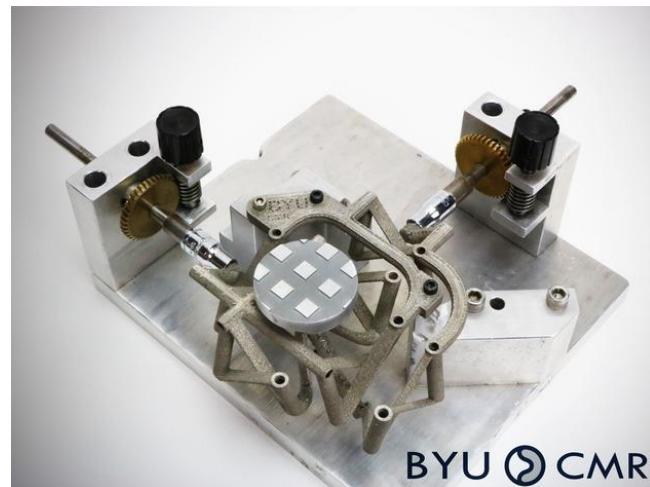


Ilustración 8: compliant mechanism.

Fuente: ([Thingiverse.com](https://thingiverse.com), s. f.-a).

- Finalmente, se encontró una articulación ideal para el objetivo específico del proyecto: un mecanismo esférico paralelo:

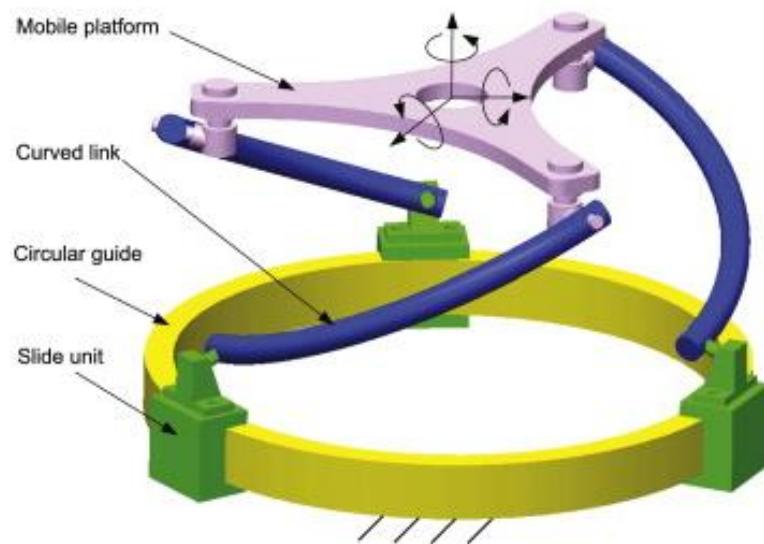


Ilustración 9: Esquema de un manipulador paralelo esférico.

Fuente: (Wu, Bai, & Kepler, 2014).

Este tipo de mecanismo ofrece las tres rotaciones buscadas en la plataforma móvil superior, cosa que hace que sea perfectamente apropiado para usarla como unión entre el antebrazo y la mano.

5.3. Mano

La mano es un órgano muy complejo, la forman 27 huesos (López, 2012) que permiten lograr una cantidad enorme de posiciones con la que se alcanza una precisión única en el reino

animal. Para moverla intervienen también unos 30 músculos no solo situados en ella si no en todo el brazo (Information, Pike, MD, & Usa, 2018).

Al ser el objetivo del proyecto realizar un primer prototipo, la mano se va a simplificar a una pinza con un movimiento de abrir y cerrar. En la industria se suelen usar pinzas (que pueden ser parecidas o no a una mano) como efectores finales de los robots manipulativos.

Existen multitud de tipos de pinza, con varios movimientos y varios tamaños. En este caso debe de tener las medidas aproximadas de una mano y que sea fácilmente encajable a una plataforma inferior. En internet hay muchos modelos disponibles.

En un brazo humano, la mayoría de los movimientos de los dedos se originan en el propio antebrazo. La solución óptima para el movimiento de la pinza de este prototipo también sería tener la potencia en el antebrazo y trasladarla a la mano mediante un sistema de transmisiones y cardanes. Para una mano más compleja con dedos con varios posibles movimientos se acostumbran a usar un sistema de cables y muelles, que realizan la extensión y la flexión de los músculos.



Ilustración 10: Pinza industrial.

Fuente: («RG2 - Pinza de prensión eléctrica by On Robot ApS | DirectIndustry», s. f.).

6. Diseño de los componentes mecánicos

La mayoría de los componentes se han basado en modelos encontrados en plataformas de divulgación en internet. Se les han hecho modificaciones o se han rediseñado de cero para una mayor adaptabilidad al proyecto.

Como se ha justificado en el apartado anterior, se abordará por un lado la muñeca y por el otro la mano. A pesar de esto, el efecto final de la muñeca y la base de la mano deberán pensarse para poderse acoplar.

En el anexo E Piezas finales existen imágenes de todas las piezas en su diseño final y con el nombre que se usa para referirse a ellas.

6.1. Muñeca

En la plataforma de divulgación *thingiverse* (Thingiverse.com, s. f.-c) se encontró un modelo *.stl* (extensión de archivo de modelo de mallas muy extendida mundialmente) de un mecanismo esférico de 3 grados de libertad encajaba bien con las necesidades:

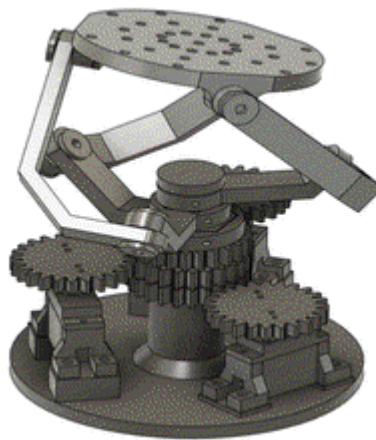


Ilustración 11: modelo de manipulador esférico paralelo en *thingverse*.

Fuente: (Thingiverse.com, s. f.-b).

Como se observa en la imagen, el mecanismo tiene los motores colocados verticalmente, configuración que nos interesa puesto que debe ir todo alineado con el brazo. A pesar de esto, el tamaño original de la pieza era demasiado grande e interesaba realizar cambios sobre todo en la plataforma de sujeción de los motores y la plataforma superior. Además, al reducir el tamaño a la mitad, se debía cambiar el módulo de los engranajes así que se decidió rediseñarlo de nuevo con Fusion 360 para tener plena libertad para realizar los cambios pertinentes.

El resultado definitivo antes de empezar con las modificaciones para los elementos electrónicos es el siguiente:

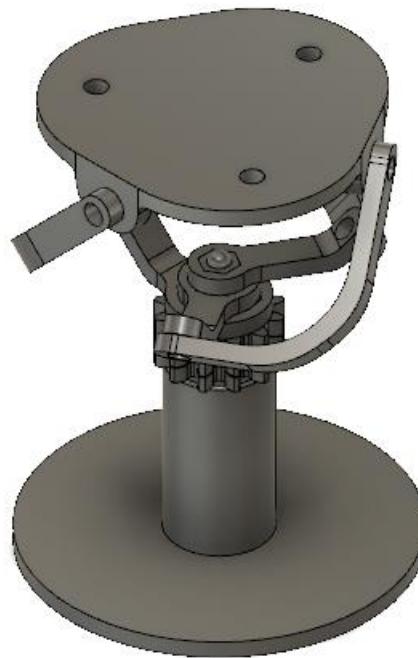


Ilustración 12: Diseño propio del mecanismo de la muñeca.

Fuente: Propia.

En la base van a sujetarse los motores, cuyos soportes se van a diseñar una vez se hayan seleccionado y se disponga físicamente de ellos.

En la plataforma superior se han añadido unos agujeros que servirán para sujetar la mano.

6.2. Mano

Existen multitud de formatos de pinzas que se pueden encontrar en internet. Se ha escogido un modelo de GrabCad el cual nos ofrece los archivos en formatos parametrizados y no en archivo de mallas como es el caso de los archivos del mecanismo usado para la muñeca. El hecho de tener los ficheros editables ha facilitado mucho el trabajo referente a adaptar alguna pieza a las condiciones requeridas para el uso que se la quiere dar en este proyecto.



Ilustración 13: modelo de pinza en varios formatos parametrizados disponible en la plataforma GrabCAD.

Fuente: («Robotic Arm | 3D CAD Model Library | GrabCAD», s. f.).

Una de las modificaciones más importantes que se han hecho al modelo original son las de aligerar las piezas más macizas, como son los dedos.

Las dos piezas de color rojo de la ilustración anterior (Ilustración 13) se han rediseñado de cero ya que interesa que encaje con la plataforma superior de la muñeca.

En cuanto a los engranajes, también se ha realizado una pequeña modificación fusionándolos con las barras.



Ilustración 14: diseño del mecanismo de la mano.

Fuente: Propia.

La tracción del mecanismo de la mano se va a situar perpendicularmente al plano de los engranajes y acoplado directamente a uno de ellos.

7. Componentes electrónicos

La electrónica del prototipo va destinada totalmente a controlar los motores que van a mover la muñeca y a abrir/cerrar la mano. En este prototipo los motores van a responder a las órdenes que se van a realizar des de un ordenador.

El esquema conceptual es sencillo:

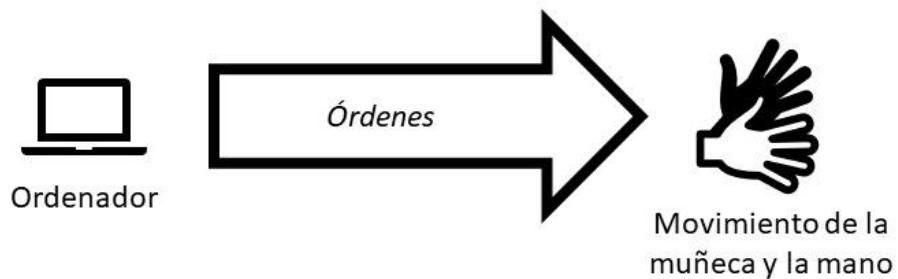


Ilustración 15: Esquema conceptual del propósito de la electrónica.

Fuente: Propia.

Estas órdenes van a ser simples indicaciones como pueden ser “abre la mano”, “cierra la mano”, “gira la muñeca horariamente”, “rotarla”, etc.

Así pues, debe elegirse qué motores usar y cómo van a transmitírse las órdenes.

7.1. Motores

La característica más importante de los movimientos a realizar es la precisión del ángulo del movimiento. El tipo de motor óptimo para realizar dichos movimientos es el de los servomotores.

Los servomotores son motores eléctricos con un bucle de realimentación que controla la posición de la rotación del efecto final del aparato (Pérez, 2015, p. 33).

Hay otros aspectos técnicos a tener en cuenta, como pueden ser la velocidad máxima de movimiento o el torque que puede llegar a dar el motor. También se debería tener en cuenta el volumen (ya que deben de caber dentro del brazo) y por último se debería considerar el peso.

Para realizar el prototipo se ha perseguido el hecho de poder realizar pruebas fácilmente, evitando problemas de librerías y buscando facilidad al tiempo de aprender a usar los elementos tractores.

