



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

DISEÑO, DESARROLLO Y FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO DE UN BRAZO ROBÓTICO ARTICULADO CONTROLADO POR ARDUINO PARA LA EXTRACCIÓN DE PIEZAS EN IMPRESORAS 3D

AUTOR: GUILLERMO ALANDÍ MARTÍN

TUTOR: FRANCISCO EUGENIO ALBERT GIL

COTUTORA: MARÍA NURIA ALEIXOS BORRÁS

Curso Académico: 2017-18

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

RESUMEN

Actualmente se está desarrollando una nueva industria en torno al prototipado rápido o impresión 3D que posibilita a los consumidores tener acceso a un bajo coste. Es posible diseñar un producto utilizando software CAD y realizar un prototipo real del mismo enviándolo a imprimir, como si de un archivo de texto se tratase.

A lo largo del documento se muestra el desarrollo de producto de un brazo robótico destinado a la extracción de piezas en impresoras 3D, abordando la fase de fabricación y de ensamblaje como parte del diseño.

En primer lugar, se especifican las características geométricas del prototipo y los elementos clave que sentarán las bases del diseño. A continuación, se realiza un análisis del movimiento utilizando un mecanismo de barras simple, dando como resultado el par de torsión necesario para mover el brazo robótico y en consecuencia el tamaño de los servomotores, necesario para modelar el conjunto de piezas.

En la fase de modelado de las piezas se muestran las líneas de diseño, pensando en todo momento en la fabricación (dividiendo piezas en dos componentes para optimizar el proceso de impresión) y el montaje, sin renunciar al componente estético que se persigue. A continuación, se ensamblan todas las piezas en un modelo digital del brazo robótico, lo que posibilita realizar ajustes de posicionamiento de los elementos o correcciones geométricas antes de proseguir a la siguiente fase.

Tras esto, cada pieza se fabrica utilizando una impresora 3D doméstica con el fin de realizar el montaje de todas las partes y crear un prototipo funcional.

Por último, se realiza el cableado de todos los sistemas eléctricos y se escribe el código de control del brazo robótico, que debe ser capaz de ponerse en funcionamiento una vez terminada la impresión de la pieza a extraer con la siguiente secuencia: aproximarse a la pieza, cogerla y depositarla fuera del perímetro de impresión.

Palabras Clave:

- Diseño.
- Pieza.
- Impresión 3D.
- Arduino.
- SOLIDWORKS.
- Brazo robótico.
- Diseño para fabricación.
- Prototipado rápido.
- Desarrollo de producto.
- Mecanismo de cuatro barras.

RESUM

Actualment s'està desenvolupant una nova indústria entorn al prototipat ràpid o impressió 3D que possibilita als consumidors tindre accés a un baix cost. És possible dissenyar un producte utilitzant un software CAD i realitzar un prototip real del mateix enviant-lo a imprimir, com si d'un arxiu de text es tractara.

Al llarg del document es mostra el desenvolupament de producte d'un braç robòtic destinat a l'extracció de peces en impressores 3D, abordant la fase de fabricació i d'acoblament com a part del disseny.

En primer lloc, s'especifiquen les característiques geomètriques del prototip i els elements clau que assentaran les bases del disseny. A continuació, es realitza una anàlisi del moviment utilitzant un mecanisme de barres simple, donant com resultat el parell de torsió necessari per a moure el braç robòtic i en conseqüència la grandària dels servomotors, necessari per a modelar el conjunt de peces.

En la fase de modelatge amb de les peces amb de les peces es mostren les línies de disseny, pensant en tot moment en la fabricació (dividint peces en dos components per a optimitzar el procés d'impressió) i el muntatge, sense renunciar al component estètic que es persegueix. A continuació, s'acoblen totes les peces en un model digital del braç robòtic, la qual cosa possibilita realitzar ajustos de posicionament dels elements o correccions geomètriques abans de continuar a la següent fase.

Després d'açò, cada peça es fabrica utilitzant una impressora 3D domèstica a fi de realitzar el muntatge de totes les parts i crear un prototip funcional.

Finalment, es realitza el cablejat de tots els sistemes elèctrics i s'escriu el codi de control del braç robòtic, que ha de ser capaç de posar-se en funcionament una vegada acabada la impressió de la peça a extraure amb la seqüència següent: aproximar-se a la peça, agafar-la i depositar-la fora del perímetre d'impressió.

Paraules Clau:

- Disseny.
- Peça.
- Impressió 3D.
- Arduino.
- SOLIDWORKS.
- Braç robòtic.
- Disseny per a fabricació.
- Prototipat ràpid.
- Desenvolupament de producte.
- Mecanisme de quatre barres

ABSTRACT

A new industry is currently being developed around rapid prototyping or 3D printing that enables consumers to access it at a low cost. It is possible to design a product using CAD software and make a real prototype of it by sending it to print, as if it were a text file.

Throughout the document the product development of a robotic arm for the extraction of parts in 3D printers is taught, addressing the manufacturing and assembly phase as part of the design.

First, the geometric characteristics of the prototype and the key elements that will form the basis of the design are specified. A motion analysis is then performed using a simple bar mechanism, resulting in the torque required to move the robotic arm and hence the size of the servomotors required to model the set of parts.

In the modeling phase, the design lines are shown, thinking at all times of the manufacturing (dividing pieces into two components to optimize the printing process) and the assembly, without renouncing the aesthetic component that is being pursued. All the parts are then assembled into a digital model of the robotic arm, which makes it possible to make adjustments to the positioning of the elements or geometric corrections before proceeding to the next phase.

After this, each part is manufactured using a 3D home printer in order to assemble all the parts and create a functional prototype.

Finally, all the electrical systems are wired and the control code of the robotic arm is written, which must be able to be put into operation once the printing of the part to be extracted has been completed with the following sequence: approach the part, take it and place it outside the printing perimeter.

Keywords:

- Design.
- Piece.
- 3D Print.
- Arduino.
- Product Development.
- SOLIDWORKS.
- Robotic Arm.
- Design for manufacturing.
- Rapid Prototyping.
- Four bar mechanism.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

ÍNDICE

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFM

- Memoria
- Presupuesto
- Planos

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	MOTIVACIÓN	1
1.2.	OBJETIVOS	1
1.3.	IDEA DEL PROYECTO	1
1.4.	CONCEPTOS TEÓRICOS.....	2
1.4.1.	Mecanismo	2
1.5.	PROTOTIPADO RÁPIDO. IMPRESORAS 3D	3
1.5.1.	Historia y técnicas.....	3
1.5.1.1.	Estereolitografía (SLA):.....	4
1.5.1.2.	Curado en base sólida:	4
1.5.1.3.	Sinterizado selectivo por láser:	5
1.5.1.4.	Modelado por deposición fundida (MDF o FDM):	6
1.6.	SOFTWARE EMPLEADO	7
1.6.1.	SOLIDWORKS 2017	7
1.6.2.	Ultimaker CURA.....	8
1.6.3.	Arduino IDE.....	8
1.7.	PLATAFORMA ARDUINO.....	8
2.	DESARROLLO	11
2.1.	PRESENTACIÓN	11

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

2.2.	ANÁLISIS PREVIO	11
2.2.1.	Geometría y dimensiones.....	11
2.2.2.	Especificaciones.....	13
2.2.3.	Mecanismo de barras	14
2.2.4.	Análisis del movimiento	19
2.2.4.1.	Análisis estático	21
2.2.4.2.	Análisis dinámico	22
2.3.	PROCESO DE DISEÑO	25
2.3.1.	Características del diseño.....	25
2.3.2.	Técnicas de diseño aplicadas.....	27
2.3.3.	Codificación de los archivos CAD.....	29
2.3.4.	Modelado y ensamblaje	30
2.3.4.1.	Grupo 01. Brazo.....	30
2.3.4.2.	Grupo 02. Antebrazo	34
2.3.4.3.	Grupo 03. Mano	37
2.3.4.4.	Grupo 04. Pinza	41
2.3.4.5.	Grupo 00. Base	43
2.3.4.6.	Ensamblaje BR-E.....	50
2.4.	PROCESO DE FABRICACIÓN POR IMPRESIÓN 3D	53
2.4.1.	Transferencia de archivos.....	53
2.4.2.	Parámetros característicos.....	54
2.4.3.	Resultados	57
2.5.	PARTE ELÉCTRICA. ARDUINO	63
2.5.1.	Componentes utilizados.....	64
2.5.1.1.	Fuente de alimentación.....	64
2.5.1.2.	Servomotores	64
2.5.1.3.	Convertidor Buck.....	67
2.5.1.4.	Cables y otros elementos auxiliares:.....	67
2.5.2.	Esquema de conexiones	67
2.5.3.	Programación Arduino	69
2.6.	MONTAJE DE PIEZAS Y PARTE ELÉCTRICA	73

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

3. PRUEBAS Y CONCLUSIONES	82
--	----

LISTA DE FIGURAS.....	86
-----------------------	----

LISTA DE TABLAS.....	90
----------------------	----

BIBLIOGRAFÍA.....	91
-------------------	----

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1. PRESUPUESTO	1
----------------------	---

ÍNDICE DE PLANOS

1. BR-E.....	1
--------------	---

2. BR-00	2
----------------	---

3. BR-01	3
----------------	---

4. BR-02	4
----------------	---

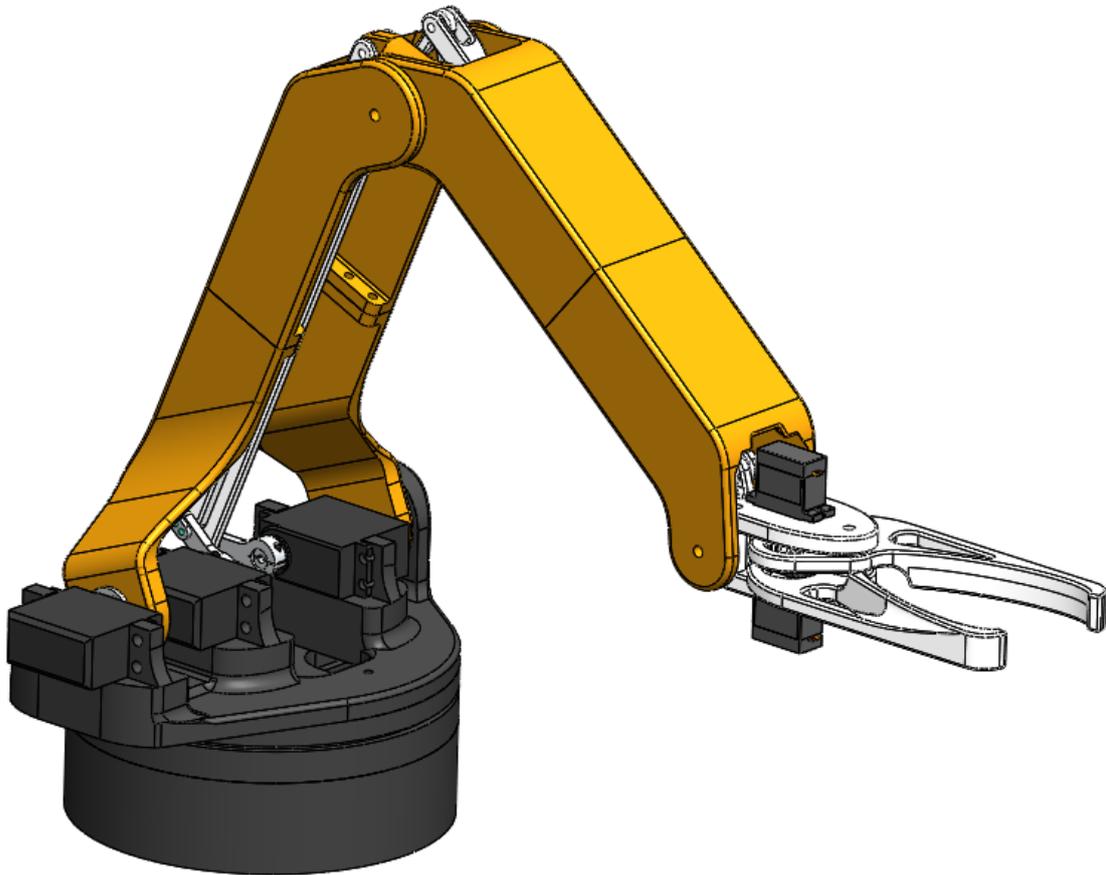
5. BR-03	5
----------------	---

6. BR-04	6
----------------	---

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

DISEÑO, DESARROLLO Y FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO DE UN BRAZO ROBÓTICO ARTICULADO CONTROLADO POR ARDUINO PARA LA EXTRACCIÓN DE PIEZAS EN IMPRESORAS 3D



Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

El presente trabajo de final de máster pretende ser la oportunidad para desarrollar una idea de producto original, desde su concepción y diseño hasta la fabricación y puesta en marcha de un prototipo aplicando los conocimientos de ingeniería adquiridos durante los últimos 6 años y, en especial, los desarrollados en la especialidad de diseño y fabricación de producto.

Para ello, se van a emplear herramientas informáticas de CAD y CAE para modelar y realizar análisis de los componentes creados para, posteriormente, fabricarlos gracias al uso de impresoras 3D. Además, este trabajo brinda la posibilidad de adentrarse en la automática y el control mediante el uso de un microcontrolador Arduino y el uso de servo motores para generar el movimiento del producto.

1.2. OBJETIVOS

El principal objetivo de este trabajo es el de diseñar y fabricar un prototipo de un brazo robótico controlado mediante el uso de un microcontrolador Arduino, cuya función será la de extraer piezas de una impresora 3D. Es decir, el proyecto tiene como finalidad automatizar el proceso de impresión 3D en un entorno doméstico o profesional para que no sea necesaria la intervención de una persona en la operación de extracción de las piezas. Para ello se va a utilizar la propia impresora 3D con el fin de fabricar las piezas diseñadas puesto que es un método accesible y económico para la creación de prototipos.

Por el camino se han marcado otros objetivos como son los de aplicar los conocimientos adquiridos durante el curso en la especialidad de diseño y fabricación de producto. A lo largo del trabajo se desarrollan conceptos clave como el diseño para la fabricación y para el montaje, técnicas de modelado, prototipado rápido, gestión de archivos digitales y selección de materiales.

Por otra parte, también se marca como objetivo aprender a utilizar y a programar un microcontrolador Arduino y realizar el montaje de la electrónica necesaria para hacerlo funcionar.

1.3. IDEA DEL PROYECTO

A la hora de producir piezas con una impresora 3D, existe una gran dependencia humana en el proceso una vez terminada la impresión. Normalmente, salvo en impresoras de alto coste para uso profesional, es una persona la que tiene que retirar las piezas.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Para ello, este trabajo va a desarrollar el diseño y la fabricación de un prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino.

El objetivo final no es solo crear un brazo robótico que funcione, si no que sea distintivo en materia de diseño si se compara con otras soluciones existentes en la actualidad, tanto las comerciales de producción en serie como otras desarrolladas por la comunidad de creadores en plataformas como Thingiverse.

La mayoría de las impresoras 3D domésticas, como se ha comentado en el apartado anterior, utilizan una plataforma base denominada cama caliente. La base, durante el proceso de impresión, se calienta a una determinada temperatura que, dependiendo del material utilizado, oscila entre los 50°C y los 90°C para asegurar la correcta adhesión de la pieza mientras se realiza la pieza. Al terminar una impresión, la temperatura desciende hasta la temperatura ambiente y, si la máquina tiene una correcta calibración, la pieza puede ser sustraída con facilidad.

Es en este punto donde un brazo robótico tiene su cabida, ya que una vez la pieza pueda ser retirada entraría en funcionamiento aproximándose a la pieza, cogiéndola con la pinza del extremo y desplazándola hasta un punto cercano donde la depositaría. Tras esto, el usuario podría poner en marcha otro proceso de impresión sin tener que estar físicamente en el mismo lugar donde tiene ubicada la impresora 3D.

1.4. CONCEPTOS TEÓRICOS

1.4.1. Mecanismo

Un mecanismo es una máquina formada un conjunto de cuerpos rígidos unidos entre sí, por lo que presentan movimiento relativo entre ellos. Entre cada cuerpo existe una interacción que es consecuencia de su propia unión, llamada par cinemático.

Los cuerpos rígidos del mecanismo se denominan piezas. Estas piezas, a su vez, pueden ser un solo cuerpo rígido o la unión de varios cuerpos rígidos que, al formar parte de una misma pieza, se denominan componentes. Esta división en dos o más componentes es de gran utilidad a la hora de fabricar las piezas, reduciendo los tiempos de proceso y mejorando el acabado.

Los mecanismos tienen diferentes cuerpos, pero debido a su función esencial son tres los que reciben nombre en este documento: el cuerpo base, el impulsor y el seguidor o trazador.

- Cuerpo base: es el cuerpo rígido que consideramos fijo, donde situamos el sistema de referencia global del sistema. A lo largo del proyecto se muestran varios mecanismos de cuatro barras, en donde el cuerpo base del mecanismo es una pieza que también es móvil, aunque de forma relativa se puede considerar como fijo.
- Impulsor: Es el cuerpo rígido del mecanismo que introduce el movimiento al resto. En general, suele estar unido al cuerpo base mediante un par de revolución.
- Seguidor: Es la pieza que ejecuta la tarea requerida.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Es posible hacer una comparación entre un mecanismo y un diagrama *input/output*, como ilustra en la figura 1. Se introduce un movimiento (input) sobre el impulsor, este acciona el resto del mecanismo y obtenemos un movimiento diferente en el seguidor (output).

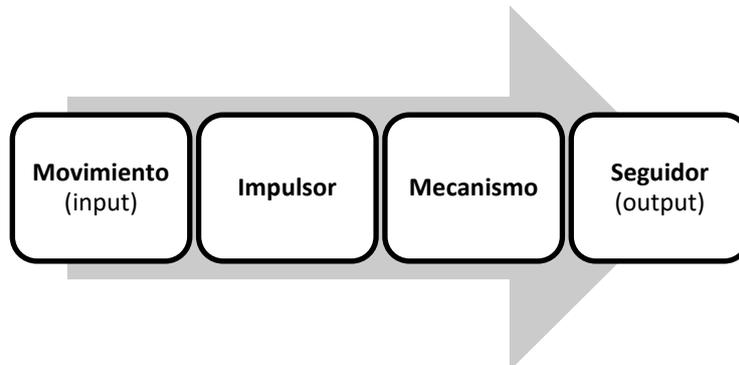


Figura 1 – Diagrama *input/output* mecanismo

1.5. PROTOTIPADO RÁPIDO. IMPRESORAS 3D

El eje vertebral sobre el que discurre este trabajo es la impresión 3D, concretamente en impresoras de modelado por deposición fundida o FDM. A continuación, se va a describir el estado del arte y conceptos de interés.

1.5.1. Historia y técnicas

En 1984 Charles Hull, ingeniero físico por la universidad de Colorado, estaba trabajando en una empresa dedicada a hacer revestimientos para mesas utilizando resinas y luz ultravioleta. Le surgió la idea de utilizar esta tecnología de endurecimiento rápido de fotoreinas para convertir de forma rápida diseños hechos por computador en prototipos físicos. A esta técnica de prototipado se la conoce como estereolitografía (SLA).

De esta manera se inició una revolución en la industria. Hasta entonces la fabricación de prototipos era lenta y costosa, pero desde ese momento era posible crear un prototipo de prácticamente cualquier producto, con las ventajas competitivas que ello supone, como son:

- Rapidez en la fabricación.
- Reducción de costes en el desarrollo de producto.
- Flexibilidad.
- Solución de fallos de diseño.
- Presentación de producto.

Poco a poco, esta idea fue evolucionando a la par que la tecnología utilizada y la capacidad de computación. Tras esta primera técnica SLA de impresión 3D inventada por Charles Hull vinieron otras.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Existen diversas clasificaciones para las distintas técnicas de prototipado rápido, pero una primera clasificación general es si aportan material o si, por lo contrario, lo sustraen. Esta diferenciación clasifica las técnicas en aditivas y sustractivas, respectivamente. Este trabajo se va a centrar en las técnicas aditivas, concretamente en el modelado por deposición fundida

Actualmente las técnicas aditivas más utilizadas para el prototipado rápido son las que se detallan a continuación:

1.5.1.1. Estereolitografía (SLA):

Como se ha comentado anteriormente, fue la primera técnica en ser desarrollada y se lleva a cabo en una máquina estereolitográfica. La máquina contiene un depósito de resina líquida fotopolimérica que se solidifica cuando recibe radiación luminosa. Un láser de radiación ultravioleta apunta a las coordenadas proporcionadas por el modelo CAD que se quiere reproducir y va confeccionando el prototipo capa a capa, ya que el depósito contiene una plataforma de altura variable.



Figura 2 – Máquina estereolitográfica

- Ventajas: tiene un buen acabado superficial y es un método rápido y preciso.
- Desventajas: las resinas son tóxicas y con alto coste, además los modelos creados son frágiles.

1.5.1.2. Curado en base sólida:

Es una técnica parecida a la anterior, con la diferencia que no utiliza un láser que apunte a las coordenadas deseadas, sino que se utilizan máscaras. Estas máscaras son películas finas, las cuales dejan pasar la luz o la bloquean. Para cada capa se cubre la superficie con polímero líquido fotosensible y se sitúa la máscara encima. A continuación, se expone la capa a una luz ultravioleta y el líquido que quedaba expuesto se solidifica.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D



Figura 3 – Máquina curado en base sólida

- Ventajas: velocidad de proceso alta, buena resistencia del material y no necesita soportes.
- Desventajas: el equipo utilizado es complejo, la geometría de las piezas se ve limitada y se utiliza gran cantidad de resina.

1.5.1.3. Sinterizado selectivo por láser:

Es este caso, se utiliza material en polvo que se va esparciendo capa a capa mientras un láser recorre la trayectoria deseada para generar el modelo. La función del láser es fundir el material en polvo y que las distintas partículas se unan entre sí capa tras capa. El proceso es muy similar a la estereolitografía, la diferencia reside en el estado del material de aporte y en que el láser realiza un aporte de energía que funde el material.



Figura 4 – Sinterizadora selectiva por láser

Esta técnica es una de las más atractivas puesto que permite el uso de materiales tan variados como policarbonato, ABS, metales, cerámicas, nylon, etc.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

- Ventajas: gran variedad de materiales, se puede reproducir cualquier geometría, no necesita ningún proceso posterior y el material que no ha sido sinterizado actúa como soporte.
- Desventajas: Proceso lento y los equipos utilizados son de gran complejidad.

1.5.1.4. Modelado por deposición fundida (MDF o FDM):

Esta técnica consiste en utilizar una bobina de filamento, la cual aporta el material necesario desenrollándose y abasteciendo al extrusor. El extrusor, el cual se encuentra a la temperatura adecuada para que el material fluya correctamente, deposita el material sobre las capas inferiores que se encuentran a una temperatura mucho más baja, lo cual hace que se endurezca nada más salir del cabezal y genere una fuerte adhesión entre ellas.

La variación de la posición relativa entre el extrusor y la plataforma inferior¹, también llamada cama caliente, y la superposición de las distintas capas, genera el modelo tridimensional hecho por ordenador en una pieza física.



Figura 5 – Impresora 3D MDF

- Ventajas: materiales plásticos de bajo coste y de fácil acceso, gran variedad de materiales, maquinaria de bajo coste en comparación con las técnicas comentadas anteriormente.
- Desventajas: para piezas grandes puede ser un método lento y necesita soportes en algunos casos.

Esta técnica es, seguramente, la que ha revolucionado el acceso a este tipo de tecnología para el gran público. El año 2009, MakerBot Industries comienza a vender kits de montaje de impresoras 3D, el primer paso de una industria que pretendía llevar a los hogares la tecnología de modelado por deposición fundida. Desde entonces, muchos más fabricantes se han adentrado en este nuevo sector, ofreciendo precios cada vez más competitivos hasta llegar a un punto en el cual la inversión necesaria para tener una impresora 3D para uso particular o profesional es mínima en comparación con el valor añadido que aporta. Son las llamadas impresoras DIY de escritorio².

¹ Para generar el movimiento plano en las sucesivas capas se pueden tener dos casos: que el extrusor se mueva en los ejes X e Y y la plataforma inferior quede fija, o bien, que el extrusor se mueva en un eje y la plataforma en el otro.

² DIY: de sus siglas en inglés *do it yourself*, o “hazlo tu mismo”.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Por otra parte, el desarrollo de herramientas CAD y el aumento de la capacidad de procesamiento de los ordenadores personales han permitido a muchas personas a adentrarse en el diseño y la fabricación de sus propios objetos, ya sean piezas para prototipos mecánicos o meras piezas decorativas. Esta tecnología trae consigo un cambio en la mentalidad de la sociedad. Ahora es posible diseñar y producir objetos propios de una forma asequible sin tener que recurrir a grandes industrias.

Todo ello ha tenido una comunidad de desarrollo *open source* detrás, y ya no sólo de la maquinaria como producto. Iniciativas como Marlin (firmware muy utilizado por los fabricantes de impresoras 3D) o Thingiverse (plataforma web para compartir diseños, información y nuevas ideas sobre impresoras 3D) han permitido que esta tecnología sea más conocida y accesible por usuarios sin conocimientos técnicos previos en ingeniería o fabricación.

También las empresas de desarrollo de producto se han visto beneficiadas al tener acceso a maquinaria para producir prototipos de sus productos que pueden ser mostrados a sus clientes antes de hacer una gran inversión en un proceso productivo.

Sobre esta técnica gira todo el proyecto, desde la funcionalidad del producto hasta su fabricación.

1.6. SOFTWARE EMPLEADO

Durante el desarrollo de este trabajo, son varios los programas que se van a utilizar, los cuales se detallan a continuación:

1.6.1. SOLIDWORKS 2017

Es un software de CAD (*Computer-Aided Design* en sus siglas en inglés), es decir, un programa de diseño asistido por ordenador que permite modelar piezas en 3D y ensamblarlas para crear productos completos. Funciona de una manera muy intuitiva y visual, lo cual facilita el proceso de diseño y las simulaciones pertinentes.



Figura 6 – Logotipo de SOLIDWORKS

También permite, mediante complementos, la simulación cinemática, dinámica y por elementos finitos. Es decir, dentro del mismo software de CAD encontramos elementos de software CAE (*Computer-Aided Engineering* en inglés), es decir, programas para el uso en ingeniería. De todos los disponibles, será necesario:

- SOLIDWORKS Motion: para la obtención del par necesario de los servomotores que accionarán el brazo robot.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

1.6.2. Ultimaker CURA

Es un software open source que, a partir de un archivo del modelo en 3D (generalmente en un formato tipo malla como son STL o OBJ) genera el código GCODE que utiliza la impresora para realizar las trayectorias. Es un tipo de software denominado *slicer*, cuya función es la de “trocear” en capas el modelo según las especificaciones que desee el usuario.



Figura 7 – Logotipo de CURA

Es en este punto donde se definen los parámetros de impresión, que se detallarán más adelante. Estos parámetros definen la estructura interna del objeto impreso, así como el acabado exterior o la resistencia mecánica.

1.6.3. Arduino IDE

Para realizar el código de control que ejecuta el microcontrolador Arduino se necesita un programa específico donde poder escribirlo y compilarlo. Arduino IDE (*Integrated Development Environment* en sus siglas en inglés) utiliza un entorno muy sencillo donde se puede programar el código, verificarlo y después compilarlo y almacenarlo en memoria del microcontrolador.



Figura 8 – Logotipo de Arduino IDE

El programa tiene acceso a una serie de librerías que ha generado la comunidad de desarrolladores. En especial, para este proyecto, se utilizará la librería `servo.h` para el control de los servomotores.

1.7. PLATAFORMA ARDUINO

Arduino es una plataforma de prototipos electrónica, los cuales son conocidos por ofrecer hardware y software fáciles de utilizar y que aportan mucha flexibilidad a los creadores. Existe una gran comunidad de desarrolladores detrás ya que se basa en código *open-source* y por lo tanto no se necesita ningún tipo de licencia.

Tiene un lenguaje de programación propio basado en Processing, un lenguaje de alto nivel parecido al lenguaje en C.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

El hardware consiste en una placa con un microcontrolador, el cual se encarga de ejecutar el código que le hayamos introducido desde Arduino IDE. La placa tiene una serie de entradas y salidas, tanto digitales como analógicas, además de una serie de puertos de conexión y alimentación. Concretamente se va a utilizar una placa Arduino UNO ya que tiene 6 pines PWM donde es posible conectar los servomotores, es pequeño y de bajo coste.

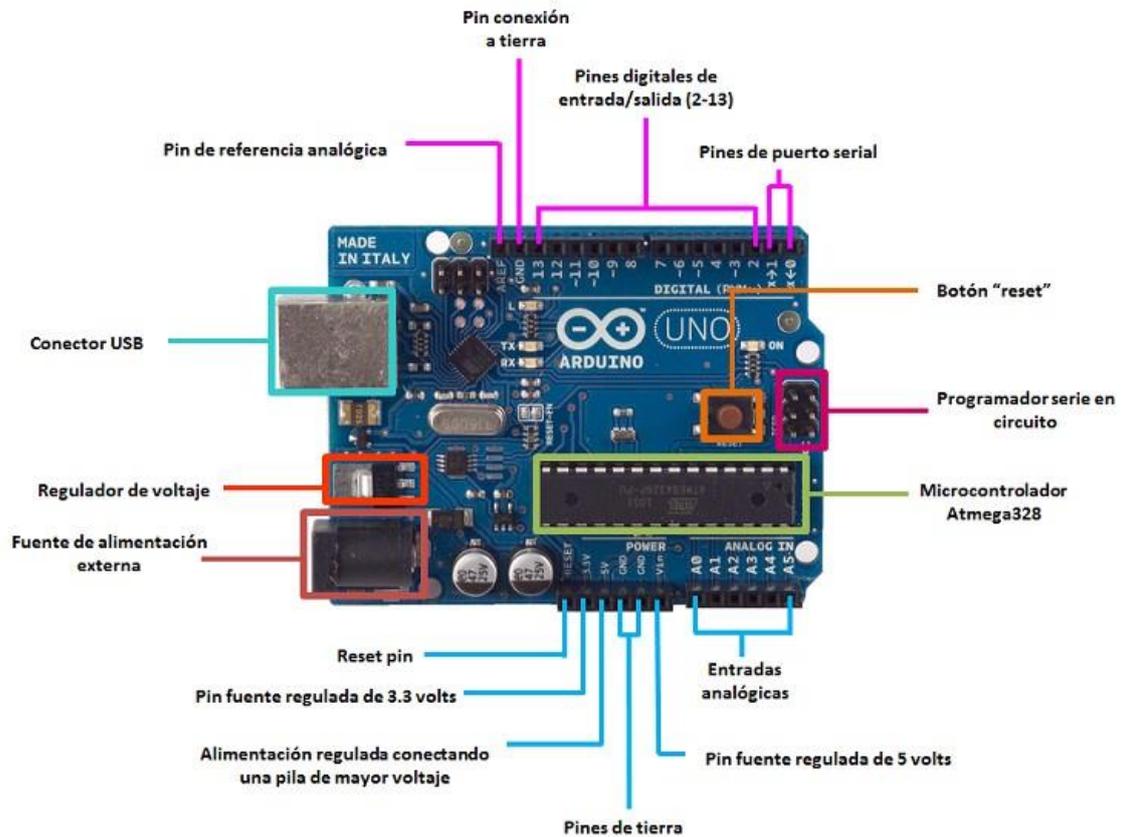


Figura 9 – Placa Arduino UNO

Fuente: miscursosenlinea.co

La utilidad de estas placas reside en su capacidad de relacionarse con el entorno a través de la gran cantidad de sensores, actuadores y otros circuitos a los que se puede conectar. En el caso concreto de este proyecto se van a utilizar servomotores que actuarán sobre las piezas del brazo robótico cumpliendo las instrucciones que se programen.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

2. DESARROLLO

2.1. PRESENTACIÓN

A lo largo de este capítulo se van a desarrollar todas las partes de las que consta el trabajo de forma secuencial desde la idea inicial hasta el montaje y puesta en marcha del prototipo. Por el camino se mostrará el proceso previo de concepción de la idea, un análisis exhaustivo sobre el movimiento del brazo robótico para concretar su geometría, el propio proceso de diseño destacando los puntos clave, la fabricación de las piezas del prototipo utilizando tecnología de impresión 3D, la programación en Arduino y, por último, el montaje y puesta en marcha

El documento pretende ser una guía para el lector del camino seguido para la consecución de los objetivos fijados, y un paso más del autor para completar su formación como ingeniero industrial.

