

**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO**

**MASTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**DESARROLLO DE UNA CÉLULA AUTOMATIZADA PARA LA  
FABRICACIÓN DE IMPLANTES DENTALES**

**JULIO 2021**

**Alumno: José Luis Viñas Salgado**

**Tutor: David Blanco Fernández**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a todos los profesores del Máster de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de Oviedo, de los que he aprendido sobre mecánica, electrónica, fabricación y software, y a cómo usarlo de forma conjunta, y en especial al coordinador del mismo y tutor de este Trabajo Fin de Máster, el profesor David Blanco.

A la dirección de la empresa Nueva Galimplant S.L.U., por confiar en mi para este proyecto y darme todas las facilidades del mundo para su realización, y a sus estupendos trabajadores, por crear el mejor ambiente de trabajo que pueda haber.

También a mi familia y a mi novia, gracias a quienes soy quien soy y hacia quienes solo puedo expresar mi más sincero agradecimiento por apoyarme durante esta etapa académica de Máster que hoy culmina.

## **RESUMEN**

El presente trabajo gira en torno a la fabricación de implantes dentales y aditamentos protésicos de manera automatizada. Primeramente, se desarrolla el proceso de mecanización de un tornillo protésico de titanio mediante un torno de control numérico o CNC. Posteriormente, se desarrolla de manera teórica una célula de fabricación completa que incluye la mecanización, manipulación, verificación y almacenaje de las piezas fabricadas. Finalmente se diseña, fabrica e implementa un prototipo del primer subsistema de la célula de fabricación automatizada, brazo robótico de tipo SCARA acoplado a la salida de las piezas del torno CNC que tiene como objetivo colocar las piezas ordenadas en los correspondientes alojamientos de una bandeja de plástico.

Palabras clave: Mecanizado, titanio, implantes, automatización, prototipado, brazo robótico.

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>II</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>3</b>
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>11</b>
<b>4. AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN</b> .....	<b>12</b>
4.1. MECANIZADO .....	12
4.2. MANIPULACIÓN.....	12
4.3. VERIFICACIÓN .....	13
<b>5. DESARROLLO DEL PROCESO DE MECANIZADO</b> .....	<b>14</b>
5.1. ANÁLISIS DE LA PIEZA A MECANIZAR .....	14
5.2. SELECCIÓN DEL TORNO .....	17
5.2.1. <i>Flexibilidad</i> .....	18
5.2.2. <i>Precisión</i> .....	18
5.2.3. <i>Velocidad y automatización</i> .....	18
5.2.4. <i>Alto volumen de producción</i> .....	19
5.2.5. <i>Material: titanio grado V</i> .....	22
5.2.6. <i>Limpieza</i> .....	23
5.2.7. <i>Búsqueda y selección</i> .....	23
5.3. MATERIAL DE PARTIDA .....	26
5.4. ESTRATEGIA DE MECANIZADO .....	27
5.5. PROGRAMACIÓN DEL TORNO CNC .....	29
5.5.1. <i>Funcionamiento del cabezal doble desde el punto de vista de la programación</i> .....	29
5.5.2. <i>Rutina de inicio</i> .....	30
5.5.3. <i>Planos de coordenadas</i> .....	31
5.6. PROBLEMAS INICIALES Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE MECANIZADO .....	32
5.7. DOCUMENTACIÓN ASOCIADA CON EL PROCESO DE MECANIZADO .....	34
5.7.1. <i>Plano de la pieza</i> .....	34
5.7.2. <i>Orden de fabricación</i> .....	34
5.7.3. <i>Pauta de control</i> .....	34
5.7.4. <i>Registro de mecanizado</i> .....	34
5.7.5. <i>Registro de herramientas</i> .....	35



5.8.	VERIFICACIÓN DE PIEZAS .....	35
<b>6.</b>	<b>MANIPULACIÓN: DESARROLLO DE PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO.....</b>	<b>38</b>
6.1.	NECESIDAD Y REQUERIMIENTOS .....	38
6.2.	ESTADO DEL ARTE .....	41
6.3.	DISEÑO CONCEPTUAL GENÉRICO DEL PROTOTIPO .....	45
6.4.	DISEÑO MECÁNICO CONCEPTUAL .....	46
6.5.	DISEÑO CONCEPTUAL DEL HARDWARE ELECTRÓNICO .....	52
6.6.	DISEÑO CONCEPTUAL DEL SOFTWARE .....	54
6.7.	SÍNTESIS DEL ROBOT SCARA .....	56
6.8.	MÉTODO DE FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN ANTERIOR AL DISEÑO .....	57
6.9.	DISEÑO MECÁNICO DE DETALLE.....	60
6.9.1.	<i>Colector.....</i>	<i>60</i>
6.9.2.	<i>Unión del perfil de aluminio al bastidor.....</i>	<i>64</i>
6.9.3.	<i>Base principal .....</i>	<i>67</i>
6.9.4.	<i>Tapa de la base principal .....</i>	<i>71</i>
6.9.5.	<i>Articulación hombro .....</i>	<i>76</i>
6.9.6.	<i>Articulación codo .....</i>	<i>79</i>
6.9.7.	<i>Unión del antebrazo al tubo de plástico.....</i>	<i>81</i>
6.9.8.	<i>Soporte de la bandeja.....</i>	<i>82</i>
6.9.9.	<i>Diseño mecánico final.....</i>	<i>84</i>
6.10.	DISEÑO DE DETALLE DEL HARDWARE ELECTRÓNICO .....	85
6.10.1.	<i>Teclado numérico .....</i>	<i>85</i>
6.10.2.	<i>Pantalla LCD .....</i>	<i>86</i>
6.10.3.	<i>Servos SG 90 .....</i>	<i>87</i>
6.10.4.	<i>Arduino .....</i>	<i>88</i>
6.10.5.	<i>Alimentación.....</i>	<i>90</i>
6.10.6.	<i>Diseño de la PCB de adaptación .....</i>	<i>91</i>
6.11.	DISEÑO DE DETALLE DEL SOFTWARE.....	94
6.12.	TEST Y VALIDACIONES .....	98
6.13.	FABRICACIÓN Y MONTAJE DEL PROTOTIPO.....	99
6.13.1.	<i>Tapa principal .....</i>	<i>100</i>
6.13.2.	<i>Base principal .....</i>	<i>101</i>
6.13.3.	<i>Soldadura PCB adaptación .....</i>	<i>103</i>
6.13.4.	<i>Cableado del sistema de alimentación .....</i>	<i>105</i>
6.13.5.	<i>Ensamblado entre la tapa superior y la base principal.....</i>	<i>107</i>
6.13.6.	<i>Montaje del hombro y brazo .....</i>	<i>108</i>
6.13.7.	<i>Montaje del codo y antebrazo.....</i>	<i>110</i>

---

6.13.8.	Otros componentes.....	112
6.14.	INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO.....	113
6.14.1.	Instalación en el perfil de aluminio.....	113
6.14.2.	Instalación en el torno.....	114
<b>7.</b>	<b>DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>115</b>
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>117</b>
<b>9.</b>	<b>DEFINICIONES.....</b>	<b>119</b>
<b>10.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>121</b>
<b>11.</b>	<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>123</b>
<b>12.</b>	<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>127</b>
	<b>ANEXO I: PLANIFICACIÓN .....</b>	<b>128</b>
	<b>ANEXO II: PRESUPUESTO.....</b>	<b>129</b>
A.	COSTE LABORAL.....	129
B.	AMORTIZACIÓN DEL EQUIPO INFORMÁTICO Y OTRAS HERRAMIENTAS .....	130
C.	USO DE SOFTWARE .....	130
D.	COSTE DE LOS EJES MECANIZADOS .....	130
E.	COSTE IMPRESIÓN 3D .....	131
F.	COMPONENTES DEL PROTOTIPO .....	131
G.	COSTE TOTAL DEL PROTOTIPO .....	132
	<b>ANEXO III: PLANOS.....</b>	<b>134</b>

# 1. INTRODUCCIÓN

Los dientes han sido durante toda la historia órganos indispensables para el desarrollo de la humanidad. Desde triturar los alimentos y favorecer la digestión, hasta permitir una correcta fonación, además de tener un papel social muy importante, ya que permiten una expresión armoniosa de la cara. Por esta razón, desde los inicios de la historia de la humanidad se tenía preocupación de sustituir los dientes perdidos por algún tipo de material [1]. Es así como a finales del siglo pasado surgió lo que hoy en día se conoce por implantología dental. La implantología dental es una de las parcelas de la odontología que ha experimentado un mayor avance científico en los últimos años. Es un campo en continuo crecimiento y cambio que genera en España y en todo el mundo mucho dinero, y en el que se ven involucradas ramas del conocimiento a priori tan dispares como la biología, bioquímica, anatomía, diseño, mecánica estructural, impresión 3D y fresado/mecanizado, entre otras. España es uno de los países de Europa donde más implantes dentales se colocan. Dos de cada diez personas de entre 25 y 79 años afirma tener colocado un implante dental. Se estima que en nuestro país se colocan entre 1.200.000 y 1.400.000 de implantes al año, y se prevé que esta cifra siga aumentando, a medida que los avances en este sector continúen y sigan provocando el abaratamiento y la fiabilidad de esta técnica de rehabilitación [2].

Nueva Galimplant S.L.U., en adelante Galimplant, es una empresa localizada en Sarria, en la provincia de Lugo, que lleva más de diez años dedicándose al diseño, fabricación y comercialización de implantes dentales, aditamentos protésicos y material quirúrgico. En los últimos años, Galimplant ha buscado internalizar aquellos procesos subcontratados a empresas externas, intervinientes en el desarrollo de los productos que fabrica y comercializa, siendo el mecanizado de las piezas uno de ellos. Este proceso de internalización, progresiva, conlleva una inversión de capital considerable, pero a cambio aporta muchas ventajas, como el mayor control de su *know-how*, mayor capacidad de innovación, además de ventajas económicas una vez la inversión está amortizada.

El objetivo de este trabajo es sentar las bases del desarrollo de una célula completa y automatizada de mecanizado de piezas dentales de titanio, en el que el proceso de mecanizado en sí, la manipulación de las piezas, y el proceso de verificación, estén dotados de un alto grado de automatización y autosuficiencia, que permita aprovechar al máximo los recursos humanos y materiales de la empresa. Se

---

pretende desarrollar una célula de fabricación que la empresa Galimplant pueda incluir dentro de su flujo de trabajo. En el presente trabajo se ha buscado el compromiso entre las necesidades de la empresa, en cuanto a estrategia de internalización e inversión económica, y la manera óptima de llevar a cabo el proceso desde el punto de vista ingenieril.

El trabajo se divide en dos partes. La primera parte tiene como objetivo el desarrollo del proceso de mecanizado. Se debe seleccionar una pieza de todas las que la empresa comercializa, y llevar a cabo el desarrollo e implementación del mecanizado de esta. Se comienza por una pieza de geometría sencilla y con un volumen de fabricación elevado. Se debe seleccionar y adquirir el torno donde se mecanizarán, así como todas las herramientas intervinientes en el proceso. Se deberá definir la estrategia de mecanizado a seguir y desarrollar la programación de la máquina. Finalmente se deberá optimizar el proceso, detectando posibles puntos débiles y mejorándolos.

La segunda tiene como objetivo desarrollar la manipulación de las piezas una vez estas son mecanizadas. Las piezas deberán ser capaces de extraerse del torno de manera automática y de colocarse en las correspondientes bandejas de plástico, en el orden en el que han salido del torno, y llegar al área de verificación. El desarrollo se deberá realizar para un solo torno, pero deberá ser escalable para múltiples máquinas, siendo el área de verificación una zona común.

En esta segunda parte se tiene como objetivo desarrollar un prototipo mecatrónico de un sistema que extraiga las piezas del torno y que las coloque en las bandejas de manera autónoma. Será un sistema de tipo brazo robótico que posicione las piezas mecanizadas en los correspondientes alojamientos de las correspondientes bandejas. Esta colocación de piezas será el primer paso del proceso de manipulación de las piezas, de tal forma que el brazo robótico deberá estar diseñado de manera que sea capaz de colocar las piezas donde y como se pretenda. Deberá funcionar de forma autónoma y estar completamente integrado en el torno.

## 2. ESTADO DEL ARTE

Se denominan implantes dentarios a los elementos aloplásticos (sustancias inertes, extrañas al organismo humano) que se alojan en el tejido óseo o por debajo del periostio, y que tienen como objetivo sustituir las raíces dentarias y servir de soporte para la posterior colocación de la prótesis [3]. Generalmente se le llama implante a la pieza metálica integrada en el interior del hueso y a la cuál este se debe adherir, mientras que se le llama aditamentos, del inglés *abutment*, al resto de componentes metálicos que conforman la estructura que soportará la corona y que unirán la misma al implante. Al conjunto de aditamentos y corona se le llama prótesis, la cuál se diseña y fabrica en un laboratorio dental.

El material más empleado en el campo de la implantología dental es el titanio. A partir de los años 80 empiezan a aparecer los primeros implantes modernos con un diseño cilíndrico semejante a la raíz de un diente natural. Posteriormente, los estudios sobre el principio de integración ósea llevados a cabo por Branemark, un cirujano ortopédico sueco, evidenciaron la capacidad del titanio por unirse al tejido óseo. Hoy en día hay una inclinación hacia los materiales que reducen el tiempo de osteointegración gracias a superficies más activas [4]. Otra de las ventajas que presenta el titanio frente a otros materiales es su alta resistencia mecánica a la fatiga, necesaria para soportar las cargas cíclicas provocadas en la masticación.