Uno de los servomotores más usados para pruebas en con son los MG90S:



Ilustración 16: Servomotor usado para el prototipo.

Fuente: («Servomotor MG90», s. f.)

Tienen un rango de movimiento de 180º (de -90º a 90º) y la comunicación es mediante PWM. Además, son capaces de aportar un torque de 0,22 Nm (especificaciones en la del anexo) (MG90S Metal Gear Servo, s. f., p. 1).

Como se ha dicho, estos servomotores responden ante una señal PWM. Una señal PWM es un tren de pulsos cuyo ciclo tiene siempre el mismo periodo, pero el tiempo a *high* y el tiempo a *low* tienen distintas duraciones en cada ciclo. Los milisegundos de duración de un pulso dentro de un ciclo PWM se traducen al ángulo al que se posiciona el motor.

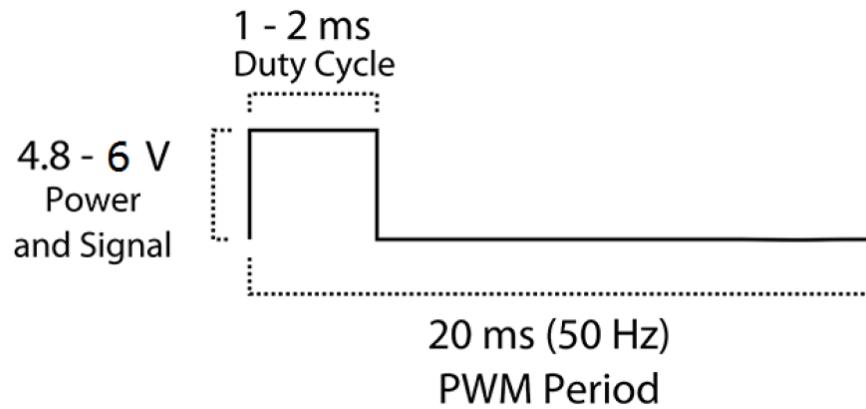


Ilustración 17: Ciclo PWM que requieren los servomotores elegidos para despenalizarse hasta un ángulo concreto.

Fuente: (MG90S Metal Gear Servo, s. f.)

Una vez escogidos los motores se han tenido que adaptar las piezas ya diseñadas para poder soportarlos.

En el caso de la muñeca se han puesto en un lugar similar al del modelo original del manipulador esférico en el que está basada la articulación:

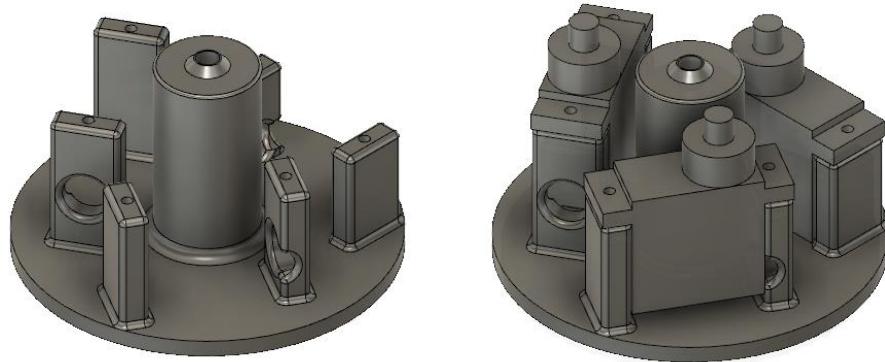


Ilustración 18: Soportes de los servomotores en la muñeca y ubicación de estos.

Fuente: Propia.

En el caso de la mano se ha puesto perpendicularmente al reverso de la palma, directamente solidario a uno de los dos engranajes de las pinzas. Las modificaciones en la mano han sido:

- En la base, que será donde el motor va sujeto.

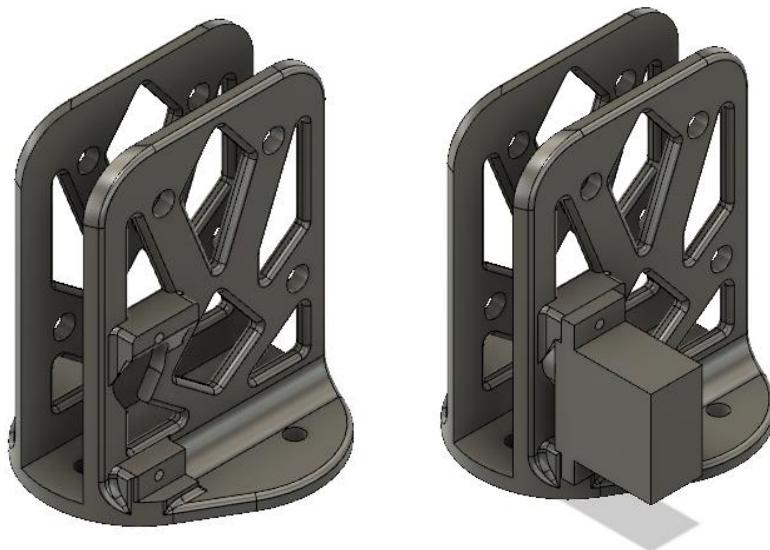


Ilustración 19: Soportes de los servomotores en la mano y ubicación de estos.

Fuente: Propia.

- En una de las ruedas dentadas, ya que es la parte donde se generará la tracción:

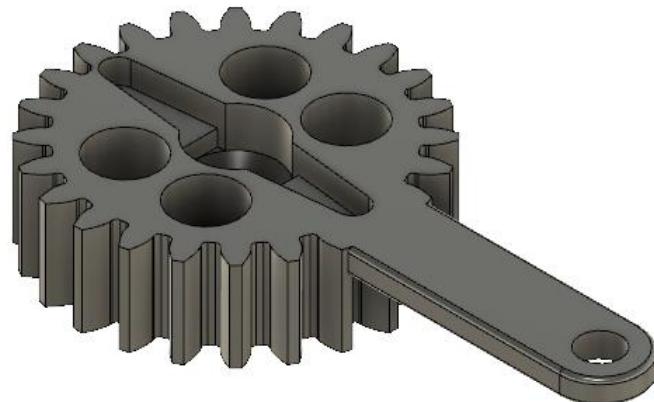


Ilustración 20: rueda dentada con barra y con orificio para poder adquirir la tracción del servomotor.

Fuente: Propia.

Como se ve en la imagen, al igual que en la otra rueda, se le han añadido agujeros para disminuir la cantidad de plástico utilizada.

7.2. Control

Como se ha dicho, en este proyecto, al tratarse de un prototipo, un ordenador va a simular las órdenes del cerebro. Así que dichas órdenes no se van a enviar directamente a los motores, si no que van a enviarse a un intermediario que las traduzca a el formato que entiendan los servos (PWM).

Este trabajo lo tiene que realizar una controladora capaz de recibir señales, de procesarlas y de reenviarlas en el lenguaje apropiado.

Existen dos opciones en cuando hacer este trabajo:

- Usar un microcontrolador, con capacidad de realizar un solo programa y capacidades de computación limitadas, pero de bajo coste y de bajo consumo.
- Usar un microprocesador, capaz de soportar un sistema operativo y con capacidades de computación más elevadas, pero con un coste y consumos mayores.

Para las necesidades del prototipo (y, probablemente, de la prótesis final resultante) no se requiere una capacidad muy alta de procesamiento ni tampoco se necesita para nada un sistema operativo en el sistema de control. Además, sí que son requisitos el bajo consumo, para una mayor autonomía, y el menor precio de los componentes.

Así pues, el elemento de control usado es un microcontrolador.

Este sistema central debe de ser capaz de recibir órdenes sencillas mediante algún tipo de bus de comunicación, procesarlas y gobernar los servomotores en consecuencia. Existen multitud de opciones. Al enfocar el proyecto a conseguir un montaje el máximo sencillo posible para que pueda realizarse a nivel particular se ha considerado oportuno usar un Arduino («Arduino - Home», s. f.) que, aparte de ser *open source*, su uso es ampliamente conocido y es muy fácil encontrar información para posibles mejoras en la red.

Para las pruebas se va a usar un Arduino Uno que es el más básico y dispone de suficientes puertos y pines para la aplicación:



Ilustración 21: Arduino UNO.

Fuente: («Arduino Uno Rev3 SMD | Arduino Official Store», s. f.).

Un Arduino Uno puede recibir señales mediante muchas interfaces y formatos, y del mismo modo las puede transmitir (1682209.pdf, s. f., p. 2). Las señales de salida van a ser PWM ya que es la comunicación requerida por los servomotores. Las órdenes procedentes del

ordenador se van a transmitir mediante USB por el protocolo *serial* («El protocolo serie, entiéndelo y protégelo», 2018), la comunicación más sencilla entre para testear con un Arduino.

7.3. Alimentación

La batería, en la prótesis final, debería ser escogida teniendo en cuenta muchos parámetros importantes:

- Voltaje de trabajo.
- Potencia máxima.
- Capacidad.
- Posibilidad de recarga (y procedimiento para hacerlo).
- Peso.

Todo son parámetros que dependen mucho de los elementos y requerimientos finales, se deja como uno de los temas a tratar en un futuro (15 Trabajo futuro).

Además, en este prototipo la prótesis va a estar conectada a un ordenador, así que tiene poco sentido usar una batería como alimentación.

La alimentación mediante el mismo USB es suficiente para el Arduino. Para los servomotores sí va a requerirse una alimentación aparte.

La fuente debe ser capaz de alimentar tanto los cuatro motores, que dan un máximo estable de 250mA. Un cargador de móvil de 5V que pueda proporcionar más de 1A es suficiente por los requerimientos de este prototipo.

Los servomotores pueden llegar a operar con un Voltaje de alimentación de 6V, tensión de alimentación soportada por el Arduino. Además, pueden dar más par motor si se les da mayor potencia de entrada.