2.2. ANÁLISIS PREVIO

Antes de comenzar a diseñar los componentes que conformarán el brazo robótico, merece la pena detenerse en los aspectos clave que van a definir el diseño y la funcionalidad del producto. Los principales focos de atención en la fase de confección del diseño son los que se enumeran a continuación.

2.2.1. Geometría y dimensiones

Para que el brazo robot pueda cumplir su cometido de extraer piezas terminadas de una impresora 3D, es necesario que su ubicación sea próxima a ésta, debe permitir su libre funcionamiento mientras se esté materializando la pieza y, al terminar el proceso, ponerse en funcionamiento realizando maniobras de aproximación.

Por otro lado, se van a enumerar una serie de nombres para definir las partes y las articulaciones de las que consta el prototipo, haciendo un símil con la anatomía de una persona:

- Partes:
 0. Base
 1. Brazo
 2. Antebrazo
 3. Pinza o mano
- Articulaciones:
 - A. Hombro
 - B. Codo
 - C. Muñeca
 - D. Cintura

En las figuras 10 (vista lateral) y 11 (vista superior) se muestra la ubicación relativa de la impresora (en azul) y de la base del brazo (en naranja). También se pueden ver las articulaciones mencionadas con

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

anterioridad. Además, se indica con una línea gruesa el alcance que debe presentar, lo cual ayuda a establecer las dimensiones:

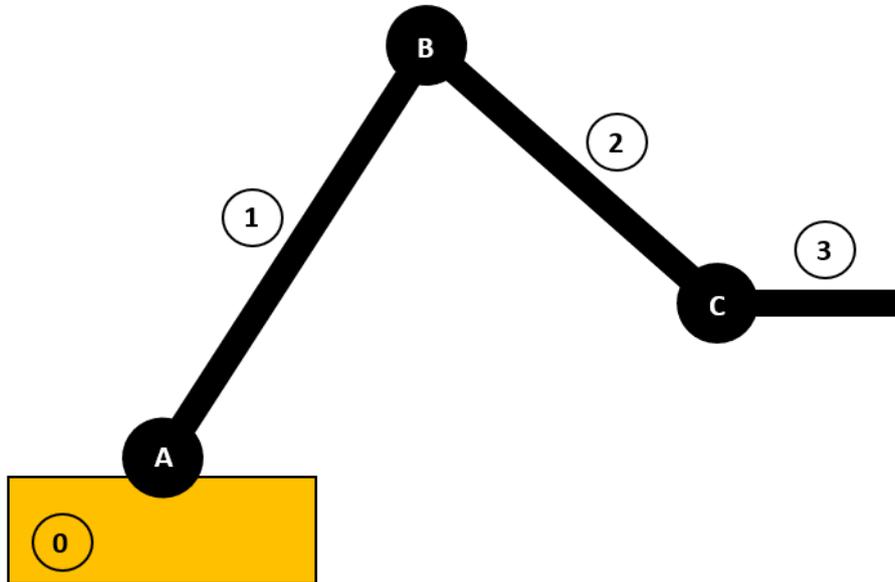


Figura 10 – Esquema brazo. Vista lateral

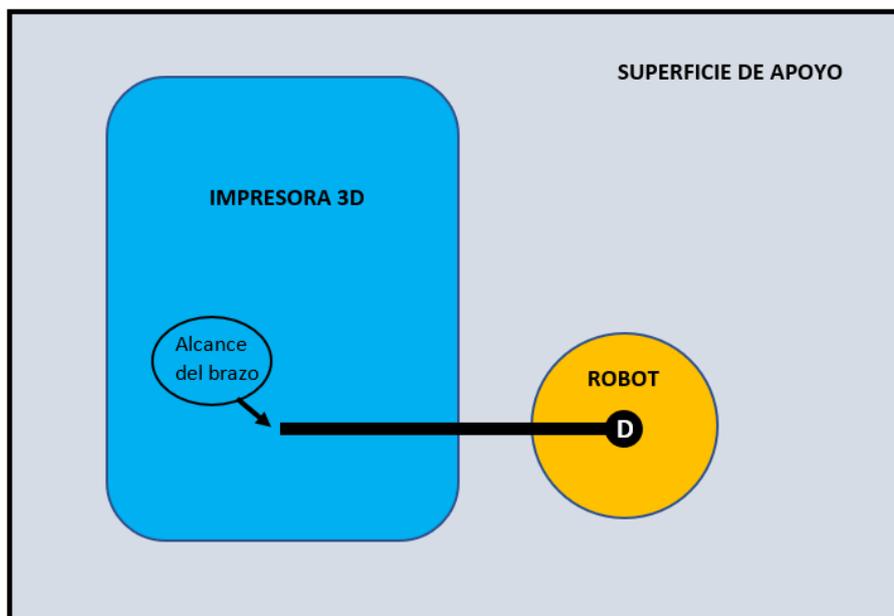


Figura 11 – Esquema brazo. Vista superior

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Por ello, a criterio del autor, el prototipo va a constar de 4 grados de libertad sin tener en cuenta el accionamiento de la pinza. Esta definición del movimiento conlleva el uso de 4 motores que accionen cada una de las 4 articulaciones mostradas con anterioridad (A, B, C y D).

Además, y este es un punto clave para la concepción de todo el proyecto, se establece que el centro de gravedad de todo el conjunto debe estar lo más próximo a la base que sea posible. Para realizarlo se opta por ubicar los motores de accionamiento en la base, en vez de tener uno en cada articulación. Este hecho implica el uso de mecanismos de cuatro barras lo que complica el mecanismo, pero reduce significativamente el peso en las extremidades del robot.

Como consecuencia, presenta las siguientes ventajas:

- Se pueden utilizar motores de menor potencia y por lo tanto de menos precio.
- Reduce el tamaño de los componentes sometidos a mayores esfuerzos mecánicos
- A igualdad de potencia de los motores, esta solución permite cargar con objetos más pesados
- Dota de mayor estabilidad a todo el conjunto del prototipo.

2.2.2. Especificaciones

El brazo robótico va a ser diseñado para cumplir una serie de especificaciones técnicas, las cuales se enumeran a continuación:

- Carga nominal: con la pinza a 350 mm de la base y en su mismo plano horizontal puede ser levantado objetos de hasta 300 gramos.
- Dimensiones y forma de los objetos: por la geometría de la pinza, se puede coger cualquier objeto cuya dimensión máxima, perpendicular al plano que contiene el brazo robótico, no supere los 120 mm y con un mínimo de 25 mm como se observa en la figura 12.

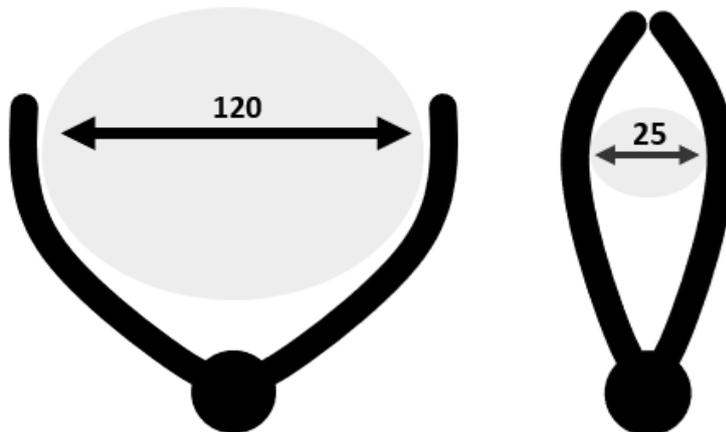


Figura 12 – Dimensiones de los objetos

En cuanto a la forma del objeto, son admisibles las formas cilíndricas, prismáticas y formas libres siempre que sus dimensiones se encuentren dentro de las restricciones dimensionales.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

- Material: para la fabricación del brazo robótico se va a utilizar poliláctico, más comúnmente conocido como PLA.

Es uno de los materiales más utilizados en impresoras de moldeo por deposición fundida dada su facilidad de procesamiento, buenas propiedades mecánicas y bajo coste. Además, presenta otras ventajas como que es biodegradable y no es tóxico. Sus propiedades física y mecánicas se muestran a continuación:

- Densidad: 1,25 g/cm³
 - Módulo de Young: 3,5 GPa
 - Resistencia a flexión: 80 MPa
 - Temperatura de transición vítrea: 60 °C
 - Temperatura de fusión: 160 °C
- Motores: se van a utilizar servomotores para realizar el movimiento del robot. De esta manera se facilita el control de la posición y se obtiene un ratio par/peso lo más elevado posible.

2.2.3. Mecanismo de barras

Una vez definida la forma que se desea utilizar, se va a utilizar SOLIDWORKS para modelar una estructura representativa de la geometría del brazo, es decir, un mecanismo de barras simple. Este mecanismo de barras va a ser de gran utilidad para predimensionar las piezas, observar el movimiento en un ensamblaje y obtener el par necesario en los motores.

Para ello se crean una serie de barras, con las pertinentes dimensiones longitudinales. En total se modelan 10 barras con la siguiente codificación: Barra-XX, donde XX comprende desde 00 hasta 09. La funcionalidad de estas barras se corresponderá con las piezas en el diseño final. Así:

- Barra-00: Es la base de todo el mecanismo. El agujero superior representa el sistema de coordenadas cartesiano utilizado, donde el eje Z es perpendicular al plano XY representado. El origen de coordenadas es la ubicación de las barras impulsoras, es decir, de las barras encargadas de realizar el movimiento.

Destacar que el sistema de coordenadas utilizado para modelar en SOLIDWORKS no es el mismo que utiliza la impresora 3D.

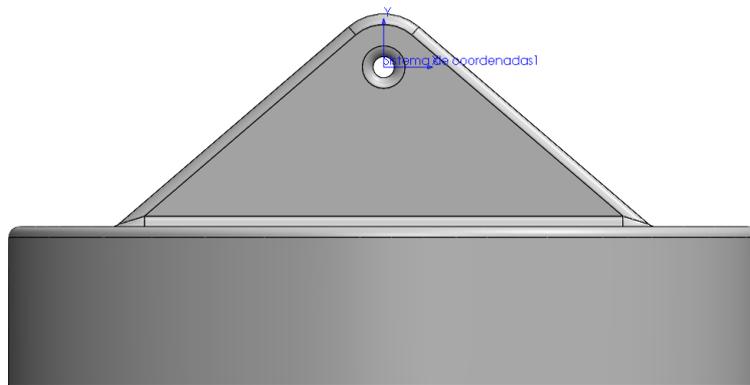


Figura 13 – Barra-00

- Barra-[01, 03, 04, 05, 07, 09]: Estas barras se caracterizan por ser rectas, cuya única dimensión relevante es la distancia entre ejes de los agujeros situados a ambos extremos. Este tipo de barra se utiliza en varias piezas, sobre todo para los mecanismos de cuatro barras.

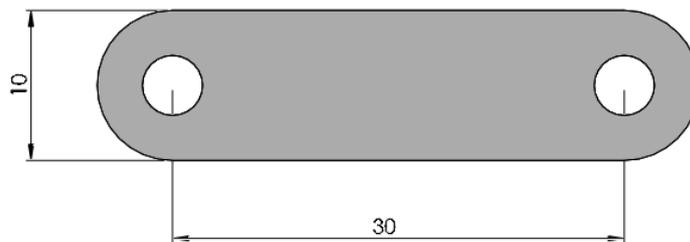


Figura 14 – Barra-[01, 03, 04, 05, 07, 09]

- Barra-02: Es una tipología de barra muy similar a la anterior. La diferencia reside en un tercer agujero colineal a los otros dos, añadido para que la barra pueda rotar sobre ese punto. En la descripción ofrecida en la figura 10 corresponde con la pieza 2, el antebrazo.



Figura 15 – Barra-02

- Barra-06: Forma parte de la cadena de mecanismos de cuatro barras que se va a utilizar para permitir la rotación de la muñeca, ya que la barra impulsora se sitúa en la base. Este concepto se verá más adelante con el ensamblaje de todo el conjunto. Las dimensiones clave son la longitud entre los ejes de los agujeros y el ángulo entre los ejes que los unen, paralelos a las cotas lineales que se muestran.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

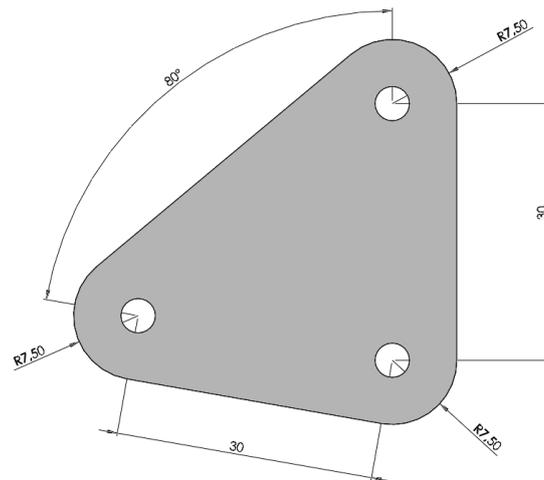


Figura 16 – Barra-06

- **Barra-08:** Es el último eslabón de la cadena, la pieza correspondiente a la mano o pinza, la cual dispone de un saliente para poder realizar la rotación. Una vez más las dimensiones clave son las distancias entre agujeros y el ángulo entre los ejes que los unen

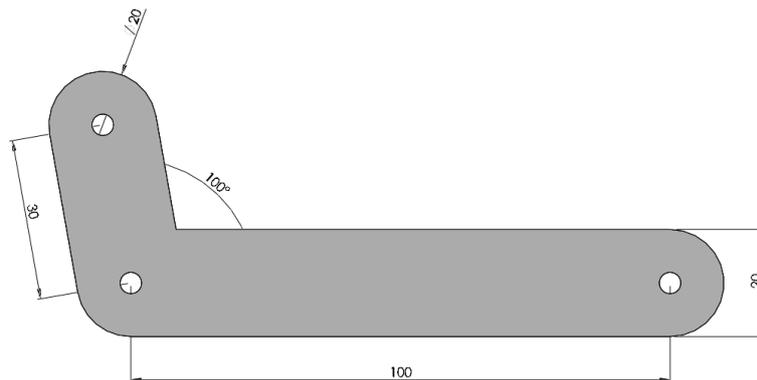


Figura 17 – Barra-08

Una vez desarrolladas todas las piezas, se procede a realizar el ensamblaje de estas utilizando relaciones de posición simples: concetricidad de superficies cilíndricas (agujeros de las barras) y coincidencia entre dos planos. El ensamblaje final puede verse en la figura 18:

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

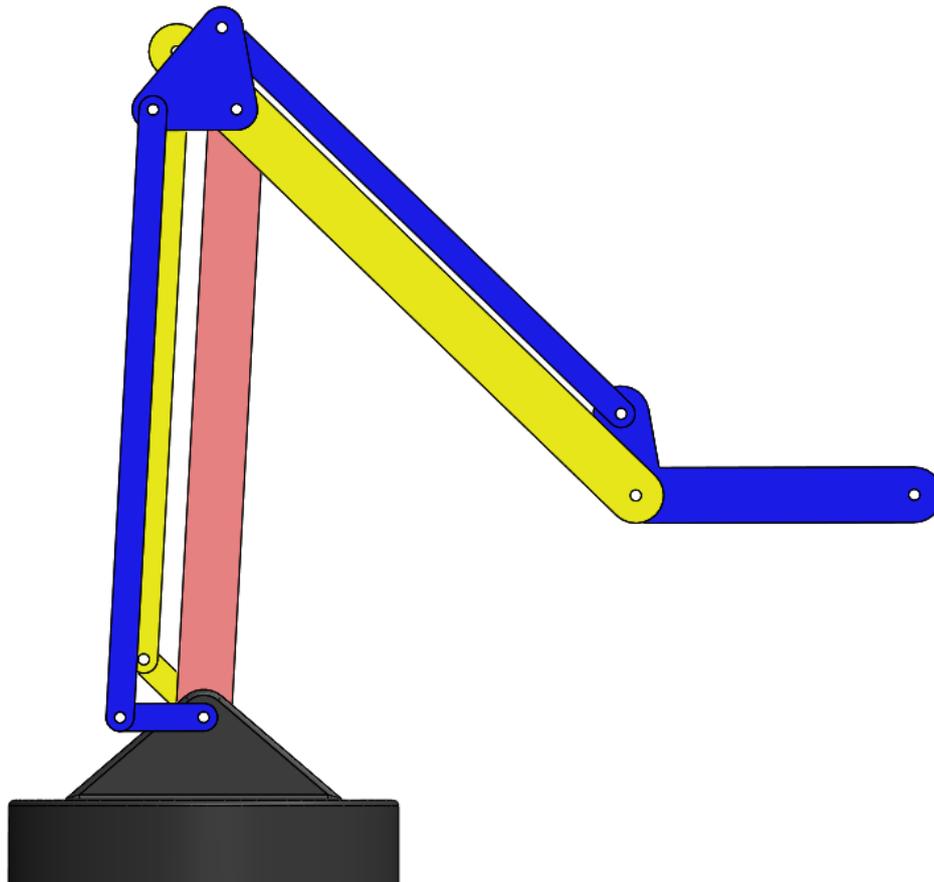


Figura 18 – Mecanismo de barras

Es importante destacar el color que se le ha dado a cada componente. En total hay cuatro colores correspondientes a las cuatro partes que se han enumerado en la figura 10. Así, cada grupo de barras proporciona movimiento a una parte diferente. De esta forma se obtiene los grupos de piezas de la tabla 1.

Grupo	Color	Nombre	Número de elementos
00	Negro	Base	1
01	Rojo	Brazo	1
02	Amarillo	Antebrazo	3
03	Azul	Pinza o mano	5

Tabla 1 – Grupos de piezas

Además de las ventajas comentadas en puntos anteriores, esta configuración permite simplificar el control del brazo. Los mecanismos de cuatro barras se han configurado para que sean de tipo

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

paralelogramo, es decir, la barra impulsora y la receptora del movimiento permanecen paralelas para cualquier ángulo. Esto se consigue igualando las longitudes de las barras dos a dos.

A continuación, se muestran una secuencia de imágenes para representar el movimiento del mecanismo al aplicar rotación a una de las barras impulsoras, manteniendo fijas las otras dos. La rotación se aplica en el eje del agujero que coincide con el origen de coordenadas situado en la base:

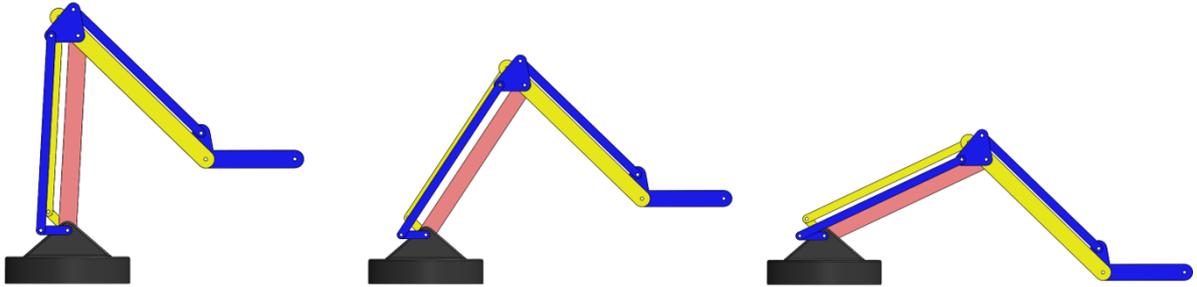


Figura 19 – Movimiento del grupo 01

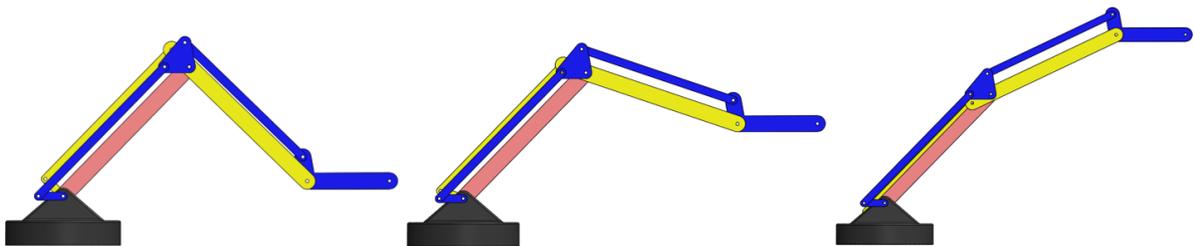


Figura 20 – Movimiento del grupo 02

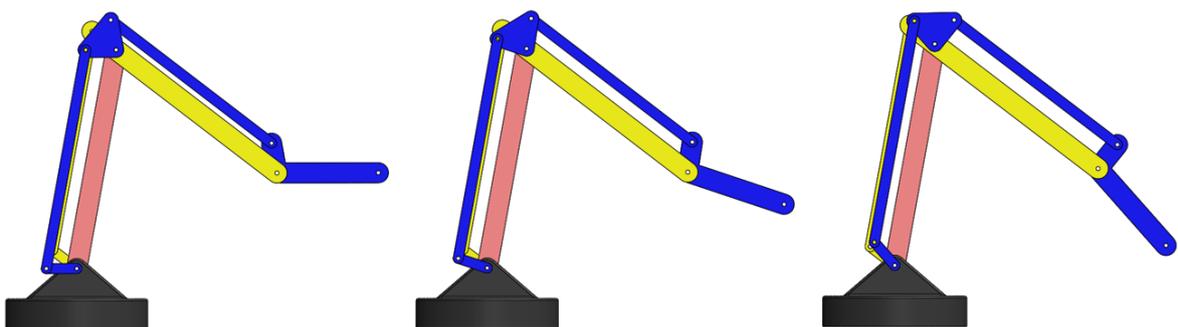


Figura 21 – Movimiento del grupo 03

Cabe destacar que, como se verá en puntos posteriores, el brazo robot dispone de un movimiento de rotación en la base respecto al eje Y, además del movimiento propio de la pinza para sujetar objetos que no han sido tenidos en cuenta en este primer análisis preliminar.

2.2.4. Análisis del movimiento

Con el mecanismo de barras modelado y ensamblado se va a proceder a realizar un análisis del movimiento utilizando el complemento de SOLIDWORKS llamado Motion.

La razón de utilizar Motion es permitir hacer un estudio previo del par mecánico necesario que deberán ejercer los motores servo que vayan a ser instalados. De esta manera es posible hacer una lista de componentes eléctricos más precisa antes incluso de tener el diseño final modelado, ya que el tamaño de los motores servo es, como se verá más adelante, un condicionante para la geometría del brazo.

El objetivo es comprobar si es posible utilizar servomotores de menos de 20 kg·cm de par, que encuentran fácilmente en el mercado y tienen un bajo coste, ya que las dimensiones son contenidas.

En primer lugar, se debe activar el complemento desde el menú de *Complementos de SOLIDWORKS*

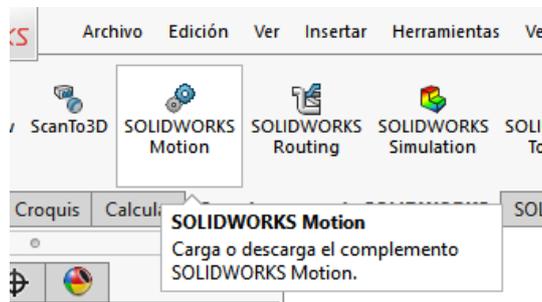


Figura 22 – Complemento SOLIDWORKS Motion

Luego se tiene que cambiar el entorno de trabajo desde Modelo hasta Estudio de movimiento, situado en el menú inferior, para tener el entorno gráfico de la figura 23.

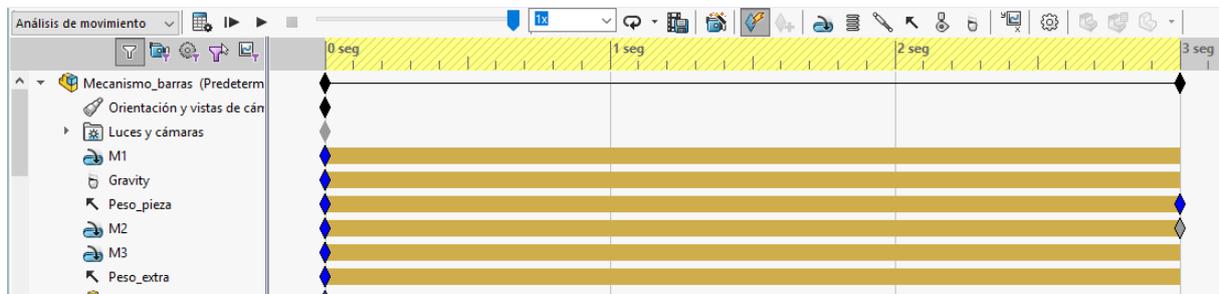


Figura 23 – Entorno gráfico SOLIDWORKS MOTION

En la barra superior y seleccionando desde el menú desplegable la opción Análisis de movimiento, se puede hacer uso de las opciones dinámicas del programa, es decir, incluir opciones como fuerzas externas aplicadas sobre superficies o puntos de una pieza o la gravedad para así incluir la masa de las propias piezas si se le asigna un material. Concretamente, para el presente estudio se van a utilizar los siguientes elementos:

- **Motor rotatorio:** Utilizado para aplicar rotación en las piezas impulsoras, situadas en la base. Para ello es necesario indicar la superficie cilíndrica donde estará ubicado el motor, la dirección de la rotación y, si se desea, se puede seleccionar respecto a qué componente se realiza el movimiento. Además, se debe indicar qué tipo de rotación se desea y la duración de la misma.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

En este análisis van a haber tres motores rotatorios, uno para cada pieza impulsora de cada grupo descrito con anterioridad llamados M1, M2 y M3. A continuación, se muestra un ejemplo de configuración del motor M1 para la pieza impulsora del grupo 01 en la figura 24:

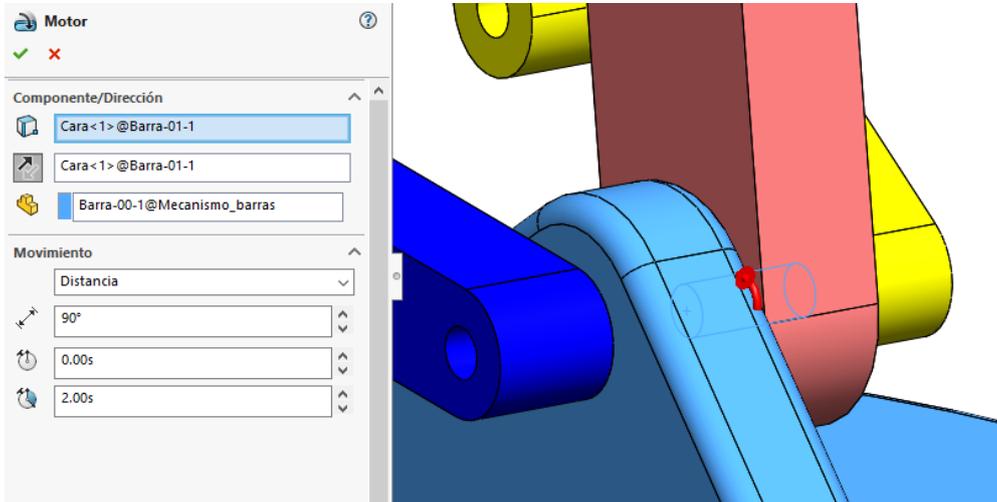


Figura 24 – Ejemplo de motor rotatorio M1

- **Fuerzas:** con objeto de que el análisis sea lo más representativo de la realidad posible, se van a introducir una serie de fuerzas externas aplicadas en el extremo del mecanismo. En total van a ser dos:
 - **Peso_pieza:** aplicada sobre el cilindro más exterior de la última pieza que forma el grupo 03 con dirección en -Y, como se observa en la figura 26. Se ha considerado un peso de 0,3 kg, correspondientes a una fuerza de 2,943 N, redondeada a 3 N.

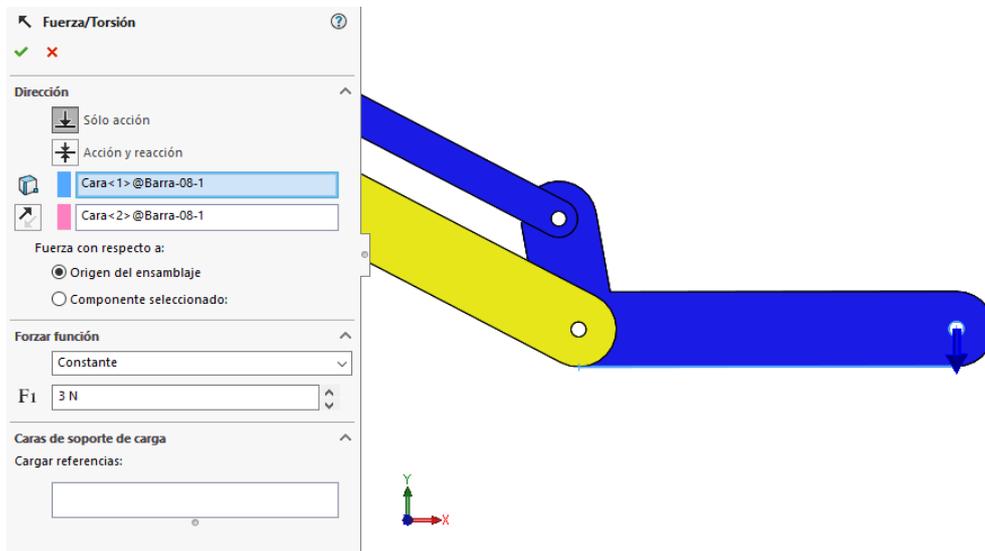


Figura 25 – Fuerza Peso_pieza aplicada

- **Peso_extra:** representa el peso extra que ocasionan los motores servo que se ubicarán en la pinza, además del peso añadido que posiblemente tengan los componentes del diseño final. También se aplica en la pinza, solo que distribuida en el plano inferior.

- Gravedad: se aplica la gravedad para considerar el peso propio de los componentes y la inercia que provocan.
- Trazados de resultados: para cada uno de los tres motores configurados, existe la posibilidad visualizar los resultados de par que han debido ser aplicados para generar el movimiento.