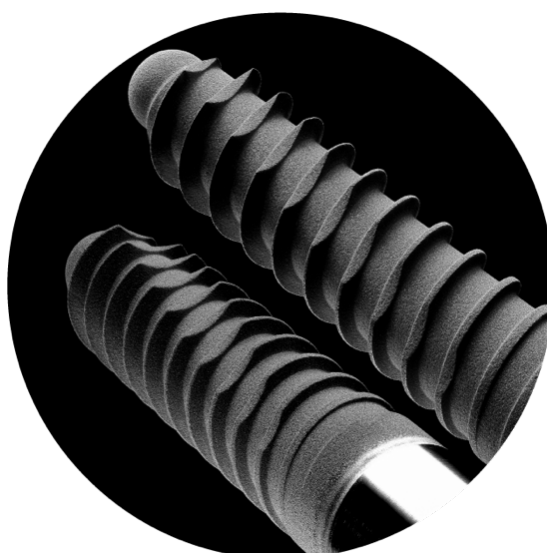


Figura 1. Implantes Galimplant

Que un implante fracase o permanezca en la boca del paciente por muchos años depende de muchos factores. Por un lado, depende de causas circunstanciales como la cantidad y calidad del hueso de la persona, sus hábitos de higiene, del profesional que lleve a cabo la rehabilitación, y de la técnica que utilice. Por otro, lado depende en gran medida del diseño tanto del implante como de los aditamentos y de la calidad y método con el que estos hayan sido fabricados. La fabricación de estas piezas es laboriosa y ha requerido de muchos años de estudio e investigación para dar con la mejor combinación de diseño, composición química del material, método de tratamiento superficial, rugosidad, y manera de llevar a cabo el proceso completo. El diseño y la fabricación de estos componentes se encuentra en continua mejora, apareciendo nuevos sistemas, técnicas y avances en general cada año, siendo este un proceso muy dilatado en el tiempo en el que desde que se diseña y fabrica algo nuevo hasta que se conocen sus resultados, han de pasar muchos años de por medio.

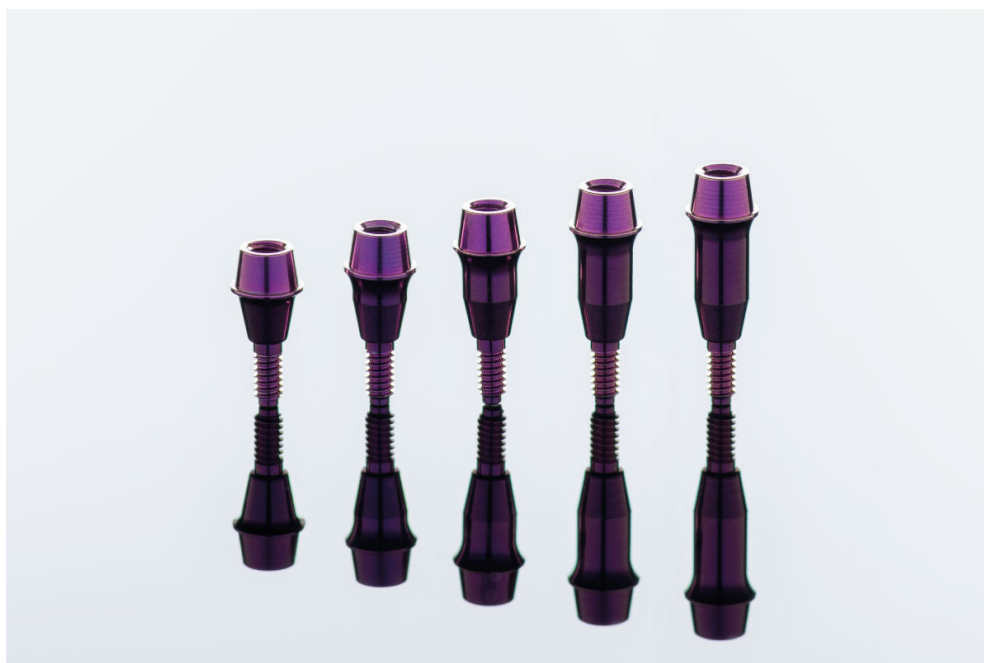


Figura 2. Implante con pilar recto estético Galimplant

El proceso de fabricación de los implantes y aditamentos se puede dividir en dos etapas, independientes entre sí. En la primera etapa, las piezas obtienen la geometría diseñada mediante un proceso de arranque de material en un torno, conocido como mecanizado. En la segunda etapa las piezas obtienen las características químicas y superficiales más adecuados para su supervivencia a largo plazo en un medio biológico como es el hueso maxilar.

---

En la primera de las etapas, mientras se realiza el proceso de mecanizado de las piezas, se lleva a cabo la verificación de un porcentaje de las piezas mecanizadas, según marca la norma ISO correspondiente. Las cotas marcadas en el plano son verificadas con los correspondientes instrumentos metrológicos. Entre el proceso de mecanizado y el de verificación existe una etapa intermedia de manipulación de las piezas, que incluye el traslado de estas desde la salida del torno hasta el lugar donde se almacenan y verifican. Posteriormente a este proceso de mecanizado, manipulación y verificación, las piezas son desengrasadas y termo desinfectadas. Posteriormente las piezas son sometidas a estrictos controles de calidad y aquellas que lo requieran, como los implantes, son sometidos a tratamientos superficiales de abrasión y de pasivado mediante ácidos, y finalmente esterilizados, siguiendo unos rigurosos procedimientos marcados por la normativa sanitaria correspondiente. Otros componentes se someten a un proceso de anodizado, que provoca un cambio de grosor en la capa de óxido que recubre a la pieza, cambiando así el color con el que se perciben.



*Figura 3. Aditamentos de Galimplant anodizados*

Este proceso de fabricación debe ser eficiente y estructurado, que permita obtener un precio de producto final adecuado en un mercado muy competitivo. Por otro lado, debido a la continua mejora y optimización de los diseños, tanto estructurales como químicos, la producción de este tipo de productos debe ser flexible, puesto que aquello que se produce en el presente puede que no sea totalmente igual a

---

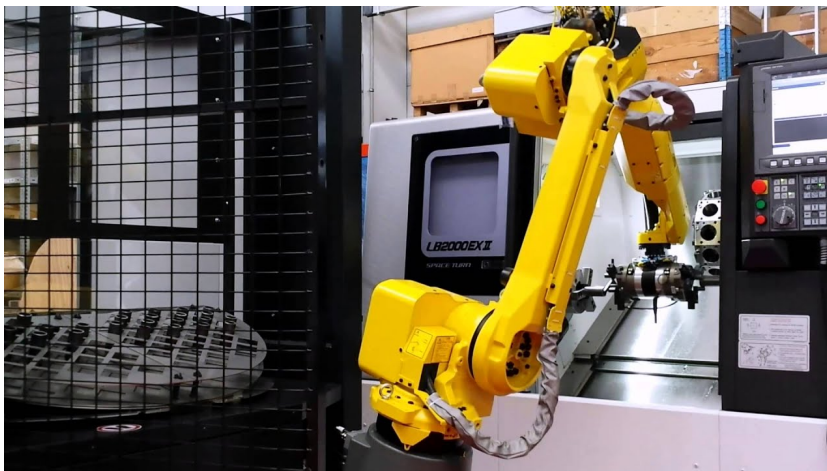
lo que esté produciendo años después. A pesar de ello, hay ciertas fases del proceso de producción que permanecerán a grandes rasgos inalteradas con el paso del tiempo, como es el proceso de mecanizado, en el cual, aunque la geometría de la pieza a mecanizar cambie, no cambiarán sus dimensiones generales, la materia prima, o el método de fabricación en sí mismo. Es por ello por lo que resulta tan interesante buscar la automatización del proceso de mecanizado, lo que se traducirá en una mayor eficiencia del proceso y una mayor rentabilidad para la empresa.

Hay que destacar que uno de los principales inconvenientes a la hora de automatizar una producción de estas características es el reducido tamaño de las piezas. Hablamos de piezas que pueden llegar a ser tan pequeñas como un tornillo de métrica 1.4 mm y tan solo un par de milímetros de longitud, lo que hace complejo el proceso de manipulación de las mismas, transporte, medición e inspección. Otras de las dificultades de llevar a cabo este proceso desde cero son las escasas referencias que podemos encontrar. El sector de la industria de fabricación de dispositivos médicos, al igual que muchos otros sectores, mantiene su *know-how* dentro de la empresa y no suele hacer público detalles de cómo hacen sus productos, salvo los procedimientos a grandes rasgos. Por ejemplo, se sabe que el proceso para dar la forma geométrica a las piezas suele ser un torno CNC de cabezal móvil, o que la superficie de los implantes es tratada con ácidos, pero se desconocen detalles de, por ejemplo, las estrategias de mecanizado que siguen, la manera de automatizar el proceso de producción o la composición de los ácidos que emplean. Todo ello forma parte del *know-how* de las mismas y es lo que las diferencia entre sí.

Centrándonos en la primera de las fases de la producción, el mecanizado, manipulación y verificación, son varias las maneras que existen de llevar a cabo esto de una manera automatizada. El primer paso es la extracción de las piezas del torno. Para los tornos de cabezal fijo, esta extracción deberá hacerse obligatoriamente cada vez que una pieza individual sea mecanizada. Esta operación puede realizarse de manera manual, es decir, el operario se sitúa a la altura de la máquina, abre la puerta, extrae la pieza, deja la máquina preparada para la siguiente y vuelve a cerrar la puerta del torno. Esta manera de proceder es la manera tradicional. Hoy en día, gracias al avance de la robótica y la informática, se le brinda a la industria la oportunidad de mejorar los tiempos de producción y optimizar el tiempo del personal de trabajo mediante brazos robóticos manipuladores, capaces de detectar cuando la pieza ha terminado de



ser mecanizada, abrir la puerta del torno, extraerla, posicionarla en un sitio concreto, cerrar la puerta y dar comienzo al mecanizado de la siguiente pieza.



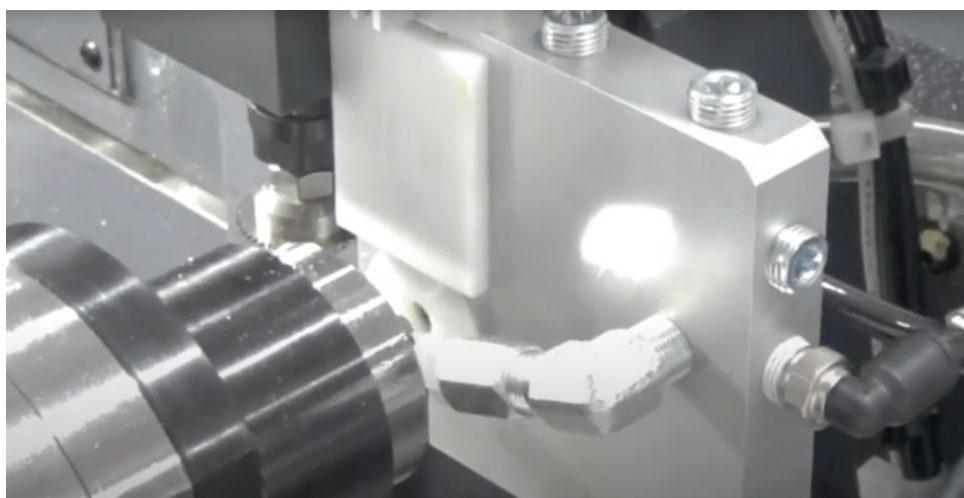
*Figura 4. Brazo robótico manipulador en torno de cabezal fijo*

En el caso de los tornos de cabezal móvil, esta extracción de piezas no se realiza cada vez que una pieza es mecanizada, sino cada vez que un número determinado de piezas son mecanizadas. En el proceso, las piezas o bien son almacenadas en un cajetín situado en la parte frontal del torno, o bien una cinta transportadora las extrae al exterior del torno y las deposita en otro cajetín. Ambas opciones son equivalentes desde el punto de vista de la automatización y, aunque a diferencia de los tornos de cabezal móvil el operario no debe atender a la máquina cada vez que se mecaniza una sola pieza, sí se debe recoger el grupo de piezas que la máquina ha mecanizado y, manualmente, llevarlas al lugar correspondiente donde se almacenan y donde se le realice la correspondiente pauta de control y control dimensional.

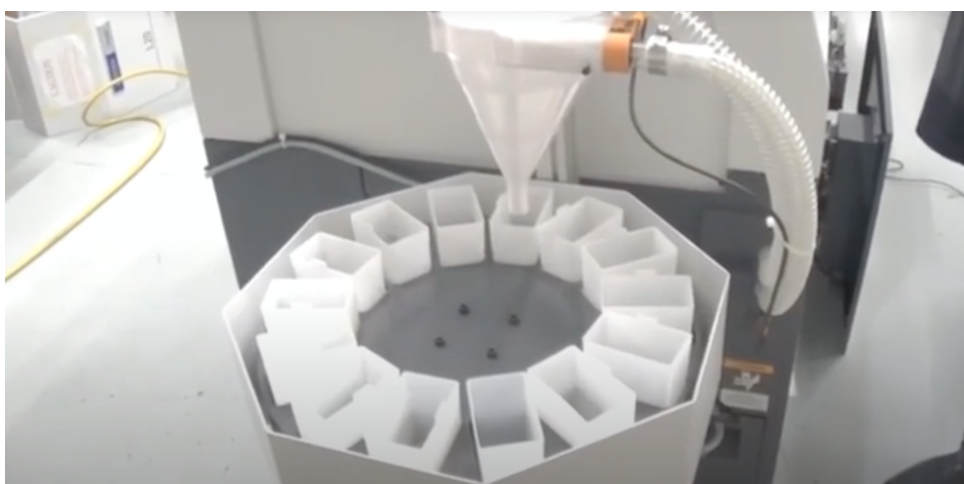
Al igual que para la industria del cabezal fijo, la tecnología también ha dotado de soluciones a los tornos que emplean cabezal móvil para aumentar el grado de automatización de estos en la tarea de la extracción de las piezas. Estas opciones son variadas, aunque se puede distinguir dos maneras diferentes de afrontar el problema:

- Usar una cinta transportadora que lleve las piezas desde el interior hasta el exterior del torno.
- Usar una extracción de piezas desde el contra cabezal mediante un sistema de extracción por succión.

En la segunda aproximación, el contra cabezal se posiciona en el extremo de un tubo de plástico por el que viajan las piezas hacia el exterior del torno impulsadas mediante un vacío generado en el mismo. De esta forma, cuando la pieza esté terminada y el contra cabezal la expulse, el sistema de succión del mecanismo se activa, llevando la pieza allí donde corresponda. Este sistema es usado para tornos de cabezal móvil y de pequeñas dimensiones, dado que para que las piezas puedan desplazarse por un tubo por succión, su masa debe ser reducida.