8. Diseño de la electrónica

En base los elementos elegidos en el apartado anterior (7 Componentes electrónicos) el esquema electrónico queda de la siguiente forma:

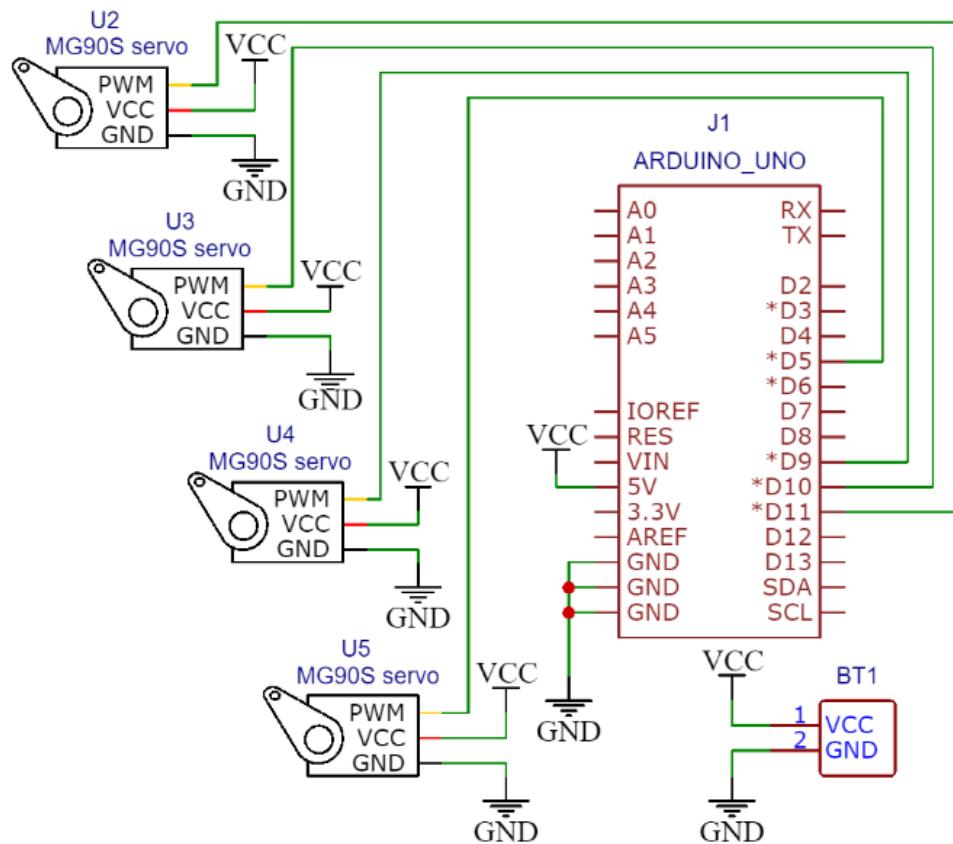


Ilustración 22: Esquema electrónico.

Fuente: Propia.

Para las pruebas se han usado cableado de pines con una *protoboard* (un elemento para hacer pruebas de circuitos electrónicos sin necesidad de soldar cables.) y alimentado mediante el transformador de un cargador de móvil para proporcionar los 5V continuos necesarios a partir de un enchufe doméstico corriente de 230V alternos.

A pesar de que el Arduino esté alimentado por el USB, también se van a referenciar los 5V de la alimentación.

El Arduino Uno dispone de 6 pines que soportan PWM, se han usado indistintamente los 5, 9, 10 y 11.

8.1. Realización del programa

El programa va a tener que recibir las ordenes, procesarlas y gestionar el movimiento de los motores. Por un lado, habrá el movimiento del motor de la mano que va a ser independiente del de los motores de la muñeca, que van a estar coordinados ya que se trata de un mecanismo paralelo.

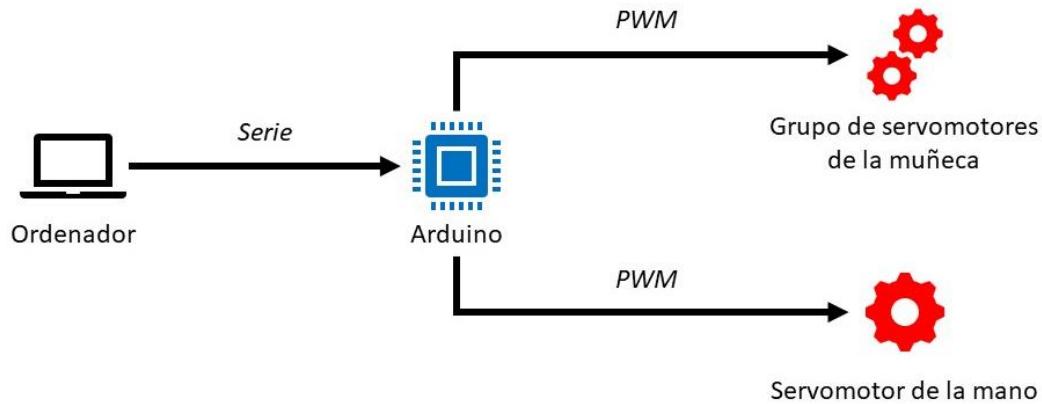


Ilustración 23: Esquema de las comunicaciones.

Fuente: Propia.

Un aspecto muy importante en el momento de programar los servomotores es que, en el caso de este prototipo, solo pueden girar 90º hacia cada lado desde la posición de reposo o inicial.

Antes de hablar del programa, se va a hablar de características técnicas de los dos elementos para tener en cuenta durante el diseño del código.

8.1.1. Mano

El movimiento de la mano es muy simple y directo, ya que en este prototipo el motor va directamente solidario a una de las dos ruedas del mecanismo de la pinza. Se considera que los cero grados (posición normal) es la figura siguiente:

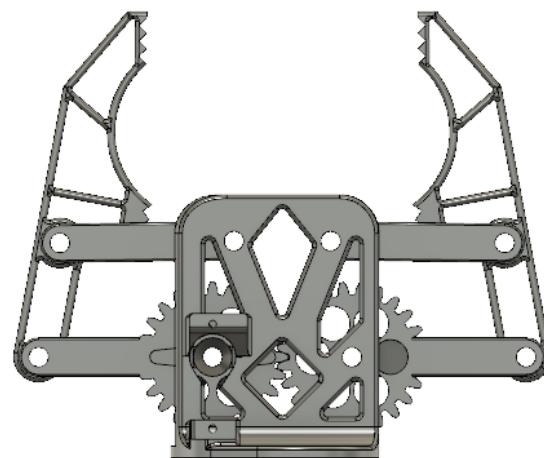


Ilustración 24: Posición 0°.

Fuente: Propia.

Así pues, el movimiento de las ruedas puede ir desde los 20° (horariamente respecto el movimiento del motor) hasta los 75° (antihorariamente respecto el movimiento del motor).

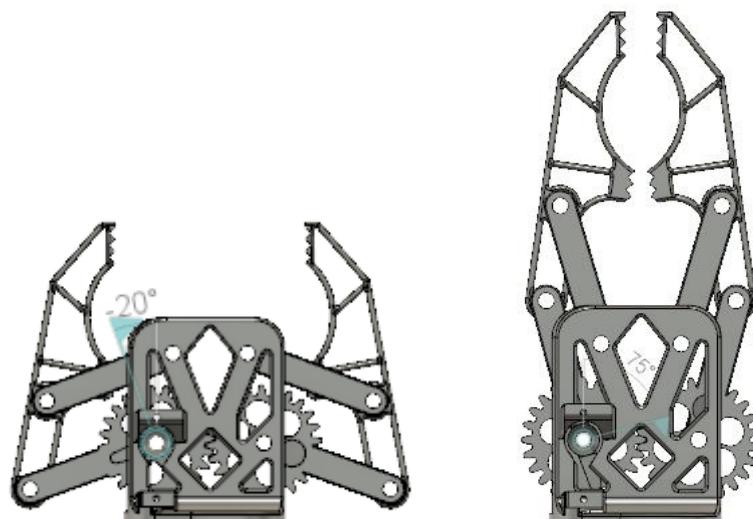


Ilustración 25: Posiciones extremas de la mano.

Fuente: Propia.

El movimiento de la mano, además, es independiente al de la muñeca (es decir, de los otros 3 motores), ya que se puede estar abriendo la mano al mismo tiempo que se mueve la muñeca, por ejemplo.

8.1.2. Muñeca

Como se ha ido adelantando, el movimiento de la muñeca se puede desglosar en 3: el *yaw*, el *pitch* y el *roll*.

La cinemática del mecanismo provoca que los movimientos en una dirección sean más complicados que otros. Sin embargo, como en todo sistema físico, el resultado final es la suma de todos efectos per separado. Por ejemplo, si queremos rotar 45º la muñeca (*roll*) y tumbarla 20 grados hacia delante (*yaw*) solo que tendremos que poner los servomotores en la suma de las posiciones.

8.1.3. Programa

Para las pruebas del prototipo se ha realizado un programa que responda a ordenes de mover la mano, de hacer el *roll* y hacer el *yaw*.

El programa se ha desarrollado una vez encajaban todas las piezas mecánicamente y los movimientos de los engranajes unidos a los motores eran los deseados, pudiendo hacer pruebas directamente sobre su escenario final.

El lenguaje utilizado ha sido la variante de C++ de Arduino, pensada específicamente para los microcontroladores de esta casa, a pesar de que se puede subir compilado a cualquier microcontrolador que acepte C o C++.

Es un programa básico que consta de un *switch case* donde dependiendo de la orden que le llega al controlador por un puerto *serial* se realiza un movimiento u otro, pudiéndose solapar movimientos (por ejemplo, se puede hacer un cierto porcentaje de *roll* y de *yaw* al mismo tiempo).

El código del programa se encuentra en el anexo C Programa.

Para transferir el binario a la placa basta con realizarlo mediante USB por el mismo puerto COM con el que se realizan las comunicaciones con el ordenador. Arduino tiene una aplicación de escritorio desde donde se puede realizar el código y con una interfaz automática para cargarlo al controlador.

9. Fabricación

La fabricación de la totalidad de los componentes mecánicos no comprados directamente se ha realizado mediante fabricación aditiva, ya que forma parte de los objetivos del proyecto el hecho de poderse realizar el diseño personalizado en un entorno doméstico.

La impresora usada es una Ender 3 de Creality («Creality3D Ender-3 3D Printer Economic Ender DIY KITS», s. f.). El material escogido para las pruebas ha sido PLA ya que es el material más ampliamente usado en la impresión 3D doméstica.

El diseño de las piezas se ha hecho sin tolerancias en la mayoría de los casos ya que, como se va a comentar más adelante, se prefiere jugar con los parámetros del laminado para solventar temas de encaje de piezas.

9.1. Laminado

El concepto laminado se refiere a la creación del archivo que va a ejecutarse en la impresora 3D. El nombre proviene de que la impresión se realiza por capas, así que en base el modelo 3D (en .stl en este caso) que se carga el software de laminado se divide capa a capa con las ordenes que deberá seguir la impresora para ir fabricándolas.

El programa que se va a utilizar en este proyecto es el *Ultimaker Cura* («Ultimaker Cura», s. f.), un software *opensource* de la compañía *Ultimaker* muy utilizado en el ámbito *maker*.

En el laminado de las piezas, para las pruebas se han usado una velocidad de 40mm/s en las partes interiores y de 20mm/s en las capas exteriores. Valores que entran dentro de lo normal en cuanto a impresión doméstica. No se pueden subir a valores más altos ya que en muchas de las piezas del diseño es importante que se respeten las dimensiones con la máxima exactitud posible debido a que deben encajar o engranar entre ellas. El hecho de aumentar las velocidades disminuye la calidad de las piezas

Para las tolerancias se ha jugado con el parámetro de expansión horizontal, que aplica lo que se puede considerar una especie de “lijado” a la superficie de las piezas, siendo muy útil en aquellas que deben encajar entre sí o en los agujeros pasantes en los que deban ir tornillos.