En este caso se quiere observar la fuerza de torsión aplicada en el eje Z global, por lo que la configuración es la que se muestra en la figura 26, con un trazado para cada uno de los motores configurados:

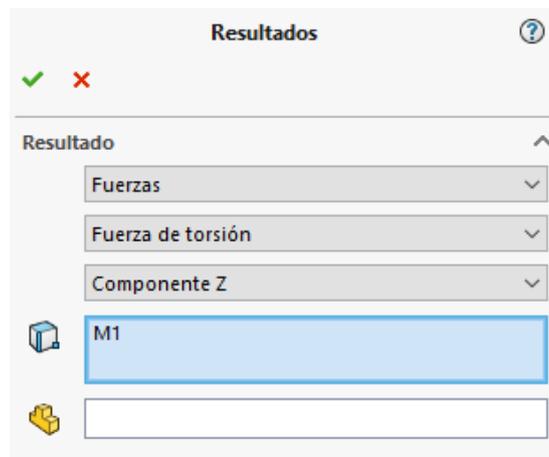


Figura 26 – Trazado de resultados. Fuerza de torsión en Z de M1

Con esta configuración, se va a proceder a realizar dos tipos de análisis: uno estático, sin movimiento, para observar el momento que generan sobre los motores el peso propio del mecanismo y las cargas externas aplicadas.

2.2.4.1. Análisis estático

En primer lugar, se posiciona el mecanismo en la posición más desfavorable, como puede verse en la figura 27. De esta manera los resultados obtenidos servirán para saber qué par de torsión se necesita para mantener esa posición sin que ninguna pieza se mueva.

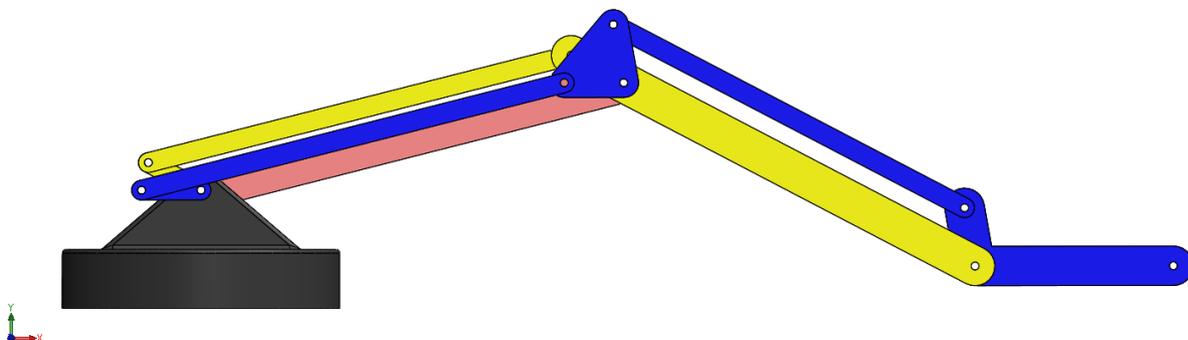


Figura 27 – Posición más desfavorable mecanismo de barras

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Para que SOLIDWORKS Motion realice el cálculo es necesario que todas las piezas del mecanismo tengan un material asignado. Desde la base de datos de SOLIDWORKS se selecciona el PET como material de referencia por sus similitudes de densidad y propiedades mecánicas con el PLA, siendo el PET un material ligeramente más denso que PLA, lo que repercute en un mayor peso de los componentes y que, por ser una estimación, se encuentra del lado de la seguridad.

Por tratarse de un análisis estático, la distancia angular de los tres motores se establece en 0°. Con todos los parámetros configurados es el momento de realizar la simulación y observar los gráficos de resultados de la figura 28, donde se muestra el valor constante:

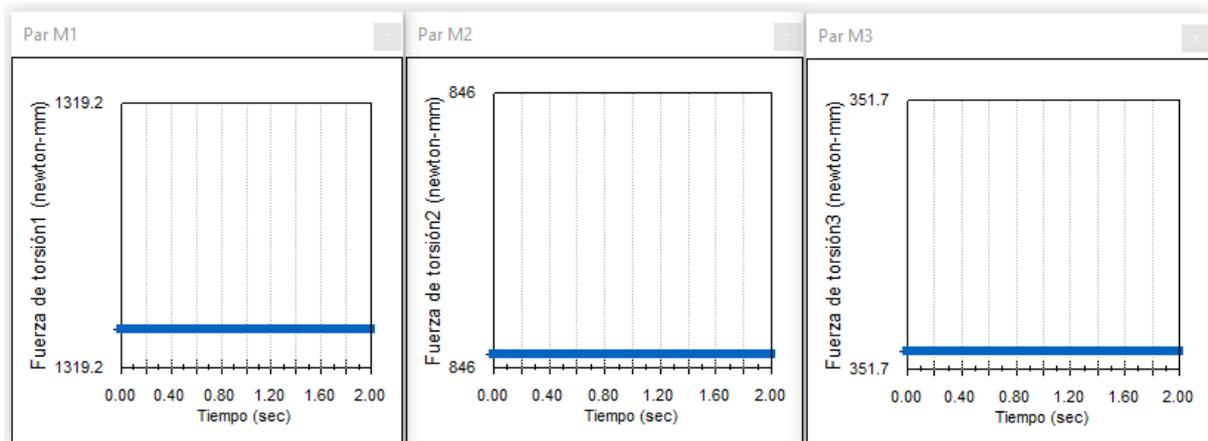


Figura 28 – Resultados análisis estático del mecanismo de barras

De esta forma, la fuerza de torsión estática en cada uno de los motores es:

- Par M1 = 1319.2 N·mm = 13,45 kg·cm
- Par M2 = 846 N·mm = 8,64 Kg·cm
- Par M3 = 351,7 N·mm = 3,59 kg·cm

Se utiliza la conversión a kg·cm porque es la unidad utilizada por los fabricantes de servo motores en la hoja de especificaciones.

2.2.4.2. Análisis dinámico

En este punto se va a realizar un análisis aplicando rotación sobre los actuadores. Esta rotación será aplicada de forma secuencial, de forma parecida a la serie de imágenes que han sido mostradas con anterioridad en las figuras 20, 21 y 22. La única diferencia reside en la posición inicial de la pinza, la cual se encuentra inclinada para que el giro se realice en el sentido positivo sobre el eje Z, como muestra la figura 29.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

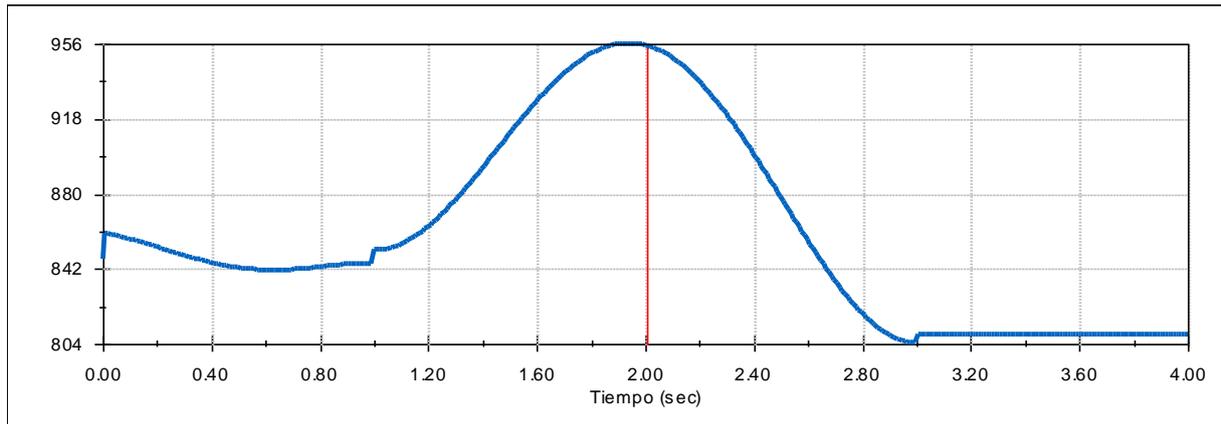


Figura 31 – Par M2

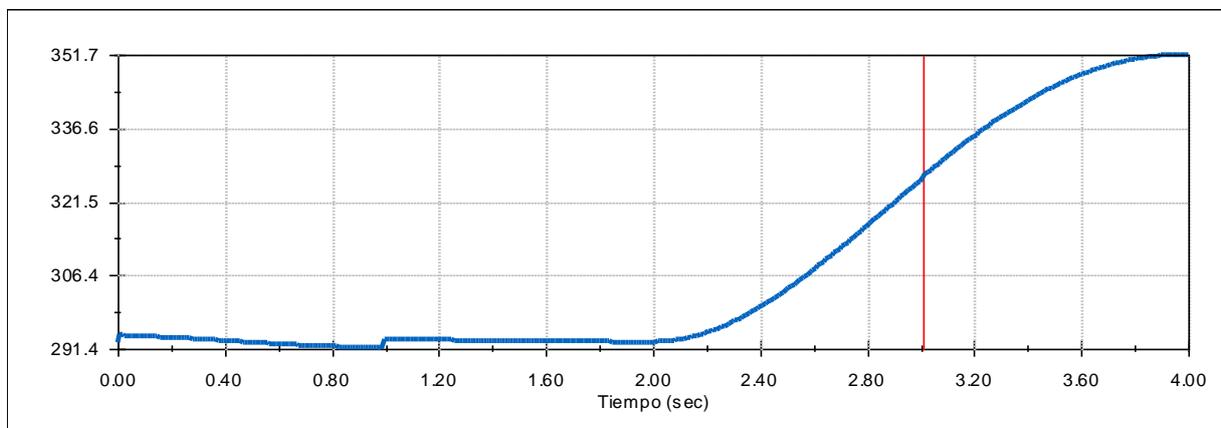


Figura 32 – Par M3

Por último, se muestra un gráfico en la figura 33 con la combinación de las curvas anteriores para observar los cambios de tendencia y el orden de magnitud del par de torsión que cada motor ha ejercido.

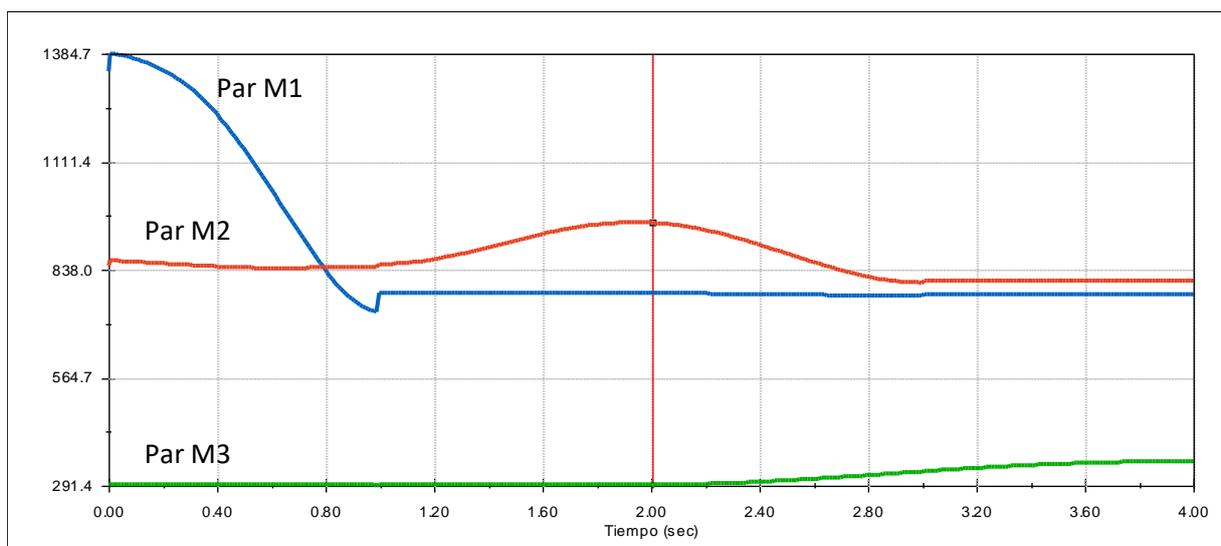


Figura 33 – Combinación de resultados

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Se demuestra que para realizar el momento del brazo el máximo par de torsión que se da es de 1384,7 N·mm o 14,12 Kg·cm. De esta forma se determina que se van a utilizar motores servo de 20Kg·cm, lo que es muy útil durante de fase de diseño, como se verá en puntos posteriores.

2.3. PROCESO DE DISEÑO

A lo largo de este apartado se va a enseñar cual ha sido el proceso creativo y organizativo para llevar a cabo el modelado de las piezas del brazo robótico, desde las ideas y bocetos previos hasta el ensamblaje final de todos los componentes.

2.3.1. Características del diseño

El objetivo del diseño es el de crear productos funcionales, estéticamente agradables en un plazo de lanzamiento lo más corto posible, al mínimo coste y con la misión de mejorar la calidad de vida del usuario.

Al realizar una búsqueda de información sobre productos similares al que se pretende crear se encuentran brazos robots con mecanismos de cuatro barras impresos en 3D como, por ejemplo, los que se muestran en la figura 34.

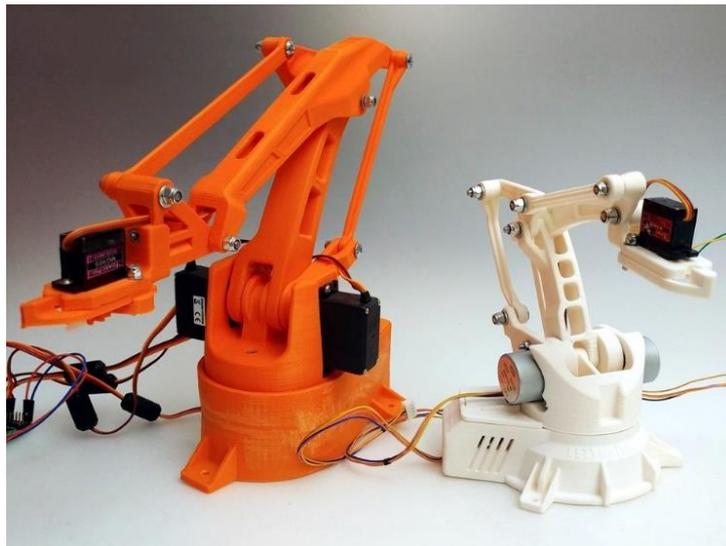


Figura 34 – Ejemplo de prototipo de brazo robótico fabricado con impresora 3D

Fuente: 3drf.com

En la mayoría de los casos, los diseños están enfocados a ser prácticos, que sean fáciles de imprimir dejando el componente del atractivo del diseño de un lado. Por ello, el diseño del brazo se va a enfocar a que tenga cierto atractivo visual que llame la atención. Al fin y al cabo, el brazo se va a diseñar para tenerlo en un entorno doméstico o de oficina y debe ser agradable tenerlo presente.

Una característica fundamental del brazo va a ser que las piezas que se deben utilizar para completar los mecanismos de cuatro barras, en la medida de lo posible, van a estar ocultas a la vista. Se quiere crear una envolvente que a la vez forme parte de la estructura de los brazos. La idea se plasma en el siguiente boceto:

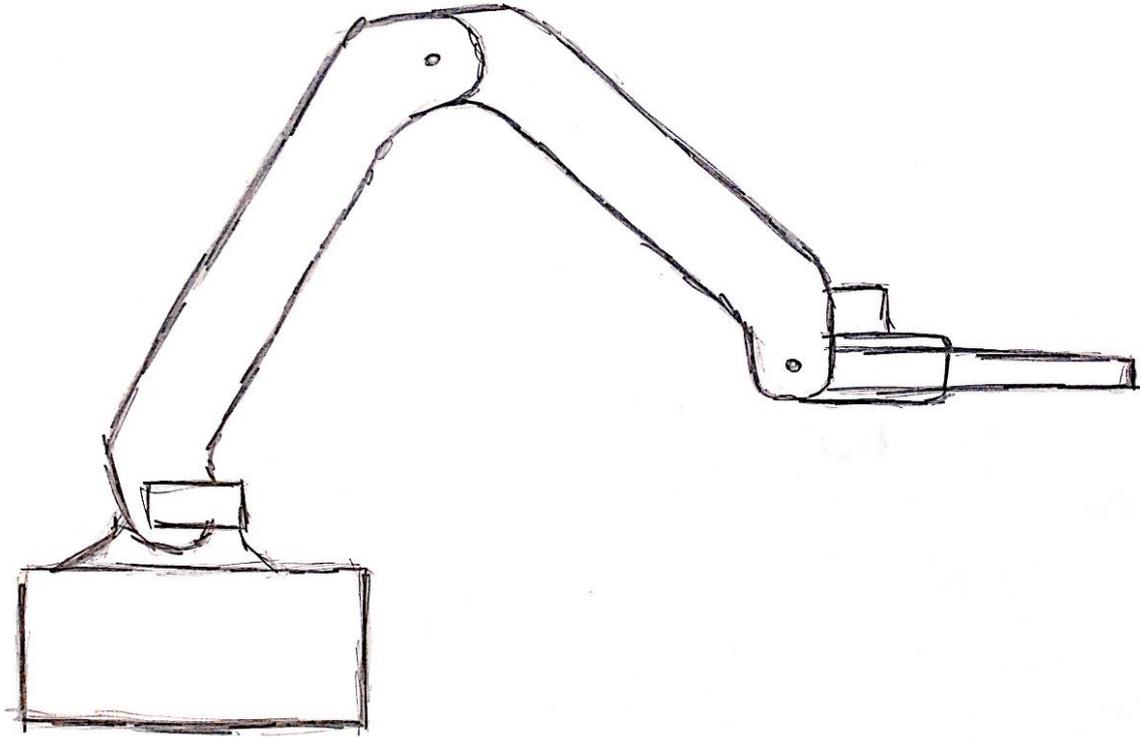


Figura 35 – Boceto 1: perfil general

Además, como se ha mencionado en puntos anteriores, los motores servo que controlan el movimiento del brazo van a estar situados en la base, por lo que se antoja necesario que, dada la configuración de la envolvente explicada en el párrafo anterior, éstos deben situarse dentro de los puntos de apoyo con la base, como puede verse en el boceto de la figura 36.

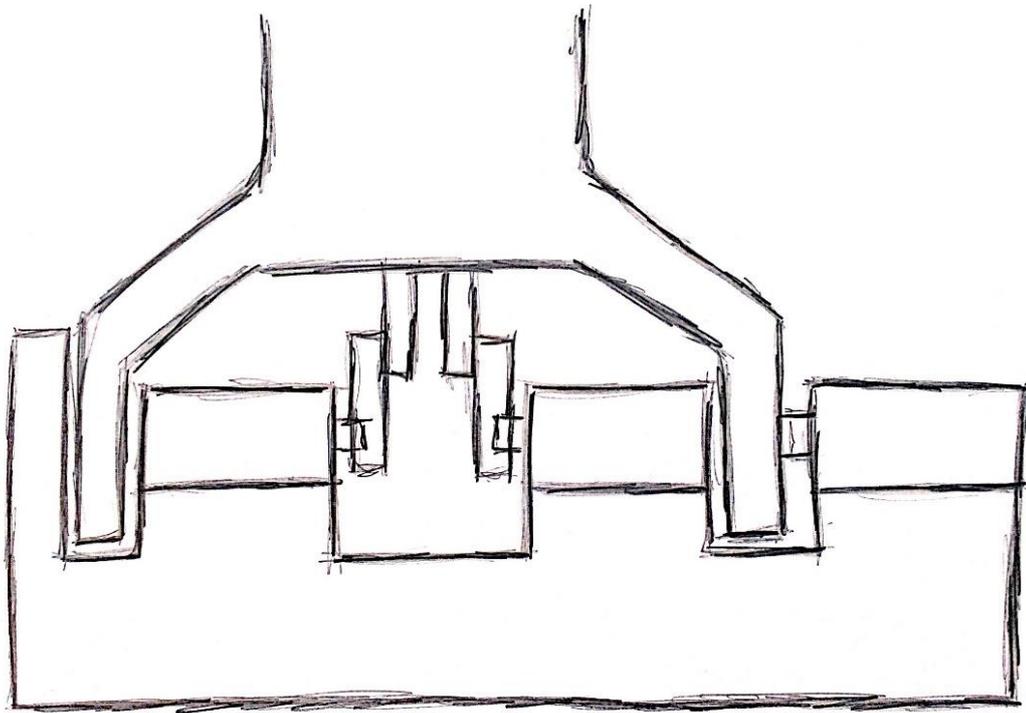


Figura 36 – Boceto 2: ubicación motores

La envolvente es la característica clave que marca el diseño y desde el cual surgen todos los demás componentes.

2.3.2. Técnicas de diseño aplicadas

En muchas ocasiones, en el proceso de desarrollo de un nuevo producto, concretamente en la fase de diseño, no se tienen en cuenta aspectos futuros del mismo, como por ejemplo el proceso de fabricación o, si fuera necesario, el montaje de los componentes que lo forman. Estas decisiones en la etapa de diseño son fundamentales ya que se estima que el 70% del precio del producto depende de las decisiones que se toman en la etapa de diseño como muestra la figura 37.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

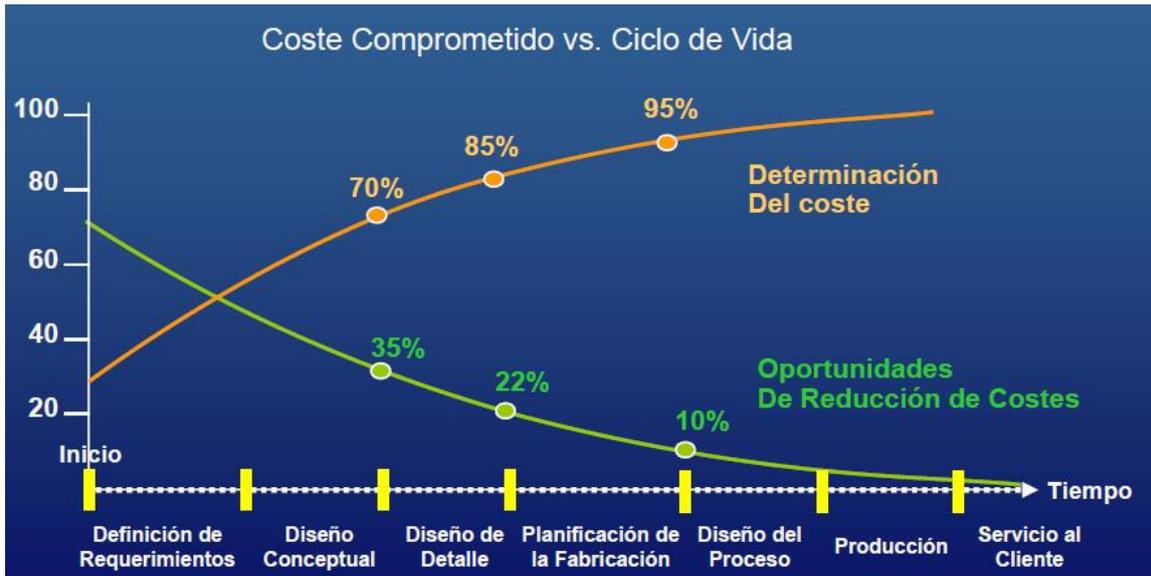


Figura 37 – Coste comprometido vs. Ciclo de vida de un producto

Fuente: DARPA RaDEO Project

Para optimizar el proceso de diseño es de gran utilidad tener presente otras etapas del ciclo de vida del producto, es decir, si es posible realizarlo mediante las técnicas de fabricación disponibles o la manera en que va a ser ensamblado, utilizado e incluso desechado cuando llegue el final de su vida útil. Esto se denomina ingeniería concurrente.

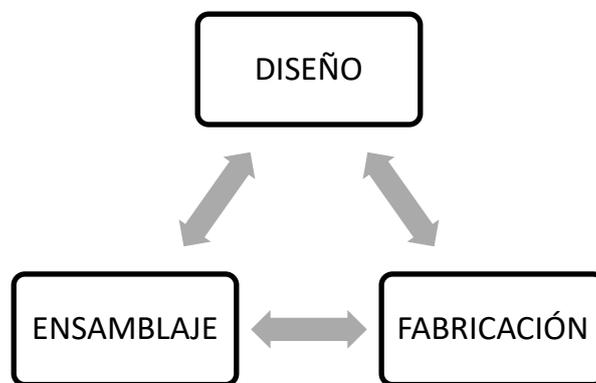


Figura 38 – Relación entre Diseño, Fabricación y Ensamblaje

El proceso de diseño que sigue este proyecto está enfocado al proceso de fabricación de modelado por deposición fundida, más conocido como impresión 3D. Aunque esta técnica de prototipado rápido es muy versátil, presenta ciertas características que deben ser tenidas en cuenta a la hora de diseñar una pieza:

- Superficie plana inferior: para que exista una correcta adhesión con la cama caliente debe existir una superficie plana en la parte inferior de la pieza. Esta no es una característica limitante puesto que se pueden utilizar soportes si fuera necesario, pero sí que se debe evitar

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

en la medida de lo posible para generar un buen acabado superficial y disminuir los tiempos de proceso.

- Tamaño máximo de la pieza: cada impresora 3D dispone de un volumen máximo de impresión. Concretamente todas las piezas de este proyecto van a poder ser fabricadas en impresoras con un volumen de $200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$, lo que posibilita a casi cualquier usuario con una impresora 3D doméstica fabricar este producto. Para ello, algunas de las piezas deberán ser separadas en 2 componentes y juntarse mediante uniones roscadas.
- Grosor mínimo de un sólido: El material fundido sale del extrusor por una boquilla, cuyo diámetro depende de la calidad que se busque y el tiempo de proceso, siendo su relación inversamente proporcional, es decir, a menor diámetro de la boquilla más tiempo tardará una pieza en materializarse.

Con estos requerimientos, resulta necesario que todo sólido que vaya a ser impreso deberá tener un grosor mínimo de dos veces el diámetro de la boquilla. Por ejemplo, si se usa boquilla estándar de 0,4 mm el grosor mínimo de pared deberá ser de 0,8 mm.

Por otro lado, a la hora de modelar, se han seguido una serie de técnicas para que, en caso de tener que realizar ajustes en la geometría o las dimensiones, éstas se puedan llevar a cabo de forma rápida:

- Croquis maestros: Estos croquis se utilizan para establecer los rasgos más característicos del diseño, como las dimensiones principales. A partir de estas referencias, en los siguientes croquis que se generen para ser embebidos por operaciones de generación de sólidos, se pueden convertir las entidades de croquis, permaneciendo con una relación de igualdad ante posibles cambios.
- Inserción de piezas de referencia: Hay ocasiones en las que modelar a partir de una pieza creada con anterioridad facilita el proceso y disminuye el tiempo necesario en caso de tener que realizar cambios. De forma parecida a los croquis maestros, la inserción de piezas se utiliza para convertir entidades de éstas a los croquis que serán embebidos por las operaciones de generación de sólidos.

2.3.3. Codificación de los archivos CAD

Es muy importante que a lo largo de la fase de diseño los archivos CAD estén bien codificados para conocer exactamente que componente, pieza o ensamblaje es cada archivo. Se propone la siguiente codificación:

BR-XX-YY-ZZ

Donde:

- BR: hace referencia a “Brazo robótico”, para identificar el proyecto.
- XX: corresponde a qué grupo principal pertenece la pieza.
- YY: número de pieza. Las piezas que tengan esta terminación pueden ser piezas modeladas únicas, o bien piezas formadas por dos o más componentes en un ensamblaje.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

- ZZ: número de componente. No todas las piezas tienen número de componente, solo aquellas que estén formadas por dos o más.

Los grupos principales del proyecto son los que se enumeran en la siguiente tabla, casi idénticos a los mencionados con anterioridad, tan solo se ha añadido el grupo 04 para agrupar las piezas que realizan el movimiento de pinza, dejando así el grupo 03 para las piezas que realizan el movimiento de la muñeca:

Grupo	Nombre
00	Base
01	Brazo
02	Antebrazo
03	Mano
04	Pinza

Tabla 3 – Grupos de piezas

Por último, existe un código especial para el ensamblaje de todas las piezas que forman el brazo robótico: BR-E.

2.3.4. Modelado y ensamblaje

Con toda esta información, a continuación, se van a mostrar todas las partes que han sido modeladas en SOLIDWORKS, las cuales forman el brazo robótico. Este proceso se va a mostrar por grupos de piezas en el orden que han sido llevadas a cabo.

2.3.4.1. Grupo 01. Brazo

Como se ha observado en los bocetos mostrados en apartados anteriores, esta es la pieza sobre la cual gira el diseño. Por esta razón es la primera en ser modelada. Concretamente es una pieza separada en dos componentes dados los requisitos de fabricación. Hacerla en dos componentes facilita la impresión y permite que pueda ser impresa en impresoras con un volumen de 200x200x200 mm³.

- **BR-01-01:**

Para el primer componente de la pieza, el BR-01-01-01, se ha utilizado un croquis maestro para definir las dimensiones principales, y dos planos de referencia para realizar los croquis de las dos paredes laterales. Estos planos son paralelos al plano de alzado principal, lo cual permite una modificación rápida de las dimensiones ya que en el hueco inferior se ubican los servomotores que mueven las barras impulsoras de los grupos 02 y 03, como se observa en las figuras 39 y 40.

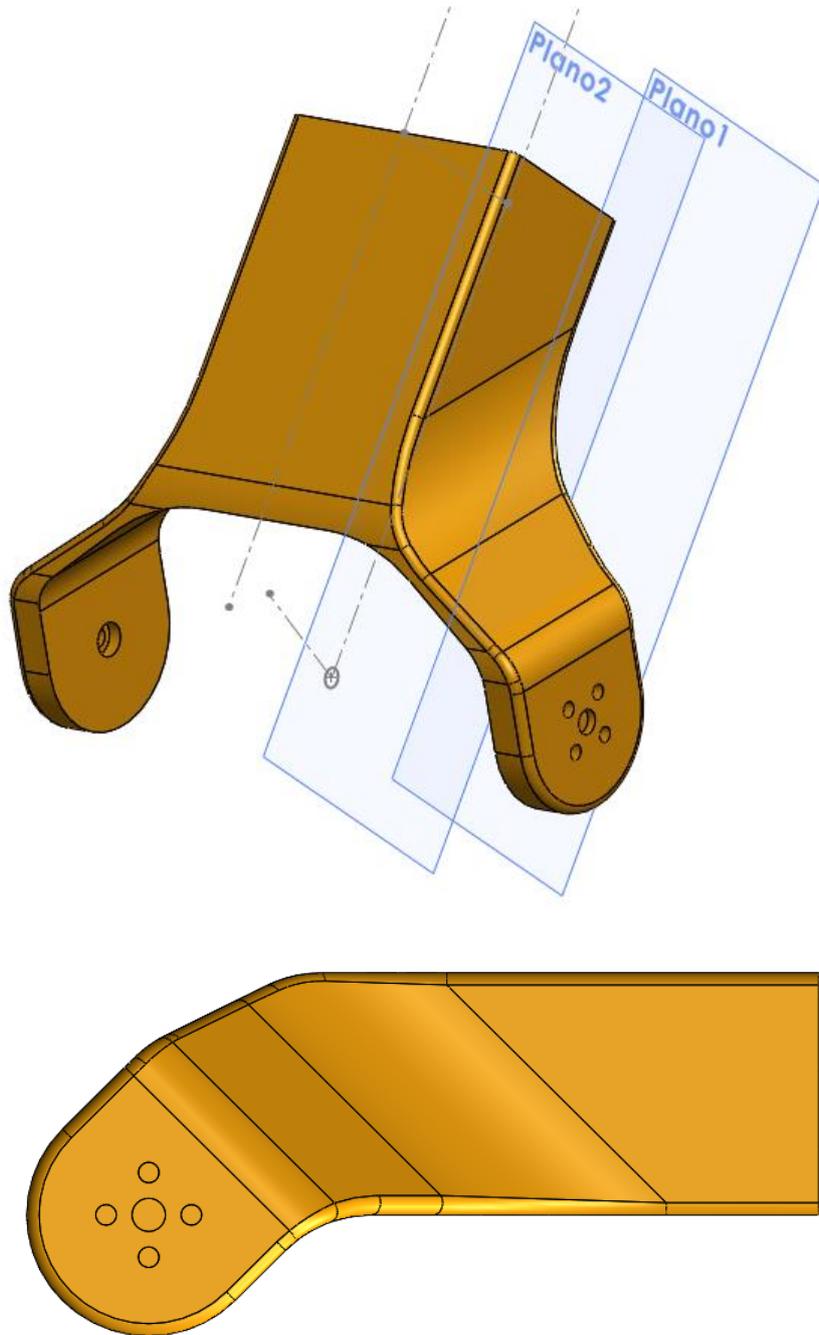


Figura 39 – BR-01-01-01

Para crear la curvatura de unión entre ambos elementos se ha realizado una solevación entre los extremos de ambos sólidos. En la parte inferior existen varios agujeros para unir el servo motor con la pieza y, en el otro extremo, a la pieza con la base.