*Figura 5. Sistema de extracción de piezas por succión. Contra cabezal*



*Figura 6. Deposición de piezas mediante sistema de extracción por succión*

Desde el punto de vista de la manipulación, con ambos métodos de extracción de piezas del torno el siguiente paso ha de ser el traslado de las piezas al área de almacenaje y verificación. Para ello, en la industria se suelen ver sistemas como tipo cintas transportadoras, que permiten el traslado de piezas de tamaño medianos y grande. A la hora de trasladar piezas de tamaños reducidos, como las de la presente aplicación, aparece la posibilidad de perder alguna de ellas, dado que se cuelan fácilmente en cualquier sitio no deseado. Esto implica la agrupación de las piezas previa al traslado en grupos de tamaño reducido, y siempre separando la pieza del grupo a la que le toca someterse al control dimensional.



*Figura 7. Uso de cintas transportadoras en la industria*



### **3. METODOLOGÍA**

Desde la empresa se busca dar una solución de automatización completa a la fabricación de una pieza de ejemplo de las que la empresa diseña, fabrica y comercializa. Se atenderá a la primera fase de la fabricación, sin entrar en la fase limpieza, tratamientos químicos, esterilización y envasado. Esta primera fase de fabricación de implantes y aditamentos protésicos se puede dividir en tres partes: mecanizado, manipulación y verificación. En el presente trabajo se desarrollarán las dos primeras, quedando la tercera para trabajos futuros.

Respecto a la parte de mecanizado, se seleccionará un torno atendiendo a los requisitos que la pieza imponga, tanto por su geometría como por su material, se establecerá la estrategia de mecanizado, se optimizará y se planificará la producción de esta. La pieza que se comenzará a mecanizar se trata de una pieza de geometría sencilla y que se encuentra en la mayoría de las prótesis que lleven un determinado tipo de sistema fabricado y comercializado por Galimplant. La pieza es de reducido tamaño, con tan solo 4.6 mm de longitud. Su mecanizado deberá hacerse con una máquina apta para trabajar piezas tan pequeñas, y su proceso de manipulación y verificación deberá ser diseñado con delicadeza para evitar que algunas de las piezas se pierdan por el camino, o para evitar que se den por buenas piezas que no cumplan con las cotas de diseño.

Para la parte de manipulación, se llevará a cabo un prototipo del tipo brazo robótico o similar que permita posicionar las piezas que se van mecanizando en algún recipiente de manera ordenada y controlada, realizando así la primera etapa de manipulación, previa al traslado de las piezas al área de verificación. Para el desarrollo del prototipo, primeramente, se debe conocer cuales son sus requerimientos de funcionalidad, sus dimensiones máximas, su versatilidad vs robustez, etc. Se deberá estudiar con atención el entorno donde se ubicará, a fin de evitar posibles obstaculizaciones del mismo a elementos terceros. El prototipo se diseñará enteramente, estando compuesto por una parte estructural, un mecanismo que posicione las piezas, y un conjunto de electrónica y software que genere los movimientos cuando corresponda.

## **4. AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN**

### **4.1. Mecanizado**

La primera fase de la fabricación automatizada es el mecanizado. Desde el punto de vista de la automatización, el mecanizado debe ser un proceso lo más autónomo posible, en el que la máquina trabaje de manera continuada en función de la estrategia de mecanizado seleccionada, y el operario solamente atienda a tareas de cambios de herramientas cuando sea necesario y preparaciones de máquina cuando se mecanice una pieza nueva. Se deben barajar tornos de control numérico y de cabezal móvil que permitan un alto volumen de producción. Muy ligado al mecanizado, se debe prestar especial atención a la primera parte de la manipulación de las piezas: la extracción de estas.

### **4.2. Manipulación**

Desde el punto de vista de la automatización, el proceso de manipulación de piezas debe ser enteramente realizado de manera automática, quedando el operario libre para realizar otras tareas. El flujo es el siguiente: las piezas se extraen del torno, se posicionan de manera ordenada en los recipientes adecuados y se trasladan al área de almacenaje y verificación.

Si se emplea la cinta transportadora incluida en el torno para llevar a cabo la extracción de las piezas, se hace necesario el uso de algún manipulador que las posicione en el lugar correspondiente según vayan siendo mecanizadas. El sitio donde se depositen puede ser una bandeja o recipiente. Cuando este estuviese lleno, la cinta transportadora trasladaría la bandeja hasta el área de verificación, posicionando automáticamente una nueva bandeja vacía.

### **4.3. Verificación**

La verificación y el control dimensional es la parte más compleja de realizar de manera totalmente automatizada, por la naturaleza de las operaciones que en ella se realizan. El grado de automatización que esta fase pueda adquirir depende en gran medida del uso de máquinas que ayuden al operario tanto a verificar cotas como a anotarlas y procesarlas. Por ejemplo, para medir las cotas exteriores de una pieza, se puede emplear un pie de rey, tomar las medidas y anotarlas, o se puede posicionar la pieza en una máquina de medición automatizada, la cual tomará las medidas exteriores mediante técnicas de visión o por sensores, y las guardará automáticamente en un ordenador. Con la segunda manera el tiempo del operario se optimiza mucho más que si se llevase a cabo de la primera forma. Para la verificación de medidas interiores, sin embargo, este proceso se vuelve más complejo a la hora de llevarlo a cabo de manera automática.

No obstante, el propio proceso de verificación requiere de una manipulación de las piezas a verificar muy concreta, siendo el uso de manipuladores automatizados para este propósito complejo por el reducido tamaño de las piezas que se manejan.

La suma de las pequeñas automatizaciones que se hacen en cada uno de los procesos que intervienen en el mecanizado hacen que el proceso en conjunto sea más eficiente y por tanto incrementa el número de máquinas que un operario puede manejar y por tanto incrementa también el número de piezas que puede mecanizar.

## 5. DESARROLLO DEL PROCESO DE MECANIZADO

### 5.1. Análisis de la pieza a mecanizar

Cuando se trata de unir una prótesis con un implante, se puede seguir dos métodos de unión diferentes. En uno de ellos, entra en juego un tornillo de cabeza redonda y longitud reducida, que tiene como objetivo hacer de prótesis e implante una misma pieza, manteniendo la unión de la prótesis con el pilar colocado encima del implante fija y estable por mucho tiempo. Este tornillo se denomina tornillo protésico, y será el elegido para poner en marcha la internalización del proceso de mecanizado. En la Figura 2 puede verse en azul la pieza a mecanizar interactuando con demás piezas del sistema Galimplant, como pueden ser *interfaces*, pilares y réplicas de implantes para laboratorios.

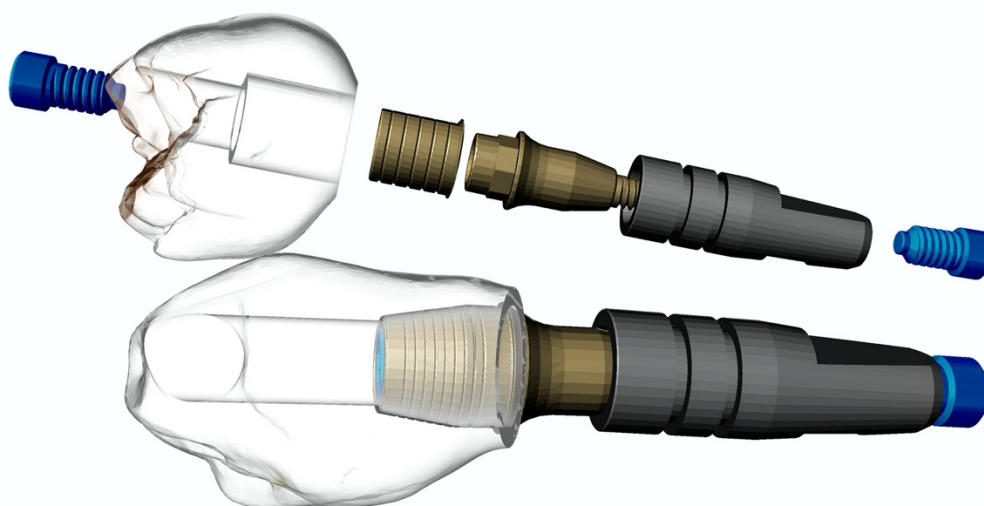


Figura 8. Aditamentos y réplicas de implantes de Galimplant

En la Figura 9 se puede ver este tornillo modelado mediante un software CAD. Se trata de un tornillo de métrica 2 mm y 4.6 mm de longitud, fabricado en una aleación de titanio, aluminio y vanadio (Ti6Al4V), también conocida como titanio grado V.



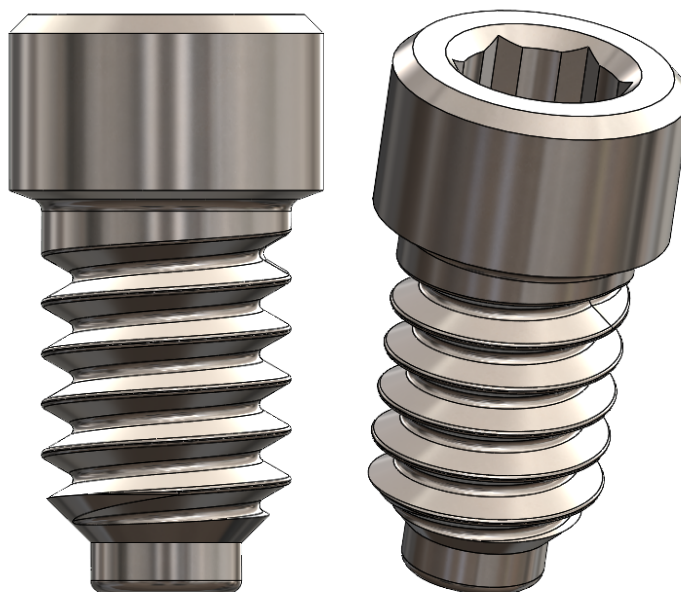


Figura 9. Tornillo protésico M2

El titanio y sus aleaciones constituyen materiales de ingeniería ampliamente usados en la industria, principalmente aeronáutica y médica, que poseen una extraordinaria combinación de propiedades. Es muy abundante en la corteza terrestre, aunque con un precio final muy elevado, derivado del elevado coste de extracción y la dificultad de su procesado. A continuación, se recogen algunas de las propiedades más destacables del titanio:

- Baja densidad, en torno a  $4,5 \text{ g/cm}^3$ , un 40% más ligero que el acero.
- Elevado punto de fusión ( $1668^\circ\text{C}$ ).
- Pequeño coeficiente de dilatación.
- Baja conductividad térmica y eléctrica.
- Gran resistencia, siendo el límite elástico del titanio puro de 410 MPa.
- Gran resistencia a la corrosión en ambientes atmosféricos, salinos y en una gran variedad de procesos industriales.
- Biocompatibilidad con el cuerpo humano. Característica fundamental para la presente aplicación.
- Resistencia a la fatiga y a la proliferación de fisuras.

No obstante, uno de los inconvenientes de este material es su alta reactividad con otros elementos como el oxígeno, tan presente en la atmósfera. Esto, junto con su baja conductividad térmica, hacen del proceso de mecanizado una tarea delicada. En la Figura 10 se pueden ver las dimensiones principales del tornillo protésico.

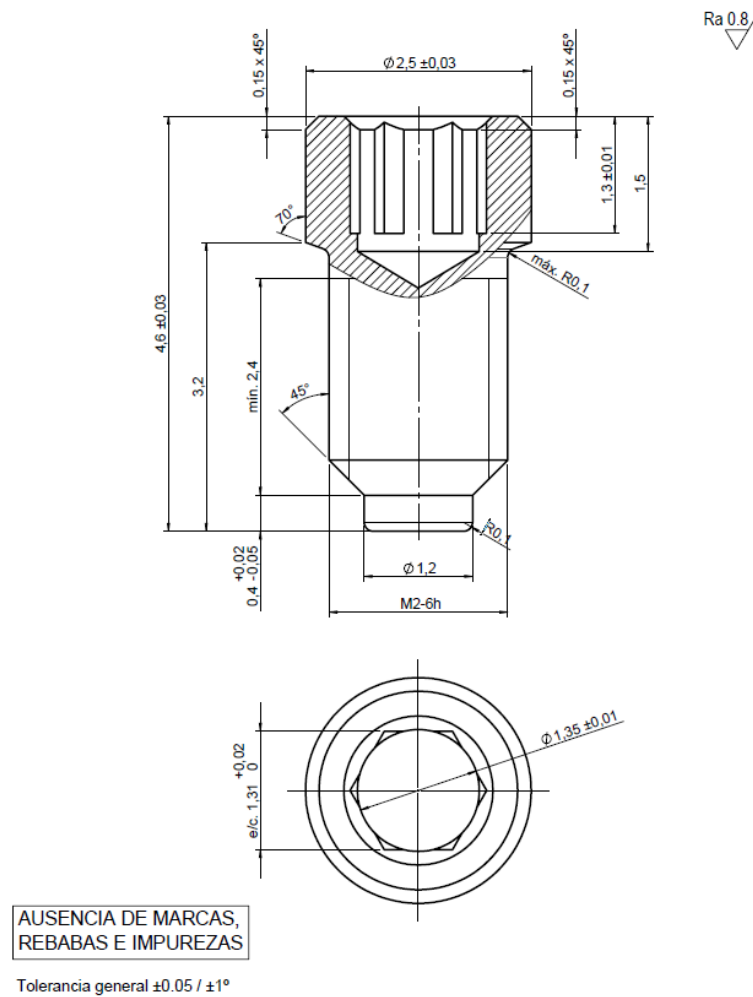


Figura 10. Dimensiones del tornillo protésico

La pieza cuenta con dos partes claramente diferenciadas: la geometría externa, que incluye la rosca y la cabeza cilíndrica con la transición progresiva entre ambas a  $70^\circ$ ; y la geometría interna, una cavidad circular y una hexagonal.