Todas las piezas del diseño han sido pensadas para realizarse sin necesidad de soportes. Esto se ha logrado haciendo que no exista ninguna parte voladera con un ángulo inferior a 45º, a no ser que se trate de agujeros muy pequeños:

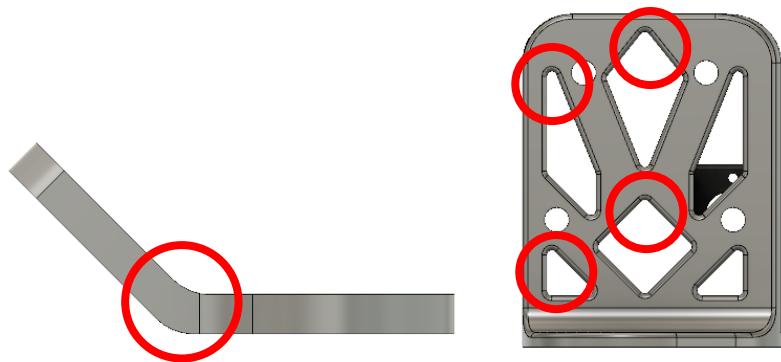


Ilustración 26: ejemplos de zonas que auto sustentadas de las piezas del diseño.

Fuente: Propia.

El concepto “auto sustentación” se refiere a que una pieza se pueda fabricar sin necesidad de añadir zonas volúmenes extra que no formaran parte del resultado final (ya que se retirarán en el post-procesado) que sirvan para poder imprimir en zonas que no tienen pieza debajo.

La densidad interior (*infill* en inglés) se refiere a el porcentaje de material que se encuentra en las partes interiores de la pieza. Un *infill* del 100% significaría una pieza completamente maciza. Existen una gran cantidad de patrones interiores que se hacen más grandes a parámetros de densidad inferior más bajos i viceversa.

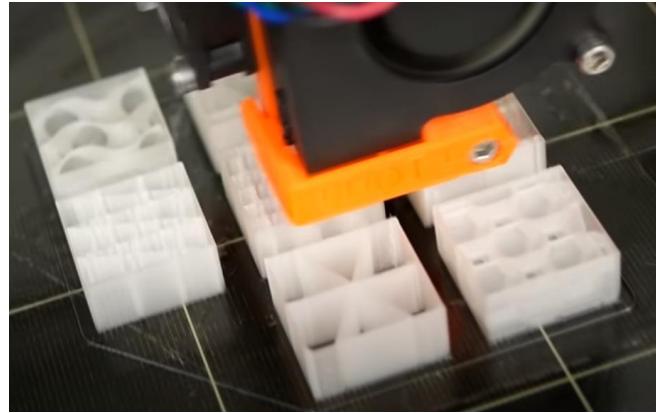


Ilustración 27: diferentes tipos de infill.

Fuente: (TESTING 3D printed INFILL PATTERNS for their STRENGTH, 2018)

Cada patrón tiene alguna ventaja respecto los otros (más resistencia a la compresión, más resistencia a la tracción, menos tiempo de impresión, etc.). Al tratarse de un prototipo que no va a tener que soportar grandes esfuerzos se ha optado para utilizar uno de básico y con una densidad del 20% para que sea mínimamente robusto, pero que no comporte un gran gasto de material ni tampoco de tiempo para la impresión.

Altura de capa	0,2 mm
Grosor de pared	0,8 mm
Expansión horizontal	-0,1
Densidad interior	20%
Velocidad de impresión interior	40 mm/s
Velocidad de impresión de pared	20 mm/s
Soportes	No

Tabla 2: Parámetros importantes de laminado.

Fuente: Propia.

9.2. Impresión

Se ha dividido la impresión en 4 fases: 2 para la mano (en una se fabrica solamente el soporte principal y en la otra el resto de los componentes) y 2 para la muñeca (por un lado, la base y la plataforma superior y por el otro el resto de los componentes). Esto es debido a que el área de impresión de la máquina es limitada.

Existen 3 conceptos importantes resultantes a las opciones de laminado:

- El tiempo de impresión.
- La cantidad de plástico consumida.
- El consumo eléctrico de la impresión.

El tiempo de impresión depende prácticamente de todos los parámetros de laminado, pero sobre todo de la velocidad de impresión y de la densidad interior.

La fabricación aditiva tiene una peculiaridad y es que no por imprimir más piezas a la vez, se va a reducir drásticamente el tiempo de producción, a diferencia de otros tipos de fabricación que muchas veces es más óptimo realizar el máximo de piezas de golpe.

Sí que reduce el tiempo de producción, en cambio, la distribución de las piezas. Cuantas más juntas estén colocadas las piezas, menos recorrido tendrá que hacer el extrusor (el efecto final de una impresora 3D) para pasar de una a otra, y ese tiempo, multiplicado por cada capa acaba siendo suficientemente importante.

En el caso del prototipo fabricado en este proyecto, la impresión lleva un total de 15 horas (unas 9 horas y media para la mano y casi 6 para la muñeca).

La cantidad de plástico usada en la impresión prácticamente solo se podrá ajustar modificando el parámetro *infill*, el software de laminado ya ofrece una estimación bastante exacta del tiempo y material necesarios para la impresión:

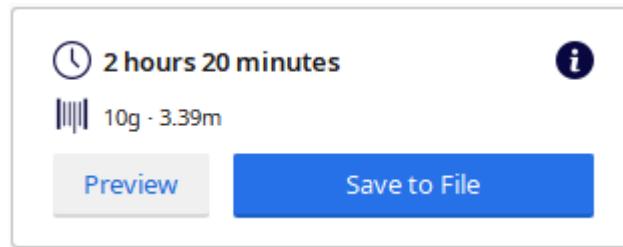


Ilustración 28: tiempo de impresión, y cantidad de PLA necesario para la fabricación de todas las piezas de la muñeca menos la base y la plataforma superior.

Fuente: Propia.

Finalmente, para saber la cantidad de energía requerida para la impresión de la prótesis se ha optado por usar un medidor de potencia consumida.

El aparato en cuestión es un enchufe inteligente HS110 de la casa tp-link («HS110 | Enchufe Inteligente Wi-Fi con Monitorización de Energía | TP-Link Iberia», s. f.). Viene con una aplicación que, una vez lo tienes configurado con el wifi, se puede consultar los kWh consumidos en distintos rangos de tiempo.



Ilustración 29: Captura de la aplicación Kasa de tp-link donde informa del consumo del enchufe inteligente HA110.

Fuente: Propia.

La energía total consumida en el proceso de fabricación de toda la prótesis es de 1,96 kWh, que se traduce a unos 0,24 € considerando una tarifa estándar de 0,12€/kWh.

La tabla siguiente muestra los distintos costes de fabricación de todo el prototipo de la prótesis y da una pequeña aproximación del coste económico de imprimirla:

Conjunto	Tiempo (h)	PLA (m)	PLA (g)	Consumo (kWh)
Mano 1	6,25	10,45	30	0,62
Mano 2	3,2	6,36	19	0,8
Muñeca 1	2,33	3,39	10	0,3
Muñeca 2	3,3	7,86	23	0,24
Total	15,08	28,06	82	1,96
			1,64 €	0,24 €

Tabla 3: costes de fabricación.

Fuente: Propia.

10. Ensamblaje

El diseño final del prototipo de la prótesis es el siguiente:

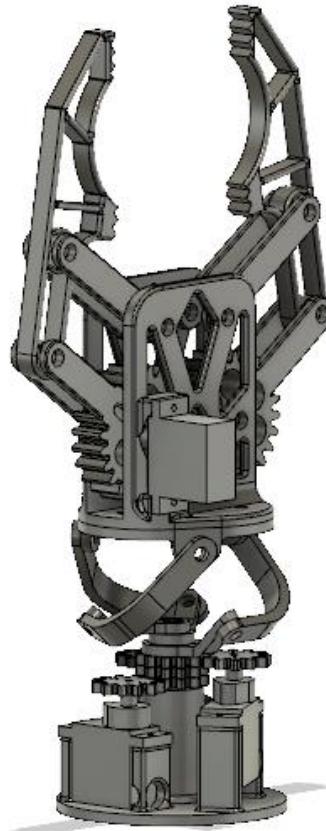


Ilustración 30: *Ensamblaje de todo el mecanismo con los motores.*

Fuente: Propia.

Para el montaje en el mundo físico se ha usado tornillería M4 en la muñeca y M5 en la mano. Los servomotores se han fijado con vises M2.

En algún caso se han tenido que repasar los orificios de la tornillería con un taladro para hacer más fácil el montaje.

Seguidamente se detalla el proceso de montaje de la prótesis. En el anexo F Fotografías de los pasos de montaje se encuentran las imágenes de cada uno de los pasos.

1. Se introduce el eje central formado por un tornillo M4x50 con el cabezal cónico en la Base de la muñeca.
2. Se pasan los cables por los orificios de los soportes para los motores y se colocan y fijan los 3 servomotores con los vises M2 que vienen en el pack.
3. Se introduce las ruedas de los motores de la muñeca en cada motor en sus ejes de rotación.
4. Se colocan las ruedas centrales.

5. Se colocan los 3 conectores en el nivel que les toque, y se añade una arandela y 2 tuercas M4.
6. Mediante tornillos M4x16, tuercas y arandelas se añaden los conectores de 90º.
7. Se encaja la barra con agujero hexagonal a la rueda tractora de la mano.
8. Se introduce la rueda tractora en el espacio de la base de la mano donde va el motor y se pasa un tornillo M5x25 cónico para que la rueda quede sujetada a la base.
9. Se encaja el elemento de sujeción con el servomotor, haciendo un poco de presión.
10. Se colocan las 4 barras simples mediante tornillos M5x25 y sus respectivas arandelas y tuercas.
11. Se fijan los dedos con el mismo tipo de tornillería.
12. Se pone el motor encajado a la rueda y atornillado de la misma forma que con los de la muñeca.
13. Se monta la mano terminada a la plataforma superior de la muñeca.
14. Se conectan debidamente la masa y la alimentación tanto de servomotores como del Arduino.
15. Se conecta el servomotor 1, 2, 3 y 4 a los pines PWM 9, 10, 11 y 3 respectivamente.

11. Control cerebral

En este proyecto, con la expresión “control cerebral” se hace referencia al hecho de mover la prótesis a voluntad del individuo, sólo con su pensamiento, sin usar movimientos de otras partes del cuerpo que influyan en el que se quiere realizar con la extremidad sustituida.

No es una actividad muy novedosa poder medir la actividad de nuestro cerebro mediante electrodos y plasmar esta información en un gráfico, la técnica usada para ello es la electroencefalografía. En las últimas décadas se ha ido abaratando el coste de realizar los llamados “tests electroencefalográficos”, tanto de los instrumentos de medición como los de procesamiento de datos obtenidos.

La actividad cerebral consiste básicamente en impulsos eléctricos fácilmente observables con los sensores adecuados. Estos estímulos se procesan para ordenar y poder definir de qué zona del cerebro provienen y así, interpretarlo como un pensamiento u otro.