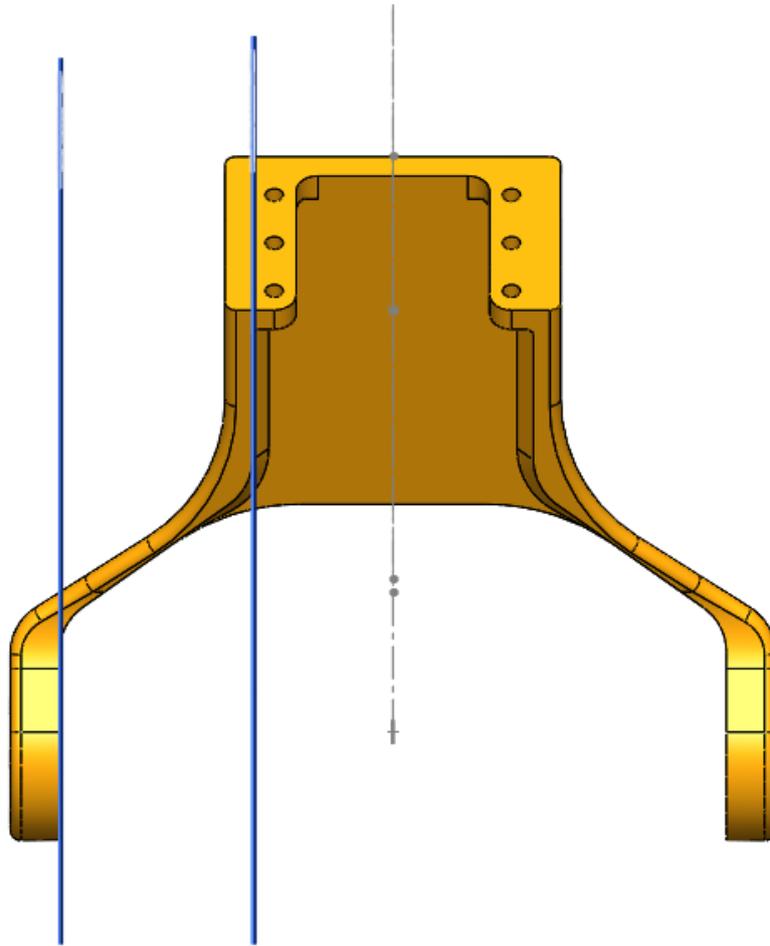


Figura 40 – BR-01-01-01

Cabe destacar que la división en dos componentes de la pieza hace necesario crear elementos de unión. Para ello se han creado una serie de agujeros en la parte superior que servirán para realizar uniones roscadas entre ambos componentes. Este sólido añadido por la parte interior también es de utilidad a la hora de imprimir el componente porque va a ser la base en contacto con la cama caliente.

Para completar la pieza 01, el segundo componente denominado BR-01-01-02 sigue las mismas líneas de diseño que el anterior, solo que en un mismo plano está contenida toda la pared lateral, sin necesidad de crear ninguna apertura para encajar otras piezas.

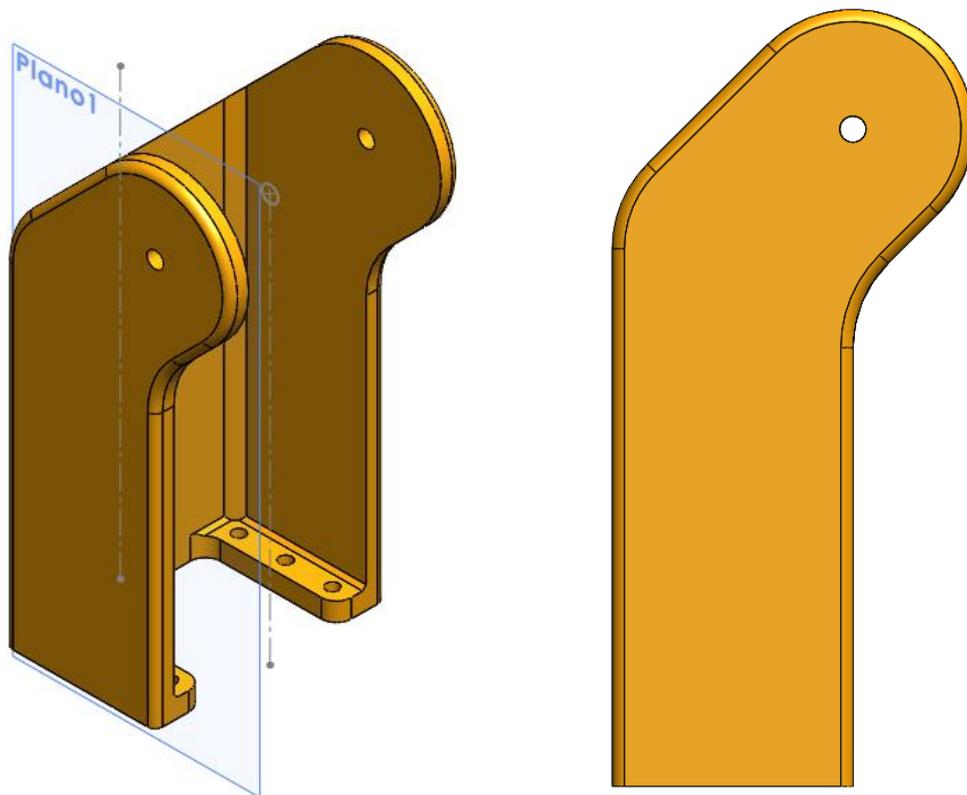


Figura 41 – BR-01-01-02

Se puede apreciar con más facilidad en este componente que los agujeros de la pieza son colineales con el perfil derecho, dejando un espacio suficiente en el interior de las tres paredes para albergar a las barras de los mecanismos de los grupos 02 y 03.

Al igual que en el componente BR-01-01-01, se han situado agujeros en la base para realizar la unión en una sola pieza.

La posición que se observa en la figura 36 es en la cual se van a imprimir estos componentes. La inclinación de 45° del saliente permite no utilizar soportes durante el proceso.

Finalmente, se crea la pieza BR-01-01 en un subensamblaje en el que se unen ambos componentes. Al ubicar en el interior los elementos de unión, les da continuidad a las superficies exteriores.

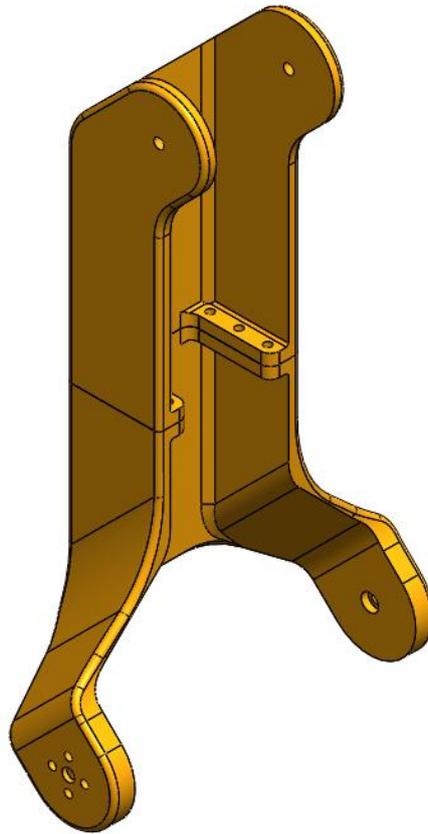


Figura 42 – BR-01-01

2.3.4.2. Grupo 02. Antebrazo

Para este grupo de piezas se han modelado dos: la BR-02-01, dividida en dos componentes al igual que los modelados en el apartado anterior, y otra pieza, la BR-02-02 para cerrar el mecanismo de cuatro barras del grupo 02. A continuación se muestran:

- **BR-02-01:**

Para su creación se ha utilizado el componente BR-01-01-02, ya que su geometría es muy continuista y solo necesita modificar sus dimensiones para que puedan encajar.

Como elemento característico, el componente BR-02-01-01 necesitaba añadir una zona de unión con la pieza BR-02-02, para que esta controle su posición. Forma parte del mecanismo de cuatro barras del grupo 02.

Así, se ha añadido un saliente hasta situar un agujero de manera colineal con el agujero principal de rotación de la pieza y el borde derecho.

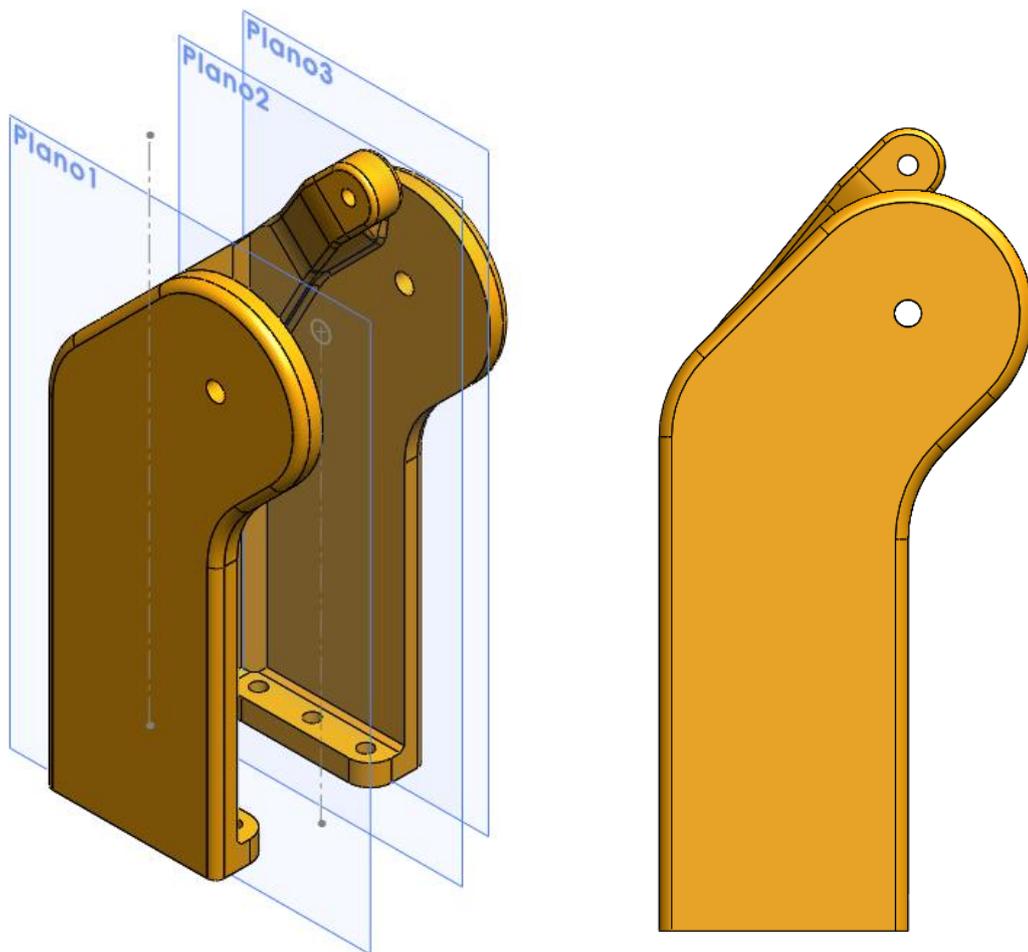


Figura 43 – BR-02-01-01

Por otro lado, el segundo componente BR-02-01-02, al igual que ocurría con el componente anterior, este vuelve a utilizar como base el componente BR-01-01-02, modificando sus dimensiones para que encaje correctamente.

En este caso no han sido necesarias más alteraciones salvo el diámetro del saliente y una pequeña incisión para evitar el contacto con el servo motor superior de la pinza.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

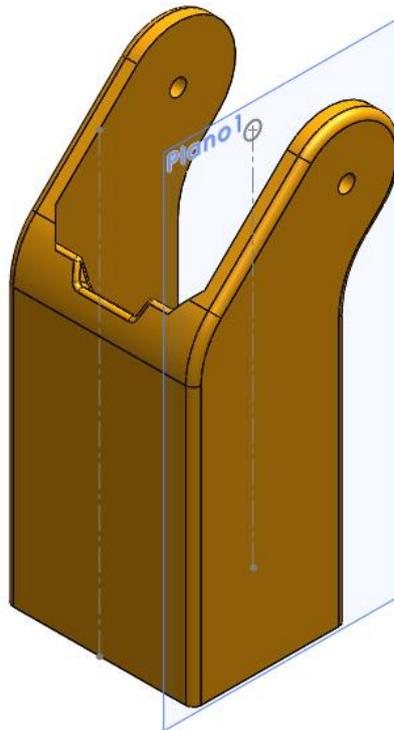


Figura 44 – BR-02-01-02

El ensamblaje de estos dos componentes da lugar a la pieza BR-02-01.

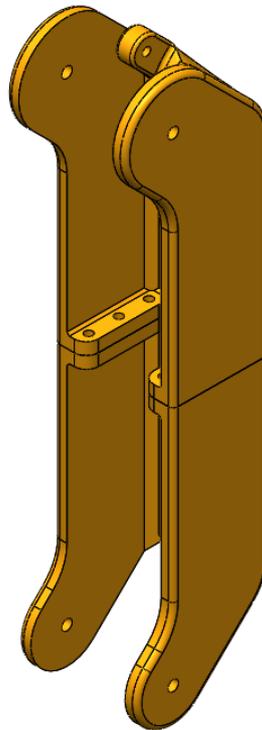


Figura 45 – BR-02-01

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

- **BR-02-02:**

Es una pieza que sirve de unión entre la pieza BR-02-01 y la pieza impulsora, que en este caso se ha optado por utilizar un brazo especial, metálico, para acoplarlo al servomotor. Su geometría es simple, tan solo tiene que unirse a otras piezas y, al discurrir por el interior de la pieza BR-01-01, no se ve.



Figura 46 – BR-02-02

La posición de la hendidura derecha se ajustará una vez se ensamblen todas las piezas.

2.3.4.3. Grupo 03. Mano

Este grupo de piezas se caracteriza por los dos mecanismos de cuatro barras consecutivos que se utilizan para posicionar angularmente la pinza. En total hay cuatro piezas, siendo una de ellas dividida en dos componentes dada su geometría.

- **BR-03-01:**

Utilizando como sólido de partida la pieza BR-02-02, tan solo es necesario modificar sus dimensiones para hacerla encajar en el ensamblaje general. Es una pieza con la misma función, es decir, estará unida a la barra impulsora del servomotor y transmitirá el movimiento hacia la pieza BR-03-02.



Figura 47 – BR-03-01

- **BR-03-02:**

Es una pieza que se utiliza de nexo entre los dos mecanismos de cuatro barras que hay en el grupo 03, es decir, hace las veces de barra impulsada del primer mecanismo y de pieza impulsora del segundo.

Para evitar contactos con las piezas a las que se une y con el pasador sobre el cual, rota, se ha optado por hacer cóncavas las uniones entre agujeros. A destacar el ángulo entre los ejes que unen los agujeros donde van unidas las piezas BR-03-01 y BR-03-03 con el agujero inferior derecho, formando 80°.

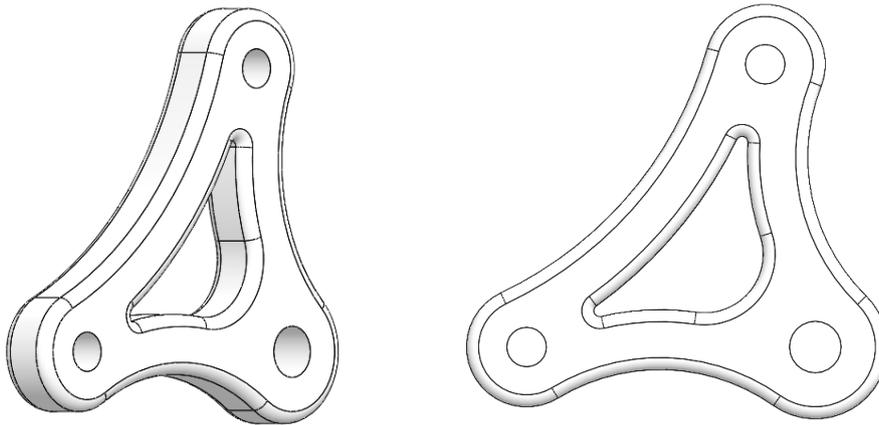


Figura 48 – BR-03-02

- **BR-03-03:**

La última de las piezas que se utilizan como transmisoras del movimiento en los mecanismos de cuatro barras y que se modela a partir de la pieza BR-03-01, a la cual tan solo hay que añadir otro saliente para que encaje con la última de las piezas de este grupo, la BR-03-04.



Figura 49 – BR-03-03

- **BR-03-04:**

Esta pieza es la unión de dos componentes. En primer lugar, el BR-03-04-01 utiliza un croquis maestro para posicionar el agujero por el cual se unirá mediante un pasador a la pieza BR-02-01 y el saliente donde se ubicará el agujero para completar el segundo mecanismo de cuatro barras.

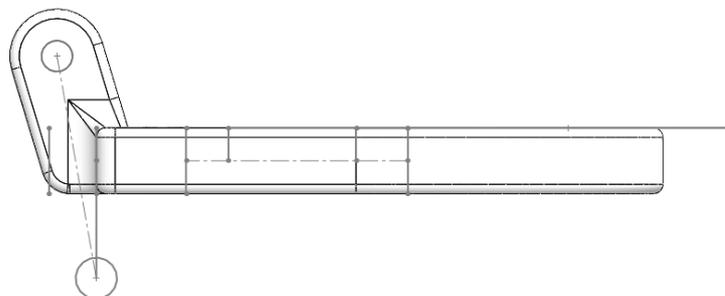


Figura 50 – BR-03-04-01

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

También se debe tener en cuenta el tamaño del servomotor, que va encajado en un hueco rectangular. Las dimensiones de esta pieza están muy relacionadas con el mecanismo de la pinza, por lo que es censario que sea fácilmente editable en caso de tener que ajustar las dimensiones.

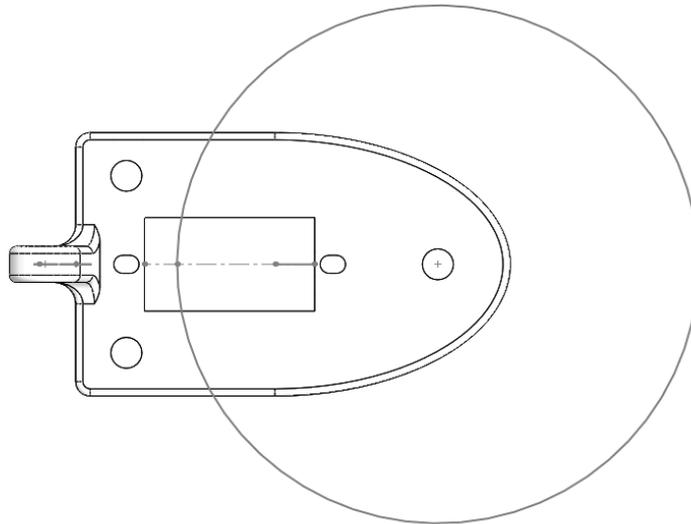


Figura 51 – BR-03-04-01

La razón de utilizar otro croquis maestro en la parte superior es para situar una circunferencia que represente el radio máximo que tiene el engranaje de la pinza, como se verá más adelante. La distancia entre el agujero derecho donde pivotará la pinza y la posición del hueco para el servomotor depende del tamaño del engranaje, de la relación de transmisión y del grosor que se le dé a la pinza. Estas piezas pertenecen al grupo 04.

Para el segundo componente, se ha utilizado la función de inserción de pieza y se han tomado las referencias del primer componente, tanto con los croquis maestros no embebidos como la proyección de la superficie inferior.

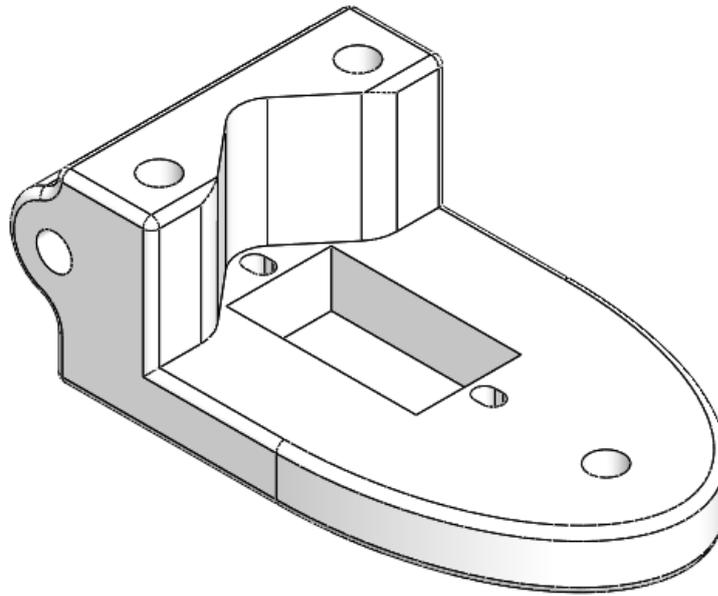


Figura 52 – BR-03-04-02

La forma general es idéntica al componente 01, a destacar el agujero izquierdo que cruza horizontalmente el componente y que lo une a la pieza BR-02-01 mediante un pasador. Para unir ambos componentes en la pieza BR-03-04 hay dos agujeros superiores que atraviesan el componente. La unión se produce mediante uniones roscadas

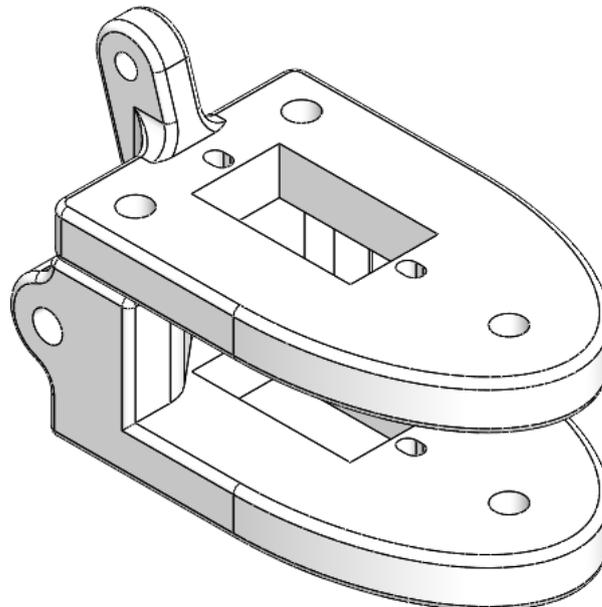


Figura 53 – BR-03-04

2.3.4.4. Grupo 04. Pinza

Para que el brazo robótico realice su función debe tener un elemento capaz de coger objetos. Para ello se va a diseñar una pinza. Esta pinza será accionada por dos servomotores pequeños MG90s capaces de generar un par de 2 kg·cm, con un giro de 180°. Con estos datos, la intención es la de utilizar engranajes para aumentar el par disponible en la pinza. Concretamente la relación de transmisión va a ser de 4, con lo que el par en el eje de rotación de la pinza será de 8 kg·cm y la apertura máxima respecto al eje principal del brazo será 4 veces menor, de 45°.

Las piezas que conforman este grupo 04 son 2: un engranaje y la pinza. Ambos serán duplicados para formar el mecanismo completo.

- **BR-04-03:**

Consiste en un engranaje de 15 mm de circunferencia primitiva con un agujero interior para unirlo al servomotor. El engranaje es de dientes rectos y con 10 dientes. Para hacerlos se ha creado uno de ellos y después se ha utilizado una matriz circular.

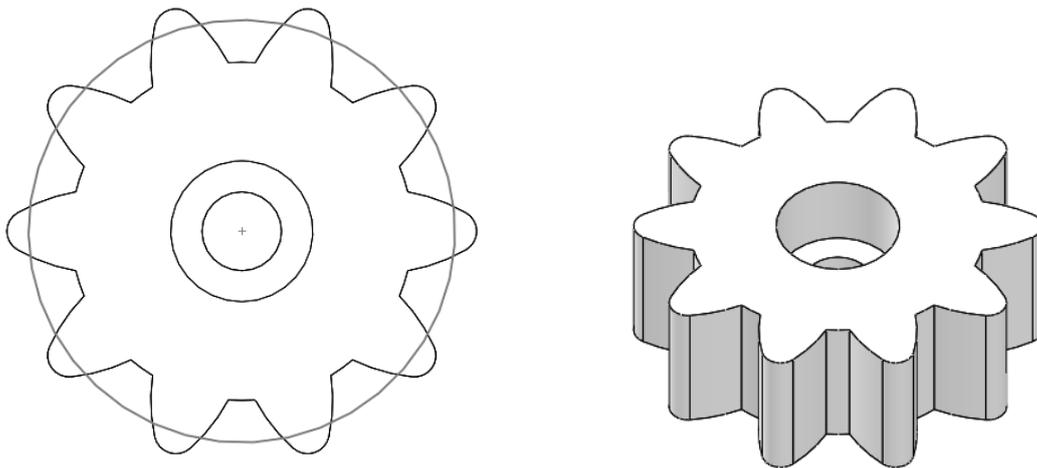


Figura 54 – BR-04-03

La circunferencia que se observa es la circunferencia primitiva, contenida en un croquis maestro.

- **BR-04-01:**

Para crear la pinza se ha utilizado de nuevo la función de insertar pieza, para colocar como referencia a la pieza anterior, la BR-04-03. A partir de ella se ha generado el negativo de un diente del engranaje, puesto que este engranaje es interior. Después, aplicando la relación de transmisión deseada, en este caso 4, se dibuja la circunferencia primitiva y por ende el centro de la circunferencia y eje de rotación de la pinza queda ubicado.

Para generar el resto de los dientes y puesto que en el engranaje mayor debe haber 4 veces más dientes que el engranaje pequeño, obtenemos que debe existir un diente cada 9°, por los 36° del engranaje de la pieza BR-04-03.

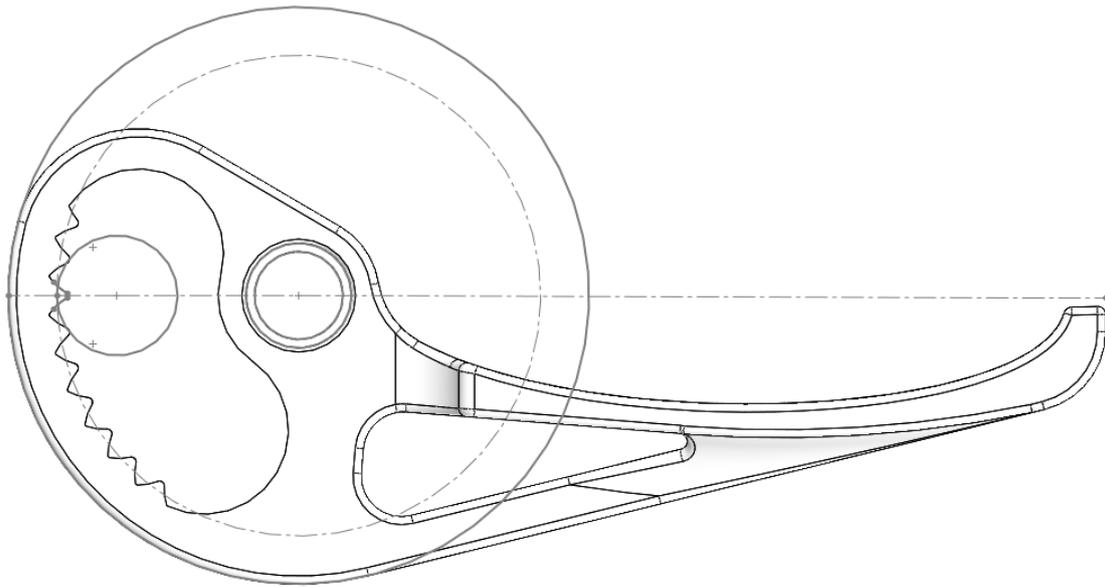


Figura 55 – BR-04-01

Otra característica importante es el agujero central. Para generar la estabilidad necesaria, puesto que se trata de una pieza que generalmente va a estar posicionada horizontalmente, se va a utilizar un rodamiento que se insertará en dicho agujero para que quede completamente fijo con la pieza y el tornillo pasante no genere fricción por el apriete que se le pueda dar.

Para el resto de la pinza, tan solo se ha debido generar su forma mediante una curva de Bezier con dos puntos de control como se muestra en la figura 56. La curva de Bezier es de gran utilidad para crear la curvatura que permita a la pinza coger objetos con la mayor versatilidad posible, independientemente del grado de apertura.

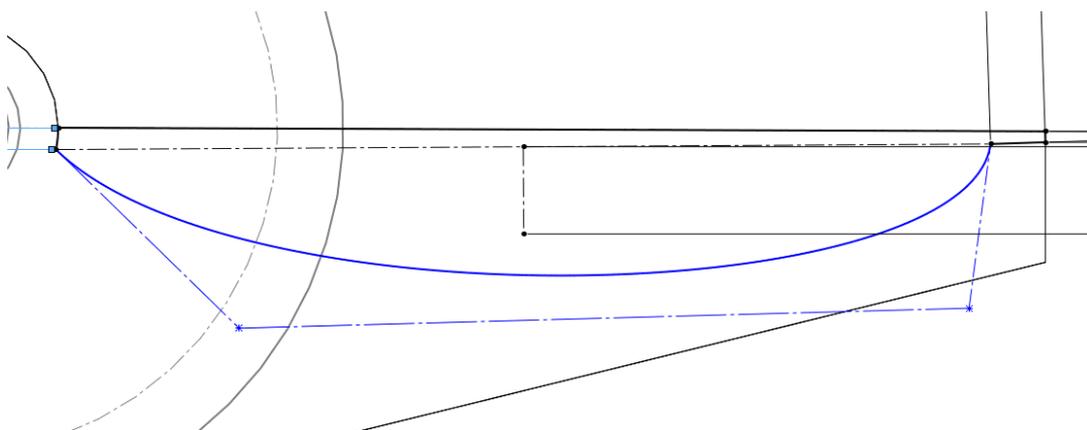


Figura 56 – Curvatura de la pinza. Curva de Bezier

Generar esta curvatura también conlleva un inconveniente, y es que el objeto que deba ser cogido por la pinza debe tener como mínimo unos 25 mm de anchura.