Es importante conocer la funcionalidad de la pieza para comprender por qué se ha diseñado de esta forma, comprender las tolerancias de fabricación de cada cota y saber identificar las zonas más

críticas. Este tornillo está destinado a permanecer en la boca del paciente a largo plazo, por este motivo, la rosca deberá ser fabricada con la mayor calidad posible, para evitar que se afloje con el paso del tiempo. Por otro lado, la superficie a 70º es la zona de apoyo entre el tornillo y la *interface* (pieza sobre la que irá cementada la corona), con lo que también es una superficie muy importante. La zona interna del hexágono es la zona más crítica de la pieza: será donde el odontólogo introducirá la llave correspondiente para poder aplicar el par de apriete necesario durante la colocación de la prótesis. Si no se mecaniza correctamente y el hexágono queda demasiado pequeño, no entrará la llave en el tornillo, haciéndolo totalmente inservible. Si, por el contrario, el hexágono es demasiado grande, la llave no podrá transmitir el par al tornillo, y este será también inútil. Es por esto por lo que esta cota cuenta con una tolerancia de fabricación más ajustada que otras cotas.

Toda la pieza, tal y como indica el plano, además de estar dentro de las tolerancias establecidas deberá carecer de rebabas, marcas o impurezas, que pongan en peligro la funcionalidad de esta.

## 5.2. Selección del torno

Se denomina torno a un conjunto de máquinas herramienta que permiten mecanizar piezas con forma geométrica de revolución. El funcionamiento básico del mismo consiste en hacer girar la pieza a mecanizar mientras una o varias herramientas de corte son empujadas en un movimiento regulado de avance contra la superficie de la pieza, cortando la viruta de acuerdo con las condiciones tecnológicas de mecanizado adecuadas [5]. El torno es una de las primeras máquinas inventadas por el ser humano. Su evolución sufrió un avance muy notable en la segunda mitad del siglo XX, incorporando técnicas de control del mismo mediante la incorporación de sistemas electrónicos, naciendo así el torno de control numérico o torno CNC.

En los siguientes apartados se describen las características del proceso de mecanizado que se pretende abordar desde el punto de vista de las capacidades que el torno adquirido deberá poseer para cumplir con la labor. Finalmente se expone el torno seleccionado y sus características principales.

### 5.2.1. Flexibilidad

El torno seleccionado deberá ser apto para mecanizar el tornillo protésico descrito anteriormente, así como también mecanizar otras piezas de titanio grado V, y que en cualquier caso tendrán un diámetro máximo de 7 mm y una longitud máxima de 30 mm.

Tabla 1. Características de las piezas a mecanizar

Material	L <sub>máx</sub> (mm)	Ø (mm)
Titanio Grado V	30	1-7

Además de mecanizar piezas tipo tornillo, deberá ser posible mecanizar piezas más complejas que incluyan roscas internas o fresados laterales (llevado a cabo con herramientas motorizadas). Para ello, aunque en la adquisición del presente torno no se incorporen, deberán permitir la posibilidad de añadirlo en un futuro si así se ve necesario.

### 5.2.2. Precisión

En el torno escogido se deberá poder mecanizar piezas de hasta métricas M1.4 mm y una longitud tan reducida como 4 mm, y con unas tolerancias dimensionales muy estrechas, del orden de centésimas. Esto se traduce en que la búsqueda del torno deba orientarse hacia aquellos destinados a labores de micro-mecanizado, que puedan ofrecer dicha precisión y fiabilidad a lo largo del tiempo.

### 5.2.3. Velocidad y automatización

El mecanizado es un proceso de fabricación relativamente lento en comparación con otros procesos, y no suele estar relacionado con volúmenes elevados de fabricación de la misma pieza, sino más bien con la fabricación de una cantidad limitada de piezas diseñadas para una aplicación en concreto. La excepción a esto podría ser el mecanizado para la industria médica, automotriz y aeroespacial.

Una característica que determina en gran medida la productividad del proceso de mecanizado es el tipo de máquina de la que se dispone: torno es manual frente a torno de control numérico o torno CNC. Un torno de control numérico hace referencia a una máquina herramienta que se utiliza para mecanizar piezas de revolución mediante un software de computadora que utiliza datos alfanuméricos, siguiendo los ejes cartesianos X, Y [5]. Este tipo de control en los tornos permite un elevado grado de repetitividad

---

en las piezas mecanizadas dado que el torno siempre realiza las trayectorias programadas, dejando las piezas siempre con la misma medida, salvo por rotura o desgaste de alguna herramienta. Además, permite bastante libertad al operario que lo maneja, ya que puede realizar otras labores mientras el torno trabaja. Hoy en día la mayoría de los tornos en la industria son CNC.

Debido al elevado volumen de piezas que se deben mecanizar, se descarta por completo la opción de usar un torno manual, centrando así la búsqueda del torno entre los de control CNC.



Figura 11. Control de un torno CNC

#### 5.2.4. Alto volumen de producción

En los tornos convencionales el proceso de mecanizado es el siguiente: se prepara un redondo del material de la pieza a mecanizar y se amarra al cabezal giratorio mediante las garras. Se lleva a cabo el correspondiente arranque de material y, cuando este termina, se extrae la pieza final, y el torno vuelve a quedar disponible para repetir el proceso, ya sea para volver a mecanizar otra pieza igual, o para mecanizar una distinta. Teniendo en cuenta el alto volumen de producción del tornillo protésico a mecanizar, este proceso se hace inviable y surge la necesidad de buscar otro tipo de tornos.

En función de la manera de operar, se puede hacer una clasificación de los tornos en dos tipos, lo cuales se exponen y comentan a continuación.

*(1) Tornos convencionales o de cabezal fijo.*

En ellos, la pieza a mecanizar gira solidaria a un plato de garras estático en la dirección axial al giro, siendo las herramientas las que avanzan respecto a la pieza y en dirección radial a la misma, propiciando así la geometría buscada. La longitud de la pieza está limitada a ser de aproximadamente 3-4 veces el diámetro de esta.

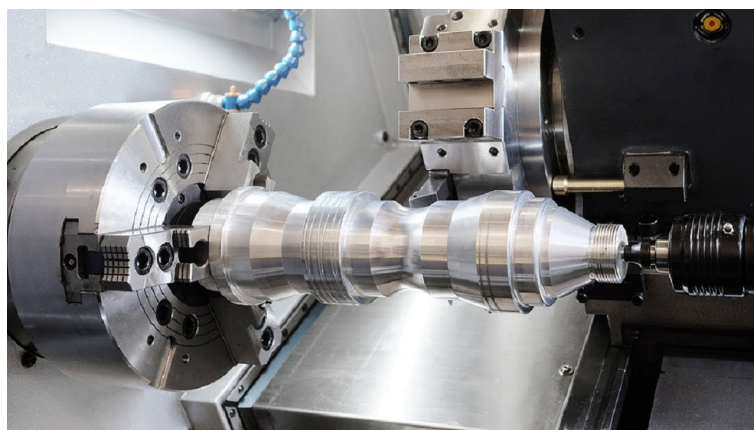


Figura 12. Torno de cabezal fijo

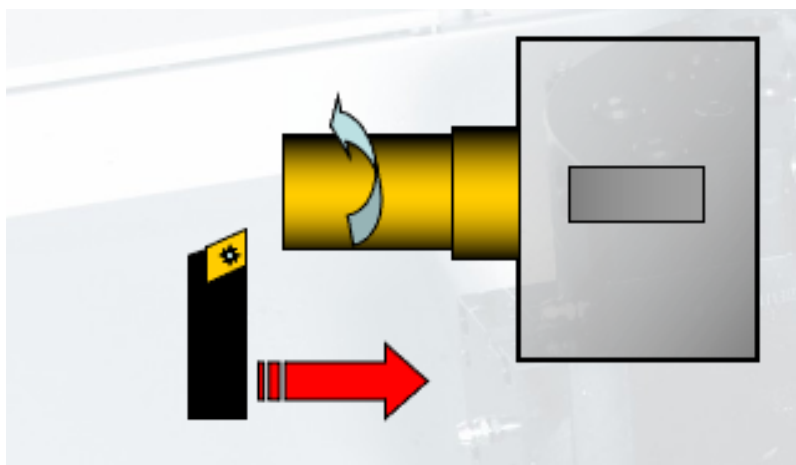


Figura 13. Funcionamiento del torno de cabezal fijo

*(2) Tornos de cabezal móvil*

En los tornos de cabezal móvil el funcionamiento y la manera de operar es totalmente distinta. Se parte de una barra larga de material, introducida en el torno mediante una máquina externa al torno, llamada cargador de barras. A diferencia de los tornos convencionales, es el material el que, además de girar, se mueve en dirección axial, siendo las herramientas las que se mueven únicamente en dirección

---

radial, y generando así la geometría buscada. No existe prácticamente limitación en longitud de la pieza a mecanizar, dado que la barra apoya en todo momento en la luneta del torno.

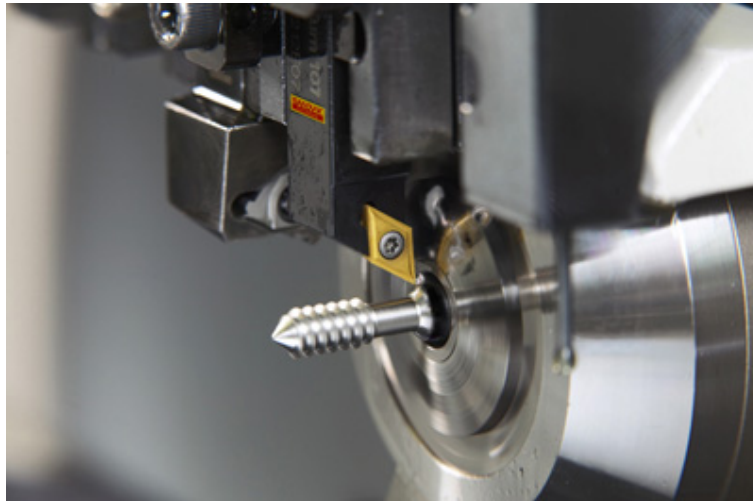


Figura 14. Torno de cabezal móvil

Los tornos de cabezal móvil permiten mecanizar una pieza después de otra sin necesidad de interrumpir el proceso, siempre que las piezas sean iguales. Cuando la pieza está terminada, esta es expulsada hacia un cajetín o una cinta transportadora, mientras la siguiente ya ha comenzado a mecanizarse. Suelen contar con dos cabezales, el principal y un contra cabezal, lo que permite realizar operaciones a dos piezas simultáneamente.

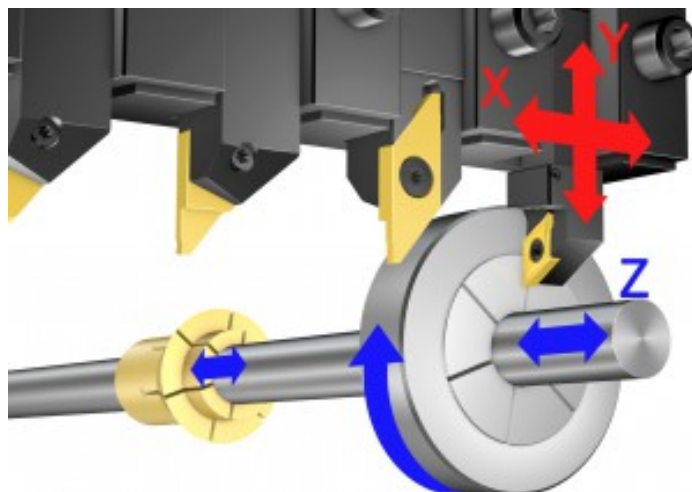


Figura 15. Funcionamiento de torno del cabezal móvil (Sandvik Coromant)

Teniendo en cuenta esta clasificación, se ve clara la necesidad de emplear un torno de cabezal móvil para esta aplicación, que satisfaga el elevado volumen de fabricación. Como consecuencia, en la búsqueda y comparaciones entre tornos, se deberá incluir un cargador de barras adecuado para el mismo, dado que generalmente torno y cargador son de distintos fabricantes.

#### 5.2.5. *Material: titanio grado V*

En los procesos de corte, aproximadamente el 97% de la energía mecánica se transforma en energía térmica a través del cizallamiento, corte y fricción entre la viruta y la cara de desprendimiento de la herramienta. Aunque gran parte de la energía es evacuada por las virutas, el calor se acumula en lugares cercanos al punto de corte y a la cara de desprendimiento en contacto con las virutas. Esta acumulación de energía provoca fenómenos no deseados en el proceso de mecanizado [6]:

- La herramienta se fragiliza y se estimula el desarrollo del desgaste.
- Respecto a la calidad final del componente mecanizado, la precisión geométrica disminuye debido a la expansión de la herramienta y de la pieza con el calor.

Dichos efectos se ven magnificados cuando hablamos del mecanizado de titanio pues, debido a su mala conductividad térmica, alta dureza y bajo módulo de elasticidad hacen que las aleaciones de titanio se vuelvan más difíciles de procesar que otros materiales metálicos [7]. Es por ello que el uso de fluidos de corte es imperativo cuando se mecaniza titanio. Aunque los investigadores buscan maneras de mecanizar titanio en seco, las propiedades de este material constituyen obstáculos significativos para hacerlo. Es gomoso, tiene baja conductividad térmica, y (en el caso de algunas aleaciones) tiene un bajo punto de llama. Como consecuencia, las virutas no extraen el calor y la pieza se calienta tanto que puede llegar a ignición y arder. Los fluidos de corte previenen el problema lubricando el borde, retirando las virutas y enfriando la pieza de trabajo. Para asegurar que el fluido realice bien estas funciones, las aleaciones de titanio necesitan fluidos suministrados a alta presión [8].

Como conclusión, el torno seleccionado deberá contar con un sistema de refrigeración con una bomba estándar y otra bomba para el sistema de aceite a alta presión. Además, deberá contar con un sistema de detección y extinción automático de llama por si se llegase a producir.