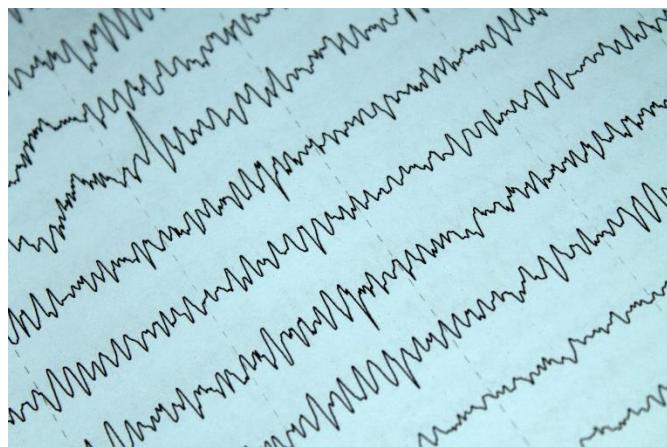


Ilustración 31: Electroencefalograma.

Fuente: (medicina, estudio, electrofisiología, eeg, electroencefalografía, electroencefalograma, salud, ciencia, tecnología, registro | Pxfuel, s. f.).

11.1. OpenBCI

OpenBCI («OpenBCI - Open Source Biosensing Tools (EEG, EMG, EKG, and more)», s. f.) es una compañía que produce herramientas *Open Source* pensadas para capturar la actividad cerebral generada por el pensamiento, que además están basadas en Arduino. Tienen en el mercado distintas placas capaces de procesar señales provenientes de electrodos, ya sean para leer actividad cerebral o muscular.

11.2. Tecnología útil para la prótesis.

Este proyecto está orientado a desarrollar una prótesis que pueda ser capaz de moverse a voluntad, para hacerlo la información debe de extraerse del sistema nervioso, existen dos posibilidades:

- Hacer la lectura mediante un casco de electrodos, cosa que generaría más información y sería una fuente más estándar independientemente del estado del miembro dañado.
- Hacer la lectura directamente de la actividad muscular mediante electrodos en el brazo, caso único a cada situación.

Las placas OpenBCI están basadas en microcontroladores que soportan Arduino, así que podría substituirse el original de la prótesis de este proyecto por una placa de dicha OpenBCI, ya que las funciones de comunicaciones y de acciones servomotores las puede gestionar el nuevo sistema embebido.

Para saber las necesidades reales para las primeras pruebas que permitieran mover al prototipo se debería trabajar físicamente con ellas, cosa no contemplada en este proyecto. Pese a esto, se va a tener en cuenta el precio de un starter kit que ronda los 1000€.

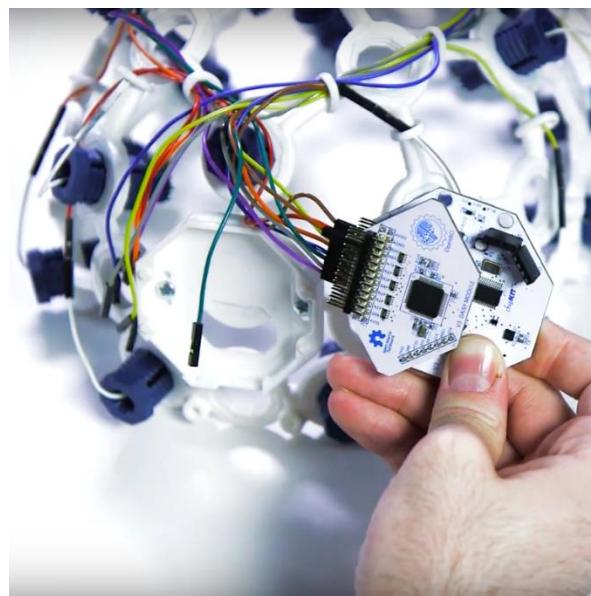


Ilustración 32: Elementos del DIY Neurotechnologist's Starter Kit de OpenBCI.

Fuente: («DIY Neurotechnologist's Starter Kit», s. f.).

Este kit de iniciación incluye una *Ganglion Board*, el controlador más básico de OpenBCI, un *Dongle Bluetooth* para comunicar el ordenador del desarrollador con la placa, un pack de 30 electrodos adhesivo, un pack de 10 cables para los electrodos y un kit de elementos para sujetar electrodos en una diadema (incluida) con el fin de realizar las lecturas cerebrales.

12. Presupuesto

Al tratarse de un prototipo se debe definir qué elementos deben formar parte del presupuesto y cuáles no. Principalmente se deben de desestimar las horas de trabajo para el diseño ya que está pensado para democratizarlo y no para generar un beneficio.

También se debe definir que se está presupuestando, si el prototipo final de este proyecto o la estimación de la prótesis terminada.

Se ha optado por presupuestar una estimación de un prototipo de la prótesis bastante avanzado tal como se esperaría que fuera en base el prototipo realizado. Como que no se ha trabajado acerca de cómo podría llegar a ser de complicada la mano, se va a considerar que esta parte seguiría siendo una pinza con las propiedades y costes ya conocidos.

Los números se van a estimar para una prótesis que constaría de:

- Antebrazo personalizado para el sujeto en cuestión. Con cavidad para el controlador y la batería.
- Muñeca de 3 grados de libertad.
- “Mano” con forma de pinza con capacidad de abrirse y cerrarse.
- 4 servomotores con potencia suficiente para mover la prótesis y levantar pequeños pesos.
- Starter Kit de Open BCI.
- Batería con las características descritas en el subapartado 7.3 Alimentación.
- Fabricación y ensamblaje de todo el conjunto.

12.1. Presupuesto para la construcción del prototipo desenvuelto en este proyecto

Se han dividido los precios en tres secciones:

- material mecánico para la construcción, que incluye tanto plástico de impresión como la tornillería para el montaje.
- material electrónico para el control del elemento, que incluye el kit inicial de OpenBCI, los motores y el cableado.
- costes de fabricación, que se refiere al precio de la electricidad.

12.1.1. Material de mecanizado

En la futura prótesis se va a necesitar, a parte la cantidad ya usada en el prototipo, una buena cantidad de PLA para fabricar el antebrazo en sí. La tornillería viene justificada en el apartado 10 Ensamblaje.

Descripción	Unidades (u)	Precio/unidad (€/u)	Importe (€)
Metros de PLA	20	0,06	1,2
Tornillo M4x25	10	0,15	1,5
Tornillo M4x40 (cabezal cónico)	1	0,15	0,15
Tornillo M5x30	15	0,15	2,25
Tornillo M5x15 (cabezal cónico)	1	0,15	0,15
Arandela M4	20	0,05	1
Arandela M5	30	0,05	1,5
Tuerca M4	20	0,1	2
Tuerca M5	30	0,1	3
Subtotal			12,75

Tabla 4: Material de mecanizado.

Fuente: Propia.

12.1.2. Material electrónico

Como se ha comentado en el apartado 11 Control , en el modelo definitivo el controlador Arduino quedaría substituido por la *Ganglion Board* («Ganglion Board (4-Channels)», s. f.), incluida en el kit de iniciación.

Por otro lado, los servomotores tendrían que ser más potentes, pero manteniendo el máximo posible la forma, tamaño y comunicación con el microcontrolador. Una buena opción, para tener una referencia de precio, sería el siguiente modelo de servomotor:



Ilustración 33: ROBSG HS3230 30KG 25T.

Fuente: (Banggood.com, s. f.)

Este servomotor, aparte de dar un torque de hasta 30 kg en su eje, tiene unas dimensiones y forma parecidas a los usados en el prototipo, cosa que facilitaría mucho la adaptación de los diseños.

Por último, para estimar el precio de la batería, se ha tomado como referencia el precio de las baterías utilizadas en cuadcopteros caseros, ya que tienen igualmente 4 motores que desarrollan una gran potencia (a pesar de que sea de velocidad, no de par).

Descripción	Unidades (u)	Precio/unidad (€/u)	Importe (€)
Servomotor	4	16,67	66,68
Low-cost Biosensing Starter Kit	1	515,95	515,95
Bateria	1	20,00	20,00
Metros de cable electrico	3	0,10	0,30
Subtotal			602,93

Tabla 5: Material electrónico.

Fuente: Propia.

12.1.3. Fabricación

En cuanto a la fabricación solo debe tenerse en cuenta la energía consumida ya que al no ser un producto con el cual hacer negocio no tiene sentido contar las horas de trabajo.

Descripción	Unidades (u)	Precio/unidad (€/u)	Importe (€)
kWh de fabricación	1,6	0,12	0,19
Subtotal			0,19

Tabla 6: Costes de fabricación.

Fuente: Propia.

12.1.4. Presupuesto total

El presupuesto total es la suma de los 3 presupuestos parciales anteriores.

Como se observa la mayor parte de los gastos para la realización de una prótesis con las condiciones descritas proviene del material para realizar las lecturas cerebrales, necesarias para el control del elemento.

El precio final estimado es algo superior a 600€, precio razonable si la prótesis pudiera realizar las funciones descritas en el proyecto si se compara con las otras prótesis existentes en el mercado de las que se ha hablado en el apartado 3.5 Propuestas parecidas a este proyecto.

Descripción	Importe (€)
Material de mecanizado	12,75
Material electrónico	602,93
Fabricación	0,19
Total	615,68

Tabla 7: Presupuesto total.

Fuente: Propia.

Un aspecto a tener especialmente en cuenta es que, al ser los elementos de control cerebral los que más peso tienen sobre el precio final de la prótesis, y teniendo estos elementos un precio prácticamente fijo, en el caso de mejorar características mecánicas (tornillos más específicos, material de más calidad, más porcentaje de *infill*, etc.) o bien de mejorar los grados de libertad de la mano (más motores), el aumento del precio final sería proporcionalmente poco importante.

13. Divulgación de la tecnología

Como finalización de este proyecto queda la fase de divulgar la tecnología públicamente en internet.

Como se ha ido explicando, uno de los objetivos que se quieren conseguir con la realización de este prototipo es llegar a crear un modelo de prótesis robótica que se pueda publicar en una plataforma de intercambio de proyectos para que cualquiera pueda descargárselo y fabricarlo, modificándolo o mejorándolo antes si lo cree conveniente y tiene las capacidades.

La plataforma elegida es *instructables* («Yours for the Making», s. f.). En ella se han subido los archivos:

- De mallas (.stl) para si se quiere imprimir en el estado actual.
- Parametrizado (.f3d) para si se quiere modificar/mejorar.
- El programa en Arduino (.ino) para el funcionamiento del microcontrolador.

Además, se han escrito las instrucciones de impresión y montaje del estado actual con la lista de materiales y componentes electrónicos a comprar.

Todo esto acompañado de fotos y videos para una mayor comprensión del proceso.

Se puede encontrar la publicación del proyecto en el siguiente enlace:

<https://www.instructables.com/id/Robotic-Prosthesis/>

14. Conclusiones

Este proyecto tenía como objetivo principal el diseño y fabricación del prototipo de una prótesis robótica mediante tecnologías desarrollables en un entorno doméstico, con conocimientos básicos de impresión 3D y electrónica.

Este objetivo principal se ha visto asumido mediante el cumplimiento de la mayoría de los objetivos específicos que se plantearon en un inicio:

- Se ha encontrado una solución para fabricar y poner en marcha un mecanismo que simule una muñeca y una mano.
- Se ha hecho un diseño de la electrónica necesaria para poder mover los elementos previamente pensados y fabricados.
- Se ha hecho un pequeño estudio sobre qué tecnologías se deberían usar para poder ofrecer a la prótesis la capacidad de reaccionar ante el pensamiento del sujeto usuario.
- Se ha estimado que el precio final de la prótesis definitiva tendría un precio relativamente asequible vistas todas sus funcionalidades finales.
- Se han divulgado los resultados en una plataforma de intercambio de proyectos *maker* para que, quien quiera, pueda fabricarlo o mejorarlo.