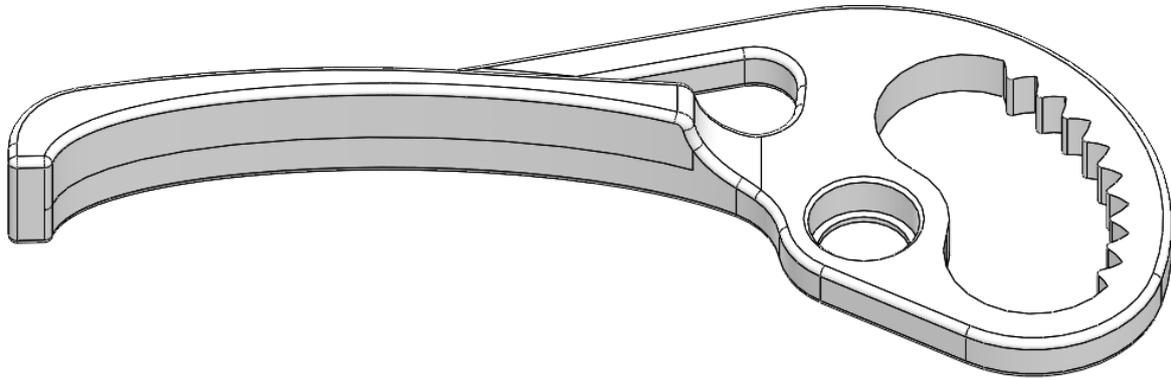


Figura 57 – BR-04-01

Por último, hacer notar el saliente de la pinza para tener más superficie de agarre. Este elemento también permite el mecanismo entero tener estabilidad ya que la otra pinza, la pieza BR-04-02 es completamente idéntica a esta. Esta característica se podrá observar con más detalle en el ensamblaje final.

2.3.4.5. Grupo 00. Base

El último grupo de los que componen el brazo robótico es la base. Se ha optado por modelarla en función de los componentes a los que va unida, es decir, una vez creadas el resto de las piezas, ubicadas en su lugar correspondiente e insertado los servomotores en el ensamblaje, se ha creado la base de arriba hacia abajo.

La base está compuesta por dos piezas, que a su vez se dividen en dos componentes cada una. Se necesitan dos piezas puesto que el brazo robótico también tiene movimiento de rotación en la base, para poder posicionarse en las tres coordenadas del espacio.

Un servo motor estará ubicado en el interior de la pieza inferior para que la pieza superior pueda rotar. Para poder estabilizar la parte superior, dado que van a existir ciertas fuerzas cuando el brazo se alargue, se van a utilizar esferas metálicas contenidas entre las dos piezas que forman la base a modo de rodamiento axial.

- **BR-00-01:**

Esta pieza, dividida en dos componentes es la que rota solidariamente con el brazo. La razón de hacer dos componentes está en que es más sencillo de fabricar con una impresora 3D

Para el primer componente, el BR-00-01-01, se ha seguido el procedimiento explicado anteriormente. A partir de la posición de las demás piezas, se generan planos de referencia donde hacer las pertinentes operaciones de generación de sólidos. Puesto que se tienen que ubicar tres servomotores en la base, se opta por hacer un croquis maestro para las sujeciones.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

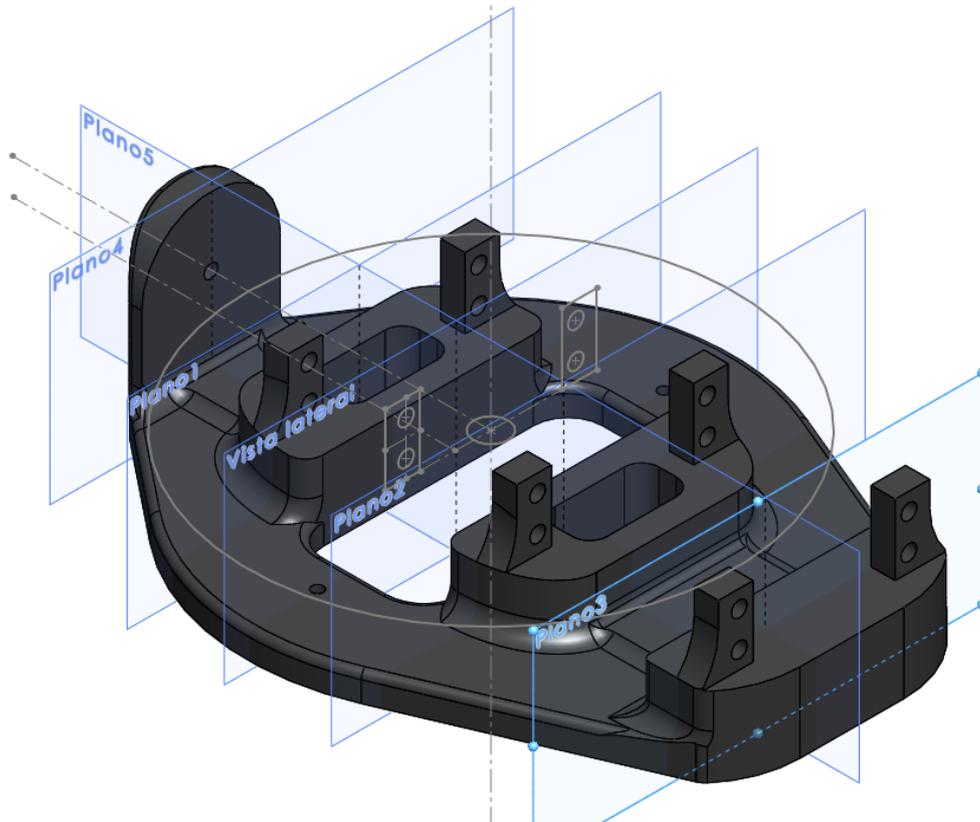


Figura 58 – BR-00-01-01

También se genera un croquis maestro para generar la circunferencia exterior de 140 mm de diámetro y generar el sólido inferior que une todos los soportes.

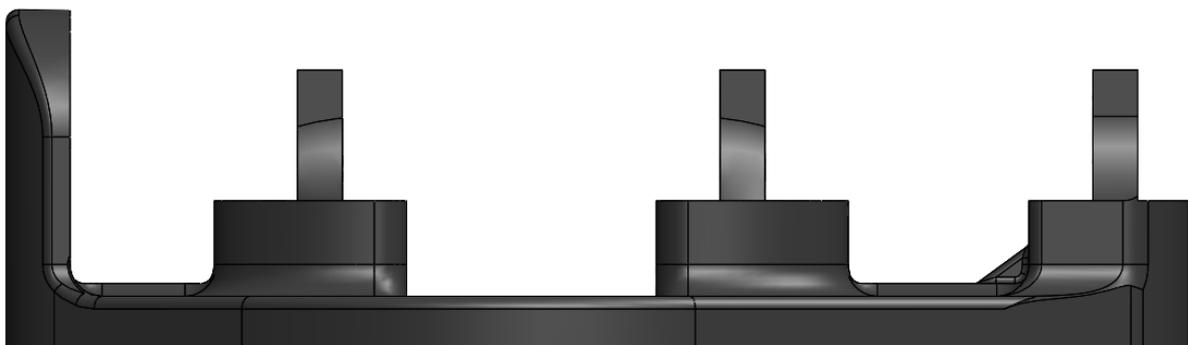


Figura 59 – BR-00-01-01

Por último, también se han generado vaciados con tal de reducir el material utilizado y disminuir el tiempo de proceso. Además, el hueco central posibilita el acceso al segundo componente, muy útil para realizar el ensamblaje una vez fabricadas todas las piezas.

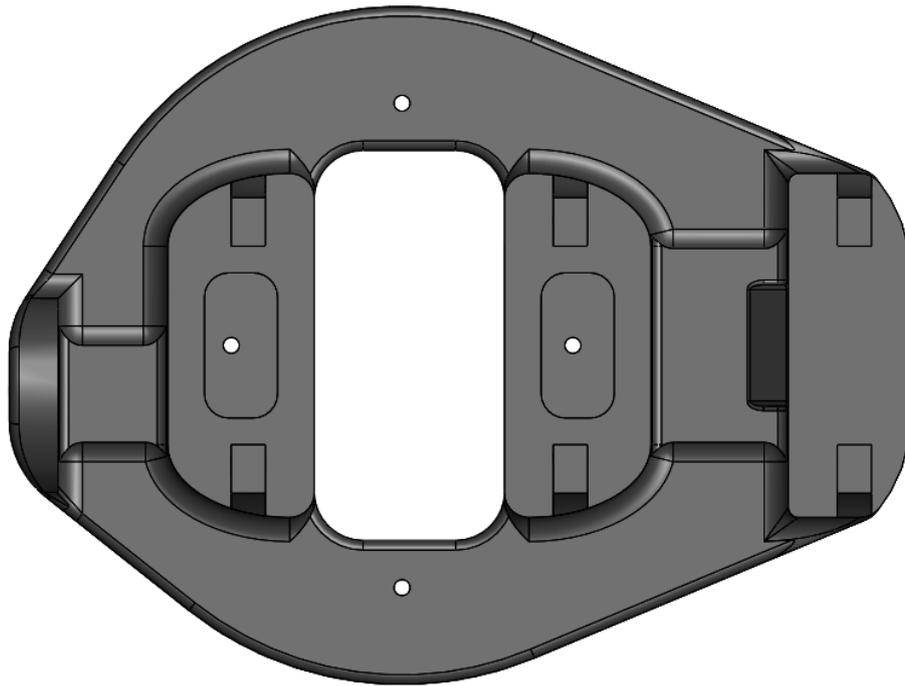


Figura 60 – BR-00-01-01

También son necesarios cuatro agujeros que unan este componente con el segundo, y es por ello que se utiliza el primero para posicionar estos agujeros y la circunferencia de 140 mm comentada anteriormente para modelar el componente BR-00-01-02.

La característica principal de este componente reside en la hendidura circular, con forma de semi toroide, en la cual estarán albergadas las esferas metálicas de 6 mm de diámetro que ayudan a estabilizar el robot transmitiendo las fuerzas hacia la superficie donde se ancle todo el conjunto.



Figura 61 – BR-00-01-02

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Por otro lado, se realizan más agujeros y cavidades para que las cabezas de los tornillos puedan caber y que la superficie superior sea completamente plana. Esto es necesario porque el espacio disponible hasta la segunda pieza es de tan solo 2 mm. En el centro se hayan los agujeros para acoplar el disco del servomotor, con espacio suficiente para apretar el conjunto de la base.

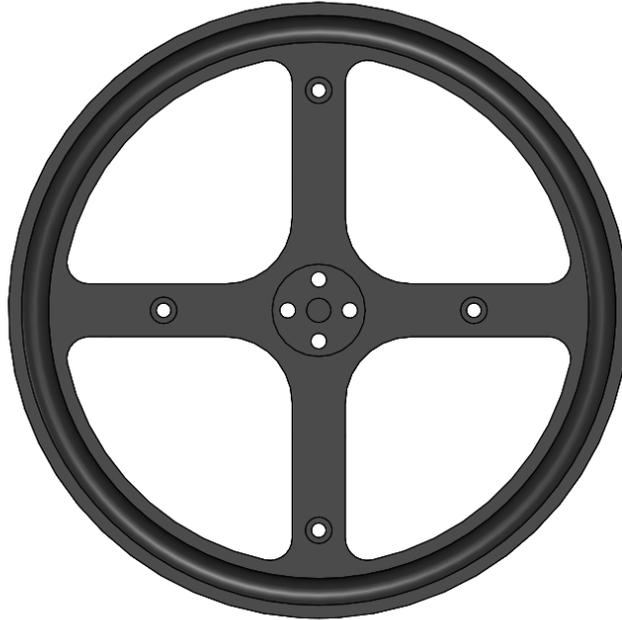


Figura 62 – BR-00-01-02

De nuevo, no es necesario que el disco sea completamente sólido, por lo que se generan radios lo suficientemente anchos para que hagan de apoyo.

De esta forma, uniendo los dos componentes en la pieza BR-00-01 se forma la primera de las dos mitades de la base. Se observa como la unión da mayor solidez estructural a la pieza.

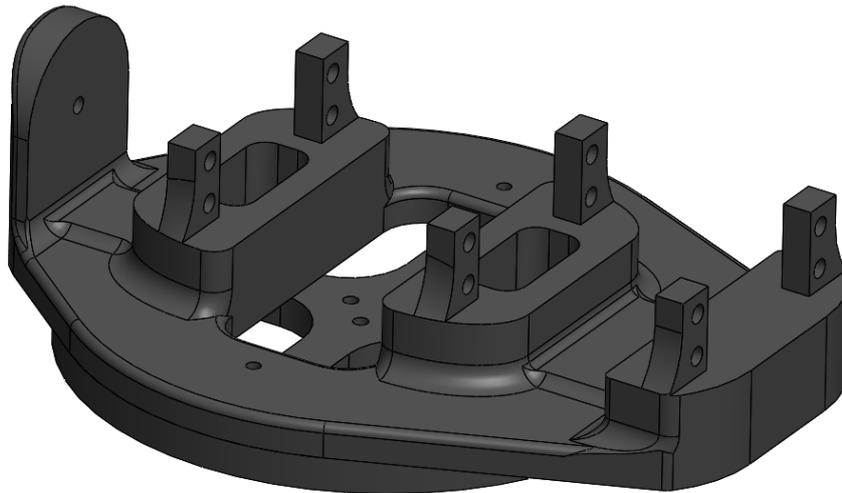


Figura 63 – BR-00-01

- **BR-00-02:**

Esta pieza une el brazo robótico con la superficie sobre la cual se ubica. Es, por lo tanto, la única pieza que permanece inmóvil. Al igual que la pieza anterior, esta se divide en dos componentes por facilidad y comodidad para su fabricación.

El componente BR-00-02-01 es muy parecido al componente 2 de la pieza anterior y es por ello por lo que se inserta como base para modelarlo. Este componente también tiene la misma hendidura semi toroidal, pero en su centro se ha generado un espacio para poner un servomotor, cuyo eje de rotación debe coincidir con el eje de la hendidura circular y permitir la rotación.

Además, al igual que en el caso anterior, es necesario que las cabezas de los tornillos de unión permanezcan por debajo de la superficie superior.

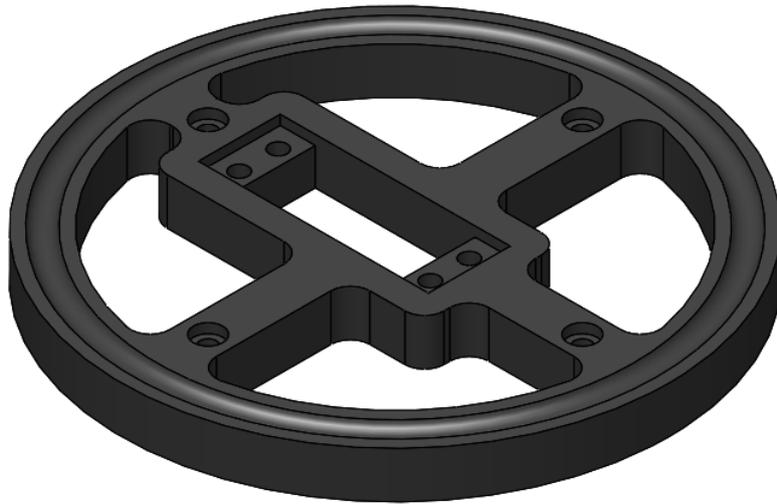


Figura 64 – BR-00-02-01

Por último, el segundo de los componentes de esta pieza debe ser lo suficientemente alto como para que el servomotor que va dentro quepa, además de proporcionar solidez al resto de elementos. Hay cuatro pilares sobre los que se asentará el componente 1 y se atornillará directamente, sin utilizar tuercas. Esto se consigue haciendo que el diámetro del agujero sea ligeramente más pequeño que el diámetro del tornillo.

Para aumentar la solidez y evitar problemas de fracturas, se han disminuido los radios de acuerdo en todos los elementos críticos mediante el uso de redondeos y de chaflanes.

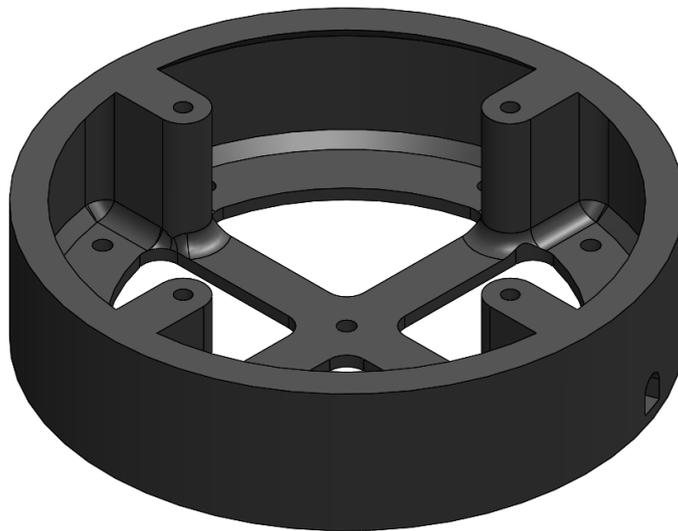


Figura 65 – BR-00-02-02

Por otra parte, se han añadido un total de 9 agujeros para fijar a una superficie todo el conjunto del brazo robot y evitar que se mueva la más mínimo.

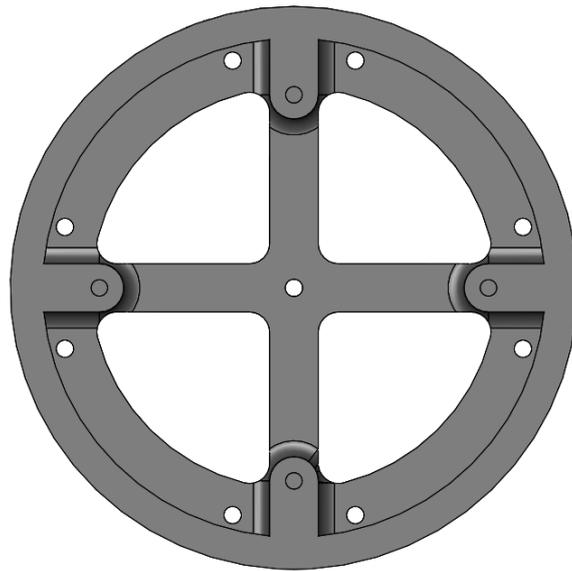


Figura 66 – BR-00-02-02

Como detalle, hay que mencionar que se ha realizado una apertura en la parte inferior del cilindro para pasar los cables de alimentación y control del servomotor.

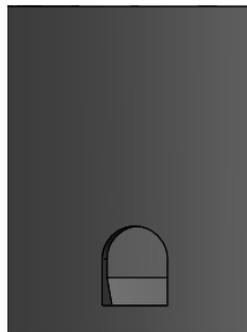


Figura 67 – Apertura para cableado en BR-00-02-02

Estos componentes se unen para formar la pieza BR-00-02. Hay que destacar que la altura del componente BR-00-02-01 está justificada porque depende de las dimensiones del servomotor y el espacio necesario para crear el rodamiento axial de la base.

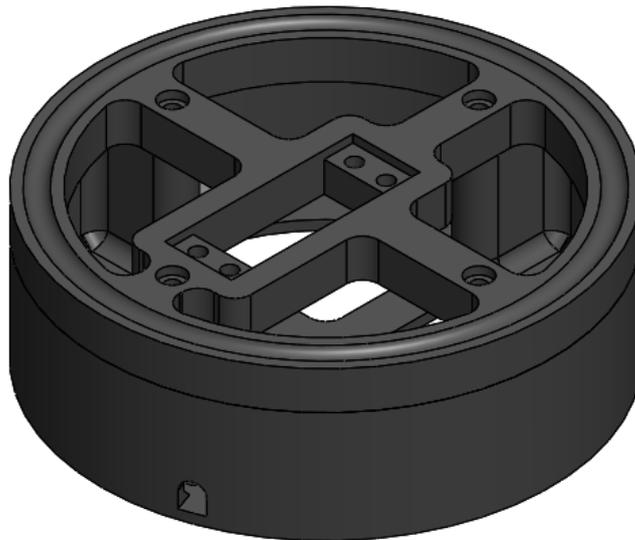


Figura 68 – BR-00-02

2.3.4.6. Ensamblaje BR-E

Con las piezas de los cinco grupos modeladas se realiza un ensamblaje general con todas ellas. Este ensamblaje es de gran utilidad para observar si las dimensiones de las piezas son las correctas, si encajan unas con otras y, si fuera necesario, realizar cambios en las mismas antes de pasar a la fase de fabricación.

Crear un modelo digital del producto puede significar un gran ahorro en costes económicos y de tiempo, ya que como se mencionó en apartados anteriores, el 70% de los costes de un producto se ven comprometidos en la fase de diseño. Las herramientas CAD permiten detectar errores y subsanarlos.

A continuación, se muestra una visión general el ensamblaje del brazo robótico con código BR-E

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

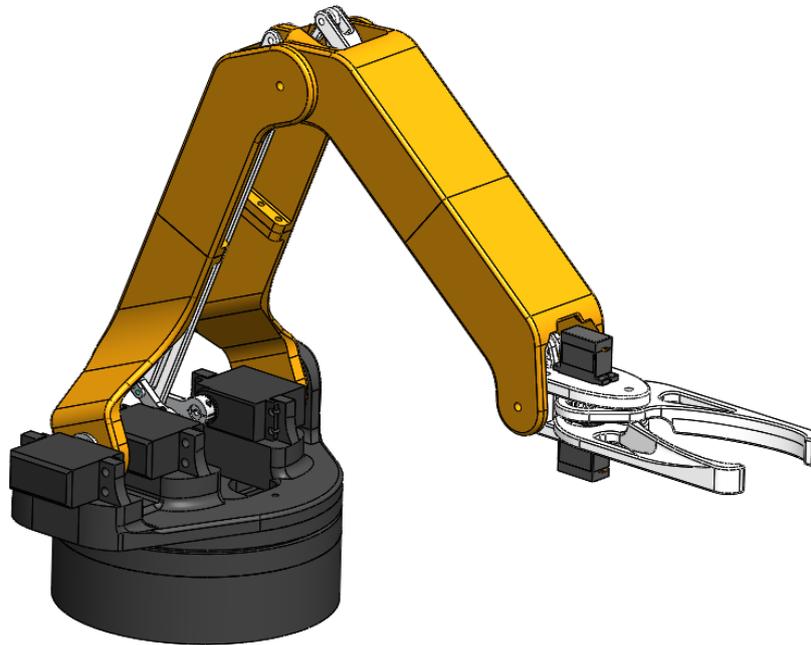


Figura 69 – BR-E

Para comprender su configuración interna es de gran utilidad ver la siguiente figura del ensamblaje vista de perfil, en la que ciertos componentes se han hecho transparentes para observar los mecanismos y su colocación:

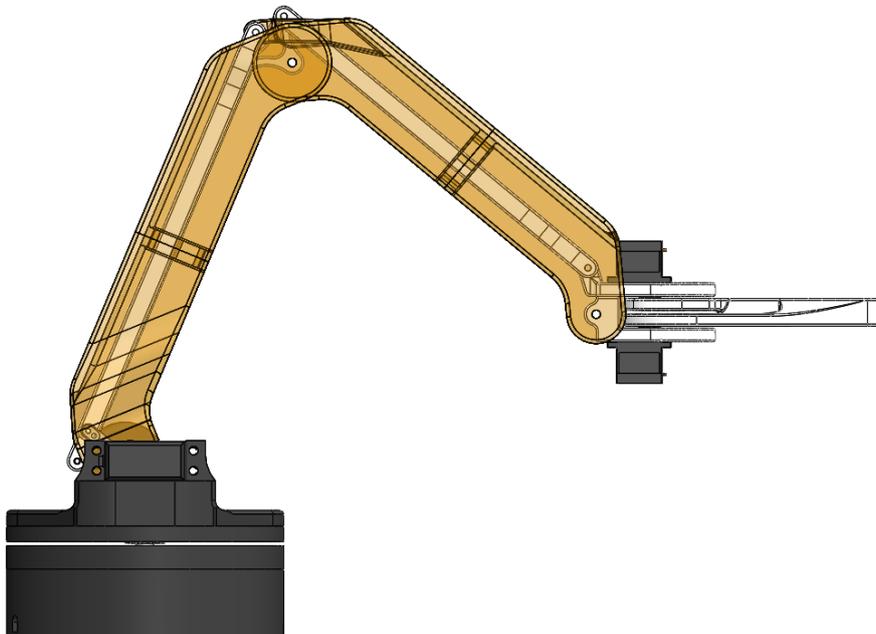


Figura 70 – BR-E con transparencias activas

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Por otra parte, visto desde detrás se observa la ubicación de los servomotores y cómo encaja la pieza BR-01-01 en la base (pieza BR-00-01). Los huecos entre piezas son necesarios para incluir la tornillería y elementos de separación como arandelas utilizados para reducir la fricción.

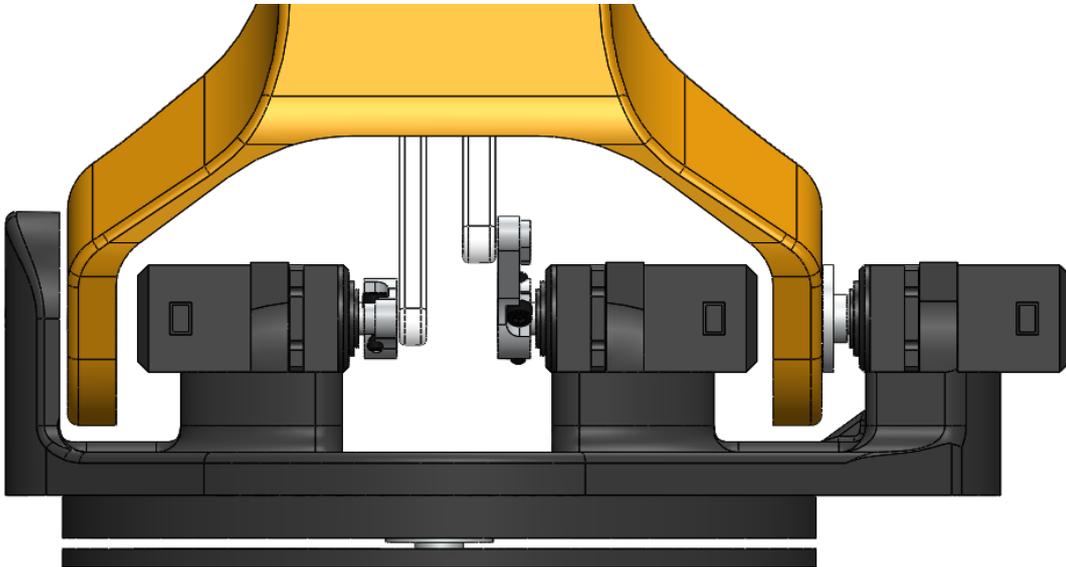


Figura 71 – Encaje de servomotores en la base

También la unión de los componentes de la pinza o grupo 04 y como esta encajado el engranaje se puede apreciar mejor en la figura 72.

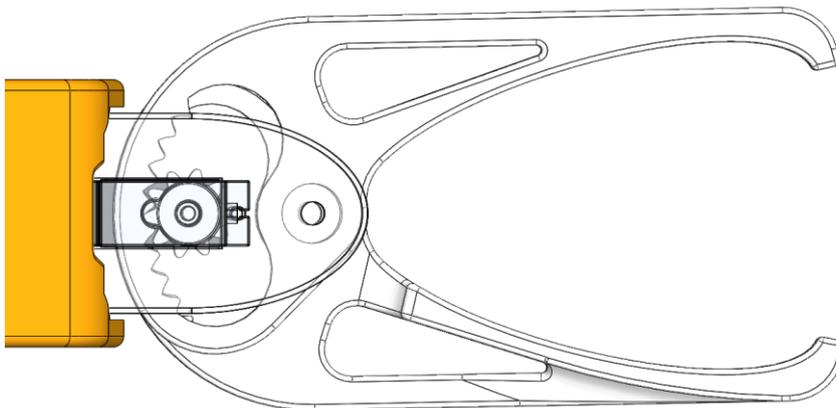


Figura 72 – Pinza completa

El último aspecto por destacar es cómo las dos piezas de la pinza, que son idénticas, se sitúan simétricamente invertidas y crean una superficie de agarre igual por ambos lados.

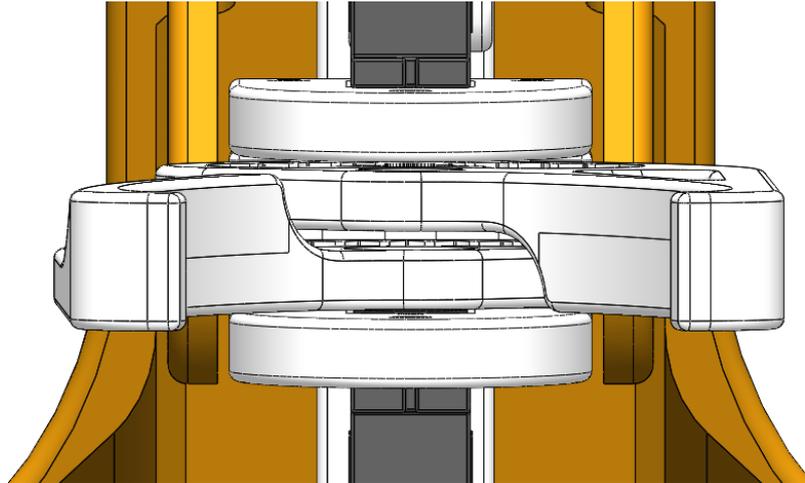


Figura 73 – Vista frontal pinza

2.4. PROCESO DE FABRICACIÓN POR IMPRESIÓN 3D

Superada la fase de diseño, es hora de adentrarse en la siguiente etapa: la fabricación. Para ello, y tras hacer mucho énfasis durante el proceso de diseño, se va a utilizar una técnica de prototipado rápido denominada moldeado por deposición fundida. Esta técnica es comúnmente conocida como impresión 3D.

Durante este apartado, se va a describir el proceso realizado para crear piezas físicas a partir de los modelos digitales creados en SOLIDWORKS, desde la adecuación de los formatos de intercambio hasta los resultados de calidad de las piezas, pasando por el uso del programa tipo *slicer*: Ultimaker CURA.

2.4.1. Transferencia de archivos

Cada pieza o componente modelado en un programa de CAD 3D utiliza un formato determinado. Existen dos tipologías de formato: neutro o registrado.

Un formato neutro es aquel que no es propiedad de ninguna compañía de software que controle su desarrollo y que generalmente son promovidos por organismos de normalización. En cambio, un formato registrado (también denominado formato propietario) es propiedad de una compañía de software CAD o entidad con ánimo de lucro que se encarga de desarrollarlo y generalmente no comparte su descripción públicamente.