### 5.2.6. Limpieza

Dado que el torno se instalará en un lugar donde se fabrican dispositivos médicos, cobra una enorme importancia la limpieza del lugar donde se instale (viruta, aceites, neblina de aceite...). Es por ello por lo que se hace necesario que la máquina incorpore una campana extractora de aceites evaporados, evitando así que este quede en el ambiente, generando olores inadecuados y evitando que posteriormente el suelo se impregne del mismo. Además, permitiría reutilizar el aceite evaporado al reconducir este de nuevo a su depósito.

### 5.2.7. Búsqueda y selección

Una vez reunidos los requisitos que la máquina debe cumplir, se realiza una búsqueda de los principales distribuidores máquina-herramienta de la península ibérica y se les solicita presupuesto. Los distribuidores de máquina herramienta consultados se recogen en Tabla 2.

Tabla 2. Fabricantes de máquina herramienta consultados

Fabricante	País de origen	Distribuidores en España
<b>CITIZEN</b>		Éibar
		Vigo
		Barcelona
<b>TORNOS</b>		Barcelona

Todas las ofertas presentadas fueron minuciosamente estudiadas y valoradas, tomando finalmente la decisión en base a la competitividad del fabricante, su experiencia dentro del sector, precio, servicio de mantenimiento y formación, entre otros. Finalmente se ha apostado por un torno modelo L12-VII del fabricante japonés Citizen y un cargador de barras de tipo revólver compatible con el mismo. A continuación, se describen las características generales del torno adquirido:

- Torno de cabezal móvil con cabezal principal y contra cabezal.
- 5 ejes lineales. Z, X, Y en el cabezal principal, Z, X en el contra cabezal.

- Capacidad para 27 herramientas.
- Diámetro máximo de barra de 12 mm.
- Velocidad máxima cabezal principal: 15.000 rpm.
- Velocidad máxima contra cabezal: 10.000 rpm
- Longitud máxima de mecanizado: 135 mm.
- Control Mitsubishi.
- Posibilidad de montar herramientas motorizadas para fresados y de mecanizar roscas internas (sistema de alta frecuencia).

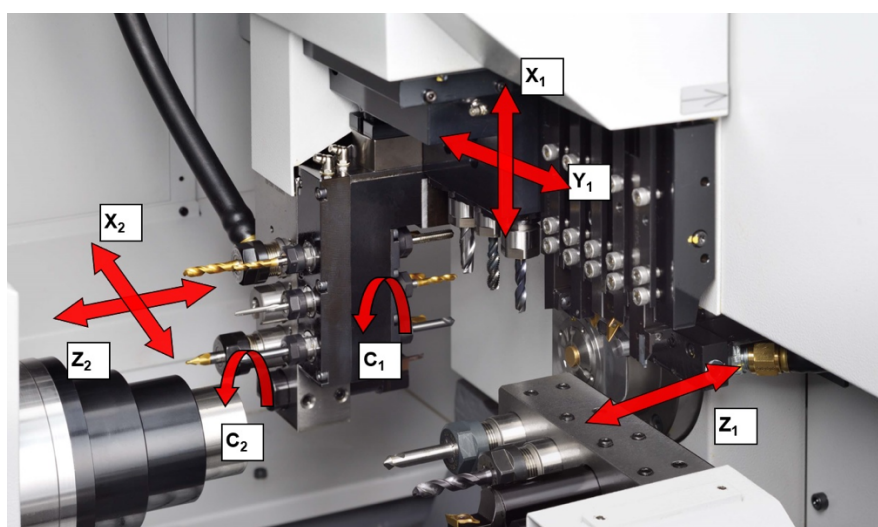


Figura 16. Ejes del torno adquirido

El cargador adquirido con el torno es de tipo revólver y puede albergar en su interior hasta 14 barras de 3 m de longitud. El cambio entre barras se realiza de manera automática cuando la barra está llegando a su fin, siendo el tiempo de cambio alrededor de 20 segundos. El cargador cuenta con un sistema de aceite que lubrica las barras permanentemente dentro del mismo.



Figura 17. Cargador de barras tipo revólver



Figura 18. Torno instalado

La instalación y puesta en marcha fue llevada a cabo por la empresa fabricante del torno y del cargador, respectivamente.

### 5.3. Material de partida

Dado que la máxima medida de la pieza a mecanizar en sentido diametral es 2.5 mm, se partirá de barras de 3 mm de diámetro. El material ha de ser titanio Ti6Al4V ELI (grado V) y la longitud 3000 mm, viniendo esto último marcado por el cargador empleado. La cantidad de barras a comprar vendrá determinada por las necesidades de producción, tiempos de entrega, precio y capacidad de almacenaje. No obstante, se estima que 40 barras (120 m) son suficientes para realizar las pruebas iniciales necesarias y mecanizar unas 25.000 unidades iniciales.

Tabla 3. Características del material de partida

Material	L (mm)	∅ (mm)
Ti6Al4V ELI	3000 <sup>+50</sup> <sub>0</sub>	3 h7



Figura 19. Material de partida

## **5.4. Estrategia de mecanizado**

Una vez se tiene escogido el torno y el cargador de barras, y se ha adquirido el material de partida, toca definir la estrategia de mecanizado. El torno cuenta con un cabezal principal y un contra cabezal que pueden trabajar simultáneamente y son completamente independientes. Es por ello que se debe separar la geometría de la pieza en geometría externa e interna, y se deberá contar con herramientas específicas para cada parte. Así, mientras se mecaniza la parte interna de la pieza en el contra cabezal, se estará mecanizando la externa de la siguiente pieza en el cabezal principal.

A continuación, se detalla la secuencia de operaciones planteada inicialmente que nos llevarán a obtener la geometría buscada.

- En el cabezal principal, partiendo de la barra de 3 mm, se realizará un cilindrado de desbaste con la plaquita recomendada para llevar a cabo operaciones de desbaste. Se deja un espesor de 0.3 mm mayor a la dimensión final.
- Cilindrado de acabado con plaquita de acabado y un radio de punta de 0.08 mm. Como regla general se deberá usar un avance menor al valor del radio para obtener una buena calidad superficial.
- Roscado con la plaquita de roscado de paso 0.40 mm. Se lleva a cabo realizando numerosas pasadas progresivas, en cada una aumentando la profundidad de penetración de la plaquita hasta llegar a la medida de la M2.
- Chaflanado de la cabeza con una plaquita especial para chaflanar.
- Tronzado con la plaquita de tronzado. Al mismo tiempo el contra cabezal se sincroniza en velocidad de giro con el cabezal principal y agarra la pieza por la cabeza.

- Una vez la pieza está agarrada por el contra cabezal, se puede trabajar la geometría de la cabeza. Primero una broca de puntear entrará lo suficiente como para dejar hecho el chaflán de entrada del agujero de 45°.
- Posteriormente entrará la broca de taladrar a diámetro 1.30 mm, que completará el agujero, dejando una medida 5 centésimas menor de la final.
- A continuación, entrará una mandrina que dejará el agujero al diámetro final, 1.35 mm, con una buena cilindridad y un buen acabado superficial.
- Por último, una vez el agujero cilíndrico esté hecho, debe entrar la brocha hexagonal, la cual tiene una medida entre caras ligeramente inferior al diámetro del agujero realizado. De esta forma solamente se arranca material en los vértices del hexágono, haciendo que la brocha sufra menos, dure más, y se genere menos viruta que luego haya que desalojar, siendo la pieza igualmente funcional.

Todas las herramientas seleccionadas están indicadas para usarse en Titanio grado V, estando este material en la categoría S (*super alloy*). En cuanto a las condiciones de corte, se calculó la velocidad de giro del husillo para mantener una velocidad de corte contenida entre 30 y 70 m/min, siendo este valor el recomendado por el fabricante de las herramientas.

Además de las herramientas y los portaherramientas, son necesarios otros componentes de la máquina para que esta pueda trabajar de forma correcta:

- Pinza para cabezal principal: Su función es generar el movimiento en Z de la barra, además de proporcionar el momento de giro a la misma. Se emplea una pinza de diámetro 3mm de diámetro.
- Pinza de contra cabezal: su función es agarrar la pieza para ser trabajada en el contra cabezal. Se emplea una pinza recta del diámetro de la cabeza del tornillo, 2.5 mm.

- Cañón guía: posicionada en la boca del torno, sirve de guía y de apoyo a la barra, evitando así la flexión de la misma. Se emplea un cañón del diámetro de la barra, 3 mm.
- Pinza del cargador: su función es empujar la barra hacia el torno. Se emplea una pinza de diámetro 3 mm compatible con el cargador.

El torno se prepara y se programa para que siempre que se produzca arranque de material haya un manguito del sistema de alta presión de aceite apuntando directamente sobre la superficie de trabajo.

## **5.5. Programación del torno CNC**

En el presente apartado se explica el desarrollo del programa de control numérico necesario para que el torno pueda generar la geometría deseada en la pieza.

### **5.5.1. Funcionamiento del cabezal doble desde el punto de vista de la programación**

Los tornos de cabezal móvil como el Citizen L12-VII están formados por un cabezal y un contra cabezal totalmente independientes, que ejecutan órdenes simultáneamente, por lo que el programa a realizar debe tener dos columnas cuyas líneas se irán leyendo simultáneamente. Las órdenes escritas en las dos columnas se irán ejecutando de manera independiente hasta el momento en el que el contra cabezal expulse la pieza y se dirija a agarrar la pieza situada en el cabezal principal, momento en el que ambos cabezales se sincronizan. De esta forma, si el cabezal principal ha terminado de realizar las operaciones programadas antes que el contra cabezal, este tendrá que esperar a que se aproxime el contra cabezal a agarrar la pieza. Si, por el contrario, las operaciones del contra cabezal han tardado menos, será este el que deba esperar antes de agarrar la siguiente pieza, que se seguirá mecanizando en el cabezal principal. En la Figura 20 se muestra un esquema del funcionamiento.

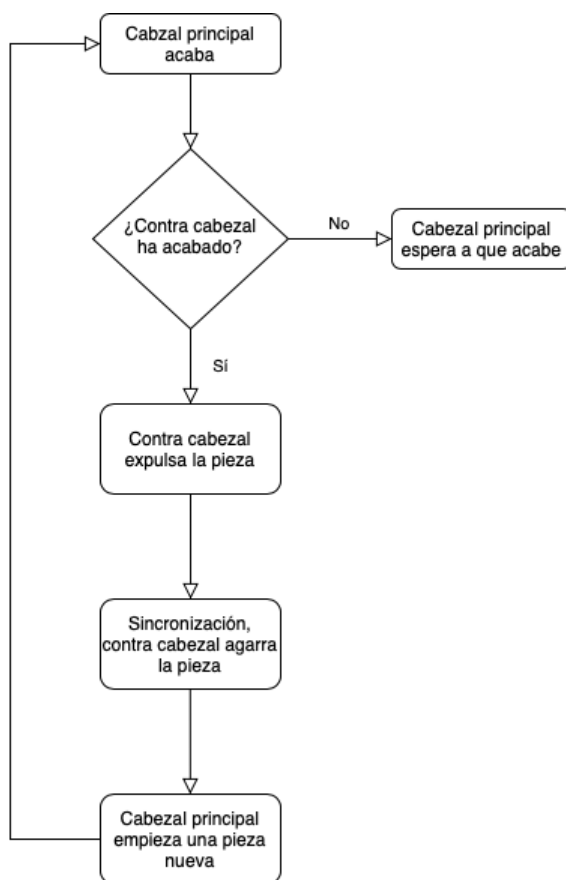


Figura 20. Funcionamiento cabezales del torno

### 5.5.2. Rutina de inicio

Al inicio de cada mecanizado, después de encender e inicializar el torno y su consola de control, se debe realizar una serie de pasos en los que se le indica al torno dónde se sitúa el extremo de la barra para que este pueda establecer la cota 0 del eje Z.

- *Position Point*: La herramienta de tronzado se posiciona por encima de la barra y esta avanza manualmente hasta posicionarse un par de milímetros por delante de ella.
- *Cut-off*: la herramienta de tronzar baja mientras la pieza gira y tronza el extremo saliente de la barra.
- *Start Position*: se le indica que el punto donde se encuentra en ese momento la barra es el punto Z=0.



### 5.5.3. Planos de coordenadas

Para poder escribir el programa de una manera sencilla, conviene generar un plano que contenga las coordenadas (X, Z) básicas de la pieza a mecanizar. De esta forma se tendrá de referencia y se reducirán las posibilidades de equivocarse y provocar posibles colisiones en la máquina, algo nada deseable.

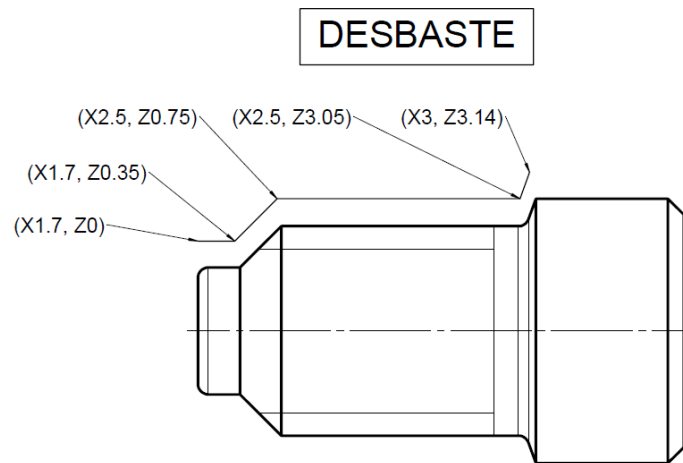


Figura 21. Coordenadas para el desbaste

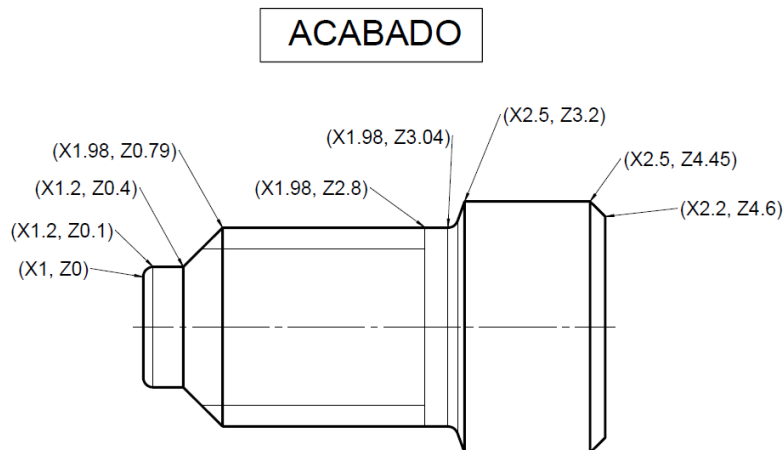


Figura 22. Coordenadas para el acabado

## 5.6. Problemas iniciales y optimización del proceso de mecanizado

Una vez el torno CNC y el cargador de barras fueron instalados, la estrategia de mecanizado definida, y el programa hecho, se dio comienzo a mecanizar las primeras piezas. Inicialmente se probó el código por partes de manera independiente y paulatina por su hubiera algún error, a fin de evitar posibles colisiones de las herramientas con la barra o con los cabezales. Una vez se completó el mecanizado de una pieza de manera exitosa, se mecanizaron las siguientes piezas de forma continuada, para poder detectar posibles fallos o anomalías solamente visibles una vez se mecanizan un alto volumen de piezas.