Además, gracias a la realización de este proyecto se han adquirido habilidades técnicas como el uso de herramientas CAD enfocadas a la fabricación aditiva y el uso de impresoras 3D.

15. Trabajo futuro

Se deja planteado para un trabajo futuro los siguientes aspectos:

- Diseño de una pieza o piezas versátiles con distintas longitudes que se puedan acoplar a la prótesis para hacer de agarre con el final de la extremidad dañada del sujeto propietario de la prótesis.
- Implementación de las tecnologías de control neuronal.
- Selección de la batería adecuada.
- Mejora de la mano.

16. Bibliografía

99P - Prótesis de mano con control motor by Fillauer | MedicalExpo. (s. f.). Recuperado de <https://www.medicalexpo.es/prod/fillauer/product-74954-466538.html>

1682209.pdf. (s. f.). Recuperado de <https://www.farnell.com/datasheets/1682209.pdf>

Arduino Uno Rev3 SMD | Arduino Official Store. (s. f.). Recuperado de <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3-smd>

Arduino—Home. (s. f.). Recuperado de <https://www.arduino.cc/>

Banggood.com. (s. f.). ROBSG HS3230 30KG 25T Metal sin engranaje Impermeable Metal Gear Digital Servo para modelos RC Piezas RC from Juguetes Pasatiempos y Robot on banggood.com. Recuperado de [Www.banggood.com](https://www.banggood.com/ROBSG-HS3230-30KG-25T-Coreless-Waterproof-Metal-Gear-Digital-Servo-For-RC-Models-p-1510899.html) website: <https://es.banggood.com/ROBSG-HS3230-30KG-25T-Coreless-Waterproof-Metal-Gear-Digital-Servo-For-RC-Models-p-1510899.html>

Building a Prosthetic Arm With Lego. (s. f.). Recuperado de https://www.youtube.com/watch?v=vFymKqUwodY&feature=emb_logo

Creality3D Ender-3 3D Printer Economic Ender DIY KITS. (s. f.). Recuperado de Creality 3D EU website: <https://www.creality3dshop.eu/products/creality-ender-3-3d-printer-economic-ender-diy-kits-with-resume-printing-function-v-slot-prusa-i3-220x220x250mm>

DIY Neurotechnologist's Starter Kit. (s. f.). Recuperado de OpenBCI Online Store website: <https://shop.openbci.com/products/d-i-y-neurotechnologists-starter-kit>

El protocolo serie, entiéndelo y protégelo. (2018). Recuperado de INCIBE-CERT website: <https://www.incibe-cert.es/blog/el-protocolo-serie-entiendeloy-protogelo>

Finch, J. (2011). The ancient origins of prosthetic medicine. *The Lancet*, 377(9765), 548-549. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)60190-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)60190-6)

Flexor Largo Superficial Común de los Dedos (FLSCD). (2014). Recuperado de MÚSCULO A MÚSCULO website: <https://musculoamusculo.wordpress.com/anatomia-muscular/miembro-superior/muneca/flexor-largo-superficial-comun-de-los-dedos/>

Ganglion Board (4-channels). (s. f.). Recuperado de OpenBCI Online Store website:

<https://shop.openbci.com/products/ganglion-board>

Garzón-Alvarado et al. - Sobre la aparición de la biomecánica y la mecanobi.pdf. (s. f.).

Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/ibi/v28n3/ibi08309.pdf>

González—2005—ROBÓTICA Y PRÓTESIS INTELIGENTES.pdf. (s. f.). Recuperado de

http://www.ru.tic.unam.mx:8080/bitstream/handle/123456789/840/art01_enero.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Hombre de Vitruvio: El significado. (2013). Recuperado de TECNOARTES.NET website:

<https://tecnoartes.net/2013/03/11/hombre-de-vitruvio-el-significado/>

HS110 | Enchufe Inteligente Wi-Fi con Monitorización de Energía | TP-Link Iberia. (s. f.).

Recuperado de <https://www.tp-link.com/es/home-networking/smart-plug/hs110/>

Impresoras 3D crean prótesis de manos y brazos | Tecnología. (2018). Recuperado de

<https://www.youtube.com/watch?v=Hbd-NwrlVac&t=129s>

Information, N. C. for B., Pike, U. S. N. L. of M. 8600 R., MD, B., & Usa, 20894. (2018). How

do hands work? En *InformedHealth.org [Internet].* Recuperado de

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK279362/>

Loaiza Bernal, J. L. (2012). *Diseño y simulación de un prototipo de prótesis de mano*

bioinspirada con cinco grados de libertad (Universidad Nacional de Colombia).

Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/77272259.pdf>

Loaiza y Arzola—2011—EVOLUCIÓN Y TENDENCIAS EN EL DESARROLLO DE

PRÓTESI.pdf. (s. f.). Recuperado de

<http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v78n169/a22v78n169.pdf>

López, L. A. A. (2012). Biomecánica y patrones funcionales de la mano. *Morfolia, 4*(1).

Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/morfolia/article/view/31373>

Maxit, D. M. J. (s. f.). *¿DE QUIÉN HABLAMOS CUANDO HABLAMOS DE AMBROISE PARÉ?*

3.

Medicina, estudio, electrofisiología, eeg, electroencefalografía, electroencefalograma, salud, ciencia, tecnología, registro | Pxfuel. (s. f.). Recuperado de <https://www.pxfuel.com/es/free-photo-xcout>

MG90S Metal Gear Servo. (s. f.). Recuperado de <https://datasheetspdf.com/pdf-file/1106582/ETC/MG90S/1>

Miralles y Giuliano—2008—Biónica eficacia versus eficiencia en la tecnolog.pdf. (s. f.). Recuperado de <https://www.scielo.br/pdf/ss/v6n3/v6n3a05.pdf>

Open Bionics Labs. (s. f.). Recuperado de Open Bionics website: <https://openbionicslabs.com>
OpenBCI - Open Source Biosensing Tools (EEG, EMG, EKG, and more). (s. f.). Recuperado de <https://openbci.com/>

Pelusso, A. (s. f.). Atomic Lab. Recuperado de Atomic Lab website: <https://atomiclab.org/>
Pérez, S. (2015). Control mediante Arduino del movimiento de una antena directiva con un servomotor (TFG, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID). Recuperado de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/24056/TFG_Sandra_Perez_Prieto_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Prótesis: MedlinePlus enciclopedia médica. (s. f.). Recuperado de <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/002286.htm>

*Puerta, C. V., Solá, M. L. del R., & García, E. S. N. (2018). Ambrosio Paré. Aportaciones a la cirugía. *Revista española de investigaciones quirúrgicas*, 21(2), 67-70.*

Redacción. (2018). Ambroise Paré, el barbero convertido en médico de los reyes de Francia que cambió la cirugía para siempre. BBC News Mundo. Recuperado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-43478384>

RG2—Pinza de prensión eléctrica by On Robot ApS | DirectIndustry. (s. f.). Recuperado de <https://www.directindustry.es/prod/on-robot-aps/product-177431-1766941.html>

Robotic Arm | 3D CAD Model Library | GrabCAD. (s. f.). Recuperado de https://grabcad.com/library/robotic-arm-48/details?folder_id=1714585

Robots UR3e: Robot Colaborativo Universal Robot. (s. f.). Recuperado de <https://cfzcobots.com/productos/ur3e/>

Servo Motor Micro MG90S. (s. f.). Recuperado de ProtoSupplies website:

<https://protosupplies.com/product/servo-motor-micro-mg90s/>

Servomotor MG90. (s. f.). Recuperado de Tostatronic website:

<https://tostatronic.com/store/es/motores/267-servomotor-mg90.html>

TE DOY UNA MANO - *emprendimiento solidario*. (2019). Recuperado de

<https://www.youtube.com/watch?v=k4YQAlarGZY>

TESTING 3D printed INFILL PATTERNS for their STRENGTH. (2018). Recuperado de

<https://www.youtube.com/watch?v=upELI0HmzHc&list=PLM7r9TfTRTRUZmyIXVAX7qcyhpwtfqxv&index=501>

Thingiverse.com. (s. f.-a). 2 DOF fully compliant space pointing mechanism by BYU_CMR.

Recuperado de <https://www.thingiverse.com/thing:3612786>

Thingiverse.com. (s. f.-b). Spherical Parallel Manipulator by plusalphaDesigns. Recuperado

de <https://www.thingiverse.com/thing:3951917>

Thingiverse.com. (s. f.-c). Thingiverse—Digital Designs for Physical Objects. Recuperado de

<https://www.thingiverse.com/>

Ultimaker Cura: Powerful, easy-to-use 3D printing software. (s. f.). Recuperado de

Ultimaker.com website: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>

Wu, G., Bai, S., & Kepler, J. (2014). Mobile platform center shift in spherical parallel

manipulators with flexible limbs. *Mechanism and Machine Theory*, 75, 12-26.

<https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.01.001>

Yours for the making. (s. f.). Recuperado de Instructables website:

<https://www.instructables.com/>

A.Arduino

Especificaciones del Arduino UNO:

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

Tabla 8: Especificaciones Arduino UNO.

Fuente: («Arduino Uno Rev3 SMD | Arduino Official Store», s. f.).

B. Servomotores

Motor Model	MG90S
Drive Type	Analog
Degree Rotation	180° (±15°)
Operating Ratings	
Voltage	4.8-6 VDC (5V Typical)
Current (idle)	10mA (typical)
Current (typical during movement)	120-250mA
Current (stall)	700mA (measured)
Stall Torque	2.2kg-cm (per spec)
Speed	0.12s / 60 degree (varies with VDC)
Dimensions	
Cable Length	24cm
Motor Housing L x W x H	23 x 12 x 26 mm
Motor Height (w/ shaft)	32mm
Motor Housing Width with Mounting Ears	32mm

Tabla 9: Especificaciones de los servomotores.

Fuente: («Servo Motor Micro MG90S», s. f.).