SOLIDWORKS utiliza dos formatos registrados denominados:

- **SLDPRT** para el modelado de piezas, en el cual se almacena la geometría del sólido y el historial de operaciones, así como otra información relevante que el usuario haya introducido como colores, materiales, simulaciones, análisis de movimiento y animaciones, etc.
- **SLDASM** para los ensamblajes, que, como en el caso anterior, permite guardar información sobre las relaciones de posición establecidas y su historial.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Para generar el código máquina donde se indican las instrucciones para llevar a cabo la fabricación de las piezas se utiliza Ultimaker CURA en su versión 3.4.1. Este programa puede importar el modelo CAD utilizando dos formatos de intercambio de tipo malla: STL y OBJ, siendo el primero de ellos el utilizado.

EL formato STL (de las siglas en inglés *Standard Triangulation Language*) genera la geometría del sólido a partir de una serie de superficies triangulares que dependen de ciertos parámetros donde el usuario puede ajustar la calidad visual a costa de aumentar el tamaño del archivo.

Se trata de un conjunto de vértices, aristas y triángulos conectados, donde como mínimo dos triángulos adyacentes comparten cada arista y cada vértice. Otros elementos se omiten, como pueden ser puntos, líneas, capas o colores.

Un elemento importante es la normal topológica, la cual indica qué cara del triángulo es la exterior y qué cara es la interior. Es una información elemental para poder reconstruir la pieza y que CURA pueda generar las trayectorias correctamente. Todas las coordenadas XYZ de los triángulos, vértices y aristas se ubican en el primer cuadrante, es decir, toman valores mayores o iguales a 0.

Además, se puede generar un archivo STL en formato ASCII o en binario. Con el primero es posible editarlo manualmente utilizando un editor de texto, pero aumenta el tamaño del archivo.

A la hora de guardar una pieza en formato STL, se debe determinar:

- Tolerancia de división en triángulos: marca lo suave que puede llegar a ser el mallado.
- Tolerancia de adyacencia angular: para la representación de detalles.

A continuación, se muestra un ejemplo en la figura 74 con el componente BR-00-02-01 donde se observa como las superficies del sólido están representadas por triángulos, y gracias a las normales topológicas el visualizador, en este caso el propio SOLIDWORKS, es capaz de interpretar qué lado es interior y que lado es exterior.

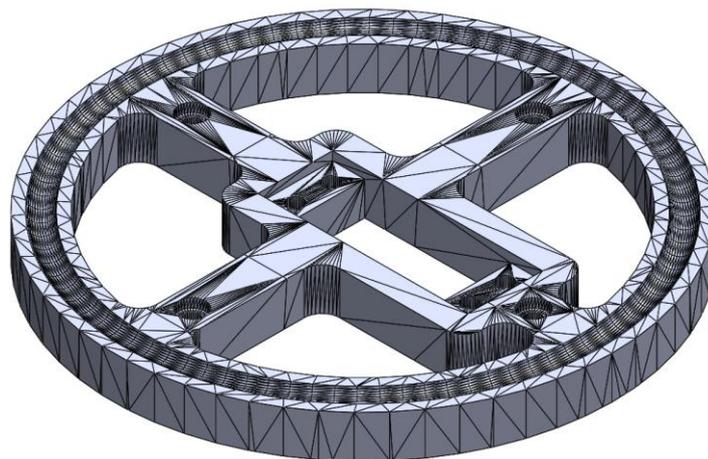


Figura 74 – STL del componente BR-00-01-01

2.4.2. Parámetros característicos

Una vez convertidos los archivos CAD a formato STL, es hora de utilizar Ultimaker CURA para poder fabricar todas las piezas. CURA es un software de los denominados *slicers*. Su función principal es la de

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

generar las trayectorias que debe seguir el extrusor de la impresora a partir del modelo 3D que se carga.

Para ello el programa “trocea” el modelo en capas de un grosor determinado, y se generan los movimientos de los motores para realizar esas trayectorias en el plano XY. Es por ello por lo que estas impresoras 3D son también conocidas como impresoras 2.5D, dado que generan trayectorias en 2D y, al terminar una capa, se mueven en el eje Z para generar la siguiente capa.

Al cargar el modelo, CURA genera automáticamente el código GCODE para los parámetros dados, dando estimaciones de tiempo de impresión y gasto de material.

En la figura 75 se muestra la interfaz típica de CURA.

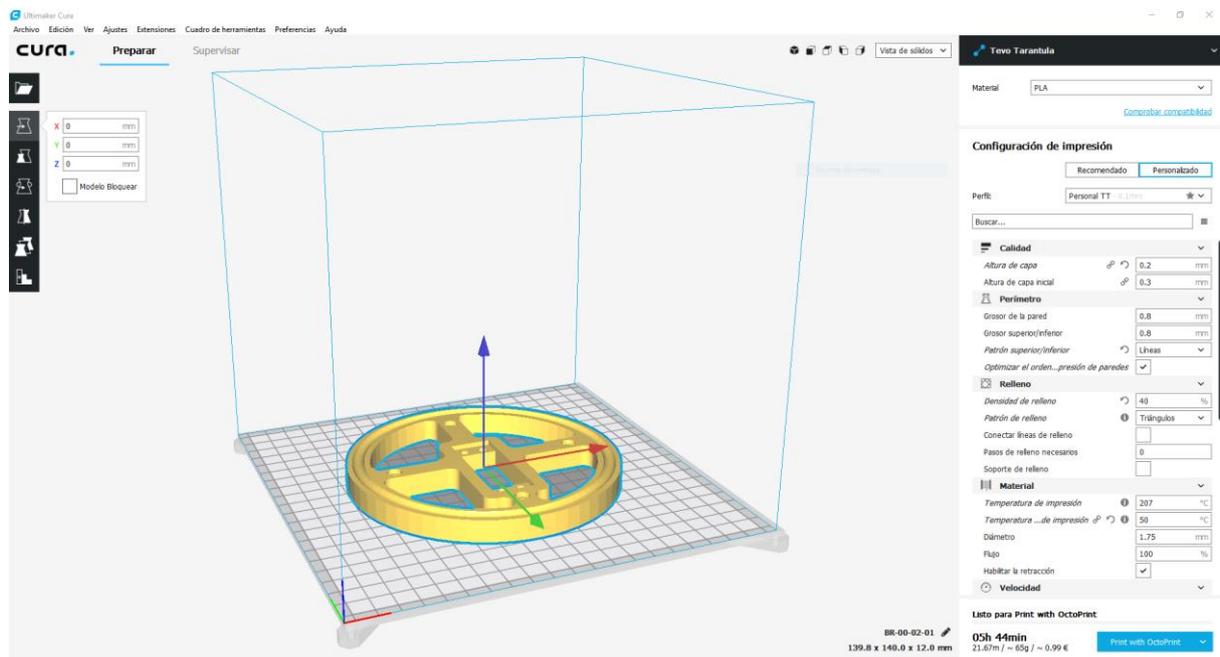


Figura 75 – Entorno gráfico CURA

Donde hay:

- Un entorno de visualización 3D con una base del tamaño real de la cama caliente de la impresora, para ver el modelo, posicionarlo, escalarlo u orientarlo según convenga. En la esquina superior derecha existe un menú desplegable donde se puede cambiar el modo de visualización, para ver el modelo sólido o la vista de capas. En esta última se pueden observar las trayectorias que va a realizar, además de otros detalles como se mencionarán más adelante.
- Parámetros de impresión: son una serie de opciones que se pueden configurar a gusto del usuario y que dependiendo de las características que se busque tener en la pieza una vez terminada toman un valor u otro.

CURA tiene cientos de parámetros que pueden ser manipulados si se desean, pero en la práctica sólo es necesario tener en cuenta un grupo reducido de ellos:

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

- **Altura de capa:** define el avance en el eje z, cada capa que genera la máquina deposita dicho espesor. En general este valor es acotado entre 0,05 mm y el diámetro de la boquilla del extrusor y es uno de los que más peso tienen a la hora del acabado.

Una altura de capa muy baja genera sólidos con muy buenos acabados, casi tan buenos como los de una pieza moldeada por inyección si se acompaña de un diámetro de boquilla también muy pequeño. En cambio, el tiempo de impresión es inversamente proporcional, es decir, aumenta al disminuir la altura de capa.

Para todas las piezas del proyecto se va a utilizar una altura de capa de 0,2 mm, la cual deja un buen acabado, una buena adhesión entre capas y el tiempo de procesamiento es razonable.

- **Grosor de pared, superior e inferior:** Es el espesor existente en el perímetro del sólido, en el plano XY paralelo a la superficie de impresión. CURA genera la trayectoria para que las superficies del modelo siempre se vean sólidas, un el grosor de pared determina esa anchura puesto que las piezas, generalmente, no son cien por cien sólidas. Este parámetro es un múltiplo entero del diámetro de la boquilla del extrusor. El grosor superior e inferior actúa de la misma forma, pero en las superficies paralelas a la base.

Por lo general, se va a utilizar un grosor de pared, superior o inferior de 0,8 mm, salvo en las piezas que requieran una mayor resistencia, las cuales tendrán 1,2 mm de grosor de pared.

- **Patrón y densidad de relleno:** para optimizar el gasto de material y disminuir los tiempos de impresión, en el volumen interior de las superficies del modelo se genera un patrón formado por líneas que se entrecruzan. Hay distintos tipos de patrones: triángulos, cuadrados, panal de abeja, cruz, concéntricos, etc.

Estos patrones aportan solidez a la pieza y su tamaño depende de la densidad que se introduzca. Esta densidad se puede variar desde el 0% (volumen vacío) hasta el 100% (pieza maciza). Para las piezas del proyecto se ha determinado utilizar un patrón triangular por ser el que mejores características mecánicas ofrece. En la figura 76 se observa cómo es el patrón, el cual queda oculto una vez terminada la pieza. Este parámetro oscilará entre el 30% y el 40% según las necesidades de cada pieza

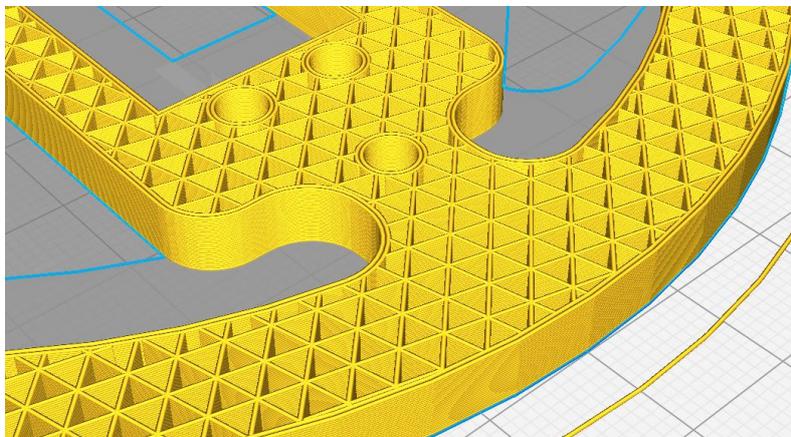


Figura 76 – Patrón de relleno triangular

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

- **Temperaturas:** según el material de aporte que se utilice se ha de configurar una temperatura para el extrusor y otra para base o cama caliente. Para imprimir en PLA, el rango de temperaturas suele oscilar entre 205 y 210 °C para conseguir un flujo óptimo por la boquilla y asegurarse un rápido enfriamiento.
- **Velocidades:** Cada zona de impresión tiene una velocidad, medida en mm/s, determinada. El relleno puede realizarse a una mayor velocidad al no necesitar un buen acabado. En cambio, el perímetro exterior exige velocidades más comedidas para que el resultado sea bueno visualmente. Cada impresora tiene un rango propio de velocidades.

En este caso las velocidades son: 50 mm/s para el relleno, 30 mm/s para el perímetro exterior y 120 mm/s para desplazamientos en vacío.

- **Velocidad del ventilador de capa:** Este ventilador situado cerca de la boquilla ayuda a refrigerar el material de aporte nada más salir del extrusor para conseguir una buena adhesión, precisión en las dimensiones y un buen acabado superficial. Se aplica un porcentaje para regular la velocidad y que enfríe en su justa medida, que se fija en un 50% de forma arbitraria basada en la experiencia del autor.
- **Soportes:** si fuera necesario, se pueden activar soportes para que las partes en voladizo del modelo tengan una base sobre la que depositar el material. Se debe intentar evitar en la medida de lo posible el uso de soportes porque aumenta el tiempo de proceso, desperdicia material y empeora la calidad superficial de dichas zonas, teniendo que realizar operaciones de extracción posteriores.

Hay que destacar que aplicando el principio de diseño para fabricación se ha tenido en cuenta esta característica y ninguna pieza del brazo robótico necesita soportes para su fabricación por impresión 3D.

2.4.3. Resultados

Para fabricar todas las piezas se ha utilizado una impresora 3D de la marca TEVO 3D Electronic Technology Co, concretamente el modelo Tarantula. Es una impresora 3D de las denominadas kit DIY, ya que el usuario es el encargado de ensamblarla e, incluso, de fabricar sus propias piezas de repuesto o mejora.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

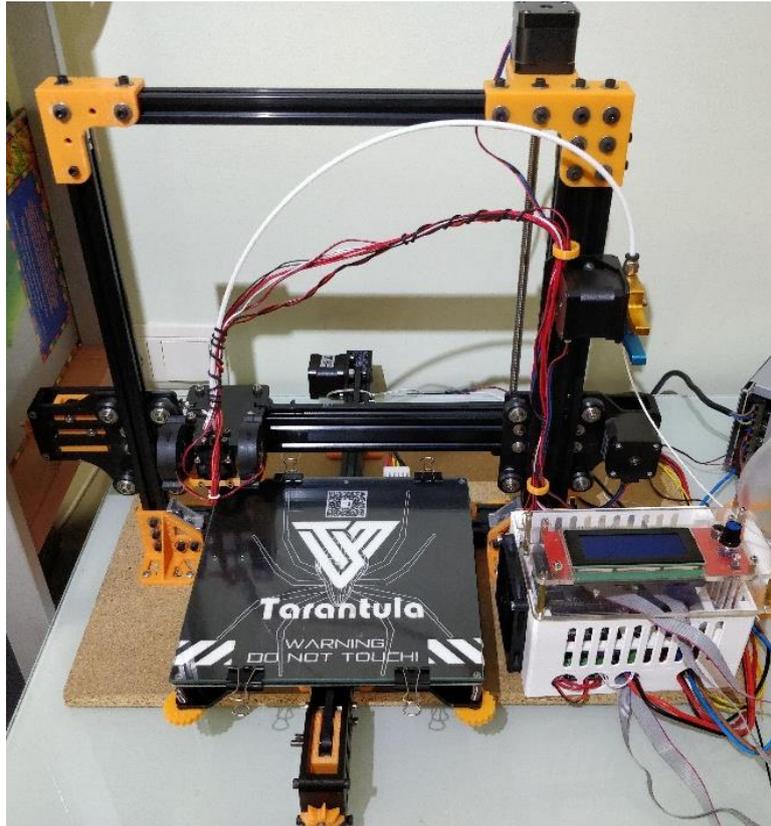


Figura 77 – Impresora 3D doméstica TEVO Tarantula

La impresora tiene las siguientes especificaciones técnicas:

- Tipología: Cartesiana.
- Resolución de impresión: hasta 50 micras.
- Volumen de impresión: 200x200x200 mm³.
- Precisión de posicionamiento: X = 0,012 mm, Y = 0,012 mm, Z = 0,04 mm.
- Velocidad máxima: 120 mm/s.
- Diámetro boquilla extrusor: 0,4 mm.
- Placa de control: MKS Gen.
- Firmware: Marlin 2.0.
- Temperaturas máximas: cama caliente = 90°C, extrusor = 260°C.
- Materiales: PLA, ABS, PETG.

Con todo ello, la tabla 4 muestra los parámetros de impresión utilizados para cada pieza o componente impreso, así como el material utilizado y el tiempo de proceso.

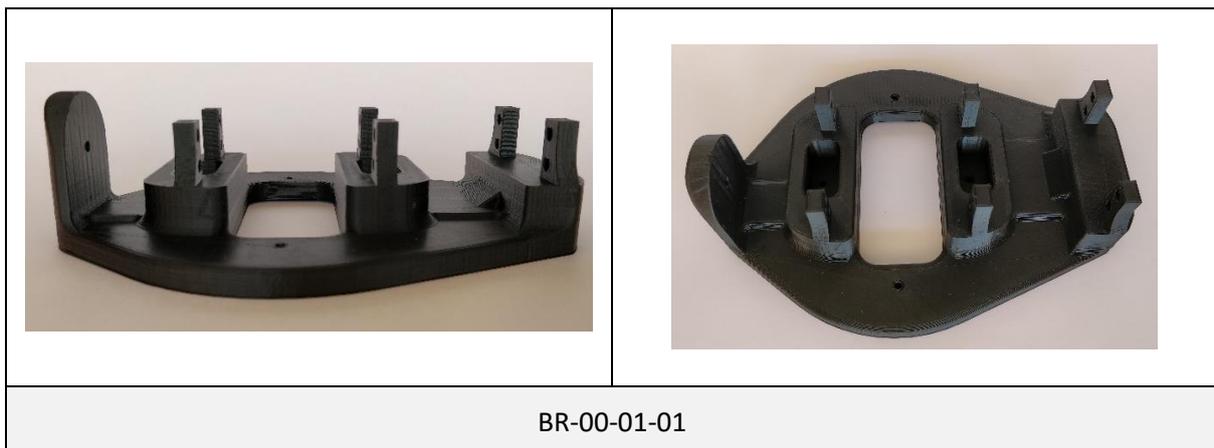
Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

CÓDIGO	Espesor ³ <i>mm</i>	Relleno %	Peso <i>g</i>	Tiempo <i>h</i>	Color
BR-00-01-01	0,8	30%	127	11:15:00	Negro
BR-00-01-02	0,8	30%	39	3:40:00	Negro
BR-00-02-01	0,8	30%	57	5:07:00	Negro
BR-00-02-02	0,8	30%	82	7:30:00	Negro
BR-01-01-01	1,2	40%	80	6:40:00	Naranja
BR-01-01-02	0,8	40%	62	5:34:00	Naranja
BR-02-01-01	0,8	40%	55	5:00:00	Naranja
BR-02-01-02	0,8	40%	47	4:15:00	Naranja
BR-02-02	0,8	40%	12	1:10:00	Blanco
BR-03-01	0,8	40%	10	0:55:00	Blanco
BR-03-02	0,8	40%	2	0:13:00	Blanco
BR-03-03	0,8	30%	10	1:00:00	Blanco
BR-03-04-01	0,8	40%	9	1:00:00	Blanco
BR-03-04-02	0,8	40%	14	1:20:00	Blanco
BR-04-01	0,8	40%	13	1:15:00	Blanco
BR-04-02	0,8	40%	13	1:15:00	Blanco
BR-04-03	1,2	40%	1	0:05:00	Blanco
BR-04-04	1,2	40%	1	0:05:00	Blanco

TOTAL	624	57:19:00
--------------	-----	----------

Tabla 4 – Registro de impresión

A continuación, se muestran los resultados de la impresión de cada pieza:



³ Puntualizar que en la tabla 4 el espesor hace referencia al grosor de pared.

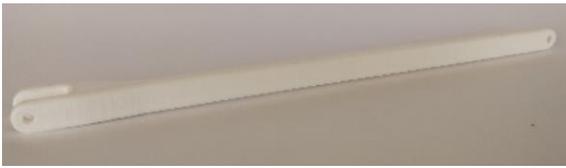
Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

	
BR-00-01-02	
	
BR-00-02-01	
	
BR-00-02-02	

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

	
BR-01-01-01	
	
BR-01-01-02	
	
BR-02-01-01	

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

	
BR-02-01-02	
	
BR-02-02	
	
BR-03-01	
	
BR-03-02	
	
BR-03-03	

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

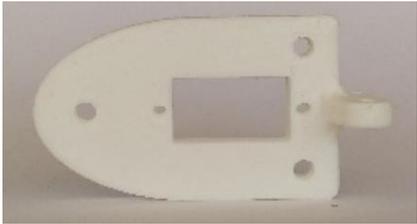
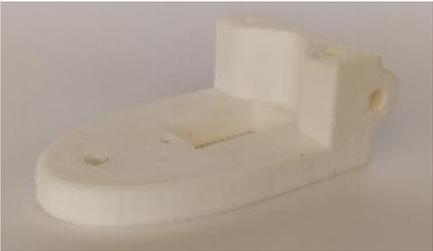
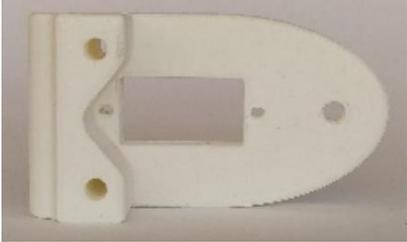
	
BR-03-04-01	
	
BR-03-04-02	
	
BR-04-01 y BR-04-02	
	
BR-04-03 y BR-04-04	

Tabla 5 – Resultados tras la impresión

2.5. PARTE ELÉCTRICA. ARDUINO

Tras haber diseñado y fabricado las piezas que componen el brazo robótico, es el momento de adentrarse en la parte eléctrica del proyecto, la encargada del movimiento y el control. Para ello se

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

van a describir los componentes que van a utilizarse, cómo van a estar conectados y tanto con la alimentación como con la placa Arduino y el código de control programado en Arduino IDE.

2.5.1. Componentes utilizados

Para funcionar, el brazo robótico necesita una serie de elementos eléctricos y electrónicos, que se enumeran a continuación:

2.5.1.1. Fuente de alimentación

Para que todo el sistema funcione se necesita de un elemento capaz de aportar la potencia necesaria. Para ello se va a utilizar una fuente de alimentación tipo ATX, más comúnmente conocidas como fuentes de alimentación de ordenador de sobremesa.



Figura 78 – Fuente de alimentación ATX

Estas fuentes de alimentación de corriente continua disponen de numerosas salidas en distintos niveles de voltaje. Para el correcto funcionamiento del brazo robótico tan solo se necesitan dos niveles de voltaje: 5 V para la placa Arduino y 12 V para los servomotores, aunque, como se verá más adelante, estos funcionan a 6 V por lo que hay que adecuar la tensión.

La fuente utilizada es de la marca FSP GROUP INC, capaz de entregar 300 W. Puede dar 16 A a 5 V y 21 A a 12 V, por lo que es más que suficiente.

La gran ventaja de este tipo de fuentes es que son de bajo coste y ofrecen mucha potencia para este tipo de proyectos.

2.5.1.2. Servomotores

Un servomotor se define como un sistema electromecánico que permite controlar la posición angular del eje. Está pensado para girar un determinado número de grados y después mantenerse en esa posición. Se caracterizan por un par de torsión elevado. En su interior se hayan los siguientes componentes, ubicados de la forma que indica la figura 79:

- Un motor DC: encargado de generar la rotación, gira de forma continua al aportar corriente.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

- Caja de engranajes reductora: para disminuir la velocidad de giro que aporta el motor DC y aumentar el par de torsión.
- Circuito de control: se encarga de posicionar correctamente el eje de salida del servomotor.

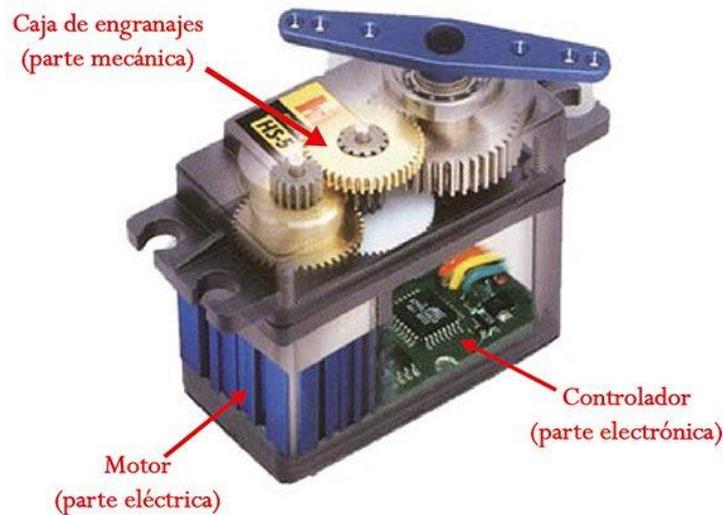


Figura 79 – Partes de un servomotor

Fuente: panamahitek.com

Los servomotores llevan tres cables de conexión. Dos de ellos son de alimentación, generalmente comprendida entre los 5 y los 6 voltios. El tercero es el de datos, el cual aporta la información al controlador que permite posicionar el servomotor según lo deseado.

Una particularidad de los servomotores es que el cable de datos debe estar conectado a un pin PWM (*Pulse Width Modulation* en sus siglas en inglés). La placa Arduino no tiene salidas analógicas y es por ello por lo que se utiliza la modulación por ancho de pulsos. Esta técnica consiste en modificar el ciclo de trabajo de una señal periódica para transmitir información, en este caso la posición angular que se desea que alcance el servomotor. En la figura 11 se muestra este concepto, donde según el ángulo que se desea, el ancho del pulso cambia

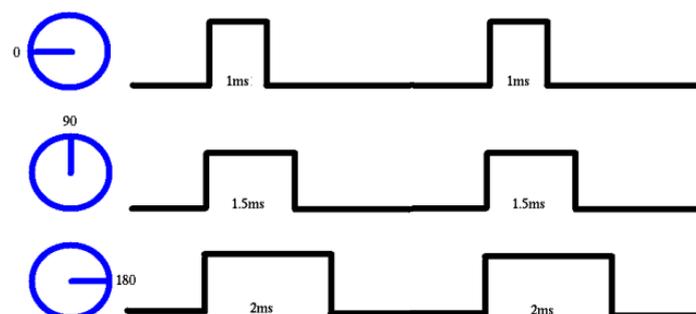


Figura 80 – Secuencia de pulsos PWM

Se utilizan dos tipos de servomotores según el par de torsión máximo que ofrecen. Por un lado, se usan 4 servomotores PDI-6221MG de la marca JX capaces de ejercer un par de 20,3 kg·cm a 6V, un rango de giro de 180° y 62 gramos de peso. Estos cuatro van ubicados en la base y son los servomotores M0, M1, M2 y M3, encargados del movimiento de los grupos 00, 01, 02 y 03 respectivamente.



Figura 81 – Servomotor JX PDI-6221MG

Por otro lado, se van a utilizar dos servomotores más pequeños denominados micro servos, de menor potencia, para el mecanismo de la pinza. La razón de utilizar servomotores menos potentes es que disminuyen el peso en la pinza, además que un exceso de par de torsión podría romper las piezas que se vayan a extraer de la impresora.

Así, se considera que, con la relación de transmisión de 4, es suficiente que el servo genere 2 kg·cm de par. Para ello se utilizan dos servomotores MG90s que alcanzan dicho par de torsión con 6V, pesan 13 gramos y tienen un rango de giro de 180°.



Figura 82 – Servomotor MG90s

Hay que recordar que el accionamiento de la pinza funciona de manera que se va cerrando hasta encontrar el objeto que debe ser desplazado y, al llegar a él, el movimiento cesa, pero no la fuerza con la que lo aprieta. El servomotor, al recibir la instrucción de cerrar la pinza, intentará llegar a la posición de cierre, aunque se detenga por el camino. Es por ello por lo que una excesiva fuerza puede dañar a las piezas.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

2.5.1.3. Convertidor Buck

Como se ha mencionado anteriormente con la fuente de alimentación, las salidas utilizadas para dar corriente a los servomotores son las de 12 V pese a que estos funcionan a 6V. Para cumplir con esto se debe intercalar entre ambos un convertidor Buck o convertidor de potencia DC.

Este dispositivo recibe una tensión de 12 V a la entrada y la adapta para obtener 6 V a la salida. Concretamente, se van a utilizar tres convertidores de tensión ajustable en un rango de entrada de 4 y 35 V y un rango de salida de 1,25 y 30 V como el que se observa en la figura.



Figura 83 – Convertidor Buck

La razón de utilizar 3 es porque la máxima corriente de salida es de 3^a, lo que puede ser insuficiente ante picos de consumo en momentos de necesidad de potencia para levantar objetos.

2.5.1.4. Cables y otros elementos auxiliares:

Para realizar las conexiones de todos los dispositivos se necesitan cables. Se van a utilizar cableado de dos tipos, diferenciando si son para alimentar los servomotores o si son para transmitir datos. Para el primer caso se utiliza cable 20AWG y para el segundo, cables cortos tipo jumper muy utilizados para Arduino.

Además, para realizar las conexiones entre cables se utilizan terminales de cable y regletas eléctricas.

2.5.2. **Esquema de conexiones**

A continuación, en la figura 84, se muestra el esquema de conexiones utilizado para alimentar a todos los elementos, así como las conexiones de los cables de datos que controlan los servomotores.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

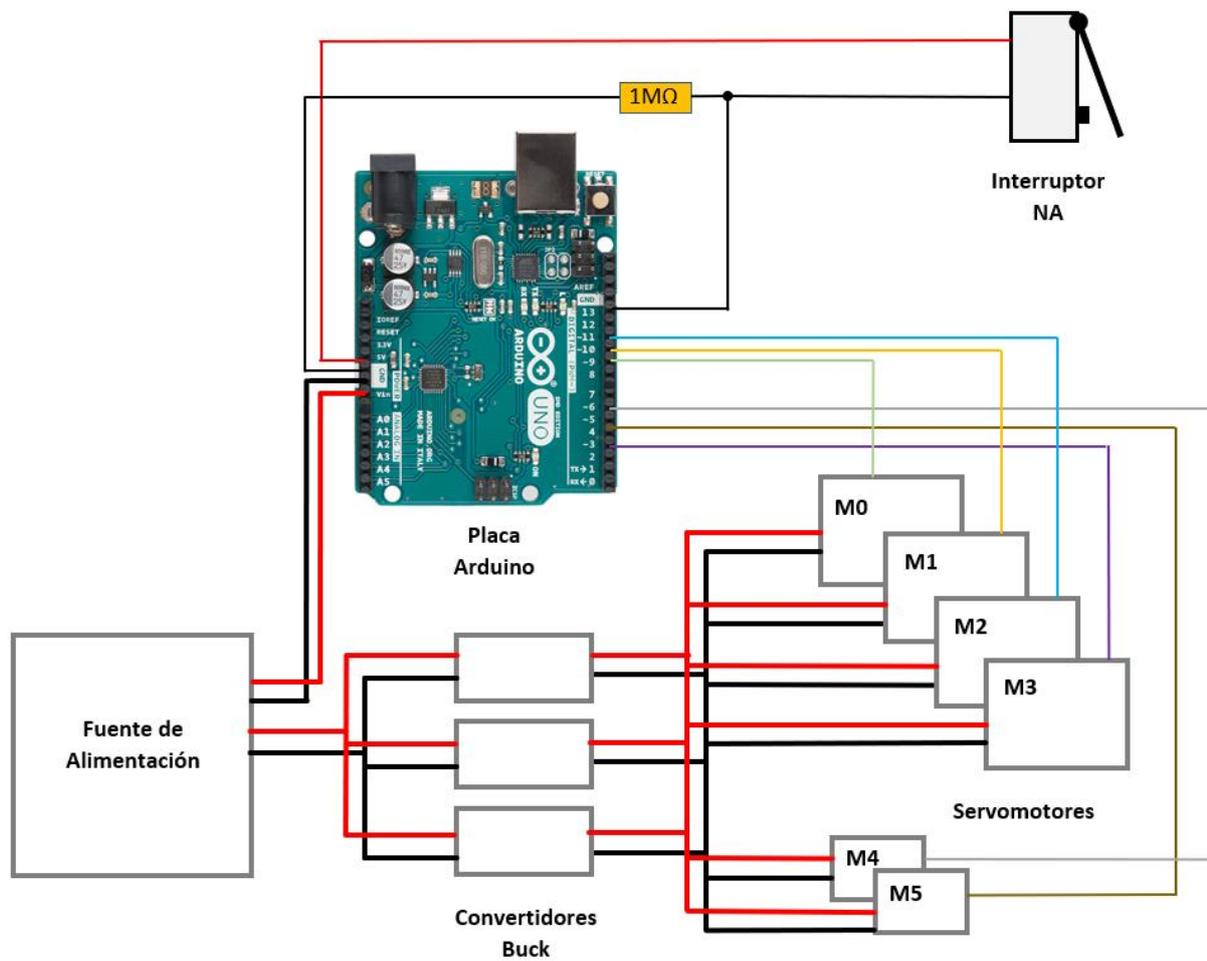


Figura 84 – Esquema de conexiones eléctricas

El interruptor normalmente abierto (NA) se utiliza como sensor de final de carrera y se instala en la impresora. Cuando termina una impresión, uno de los carros (puede ser tanto el del eje X del extrusor como el eje Y de la cama caliente) toca el interruptor y cierra el circuito como se muestra en la figura 85.