La primera anomalía que se detectó fue con relación a la herramienta de mandrinar: duró solamente unas 300 piezas, un número bastante más inferior de lo esperado. Consideramos que quizá las condiciones de corte no eran las adecuadas, con lo que se probó a modificarlas, aumentando la velocidad de corte y bajando el avance. La siguiente mandrina volvió a dudar aproximadamente el mismo número de piezas.

Acto seguido se tomó la decisión de cambiar la estrategia de mecanizado. Hasta el momento, la herramienta de mandrinar entraba en el interior de la pieza arrancando material, y una vez llegaba al final del agujero realizado previamente por la broca de 1.30 mm, se alejaba del material y se retiraba del interior de la pieza. Lo que se probó después de haberse roto prematuramente dos herramientas de mandrinar fue introducir la mandrina hasta el fondo de la pieza sin comer material, bajase, y saliese de la pieza arrancando material. El resultado no fue satisfactorio dado que la mandrina duraba igual o incluso menos.

Barajamos otras alternativas, como usar una mandrina más robusta o emplear un escariador después del taladrado. No obstante, antes de inclinarse por soluciones en esa dirección, se consultó la importancia de rugosidad de dicha superficie. Dado que después del mandrinado la siguiente operación es la de brochado, es esta última operación la que dejará la superficie donde apoyará la llave del dentista o protésico, transmitiendo el par de apriete al tornillo. De esta manera la superficie mandrinada nunca entra en contacto con nada durante la vida útil del tornillo, con lo que no se considera una superficie funcional. Cabe destacar que, aunque esto sea así, la dimensión del agujero final que resulte sí es de suma

importancia, dado que está calculado para que en el brochado solamente trabajen las puntas de la brocha y así disminuir los esfuerzos de la operación y el desgaste de la herramienta.

Es por este motivo por el que se probó a mecanizar el agujero cilíndrico final de diámetro 1.35 mm directamente con una broca de 1.35 mm. Los resultados fueron satisfactorios, puesto que, con la broca seleccionada, de 3 labios, y las condiciones de corte adecuadas, se consiguió estar dentro de las tolerancias dimensionales marcadas en el plano y con un acabado, aunque ligeramente más rugoso que con la mandrina, plenamente funcional, además de ahorrar tiempo de mecanizado y el uso de una herramienta.

Finalmente, la secuencia de operaciones en el contra cabezal quedó de la siguiente manera:

- Punteado con broca de 90º
- Taladrado con broca de 1.35 mm
- Brochado a 1.31 mm
- Repaso de la broca de 1.35 mm
- Para la operación de roscado, en el cabezal principal, se incluyó un repaso a fin de eliminar la rebaba generada durante la operación previa.

De cara a optimizar el proceso de brochado, realizado primeramente con una brocha hexagonal de 6 puntas y una sola entrada, se probó a realizar esta operación introduciendo la brocha hasta el 50%, retirándola, volviendo a introducirla al 70%, retirarla, y volverla a introducir al 100%, además de variar la velocidad de entrada y de salida. Finalmente se consiguió mejorar la vida de la herramienta de brochado en un 30%, pasando de durar unas 600 piezas a durar unas 800.

Se probó a añadir refrigeración con la bomba de alta presión empleando portaherramientas con refrigeración interna. De esta manera, el aceite incide de una manera más precisa en la punta de la herramienta, mejorando la evacuación de calor y aumentando la vida de las herramientas.

Una vez realizados estas modificaciones y mejoras se mecanizó el primer lote de prueba de 5000 unidades, obteniendo un tiempo de pieza inferior a un minuto, y unas piezas que cumplen con las tolerancias del plano y con las especificaciones de acabado superficial, ausencia de marcas y de rebabas.

Con la optimización llevada a cabo, la capacidad del torno de producir piezas es de alrededor de 50 piezas/hora.

## ***5.7. Documentación asociada con el proceso de mecanizado***

El proceso de mecanizado lleva consigo el uso de varios documentos que facilitan el seguimiento y el control de aquello que se mecaniza. En el presente apartado, se enumeran y se explican brevemente.

### ***5.7.1. Plano de la pieza***

Es el documento asociado al mecanizado que más información proporciona. De él parte el programa y los demás documentos. Alberga datos como la referencia de la pieza, versión, toda la información geométrica necesaria para su fabricación, material, etc.

### ***5.7.2. Orden de fabricación***

Documento que contiene la información del lote a mecanizar. Contiene la referencia de la pieza a mecanizar, el material del que está hecha, la cantidad de piezas del lote e información de la estrategia de verificación a seguir. Además del material y el diámetro de barra del cual se debe partir, también especifica la colada de material que se debe escoger. Esto es así para guardar la trazabilidad de los lotes fabricados.

### ***5.7.3. Pauta de control***

Documento que recoge las cotas del plano a verificar, sus valores límites, el instrumento de medida a utilizar y la frecuencia de medida de cada cota.

### ***5.7.4. Registro de mecanizado***

Hojas enumeradas y con espacios para anotar los valores medidos de cada cota de las piezas medidas del lote.

#### 5.7.5. Registro de herramientas

Documento empleado en la preparación de la máquina en el momento de entrada de un nuevo lote. Contiene información de las herramientas, pinzas y cañón a montar. Incorpora espacios para anotar los cambios de herramientas junto con el motivo (rotura o desgaste), y a qué número de piezas se realizó dicho cambio.

### 5.8. Verificación de piezas

Se establecen los criterios para llevar a cabo la verificación de los tornillos protésicos mecanizados. Se definen las cotas a verificar, las frecuencias y los instrumentos de medición. Según la norma ISO correspondiente, para un lote de 5000 piezas, se deberá realizar la correspondiente pauta de control como mínimo cada 25 piezas. Se decide hacer la verificación a las 24 piezas por simplificaciones a la hora de llevar la cuenta en las posiciones de las bandejas. Los instrumentos de medida empleados son los siguientes:

- Proyector de perfiles Mitutoyo. Mediante una combinación de luces y espejos, este instrumento proyecta el perfil de la pieza aumentado sobre una lámina semi-transparente en la que se pueden medir distancias en el eje horizontal, vertical, así como también ángulos. Además de medir cuantitativamente, resulta de gran utilidad a la hora de detectar visualmente posibles rebabas, imperfecciones en la rosca, chaflanes o radios.



Figura 23. Proyector de perfiles Mitutoyo

- Microscopio o visor. Es empleado para ver las piezas con un mayor zoom óptico. Permite observar la superficie mecanizada, detectar posibles marcas sobre la pieza y las roturas de algunas herramientas.



Figura 24. Visor de piezas

- Calibres a medida. Para las verificaciones dimensionales se emplean calibres a medida con la medida nominal y tolerancias del plano.
  - o Tampón liso Pasa/No Pasa diámetro 1.35 mm.

- Tampón hexagonal Pasa/No Pasa diámetro 1.31 mm.
  - Anillo de rosca M1.6 Pasa/No Pasa.
  - Calibre profundidad de agujero.
  - Calibre profundidad de brochado.
- Pie de rey digital Mitutoyo. Resolución de 0.01 mm y con protección contra salpicaduras de aceite.

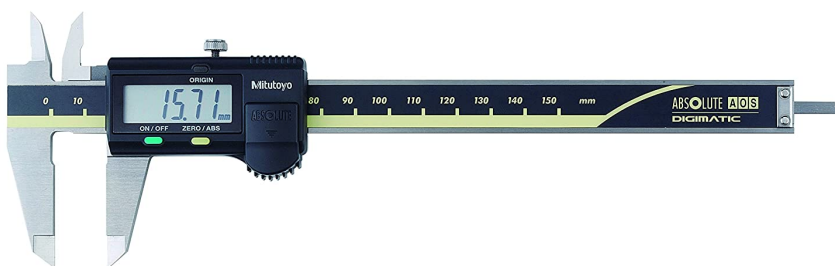


Figura 25. Pie de rey Mitutoyo

- Micrómetro digital. Se emplea para verificar medidas externas. Es un instrumento de medida de mayor precisión que el pie de rey, con una resolución de 0.001 mm. Cuenta también con protección contra salpicaduras de aceite.



Figura 26. Micrómetro digital

## ***6. MANIPULACIÓN: DESARROLLO DE PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO***

En el presente apartado se prototipa uno de los sistemas intervinientes en la manipulación de las piezas una vez estas son mecanizadas. Se tiene como objetivo diseñar y fabricar un prototipo completo del mismo, tanto de su estructura y mecanismo como del desarrollo de la electrónica y del software, que permita aumentar el grado de automatización del torno que mecaniza tornillos protésicos, y se pueda incluir dentro de una célula completamente automatizada.

### ***6.1. Necesidad y requerimientos***

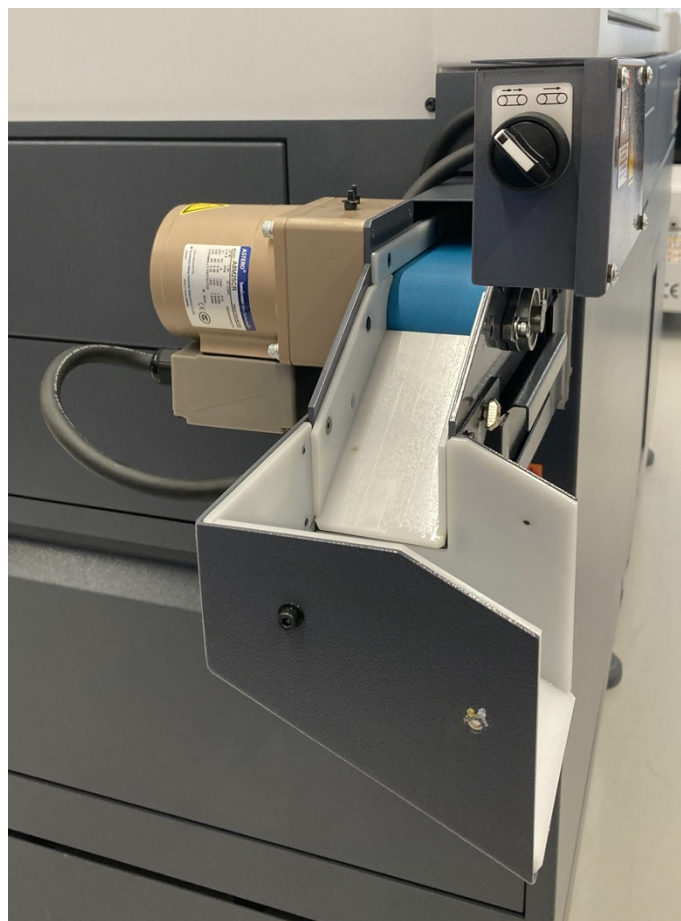
Una vez las piezas son mecanizadas, estas deben ser manipuladas de manera correcta y automatizada. Debe desarrollarse por tanto un prototipo de un sistema mecatrónico de reducidas dimensiones que guíe las piezas a su salida del torno y las posicione de manera automática en las diferentes posiciones de una bandeja de plástico, de forma que este paso (colocar las piezas en cada posición) sea llevado a cabo de manera autónoma, permitiéndole al operario ganar tiempo y poder realizar otras tareas.

El funcionamiento general debe ser el siguiente: Cuando las piezas son mecanizadas, estas caen a un cajetín situado en la parte frontal del torno, como el de la Figura 27. Otra alternativa que el fabricante de máquina herramienta incluye, es la incorporación de una cinta transportadora que traslada la pieza que acaba de ser mecanizada desde el interior del torno hasta el exterior, haciéndola deslizar por una rampa y cayendo en un recipiente, todas juntas y una tras otra, como la de la Figura 28.





*Figura 27. Cajetín de las piezas*



*Figura 28. Cinta y rampa de extracción de piezas*

Se pretende construir un sistema aprovechando la existencia y versatilidad de la cinta transportadora que incluye el torno. El objetivo es que, después de que la pieza caiga por la rampa, se coloque en la posición correspondiente de la bandeja de plástico, como la mostrada en la Figura 29. El sistema debe permitir seleccionar qué referencia de pieza se está mecanizando, dado que dicha pieza estará asociada a un tiempo de mecanizado, que será usado como intervalo entre movimientos sucesivos del brazo robótico.



*Figura 29. Bandeja de plástico para las piezas*

El movimiento buscado es el siguiente: en el plano horizontal, se deberá generar o bien el movimiento del elemento que expulsa las piezas de la cinta transportadora, permaneciendo estática la bandeja, o bien se deberá mover la bandeja, permaneciendo inmóvil el elemento desde donde caigan las piezas. Las piezas pasarán de la cinta transportadora a la bandeja por gravedad, tras deslizarse por la rampa. Para realizar dicho cometido, se propone el empleo de un brazo robótico que genere el movimiento adecuado. Dado que el posicionamiento de las piezas en la bandeja se lleva a cabo en un plano horizontal paralelo al suelo, el robot deberá ser de dos grados de libertad.