C.Programa

```

#include <Servo.h> //se incluye la libreria para usar los servos

Servo servo1; //definicion de los 4 servos
Servo servo2;
Servo servo3;
Servo servo4;

char ordre; //variable de ordenes de movimiento
int s1=0, s2=0, s3=0, s4=0; //variables del angulo de los servos
bool token=false; //variable de llegada de ordenes
int GiroMaximo; //variable auxiliar de limite de giro
//se usa en el switch case con una formula
//distinta en cada caso

void setup()
{
  Serial.begin(9600); //inicialización del bus serial

  servo1.attach(9); //definicion de los pines PWM de cada servo
  servo2.attach(10);
  servo3.attach(11);
  servo4.attach(3);

  pinMode(7, INPUT);
  //servos en posicion de reposo. Los calculos se realizan
  //con el 0 como posicion central (rango de -90 a 90)
  //pero los servos entienden por posicion neutral
  //el 90 (rango de 0 a 180)
  servo1.write(s1+90);
  servo2.write(s2+90);
  servo3.write(s3+90);
  servo4.write(s4+90);
}

void loop() {
  //si hay datos en el bus serial
  //se guardan en la variable ordre
  //y se canvia el token a true
  if (Serial.available()) {
    ordre = Serial.read();
    token=true;
  }
  switch (ordre){
    case 'A': //A=abrir
      Serial.println("abrir");
      s4=165; //angulo max de la mano = 75+90
      break;
    case 'C': //C=cerrar
      Serial.println("cerrar");
      s4=70; //angulo min de la mano = -20+90
      break;
    case 'Y': //Y=yaw horario; s1 y s2 giran simetricamente, s3 quieto
      Serial.println("YAW");
      GiroMaximo = 20+min(70+s2, 70-s1);
  }
}

```

```

s2=s2-GiroMaximo;
s1=s1+GiroMaximo;
break;
case 'y': //y=yaw antihorario; s1 y s2 giran simetricamente, s3 quieto
Serial.println("yaw");
GiroMaximo = 20+min(70-s2,70+s1);
s2=s2+GiroMaximo;
s1=s1-GiroMaximo;
break;
case 'R': //R=roll horario; s1, s2, s3 giran solidarios
Serial.println("ROLL");
GiroMaximo = 90-max(max(max(s1,s2),s3),0);
s1=s1+GiroMaximo;
s2=s2+GiroMaximo;
s3=s3+GiroMaximo;
break;
case 'r': //r=roll antihorario; s1, s2, s3 giran solidarios
Serial.println("roll");
GiroMaximo = 90+min(min(min(s1,s2),s3),0);
s1=s1-GiroMaximo;
s2=s2-GiroMaximo;
s3=s3-GiroMaximo;
break;
case 'O': //O= posicion de origen
Serial.println("Inicio");
s1=0;
s2=0;
s3=0;
s4=90;
break;
}
//si el token esta activo se escribe la nueva posicion de
//cada servo y se desactiva el token;
//a la posicion se le sume 90 ya que estan referenciados
//con el 90 en la posicion central
if(token){
  servo1.write(s1+90);
  servo2.write(s2+90);
  servo3.write(s3+90);
  servo4.write(s4);
  token=false;
  Serial.println(s1);
  Serial.println(s2);
  Serial.println(s3);
  Serial.println(s4);
}
}

```

D.Fotografías de pruebas

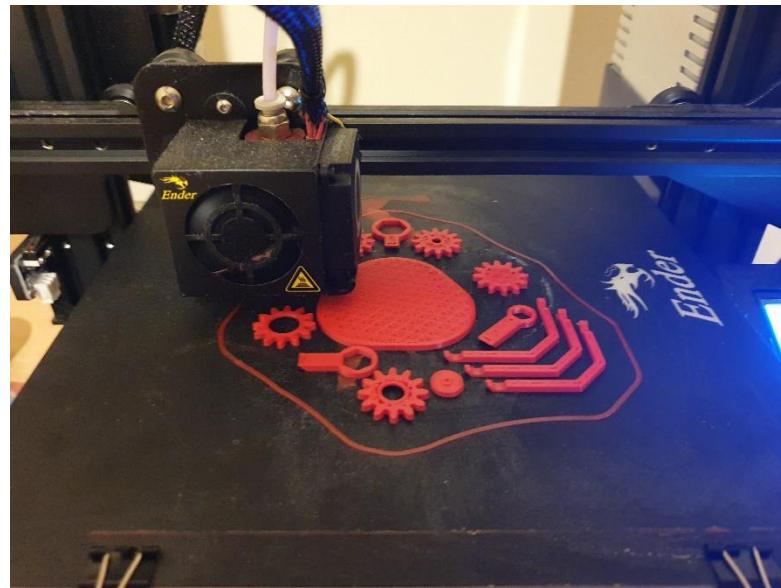


Ilustración 34: Imprimiendo piezas de prueba.

Fuente: Propia.



Ilustración 35: Una de las primeras versiones del mecanismo de la muñeca.

Fuente: Propia.

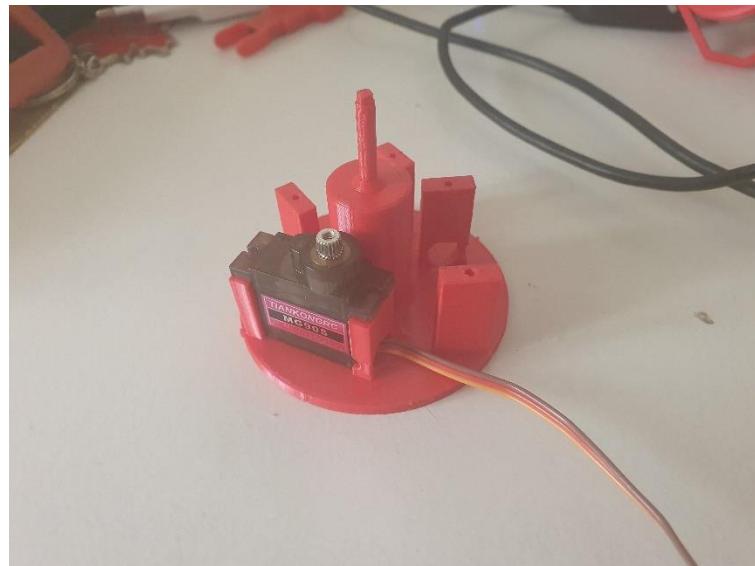


Ilustración 36: Pruebas de los soportes de los motores.

Fuente: Propia.



Ilustración 37: Versión próxima a la final de la muñeca.

Fuente: Propia.

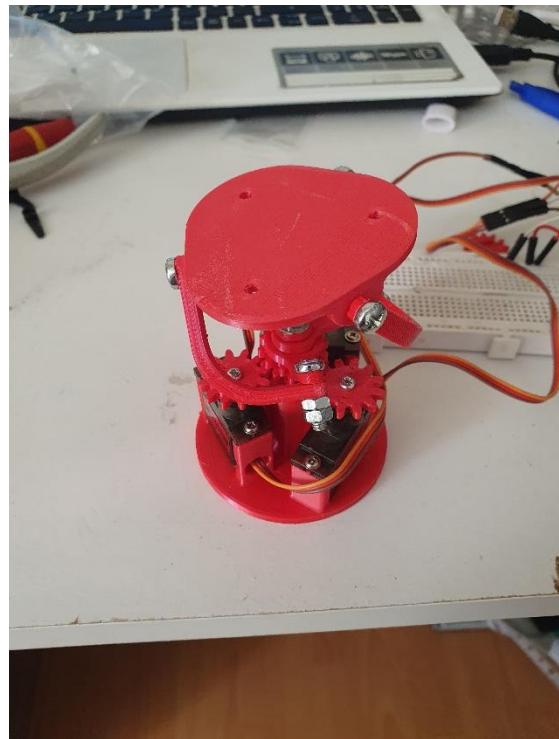


Ilustración 38: Primera versión funcional de la muñeca.

Fuente: Propia.



Ilustración 39: Primera versión de la mano.

Fuente: Propia.

E. Piezas finales

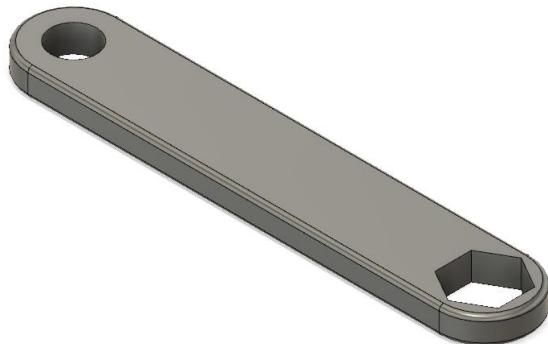


Ilustración 40: Barra con agujero hexagonal.

Fuente: Propia.

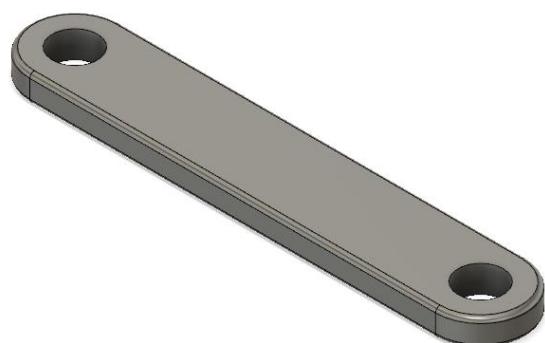


Ilustración 41: Barra simple.

Fuente: Propia.



Ilustración 42: Base de la mano.

Fuente: Propia.

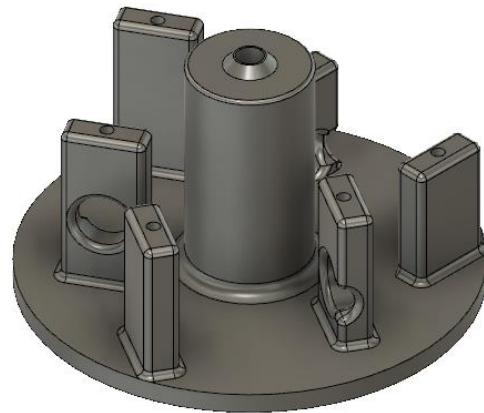


Ilustración 43: Base de la muñeca.

Fuente: Propia.

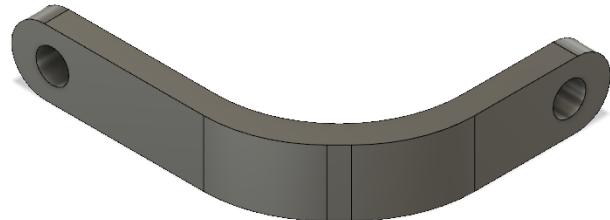


Ilustración 44: Conector de 90º.

Fuente: Propia.

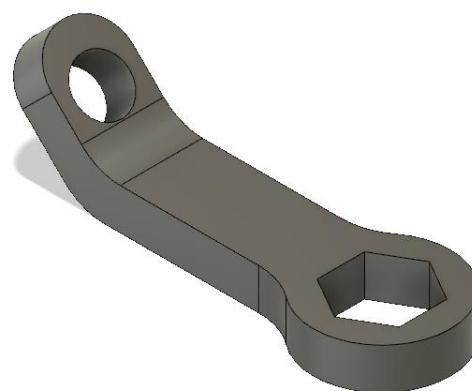


Ilustración 45: Conector del nivel 1.

Fuente: Propia.



Ilustración 46: Conector del nivel 2.

Fuente: Propia.



Ilustración 47: Conector del nivel 3.

Fuente: Propia.

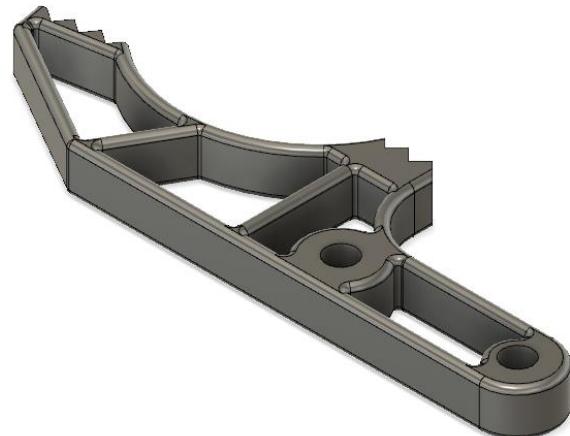


Ilustración 48: Dedo de la mano.