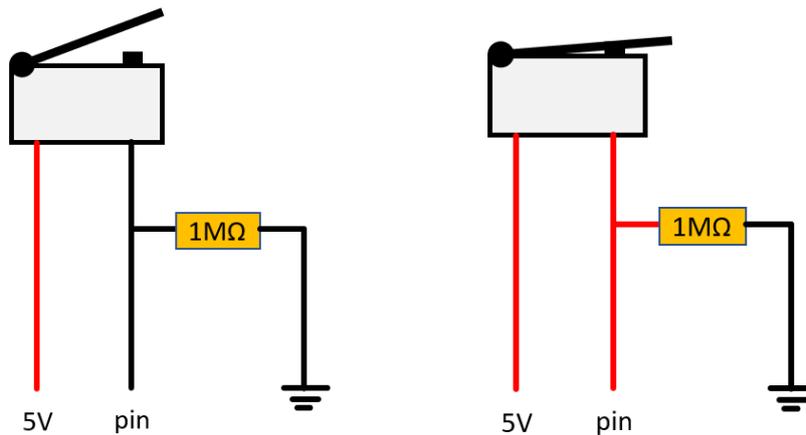


Figura 85 – Circuito interruptor abierto (izquierda) y cerrado (derecha)

Al leer una señal de 5 V por el pin digital de la placa de Arduino se pone en marcha la cuenta atrás para iniciar la secuencia del brazo robótico. La razón de poner una resistencia de 1 MΩ es para fijar la señal a masa. Una vez se cierra el circuito, la resistencia impide un cortocircuito y la intensidad que se deriva por el ramal es mínima.

2.5.3. Programación Arduino

Para crear el control del brazo robótico se utiliza Arduino IDE. Este programa, además de tener un editor de texto para poder introducir las instrucciones, tiene una serie de librerías. Estas librerías son una colección de funciones que están disponibles para incluir en un proyecto. En este caso, se va a utilizar la librería *Servo.h*, necesaria para el control de los servomotores.

En primer lugar, se crean los elementos tipo Servo y se especifican una serie de valores contenidos en vectores:

- pos_inicial: se introduce el valor de la posición inicial de cada uno de los servomotores, teniendo en cuenta que M4 y M5 deben moverse sincronizados tanto en módulo como en sentido. Su dimensión es de 5, uno por cada servomotor.
- M: número del servomotor que va a realizar un movimiento. La dimensión depende del número de rotaciones deseado.
- A: incremento angular para mover los servomotores en el orden especificado en *M*.

Tras esto se crean dos vectores en los que se almacenan la posición anterior (*pos_0*) y posterior (*pos_1*) a la acción de un servomotor. En el momento de poner el funcionamiento el prototipo, los valores de *pos_inicial* se introducen en *pos_0*.

Con tal de reducir el número de instrucciones, se ha definido una función (*accionar_M*) que será llamada cada vez que se necesite accionar un motor. Esta función se ha creado para regular la velocidad de los servomotores. Así, la función *accionar_M* diferencia el sentido de giro mediante una comparación de la posición inicial (*pos_0*) y final (*pos_1*). Con el uso de un bucle *for* se va

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

incrementando o disminuyendo en 1º la posición angular hasta alcanzar el objetivo fijado en *pos_1* con la posibilidad de variar el tiempo de la cadena.

Mas adelante se le asigna a cada servomotor un pin digital PWM y se comienza con la secuencia de instrucciones:

- Se recibe la señal de 5 V de que se ha cerrado el circuito del interruptor.
- Esperar 20 min hasta que se enfríe la cama caliente y la pieza sea fácilmente extraíble (también existe la posibilidad de añadir un sensor de temperatura).
- Realización de la secuencia introducida en los vectores M y A. Un bucle *for* extrae la información de forma secuencial de ambos vectores, los procesa y hace una llamada a la función *accionar_M* para realizar el movimiento. Tras esto, para llevar el control de la posición de cada servomotor, la información contenida en *pos_1* pasa a *pos_0*.
- Al terminar, le brazo robótico regresa a su posición inicial utilizando otro bucle *for* para llevar a cada servomotor al valor del vector *pos_inicial*. Luego la secuencia no vuelve a comenzar hasta que la cama caliente deja de toca el interruptor y vuelve a tocarlo.

A continuación, se muestra el código de control completo:

```
#include <Servo.h>           // Incluir la librería Servo

Servo M0;                   // Crear Servo llamado M0
Servo M1;                   // Crear Servo llamado M1
Servo M2;                   // Crear Servo llamado M2
Servo M3;                   // Crear Servo llamado M3
Servo M4;                   // Crear Servo llamado M4
Servo M5;                   // Crear Servo llamado M5

int i, m, p0, p1, interruptor=LOW;

int pos_inicial[5]={90, 0, 40, 155, 0};

int M[11]={ 0, 1, 2, 1, 3, 4, 3, 2, 0, 1, 2};
int A[11]={-38, 40, 40, 40, -20, 160, 20, -30, 50, 10, 60};
int n=11;

int pos_0[5]={pos_inicial[0], pos_inicial[1], pos_inicial[2], pos_inicial[3], pos_inicial[4]};
int pos_1[5];

// Funcion para mover los servomotores

void accionar_M (int M, int pos_0, int pos_1) {
```

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

```
int angulo;
if (pos_0<pos_1) {
  for(angulo=pos_0; angulo<=pos_1; angulo++) { //incrementa angulo 1 grado
    if (M==0){
      M0.write(angulo);}
    else if (M==1){
      M1.write(angulo);}
    else if (M==2){
      M2.write(angulo);}
    else if (M==3){
      M3.write(angulo);}
    else if (M==4){
      M4.write(angulo);
      M5.write(angulo);}
    delay(20); }}
else {
  for(angulo=pos_0; angulo>=pos_1; angulo--) { //disminuye angulo 1 grado
    if (M==0){
      M0.write(angulo);}
    else if (M==1){
      M1.write(angulo);}
    else if (M==2){
      M2.write(angulo);}
    else if (M==3){
      M3.write(angulo);}
    else if (M==4){
      M4.write(angulo);
      M5.write(angulo);}
    delay(20); }}}

void setup()
{
  pinMode(13, INPUT);    //Entrada interruptor NA

  M0.attach(9,500,2500) ; // Conectar servo M1 al pin 9
  M1.attach(10,500,2500) ; // Conectar servo M1 al pin 10
  M2.attach(11,500,2500) ; // Conectar servo M2 al pin 11
  M3.attach(3,500,2500) ; // Conectar servo M1 al pin 3
  M4.attach(6,500,2500) ; // Conectar servo M1 al pin 6
  M5.attach(5,500,2500) ; // Conectar servo M1 al pin 5
}
```

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

```
//Secuencia de movimientos del brazo robotico
```

```
void loop() {
```

```
  if(interruptor==LOW){
```

```
    while (interruptor==LOW) {  
      interruptor=DigitalRead(13);  
      delay(60000);} 
```

```
    delay(1200000);
```

```
// Poner en posicion inicial a los servomotores
```

```
  M0.write(pos_inicial[0]);  
  M1.write(pos_inicial[1]);  
  M2.write(pos_inicial[2]);  
  M3.write(pos_inicial[3]);  
  M4.write(pos_inicial[4]);  
  M5.write(pos_inicial[4]);
```

```
  delay(1000);
```

```
// Movimiento servomotores
```

```
  for (i=0; i<n; i++) {  
    m=M[i];  
    p0=pos_0[m];  
    p1=p0+A[i];  
    accionar_M (m, p0, p1);  
    pos_0[m]=p1;  
    delay(100); } 
```

```
  for (i=4; i>=0; i--) {  
    m=i;  
    p0=pos_0[m];  
    p1=pos_inicial[i];  
    accionar_M (m, p0, p1);  
    pos_0[m]=p1;
```

```
delay(100);}}
```

```
else {interruptor=DigitalRead(13);}
}
```

2.6. MONTAJE DE PIEZAS Y PARTE ELÉCTRICA

Una vez fabricadas las piezas y realizado el código en Arduino, es el momento de ensamblarlas y poner en funcionamiento al prototipo. Para ello, además de los componentes diseñados, el brazo robot necesita una serie de elementos de unión, ya sean uniones para fijar componentes en una sola pieza o pasadores para crear un par de revolución.

La secuencia seguida para realizar el montaje es de suma importancia, puesto que las piezas están diseñadas teniendo en cuenta el proceso de ensamblaje y ciertas piezas deben ser unidas antes que otras.

Antes de colocar los motores en sus respectivos lugares, se ha generado un código simple en Arduino para posicionarlos a 0°. Así, una vez puestos en su lugar se pueden acoplar los elementos que van unidos a ellos en el ángulo adecuado que se utiliza para la programación.

Los elementos de unión son tornillos, tuercas y arandelas, que se detallan en las siguientes tablas, divididas según el tipo de unión:

- Unión rígida: dos componentes se unen para formar una pieza o un motor se une con una pieza. Así estos dos elementos permanecen inmóviles entre sí.

Pieza	Comp. 1	Comp. 2	Tornillos			Arandelas		Tuercas	
			M	L	Nº	D int	Nº	M	Nº
BR-00-01	BR-00-01-01	BR-00-01-02	3	20	4	3	4	3	4
BR-00-02	BR-00-02-01	BR-00-02-02	4	16	4				
BR-01-01	BR-01-01-01	BR-01-01-02	3	16	4	3	8	3	4
BR-02-01	BR-02-01-01	BR-02-01-02	3	16	4	3	8	3	4
BR-03-04	BR-03-04-01	BR-03-04-02	4	40	2	4	4	4	2

Tabla 6 – Uniones rígidas componente-componente

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Motor	Pieza	Tornillos			Tuercas	
		M	L	Nº	M	Nº
M0	BR-00-02	4	16	4	4	4
M1	BR-00-01	4	12	4	4	4
M2	BR-00-01	4	12	4	4	4
M3	BR-00-01	4	12	4	4	4
M4	BR-03-04	2,5	8	2		
M5	BR-03-04	2,5	8	2		

Tabla 7 – Uniones rígidas motor-pieza

- Par de revolución: utilizando tornillos como pasadores entre varias piezas se consigue crear un par de revolución. Además, también se detalla la unión de motores a piezas.

Pieza 1	Pieza 2	Pieza 3	Tornillos			Arandelas		Tuercas	
			M	L	Nº	D int	Nº	M	Nº
BR-00-01	BR-01-01		4	30	1	4	2	4	1
BR-01-01	BR-02-01	BR-03-02	4	80	1	4	4	4	1
BR-02-01	BR-03-04		4	60	1	4	4	4	1
BR-04-01	BR-04-02	BR-03-04	4	40	1	4	8	4	1
BR-02-01	BR-02-02		3	20	1	3	2	3	1
BR-03-01	BR-03-02		3	16	1	3	2	3	1
BR-03-02	BR-03-03		3	16	1	3	2	3	1
BR-03-03	BR-03-04		3	16	1	3	2	3	1

Tabla 8 – Pares de revolución entre piezas

Motor	Pieza	Tornillos			Arandelas	
		M	L	Nº	D int	Nº
M0	BR-00-01	3	10	4	3	4
M1	BR-01-01	3	10	4	3	4
M2	BR-02-02	3	12	1	3	2
M3	BR-03-01	3	12	1	3	2
M4	BR-04-03	2,5	5	1		
M5	BR-04-04	2,5	5	1		

Tabla 9 – Pares de revolución entre motores y piezas

A continuación, se muestra una serie de imágenes del proceso de ensamblaje de los componentes y las piezas. En primer lugar, se enseña una vista de planta con todos los elementos necesarios para realizar el montaje del brazo robótico, donde se observan las piezas impresas, los servomotores, la tornillería y las esferas metálicas.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

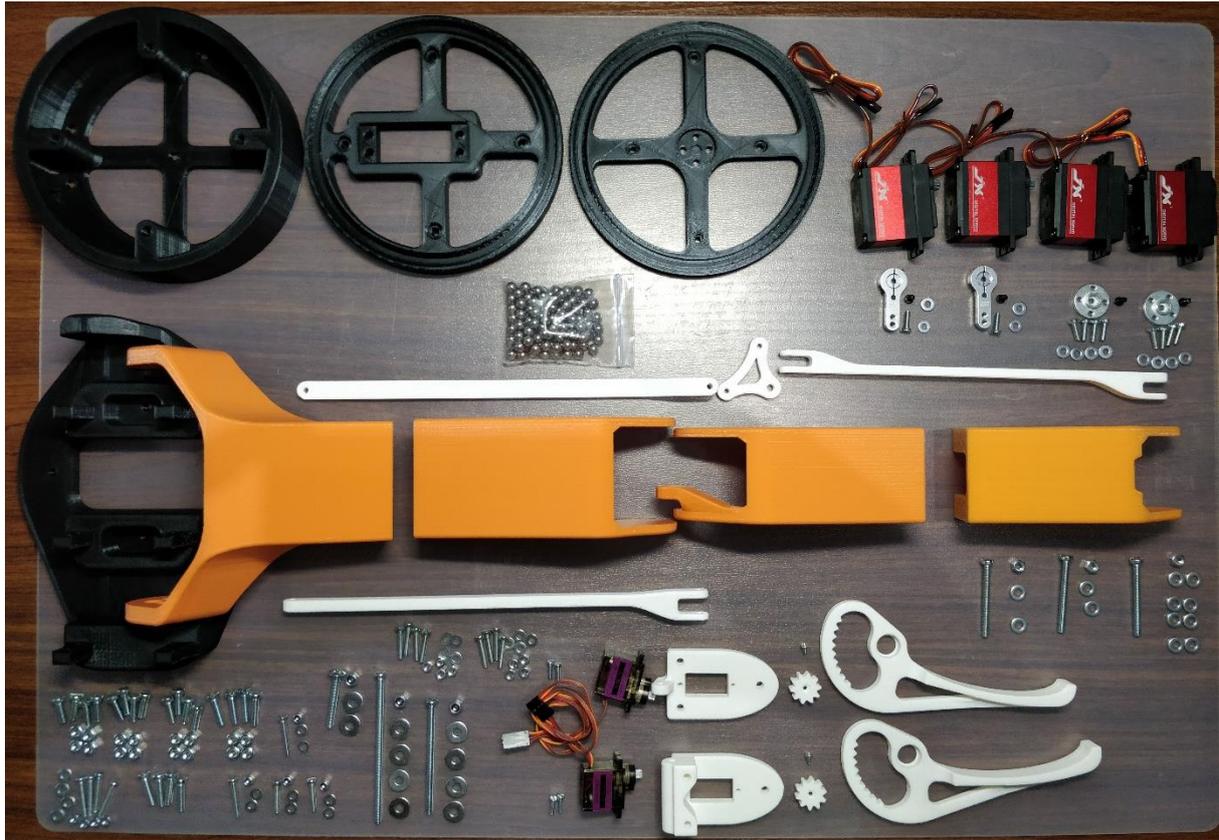


Figura 86 – Vista global de todos los elementos del montaje

Para realizar el ensamblaje, se necesitan las siguientes herramientas:

- Destornillador Philips.
- Llave de tubo de 5 mm y de 4 mm.

Se comienza el montaje por la base, el grupo 00. Lo primero es unir el motor M0 al componente BR-00-02-01 y después este al componente BR-00-02-02 para formar la pieza BR-00-02. Tras esto, se añaden un total de 120 esferas metálicas de 6 mm de diámetro para generar un rodamiento axial y que los esfuerzos del brazo robótico se transmitan correctamente a la superficie de apoyo.

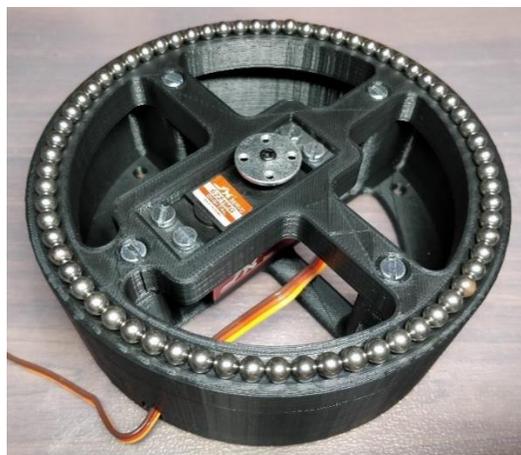


Figura 87 – Montaje BR-00-02 con esferas metálicas

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Para completar la base, se unen los componentes BR-00-01-01 y BR-00-01-02 para formar la pieza BR-00-01.



Figura 88 – Unión BR-00-01

Y las dos piezas de la base se unen utilizando el par de revolución con el servomotor M0. Los tornillos centrales ejercen presión para unir el conjunto, y gracias a las esferas metálicas puede rotar.



Figura 89 – BR-00

Para formar las piezas BR-01-01 y BR-02-01 se unen los componentes BR-01-01-01 con BR-01-01-02 y BR-02-01-01 con BR-02-01-02, respectivamente.



Figura 90 – BR-01-01

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

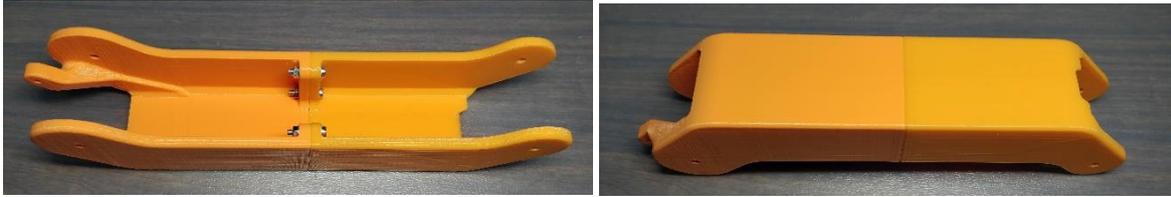


Figura 91 – BR-01-01

Con estos componentes ensamblados entre sí, se unen las piezas de los brazos y los motores M1, M2 y M3 a la base como muestra la siguiente figura

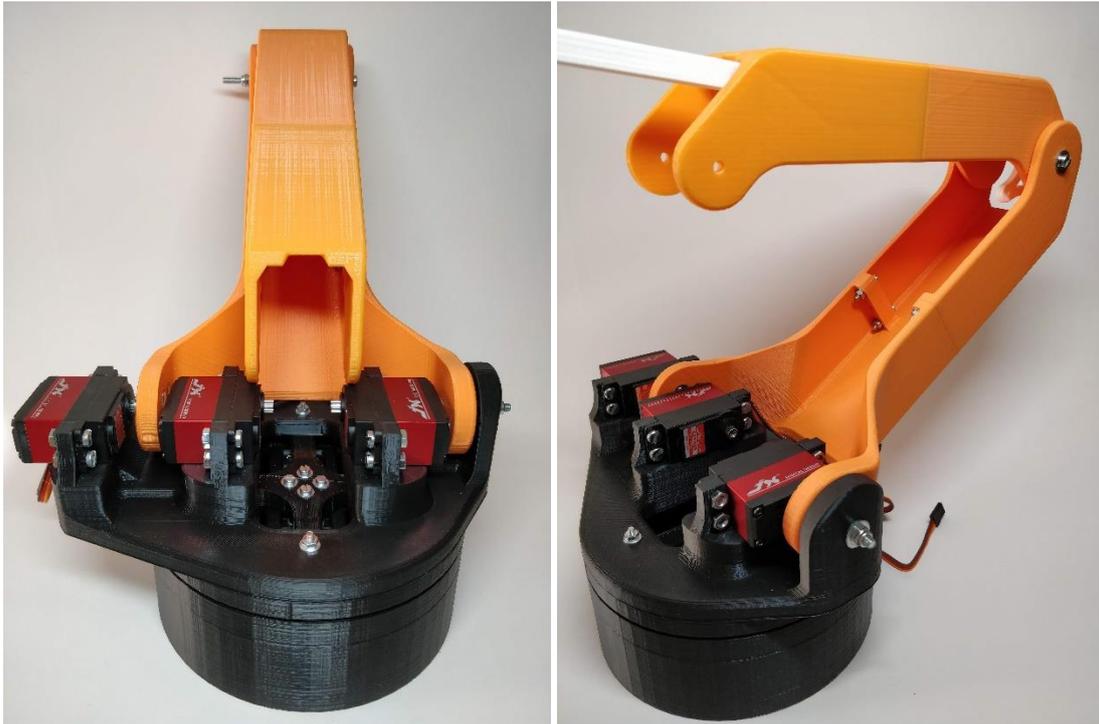


Figura 92 – Unión BR-00, BR-01-01, BR-02-01

Y de la misma forma, se unen las barras que transmiten el movimiento a los brazos impulsores de los motores por un extremo y a las piezas impulsadas por el otro.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

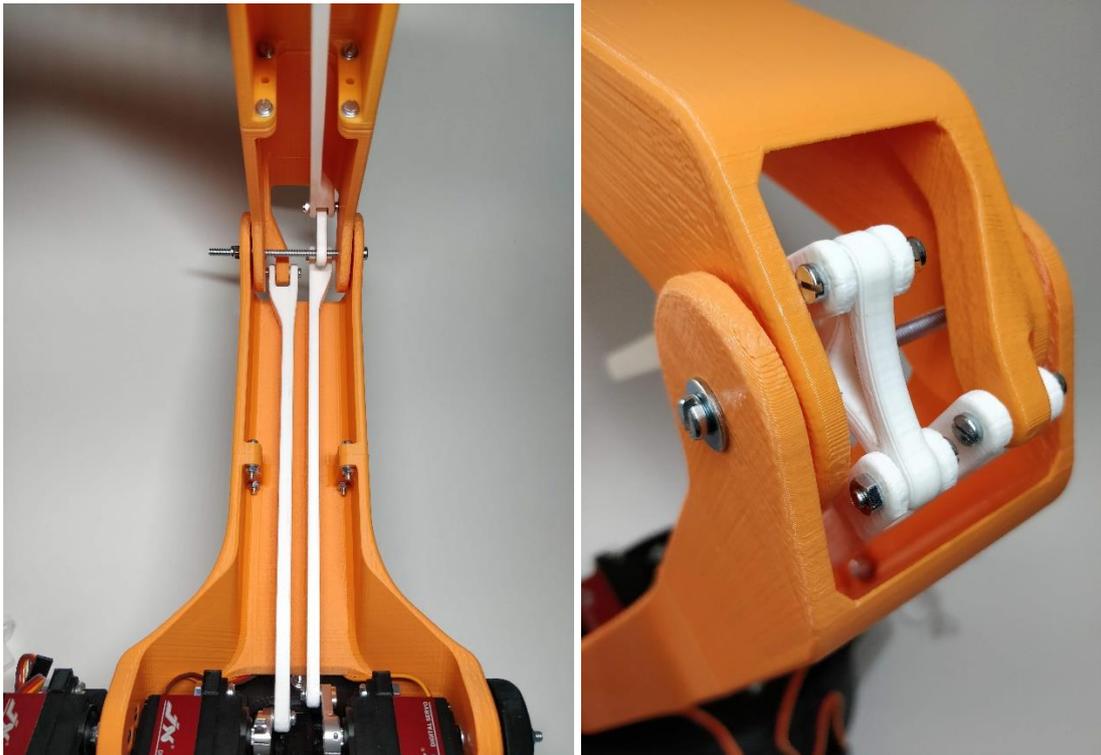


Figura 93 – Inserción de BR-02-02, BR-03-01, BR-03-02 y BR-03-03

Seguidamente se muestra cómo se han unido las piezas que conforman la pinza. Es importante seguir un orden específico. Primero se unen los servomotores a los componentes BR-03-04-01 y BR-03-04-02. En segundo lugar, se añaden los engranajes, las piezas BR-04-03 y BR-04-04, a los servomotores. Luego se ensamblan todos los elementos de la pinza, con sumo cuidado de ubicar en la posición correcta las piezas BR-04-01 y BR-04-02 para que engranen correctamente.

La unión del conjunto de la pinza se realiza mediante tornillos. En especial, el eje de rotación de la pinza atraviesa los dos rodamientos tipo 624ZZ encajados a presión en el hueco cilíndrico que existe en las piezas BR-04-01 y BR-04-02. Los rodamientos consiguen par de rotación suave para no generar rozamiento y por consiguiente una pérdida de potencia efectiva. Además, se puede apretar todo el conjunto para que no se mueva al levantar cargas.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

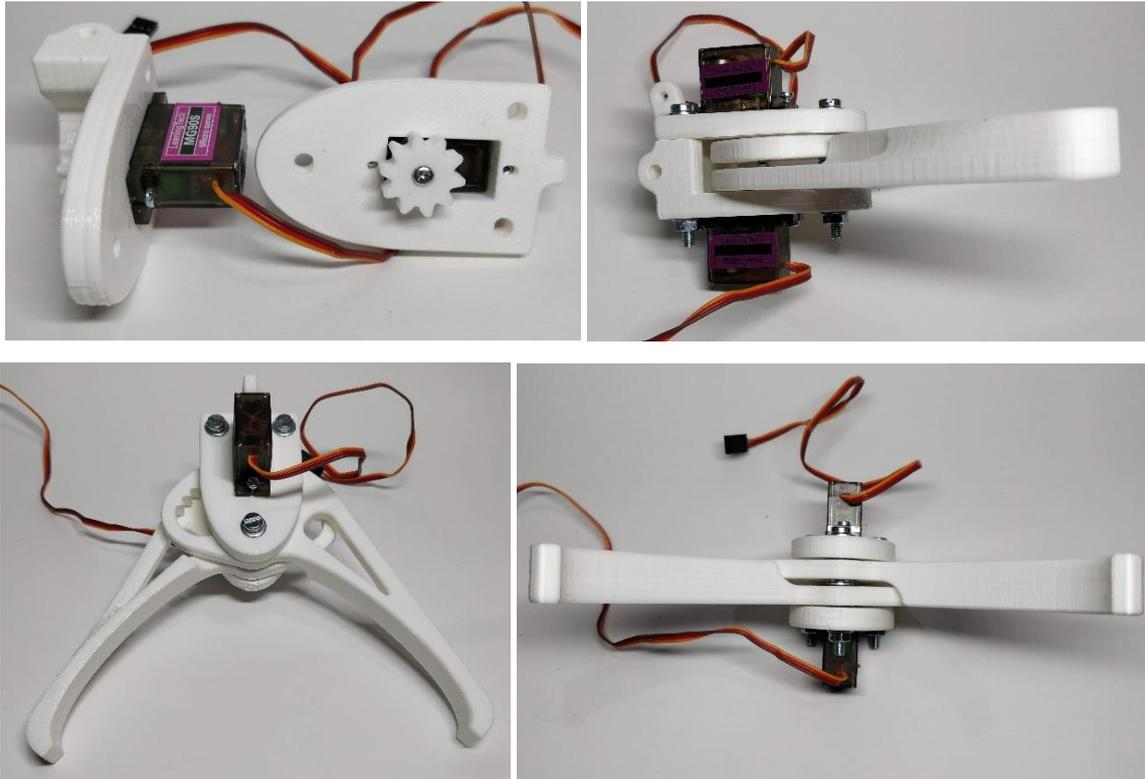


Figura 94 – Pinza ensamblada

Por último, se une el conjunto de la pinza al resto de brazo, conectando las piezas BR-02-01 y BR-03-03 a la pieza BR-03-04 dando por finalizado el ensamblaje de las piezas.

Luego se realizan las conexiones de los componentes eléctricos como se muestra en la figura 84, y que se observa en la figura 95.

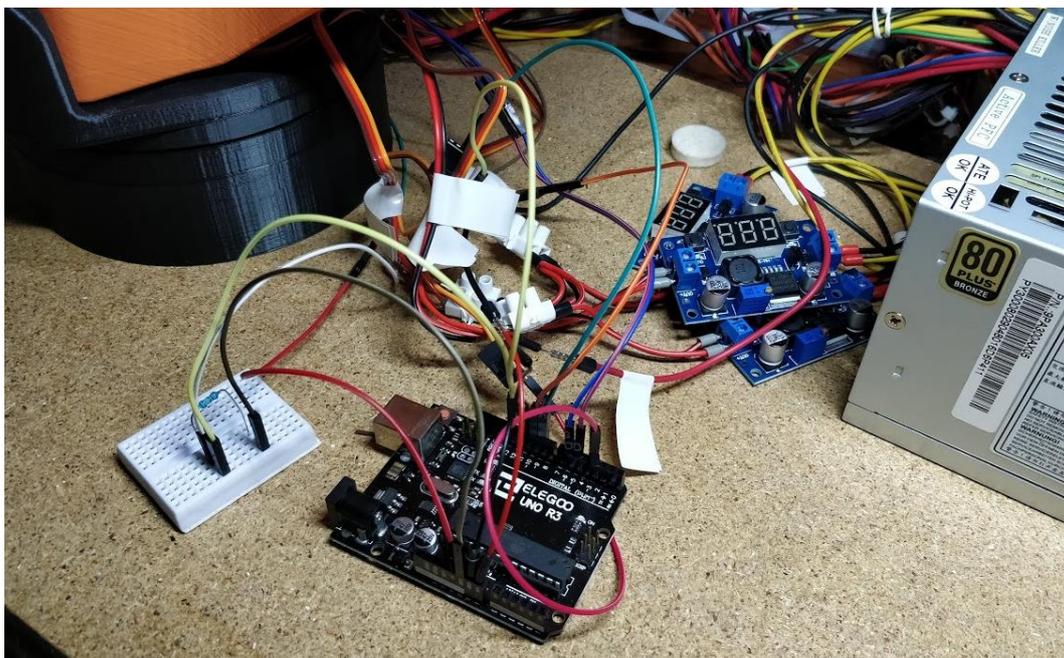


Figura 95 – Conexiones eléctricas

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Y el resultado final del proyecto se muestra en la figura 96, con el brazo robótico ubicado cerca de la impresora 3D.