Debe diseñarse e implementarse por tanto un prototipo de brazo robótico que cumpla las siguientes condiciones:

---

- Realizar el posicionamiento de 24 piezas en cada uno de los alojamientos de una bandeja de plástico.
- Permitir colocar dicha bandeja de plástico siempre en la misma posición.
- Permitir parar e iniciar el ciclo en cualquier momento.
- Permitir seleccionar la referencia a mecanizar en cualquier momento.
- Funcionamiento estable y fiable.
- Sencillez.
- Durabilidad.
- Precio económico.
- Tamaño compacto
- Posibilidad de ampliación / mejora
- Aumento del grado de automatización del torno de cabezal móvil

## 6.2. Estado del arte

En este apartado se enumeran y analizan las posibilidades que nos otorgan las distintas morfologías de robots existentes en la industria actual, que nos permitan realizar el movimiento buscado, centrándonos en los de tipo cartesiano y tipo SCARA, por su relativa simplicidad y adecuación a la aplicación que concierne.

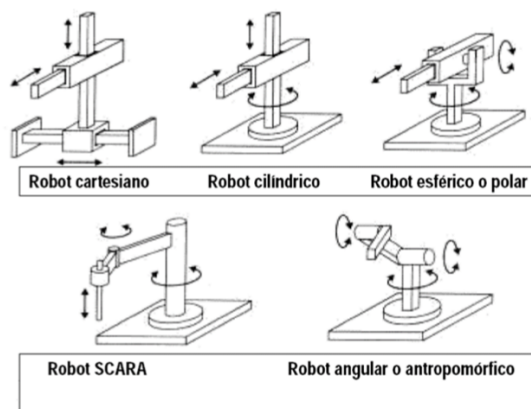


Figura 30. Principales morfologías de robots

Los robots de topología SCARA, siglas en inglés de *Selective Compliance Assembly Robot Arm*, son dispositivos robóticos programables de 3 y 4 grados de libertad. Estos robots están formados por una base vertical y dos brazos horizontales. El primer brazo se une a la base en una articulación que solamente permite la rotación entre ambos, y los brazos se unen entre sí en otra articulación que de nuevo solo permite la rotación. Siguiendo la analogía del cuerpo humano, al primer brazo se le llama brazo y, al segundo, antebrazo. De la misma manera, a la primera articulación se la conoce por hombro y, a la segunda, codo. La composición de movimiento de los dos primeros ejes da como resultado un desplazamiento en el plano X-Y. Estos robots cuentan además con una tercera articulación en su extremo que permite el movimiento vertical y de rotación.

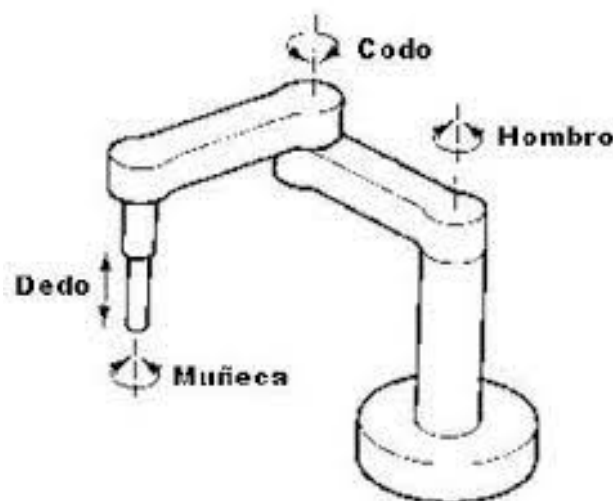


Figura 31. Morfología de un robot SCARA

Estos robots son compactos y relativamente sencillos de programar, puesto que el eje vertical o eje Z se encuentra desacoplado de los otros dos. Los robots tipo SCARA son ampliamente usados en la industria para todo tipo de aplicaciones, sobre todo en aquellas de peso limitado y que requieran una gran velocidad de operación, como procesos de manipulación, transporte, *pick&place* o embalaje. Se utilizan para operaciones de ensamblaje sencillas que no requieren una capacidad completa de orientación de las piezas manipuladas. Para estas tareas, los robots SCARA son más precisos y menos costosos que los robots articulados [9].



Figura 32. Ejemplo de robot SCARA

Por otro lado, están los robots cartesianos. Estos robots industriales poseen desde 2 hasta 6 ejes, con diferentes formatos constructivos para todo tipo de aplicaciones. Son robots muy extendidos en la industria, por ser robots simples, versátiles y económicos, con esquema de movimiento basado en el sistema de ejes cartesianos X-Y-Z. Consta de una serie de ejes que se desplazan cada uno de ellos de forma lineal, formando ángulos rectos entre ellos.

Las aplicaciones de robots cartesianos en la industria son muy variadas, yendo desde las configuraciones más sencillas de 2 ejes usadas como unidades de *pick&place*, usados para movimientos de recoger una pieza, desplazarla y volverla a posicionar en otro sitio, hasta configuraciones para fresadoras CNC potentes y robustas. En general, cualquier proceso que incluya desplazamiento de piezas y herramientas en coordenadas cartesianas y que no necesite de cambio de ángulos de orientación, es susceptible de ser resuelto con un robot de tipo cartesiano. Otro ejemplo de uso de esta configuración se encuentra en la mayoría impresoras 3D por Modelado por Deposición Fundida (FDM), donde en la extremidad de la estructura se incorpora el extrusor de plástico que se deberá mover en el espacio sin necesidad cambiar su ángulo [10].



Figura 33. Ejemplo de robot cartesiano

En cuanto a la instalación mecánica, una ventaja del robot tipo SCARA frente al cartesiano es que esta se lleva a cabo de una manera más sencilla, puesto que un SCARA solamente se atornilla en la base, a diferencia del cartesiano, que requiere de la fijación de múltiples componentes.

En general, los robots tipo cartesiano poseen una tipología que permite diseñarlos con grandes dimensiones capaces de abarcar una gran superficie de trabajo. Por el contrario, los SCARA se ven más limitados en este aspecto. Además, mientras los cartesianos abarcan un volumen de trabajo cúbico, el SCARA tiene un volumen de trabajo cilíndrico con un área inaccesible tanto en torno a la base como en su parte trasera. En la Figura 34 se ve la comparativa entre ambas tipologías.

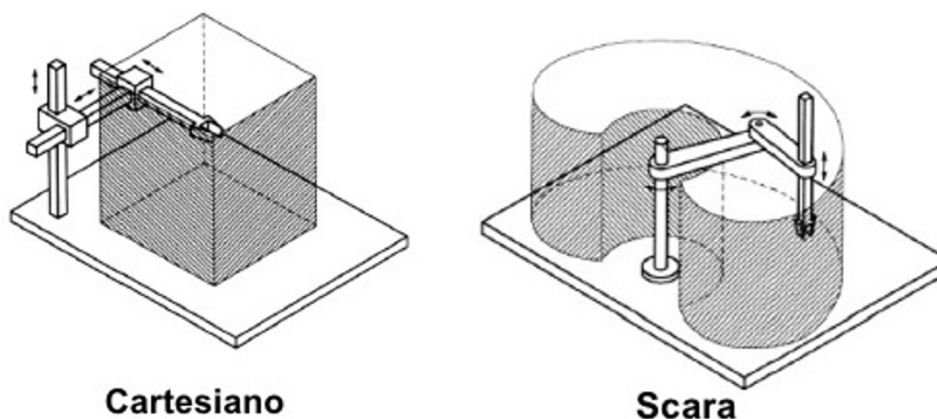


Figura 34. Volumen de trabajo robot SCARA y cartesiano

En cuanto a la carga máxima que los robots pueden manejar, los cartesianos, por lo general, son capaces de soportar una más elevada que los de tipo SCARA, aunque estos últimos permiten una mayor velocidad en los movimientos.

Una vez analizadas las morfologías y aplicaciones de dos de los tipos de robots más empleados en la industria, en el siguiente apartado se escogerá una de ellas para llevar a cabo el diseño y el desarrollo del prototipo de brazo robótico que como principal elemento del sistema mecatrónico a desarrollar.

### **6.3. Diseño conceptual genérico del prototipo**

Una vez examinadas las posibilidades existentes para conseguir el movimiento deseado, estas son analizadas y comparadas. Por un lado, el robot de tipo SCARA parece más adecuado para provocar el movimiento de aquello que guíe a la pieza encima de la bandeja. De esta manera, manteniendo la bandeja fija en el espacio, y conociendo cada una de sus posiciones, solamente se tendría que posicionar el extremo del robot, unido a algún elemento flexible, que guíe las piezas y que sea capaz de soportar los movimientos del brazo sin romperse o dañarse. Por otro lado, que el robot cartesiano sería más apto para generar el movimiento de la bandeja en el plano horizontal.

Ambas aproximaciones tienen prácticamente el mismo nivel de dificultad, y ambas son adecuadas para la aplicación presente, pues el resultado sería el mismo. La decisión sobre cuál de los dos métodos seguir deberá realizarse entonces pensando en la continuidad del proyecto de automatización del

conjunto de tornos unidos al sistema de verificación. En dicho sistema, las bandejas vacías se colocarían debajo de la rampa donde caen las piezas y, una vez llenas, irían de manera guiada a la zona de inspección y verificación. Con el objetivo de hacer este prototipo y la continuación lo más compatibles posible, se prefiere generar el movimiento en el tubo por el que bajen las piezas, y mantener la bandeja estática.

Se empleará por tanto un brazo robótico tipo SCARA de 2 grados de libertad, cuyo extremo se moverá en el plano cartesiano paralelo al suelo y estará unido a un tubo flexible que guíe las piezas a cada una de las posiciones de la bandeja. Las piezas pasarán de la rampa por la que se deslizan al tubo flexible mediante una pieza que funcione como embudo o colector guía de las mismas. La bandeja deberá permanecer unida al conjunto en una posición conocida e invariable.

El control del mecanismo se realizará mediante un Arduino o microcontrolador similar, que recibirá valores de entrada desde un teclado numérico, procesará la información y mostrará lo que corresponda en una pantalla LCD. El movimiento de los brazos será proporcionado por dos actuadores eléctricos de reducido tamaño. Tanto la estructura como los componentes del prototipo se fabricarán mediante impresión 3D de filamento en material PLA.

#### ***6.4. Diseño mecánico conceptual***

La estructura mecánica a diseñar se puede dividir en tres grandes partes:

- El colector por donde bajen guiadas las piezas. Irá atornillado a la estructura de la cinta transportadora. En su parte inferior se le deberá poder acoplar un tubo de plástico transparente y flexible, por el que bajarán las piezas por gravedad hasta la bandeja. Debe contar con la inclinación adecuada y con una rugosidad mínima para facilitar el deslizamiento de las piezas hacia el tubo de plástico.
- La estructura de soporte del brazo robótico, de la electrónica y de la bandeja. Deberá servir de base del robot SCARA y soportar la articulación del hombro, el Arduino, teclado y LCD. Esta estructura deberá ser enteramente soportada por la estructura existente en la cinta



transportadora, quedando elevada del suelo, evitando así entorpecer las tareas de limpieza del mismo, evitar tropiezos y hacerlo lo más compacto posible.

- Los eslabones y articulaciones del brazo robótico. Estarán compuestas por el hombro, brazo, codo y antebrazo. Las dimensiones de sus brazos serán calculadas mediante la correspondiente síntesis del mecanismo, procurando que el tamaño sea el más reducido posible. El extremo deberá poder agarrar el tubo de plástico por el que deslicen las piezas, pero sin presionarlo demasiado. El par necesario para provocar el movimiento de las articulaciones hombro y codo será proporcionado por dos servos de reducido tamaño.

El primer paso antes de comenzar con el proceso de diseño y con el objetivo de facilitararlo, es tomar las medidas principales de la cinta y de la rampa, y se modelarlas en el ordenador mediante el software SolidWorks. Los instrumentos de medición utilizados para ello fueron un pie de rey digital y una cinta métrica. Una vez la estructura existente o bastidor está en formato digital, se comienzan con los bocetos a mano alzada y con los diseños iniciales en SolidWorks.