Fuente: Propia.

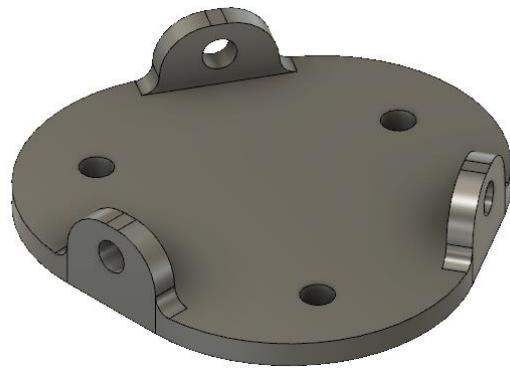


Ilustración 49: Plataforma superior de la muñeca.

Fuente: Propia.

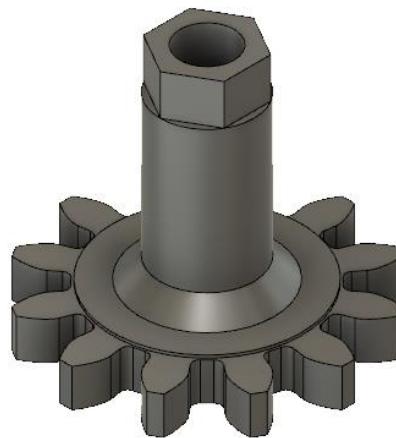


Ilustración 50: Rueda central del nivel 1.

Fuente: Propia.

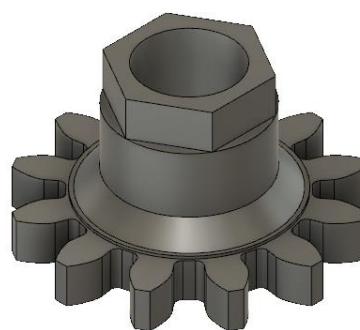


Ilustración 51: Rueda central del nivel 2.

Fuente: Propia.

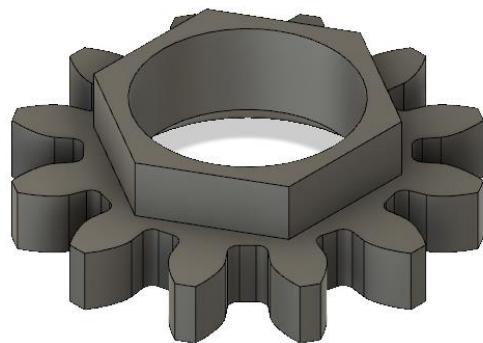


Ilustración 52: Rueda central del nivel 3.

Fuente: Propia.

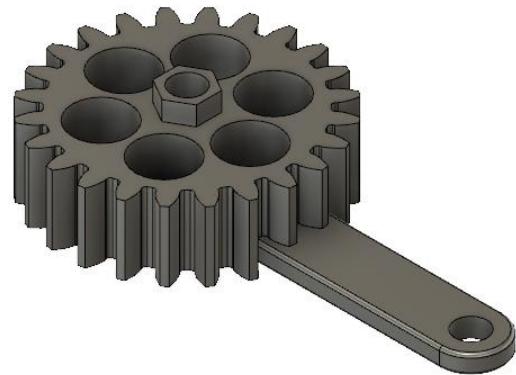


Ilustración 53: Rueda esclava de la mano.

Fuente: Propia.

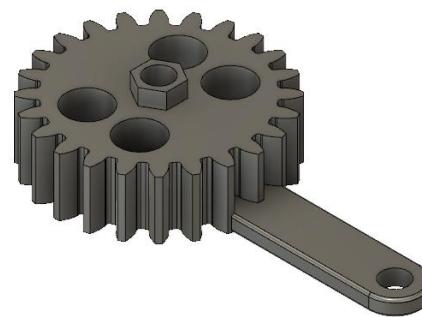


Ilustración 54: Rueda tractora de la mano.

Fuente: Propia.

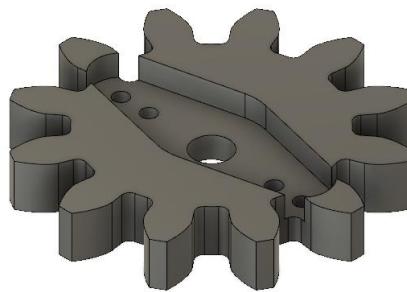


Ilustración 55: Rueda de los motores de la muñeca.

Fuente: Propia.

F. Fotografías de los pasos de montaje

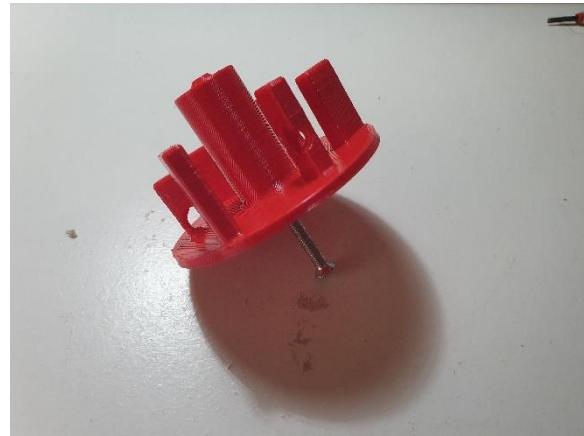


Ilustración 56: paso 1.

Fuente: Propia.



Ilustración 57: Paso 2.1.

Fuente: Propia.

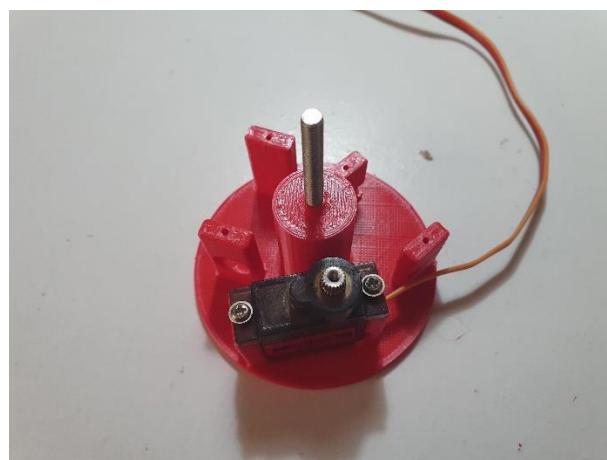


Ilustración 58: paso 2.2.

Fuente: Propia.



Ilustración 59: Paso 3.

Fuente: Propia.

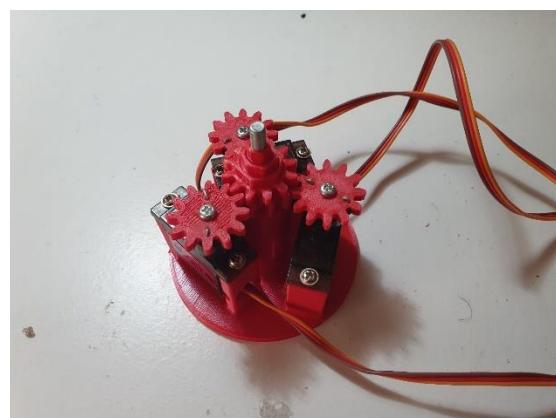


Ilustración 60: Paso 4.

Fuente: Propia.



Ilustración 61: Paso 5.

Fuente: Propia.



Ilustración 62: paso 6.

Fuente: Propia.



Ilustración 63: Paso 7.

Fuente: Propia.

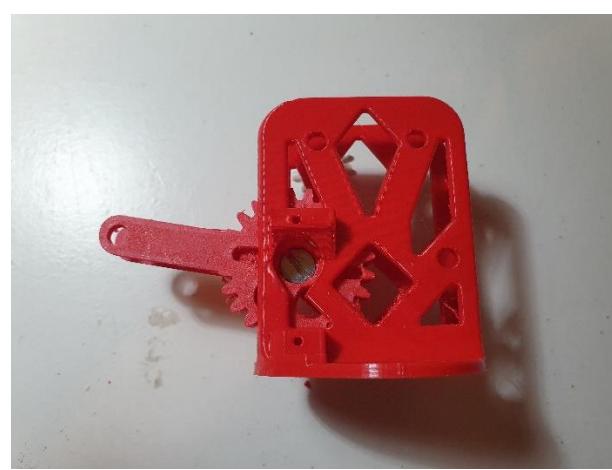


Ilustración 64: Paso 8.

Fuente: Propia.

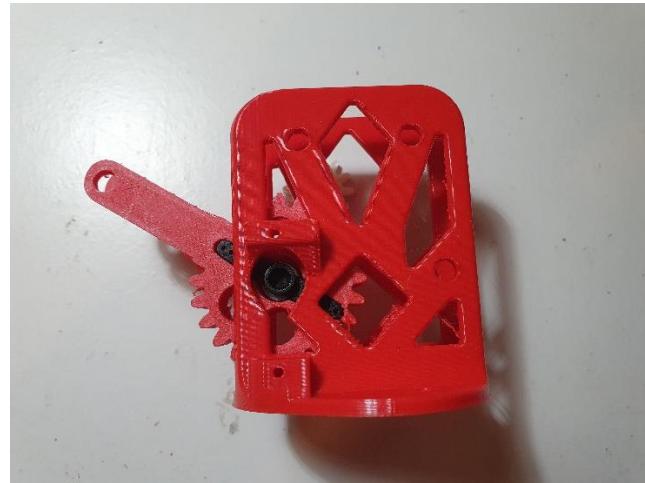


Ilustración 65: Paso 9.

Fuente: Propia.

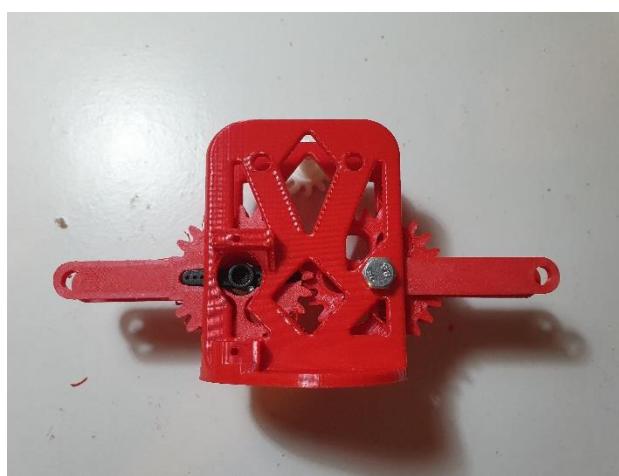


Ilustración 66: Paso 10.1.

Fuente: Propia.



Ilustración 67: Paso 10.2.

Fuente: Propia.



Ilustración 68: Paso 11.

Fuente: Propia.



Ilustración 69: montaje mecánico realizado.

Fuente: Propia.