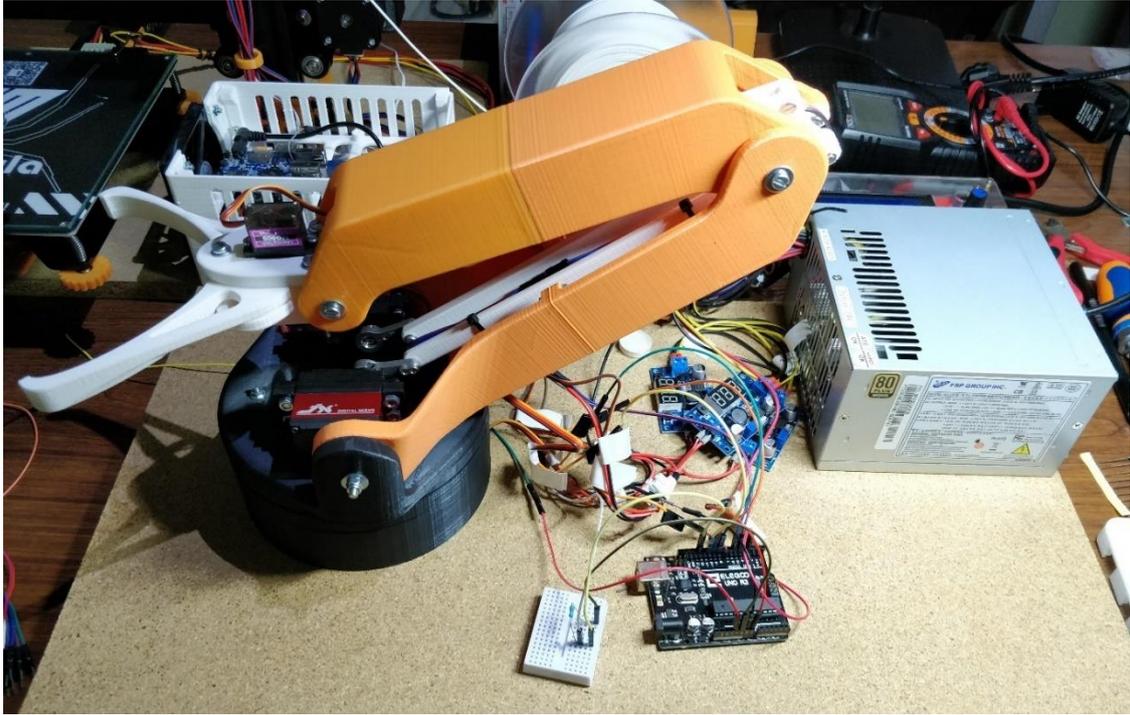


Figura 96 – Resultado final del proyecto

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

3. PRUEBAS Y CONCLUSIONES

Finalizadas las fases de diseño, impresión y montaje del brazo robótico se procede a validar el trabajo realizado con una secuencia de pruebas. Estas pruebas deben llevarse a cabo en un orden ascendente de complejidad y exigencia para, en caso de detectar algún fallo, poder corregirlo.

De esta forma se realizan 4 pruebas:

1. Movimiento de grupos: Se introduce un código simple en Arduino, el cual se utiliza para asegurar que todas las piezas móviles pueden moverse correctamente, así como confirmar que las posiciones iniciales configuradas en los servomotores son las correctas. Esta prueba de chequeo inicial es pasada sin ningún contratiempo, y se procede a utilizar el código real de control.
2. Movimiento en vacío: e introduce el código programado en el apartado 2.5.3 y se pone en marcha el brazo robótico sin tener la impresora 3D en funcionamiento y sin ningún objeto que poder coger con la pinza. Esta prueba sirve para validar la trayectoria creada y ver el comportamiento de las piezas ante las distintas posiciones que se suceden, prestando especial atención al cierre de la pinza.

Se observa que el posicionamiento es correcto en la mayoría de los servomotores, salvo en el M3 (control del ángulo de la pinza con el plano horizontal) que inclina demasiado al aproximarse a la cama caliente. Se procede a realizar un pequeño ajuste en el ángulo girado por dicho servomotor

3. Cargas de prueba: se realiza una modificación al código de control anterior (tan solo los valores de los vectores de introducción de datos M y A), el cual imita a la secuencia de imágenes mostrada durante en análisis previo, en las figuras 19, 20 y 21. Además del movimiento, esta vez se pone carga en la pinza. Concretamente se utiliza una botella de agua para variar el peso.

Se comienza por 0,1 Kg y se realiza la secuencia de movimientos. Se observa si los servomotores funcionan correctamente y si las piezas no se ven afectadas por grietas o deformaciones en alguna de sus partes. Si la prueba resulta exitosa se eleva el peso en la pinza en 0,1 kg. Los resultados obtenidos en la prueba se muestran en la tabla 10.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Carga	Servomotores	Integridad piezas	Resultado
0,1 kg	OK	OK	Satisfactorio
0,2 kg	OK	OK	Satisfactorio
0,3 kg	OK	OK	Satisfactorio
0,4 kg	OK	La pieza BR-01-01 flexa ligeramente en la base y recupera su forma al soltar la carga	Se establece en 0,4 el límite de peso que es capaz de levantar el brazo de forma segura

Tabla 10 – Pruebas de carga



Figura 97 – Prueba con carga 0,4 kg

4. Extracción de una pieza real: En último lugar se procede a comprobar si el brazo robótico es capaz de extraer una pieza acabada de fabricar en una impresora 3D. Se pone en marcha la impresora y el brazo robótico. Al terminar, la cama caliente toca el interruptor NA situado en el final de carrera y se pone en marcha la cuenta atrás de 20 minutos hasta que se enfría y la pieza es fácilmente extraíble.

Tras este tiempo se pone en funcionamiento, realiza correctamente las trayectorias programadas, coge el objeto, lo levanta y lo deposita a un lado para después regresar a la posición inicial.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D



Figura 98 – Extracción de una pieza real

Con esto se concluye que el prototipo del brazo robótico funciona tal y como se había diseñado y realiza correctamente la función de extraer piezas de impresoras 3D, siempre dentro de las especificaciones marcadas al inicio del desarrollo del prototipo.

Se han conseguido los objetivos marcados en un principio ya que se ha desarrollado el prototipo aplicando las técnicas de diseño para la fabricación y para el montaje. Además, el modelo creado contiene las líneas de diseño concebidas en los bocetos iniciales y en la geometría de las piezas. También se ha desarrollado con éxito la programación en Arduino y la integración de las piezas creadas con los elementos adquiridos de forma externa, con lo que se valida la correlación entre el modelo digital y el prototipo fabricado.

Siguiendo esta última idea del párrafo anterior, se ha de destacar la utilidad de los programas de diseño 3D para la consecución de este proyecto, así como en la mayoría de los proyectos de desarrollo de producto, ya que ofrecen la oportunidad de reducir los costes en la fase de diseño y de detectar errores antes de ser lanzados a fabricación.

Por otro lado, este proyecto de automatizar el proceso de extracción de piezas en impresoras 3D puede extenderse y ser mejorado en aspectos como el control o el diseño de la pinza para conseguir que sea más versátil y pueda ser de utilidad en un mayor número de ocasiones. También sería interesante la integración con sistemas de control de impresoras 3D como es el proyecto OctoPrint, un software *open-source* utilizado para monitorizar y controlar impresoras 3D través de una conexión a internet y cualquier dispositivo con acceso a este.

Por último, hay que destacar la versatilidad que puede ofrecer el prototipo para realizar otras tareas al margen de extraer piezas en impresoras 3D mediante la introducción de un programa de control diferente. Además, las piezas han sido modeladas de forma que sus dimensiones pueden ser

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

modificadas con facilidad, por lo que el diseño otorga adaptabilidad a las necesidades del usuario a un bajo coste, dado el método de fabricación utilizado.

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama <i>input/output</i> mecanismo	3
Figura 2 – Máquina estereolitográfica	4
Figura 3 – Máquina curado en base sólida.....	5
Figura 4 – Sinterizadora selectiva por láser.....	5
Figura 5 – Impresora 3D MDF.....	6
Figura 6 – Logotipo de SOLIDWORKS	7
Figura 7 – Logotipo de CURA.....	8
Figura 8 – Logotipo de Arduino IDE.....	8
Figura 9 – Placa Arduino UNO	9
Figura 10 – Esquema brazo. Vista lateral	12
Figura 11 – Esquema brazo. Vista superior	12
Figura 12 – Dimensiones de los objetos.....	13
Figura 13 – Barra-00	15
Figura 14 – Barra-[01, 03, 04, 05, 07, 09].....	15
Figura 15 – Barra-02	15
Figura 16 – Barra-06	16
Figura 17 – Barra-08	16
Figura 18 – Mecanismo de barras	17
Figura 19 – Movimiento del grupo 01	18
Figura 20 – Movimiento del grupo 02	18
Figura 21 – Movimiento del grupo 03	18
Figura 22 – Complemento SOLIDWORKS Motion	19
Figura 23 – Entorno gráfico SOLIDWORKS MOTION	19
Figura 24 – Ejemplo de motor rotatorio M1	20
Figura 25 – Fuerza Peso_pieza aplicada.....	20
Figura 26 – Trazado de resultados. Fuerza de torsión en Z de M1	21
Figura 27 – Posición más desfavorable mecanismo de barras.....	21
Figura 28 – Resultados análisis estático del mecanismo de barras	22

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Figura 29 – Posición inicial pinza	23
Figura 30 – Par M1	23
Figura 31 – Par M2	24
Figura 32 – Par M3	24
Figura 33 – Combinación de resultados	24
Figura 34 – Ejemplo de prototipo de brazo robótico fabricado con impresora 3D	25
Figura 35 – Boceto 1: perfil general	26
Figura 36 – Boceto 2: ubicación motores.....	27
Figura 37 – Coste comprometido vs. Ciclo de vida de un producto.....	28
Figura 38 – Relación entre Diseño, Fabricación y Ensamblaje	28
Figura 39 – BR-01-01-01.....	31
Figura 40 – BR-01-01-01.....	32
Figura 41 – BR-01-01-02.....	33
Figura 42 – BR-01-01	34
Figura 43 – BR-02-01-01.....	35
Figura 44 – BR-02-01-02.....	36
Figura 45 – BR-02-01	36
Figura 46 – BR-02-02	37
Figura 47 – BR-03-01	37
Figura 48 – BR-03-02	38
Figura 49 – BR-03-03	38
Figura 50 – BR-03-04-01.....	38
Figura 51 – BR-03-04-01.....	39
Figura 52 – BR-03-04-02.....	40
Figura 53 – BR-03-04	40
Figura 54 – BR-04-03	41
Figura 55 – BR-04-01	42
Figura 56 – Curvatura de la pinza. Curva de Bezier.....	42
Figura 57 – BR-04-01	43
Figura 58 – BR-00-01-01.....	44
Figura 59 – BR-00-01-01.....	44

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Figura 60 – BR-00-01-01.....	45
Figura 61 – BR-00-01-02.....	45
Figura 62 – BR-00-01-02.....	46
Figura 63 – BR-00-01.....	47
Figura 64 – BR-00-02-01.....	48
Figura 65 – BR-00-02-02.....	48
Figura 66 – BR-00-02-02.....	49
Figura 67 – Apertura para cableado en BR-00-02-02.....	49
Figura 68 – BR-00-02.....	50
Figura 69 – BR-E.....	51
Figura 70 – BR-E con transparencias activas.....	51
Figura 71 – Encaje de servomotores en la base.....	52
Figura 72 – Pinza completa.....	52
Figura 73 – Vista frontal pinza.....	53
Figura 74 – STL del componente BR-00-01-01.....	54
Figura 75 – Entorno gráfico CURA.....	55
Figura 76 – Patrón de relleno triangular.....	56
Figura 77 – Impresora 3D doméstica TEVO Tarantula.....	58
Figura 78 – Fuente de alimentación ATX.....	64
Figura 79 – Partes de un servomotor.....	65
Figura 80 – Secuencia de pulsos PWM.....	65
Figura 81 – Servomotor JX PDI-6221MG.....	66
Figura 82 – Servomotor MG90s.....	66
Figura 83 – Convertidor Buck.....	67
Figura 84 – Esquema de conexiones eléctricas.....	68
Figura 85 – Circuito interruptor abierto (izquierda) y cerrado (derecha).....	69
Figura 86 – Vista global de todos los elementos del montaje.....	75
Figura 87 – Montaje BR-00-02 con esferas metálicas.....	75
Figura 88 – Unión BR-00-01.....	76
Figura 89 – BR-00.....	76
Figura 90 – BR-01-01.....	76

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

Figura 91 – BR-01-01	77
Figura 92 – Unión BR-00, BR-01-01, BR-02-01	77
Figura 93 – Inserción de BR-02-02, BR-03-01, BR-03-02 y BR-03-03.....	78
Figura 94 – Pinza ensamblada	79
Figura 95 – Conexiones eléctricas	79
Figura 96 – Resultado final del proyecto.....	80
Figura 97 – Prueba con carga 0,4 kg.....	83
Figura 98 – Extracción de una pieza real.....	84

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 – Grupos de piezas.....	17
Tabla 2 – Secuencia de desplazamientos análisis dinámico.....	23
Tabla 3 – Grupos de piezas.....	30
Tabla 4 – Registro de impresión.....	59
Tabla 5 – Resultados tras la impresión.....	63
Tabla 6 – Uniones rígidas componente-componente.....	73
Tabla 7 – Uniones rígidas motor-pieza.....	74
Tabla 8 – Pares de revolución entre piezas.....	74
Tabla 9 – Pares de revolución entre motores y piezas.....	74
Tabla 10 – Pruebas de carga.....	83

BIBLIOGRAFÍA

Oliver, J. L. (2014). *Módulo 2 – Creación Virtual de Mecanismos Planos En Maquinas*. Universidad Politécnica de Valencia.

Contero González, M. R. (2018). *Apuntes de la asignatura Gestión de la Representación Digital del Producto*. Universidad Politécnica de Valencia.

Torres Carot, R. (2017). *Apuntes de la asignatura Integración del Diseño y la Fabricación*. Universidad Politécnica de Valencia.

Gutiérrez Rubert, S. C. (2018). *Apuntes de la asignatura Prototipado Rápido e Ingeniería Inversa*. Universidad Politécnica de Valencia.

Besa González, A. J. (2014). *Apuntes de la asignatura Teoría de Máquinas*. Universidad Politécnica de Valencia.

Banzi, M. y Shiloh, M (2016). *Introducción a Arduino*. ANAYA.

Prometec.net. (2018). *Tutoriales Arduino*. [online] Disponible en: <https://www.prometec.net/> [Consultado el 10 Jul. 2018].

Arduino.cc. (2018). *Arduino*. [online] Disponible en: <https://www.arduino.cc/> [Consultado el 12 Ag. 2018].

Impresoras3d.com. (2018). *Impresoras3D*. [online] Disponible en: <https://www.impresoras3d.com/> [Consultado el 30 Ag. 2018].

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

1. PRESUPUESTO

Capítulo	Código	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
1		Fabricación por impresión 3D			57,27 €
	1.1	Uds Amortización impresora	1	20,00 €	20,00 €
	1.2	h Tiempo de máquina	58	0,50 €	29,00 €
	1.3	Kg PLA BQ Easy Go naranja	0,244	14,07 €	3,43 €
	1.4	Kg PLA BQ Easy Go blanco	0,085	11,53 €	0,98 €
	1.5	Kg PLA Sunlu negro	0,305	12,64 €	3,85 €

Capítulo	Código	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
2		Componentes eléctricos			61,57 €
	2.1	Uds Placa Arduino Uno	1	6,60 €	6,60 €
	2.2	Uds Servomotor JX PDI-6221MG	4	7,44 €	29,75 €
	2.3	Uds Micro servo MG90s	2	3,72 €	7,43 €
	2.4	Uds Fuente FSP GROUP INC 300W	1	12,40 €	12,40 €
	2.5	Uds Convertidor Buck LM2596	3	1,17 €	3,52 €
	2.6	Uds Cable tipo jump	20	0,02 €	0,47 €
	2.7	m Cable 20AWG	1	0,54 €	0,54 €
	2.8	Uds Regleta 4 mm2	4	0,15 €	0,60 €
	2.9	Uds Terminal cable	20	0,01 €	0,21 €
	2.10	Uds Interruptor NA	1	0,05 €	0,05 €

Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino
para la extracción de piezas en impresoras 3D

Capítulo	Código	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
3		Uniones roscadas			4,12 €
	3.1	Uds M4 L80 mm + tuerca	1	0,22 €	0,22 €
	3.2	Uds M4 L60 mm + tuerca	1	0,13 €	0,13 €
	3.3	Uds M4 L40 mm + tuerca	3	0,11 €	0,33 €
	3.4	Uds M4 L30 mm + tuerca	1	0,10 €	0,10 €
	3.5	Uds M4 L16 mm + tuerca	8	0,07 €	0,54 €
	3.6	Uds M4 L12 mm + tuerca	12	0,05 €	0,63 €
	3.7	Uds M3 L20 mm + tuerca	5	0,04 €	0,22 €
	3.8	Uds M3 L16 mm + tuerca	11	0,04 €	0,48 €
	3.9	Uds M3 L12mm + tuerca	2	0,05 €	0,11 €
	3.10	Uds M3 L10 mm + tuerca	8	0,04 €	0,35 €
	3.11	Uds M2,5 L8 mm + tuerca	4	0,04 €	0,18 €
	3.12	Uds M2,5 L5 mm + tuerca	2	0,04 €	0,09 €
	3.12	Uds Arandela ø4	22	0,01 €	0,26 €
	3.13	Uds Arandela ø3	40	0,01 €	0,48 €

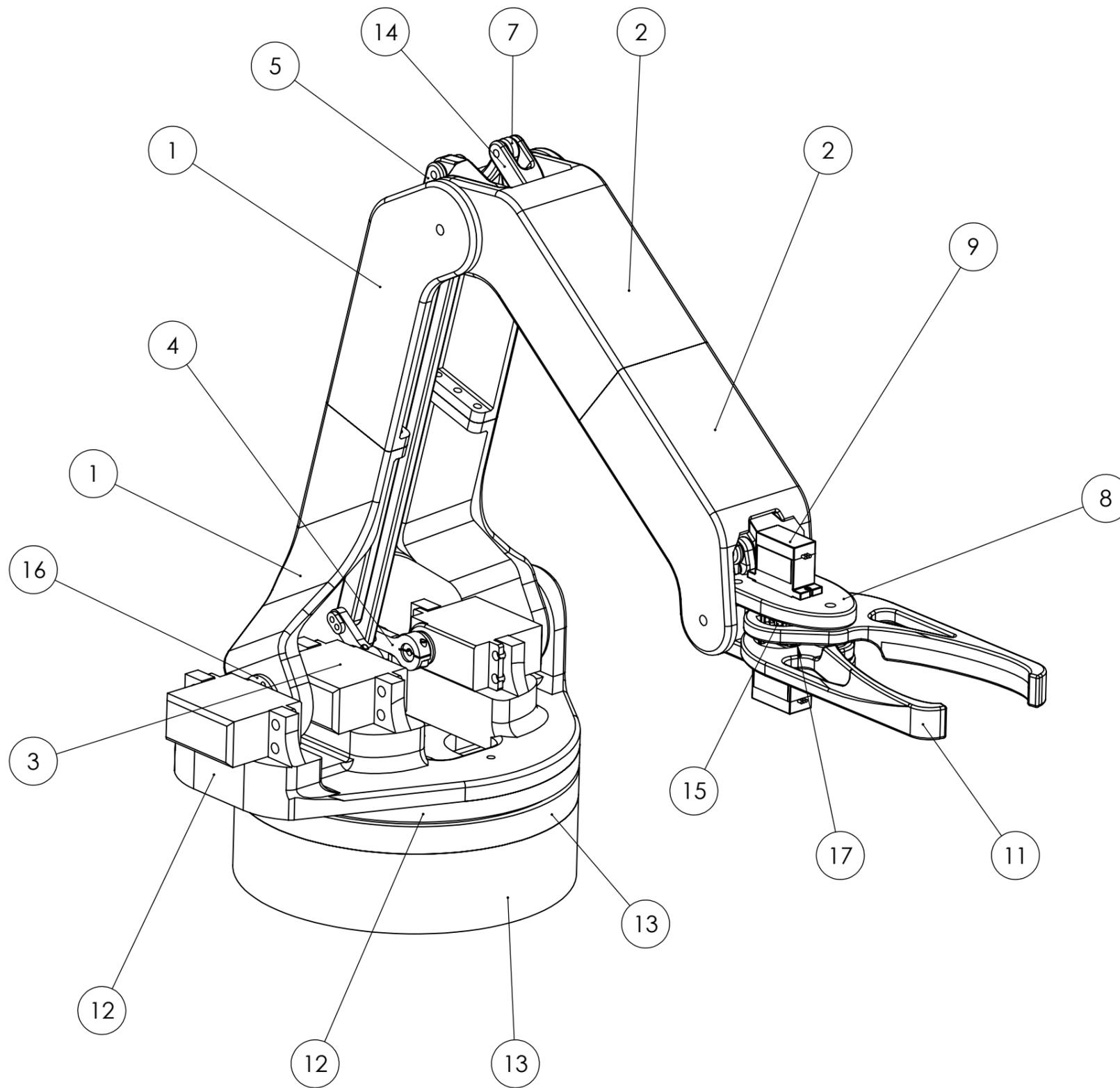
Capítulo	Código	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
4		Ingeniería			6.400,00 €
	4.1	h Mano de obra ingeniero	300	20,00 €	6.000,00 €
	4.2	Uds Amortización ordenador	1	100,00 €	100,00 €
	4.3	Uds Amort. licencia SOLIDWORKS 2017	1	300,00 €	300,00 €

	PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN		6.522,95 €
%	BENEFICIO	0,2	1.304,59 €
%	IVA	0,21	1.643,78 €
	TOTAL PRESUPUESTO		9.471,33 €

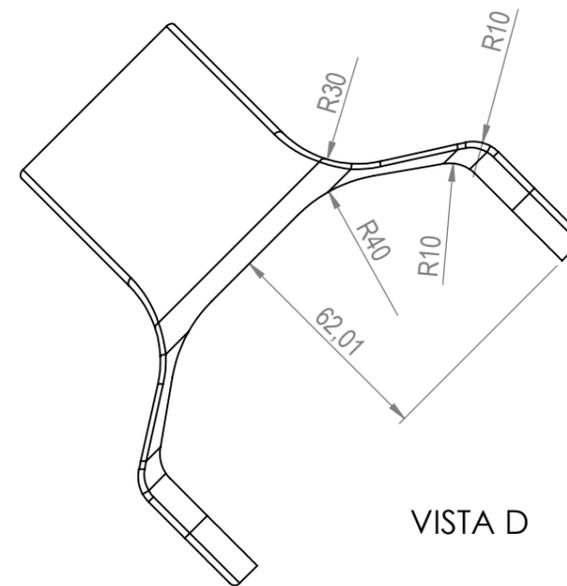
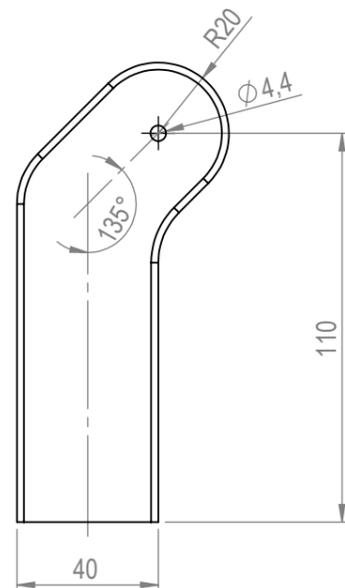
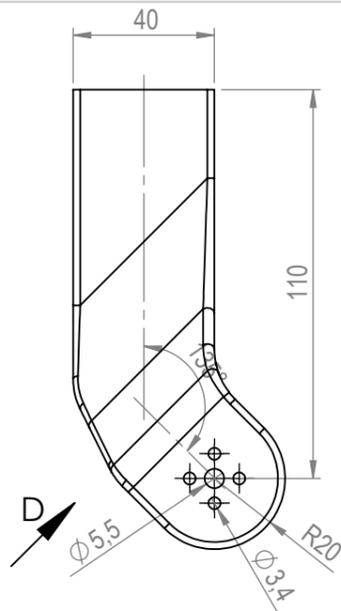
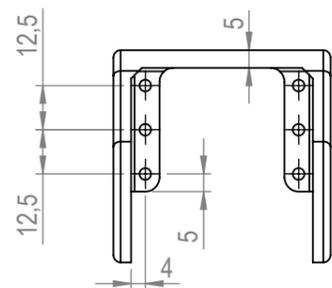
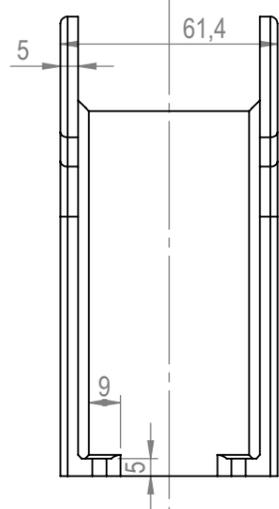
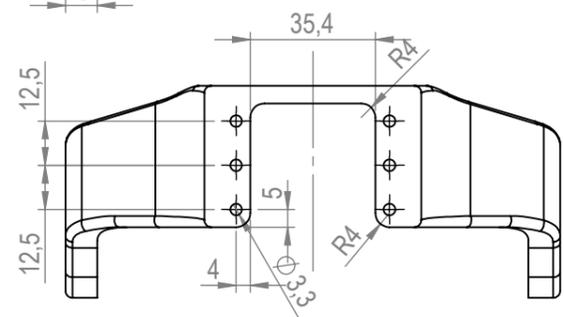
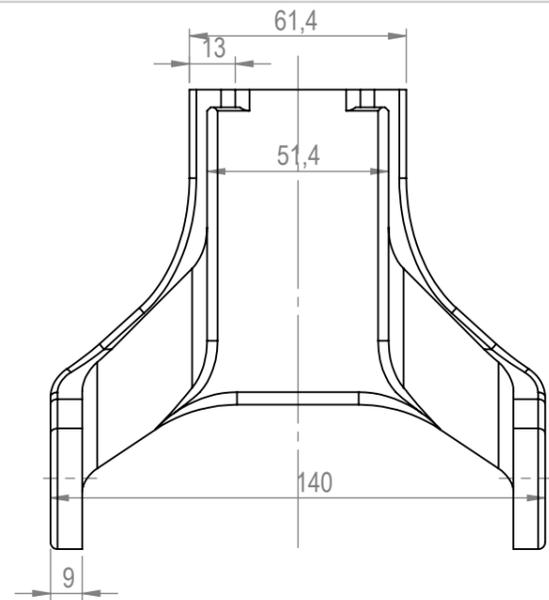
Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

PLANOS

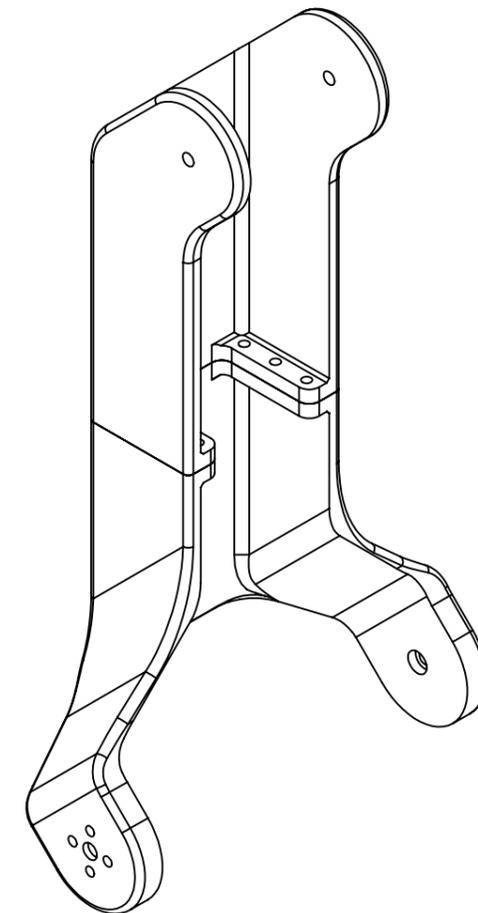
Diseño, desarrollo y fabricación del prototipo de un brazo robótico articulado controlado por Arduino para la extracción de piezas en impresoras 3D

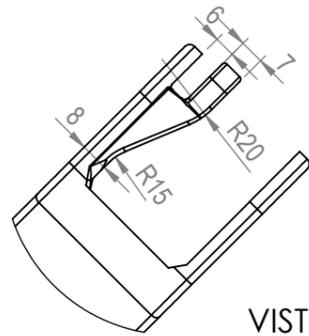
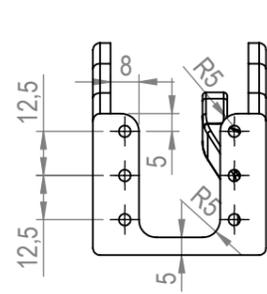


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	BR-01-01	BR-01-01-01y BR-01-01-02	1
2	BR-02-01	BR-02-01-01y BR-02-01-02	1
3	BR-S-JX		4
4	BR-S-1		2
5	BR-02-02		1
6	BR-03-01		1
7	BR-03-02		1
8	BR-03-04	BR-03-04-01y BR-03-04-02	1
9	BR-S-MG90s		2
10	BR-04-01		1
11	BR-04-02		1
12	BR-00-01	BR-00-01-01y BR-00-01-02	1
13	BR-00-02	BR-00-02-01y BR-00-02-02	1
14	BR-03-03		1
15	BR-04-03		1
16	BR-S-2		2
17	BR-04-04		1

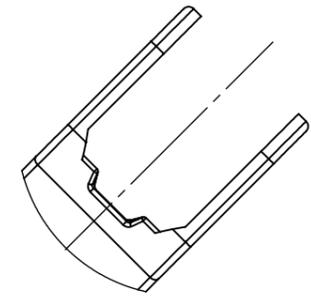
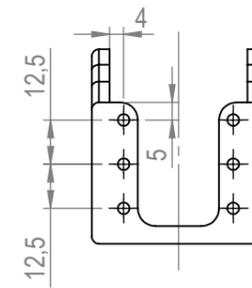


VISTA D

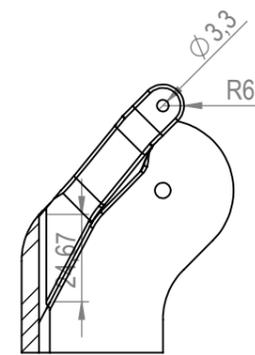
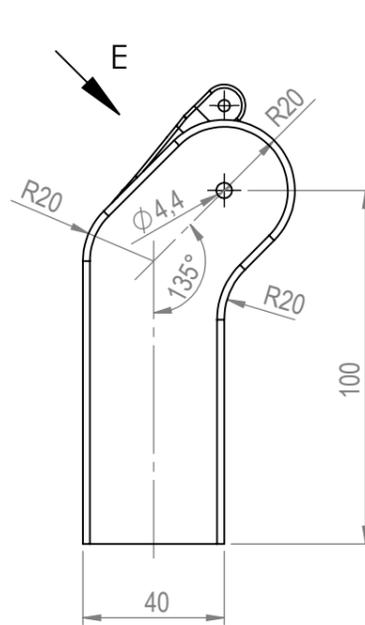
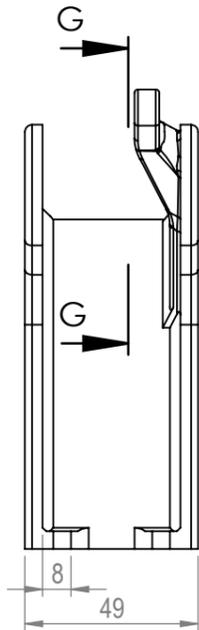




VISTA E



VISTA H



SECCIÓN G-G