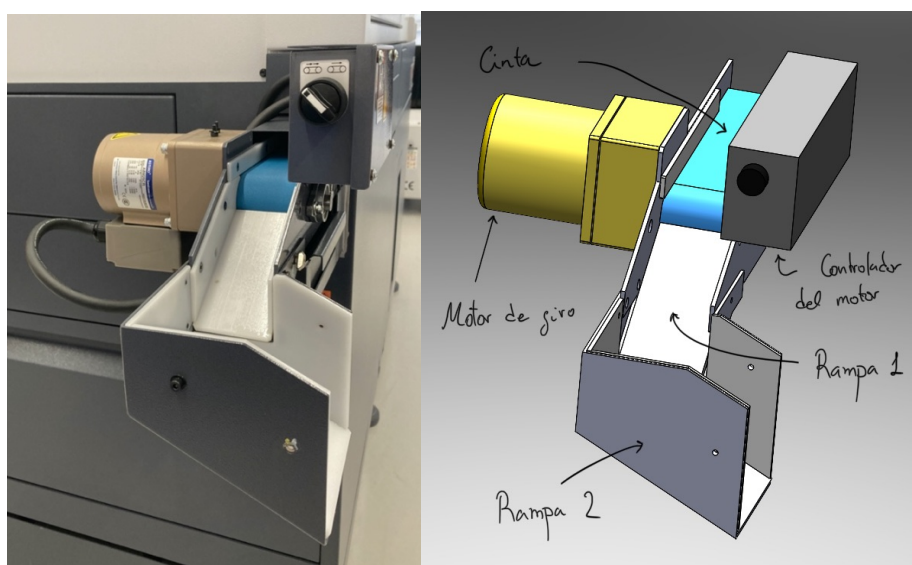


Figura 35. Cinta y rampa modeladas vs sistema real. Vista 1

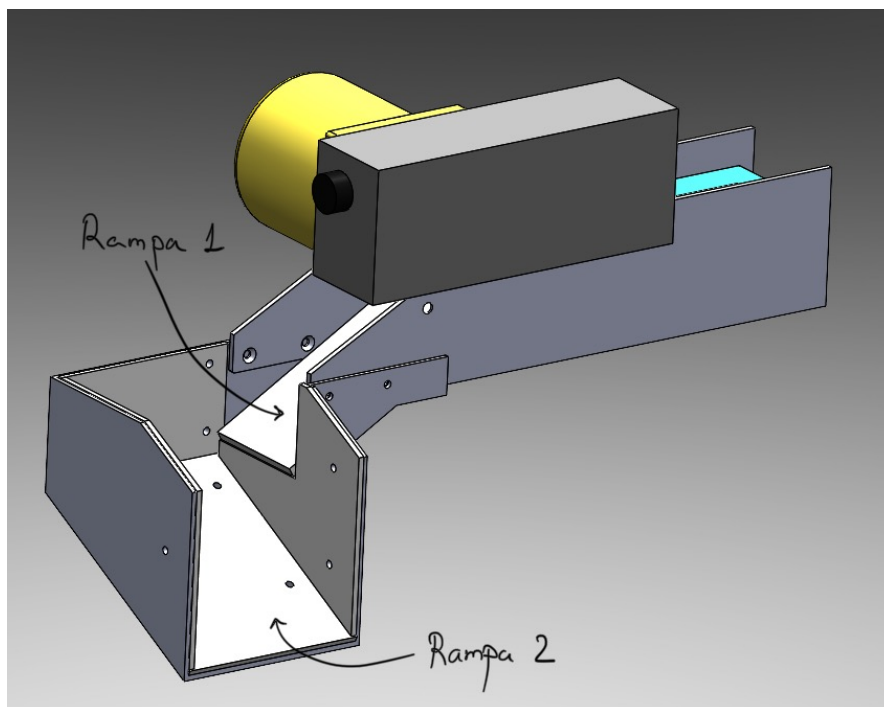


Figura 36. Cinta y rampa modeladas. Vista 2

Para el diseño del prototipo primeramente se piensa en emplear la cinta solamente con las dos rampas desmontadas, dado que ambas se pueden desacoplar con facilidad de la estructura principal. En la Figura 37 se muestra el primer boceto en papel de una idea de diseño. En este diseño, tanto el embudo o colector como la estructura que soporta la electrónica, el servo del hombro y los brazos van atornillados en los agujeros existentes en cada lateral de la chapa, dejando 2 para el embudo y 4 para la estructura.

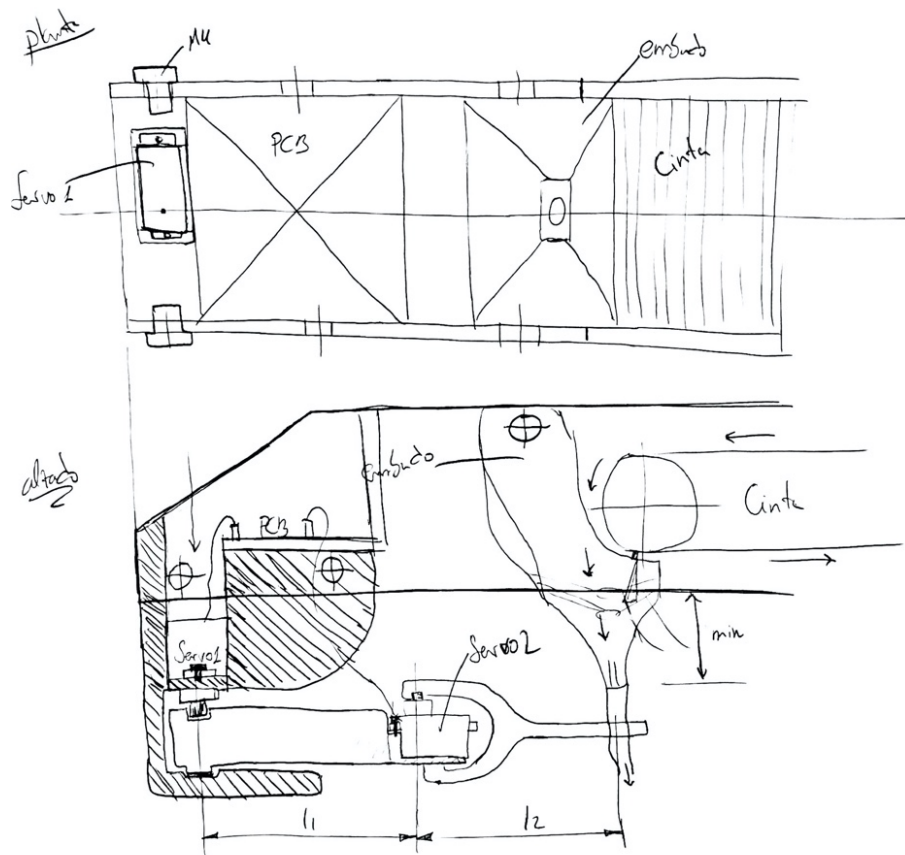
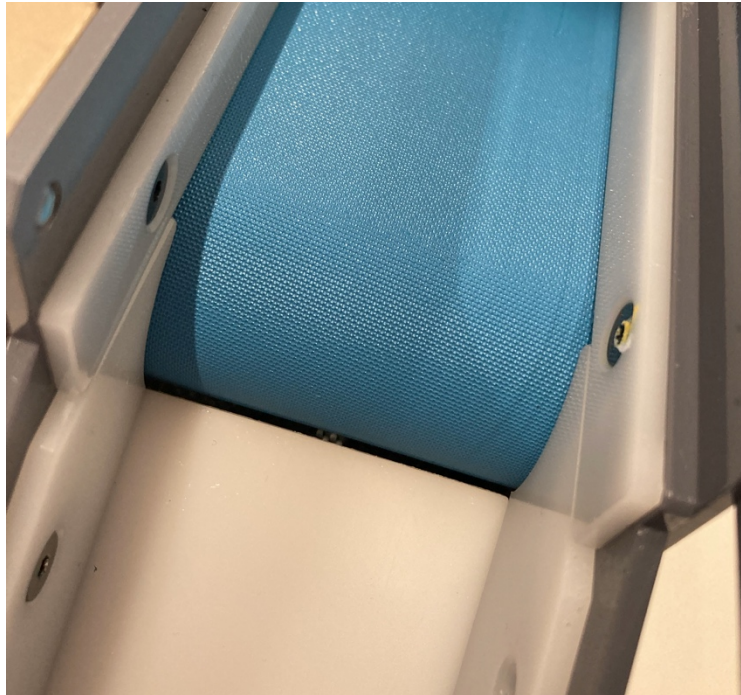


Figura 37. Primer diseño conceptual mecánico

En este diseño, una vez se posiciona el brazo en su lugar, se introduce el servo verticalmente desde arriba y se fija mediante algún sistema de fijación tipo tapa o atornillado directamente a la estructura. En la parte superior de la estructura se coloca la electrónica necesaria para el funcionamiento del sistema. Este planteamiento presenta la ventaja de que, al prescindir de las rampas que incorporan la cinta, el mecanismo queda mucho más compacto que con ella, pasando más desapercibido y optimizando el espacio disponible. Sin embargo, esta aproximación presenta un problema externo al funcionamiento en sí mismo del mecanismo: cuando las piezas son transportadas en la cinta, con estas van acompañadas de una pequeña cantidad de aceite. Cuando la pieza pasa de la cinta a la rampa, el espacio existente entre ambas es suficiente como para que el aceite gotee en un depósito situado debajo de la rampa, pero las piezas deslicen por la rampa prácticamente libres de aceite. Si se decide seguir este diseño, se corre el riesgo de que el aceite baje por el embudo y por el tubo de plástico, y consecuentemente caiga con la pieza en la bandeja junto con las piezas, siendo necesaria la incorporación de algún otro sistema que recircule de nuevo el aceite a la máquina.



*Figura 38. Espacio entre la cinta y la rampa*

Dado que se prima más la sencillez y funcionalidad del mecanismo que a que ocupe menos espacio, se decide sacarle partido a la rampa y al sistema de recirculación de aceite incorporado y diseñar el mecanismo empleando dicha rampa, por donde las piezas caen libres de aceite. Se llega así al segundo diseño conceptual, mostrado como boceto en la Figura 39.

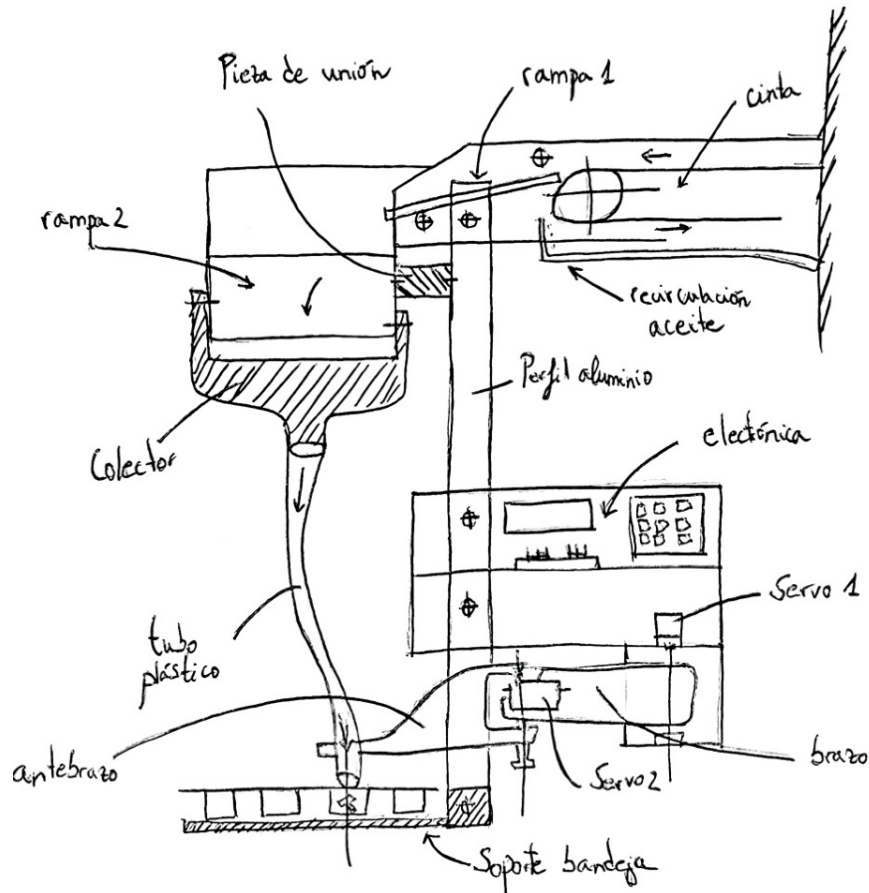


Figura 39. Segundo diseño conceptual mecánico

La unión del servo con el bastidor se realiza de igual manera que en el primer diseño. En este diseño también se aumenta la distancia vertical existente entre el colector y la bandeja. Dicha distancia es necesaria dado que el tubo de plástico necesita unos 150 mm para poder moverse con facilidad de una celda de la bandeja a la otra. En este segundo diseño se incorpora un perfil de aluminio que permita aumentar esta distancia, además de hacerla regulable y poder ajustarla hasta que esta sea la ideal, además de servir de soporte de la electrónica y del brazo robótico.

En cuanto al diseño de la articulación del codo, se realiza un boceto de una posible solución, donde se muestra la parte opuesta al eje del servo. La idea es insertar en el brazo, colineal al eje de giro del servo y del lado opuesto al mismo, un eje sobre el que deslice un cojinete de fricción alojado en el antebrazo.

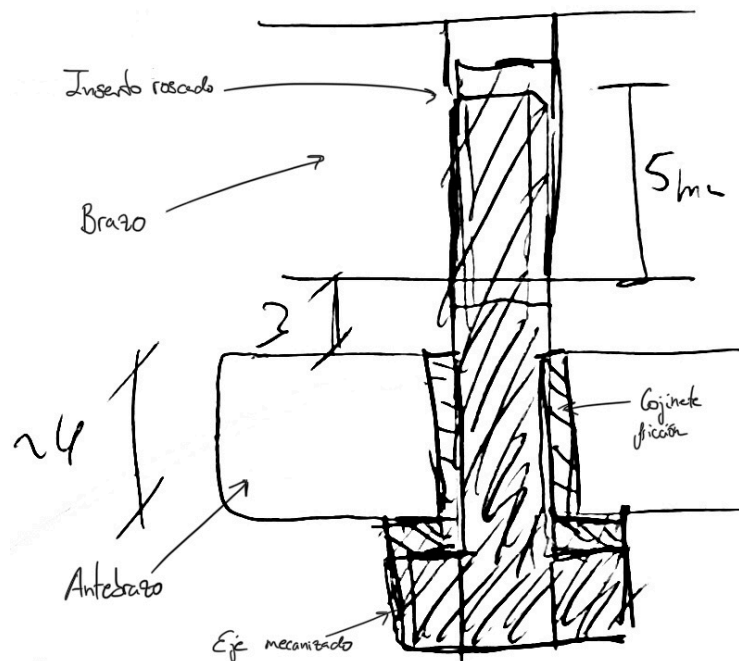


Figura 40. Diseño conceptual articulación codo

Una vez se tiene claro cuál es la aproximación de diseño a tomar, se comienza a diseñar en SolidWorks las primeras piezas. Se modela también el perfil de aluminio de 30x30 mm, así como los componentes electrónicos puesto que el diseño de alguna parte se verá influenciado por sus dimensiones.

### 6.5. Diseño conceptual del hardware electrónico

El prototipo de brazo robótico a realizar deberá contar con un hardware electrónico que le permita recibir, procesar y mostrar la información relacionada con el movimiento de los brazos, además de proporcionar dicho movimiento. Para este flujo de información será necesario el uso de un microcontrolador. En un inicio, por su sencillez y versatilidad, se piensa en un Arduino, en el cual un microcontrolador está montado en una tarjeta electrónica con posibilidad de interactuar directamente con sus pines de entrada y salida.

Para recibir información se usará un teclado numérico y, para mostrarla, una pantalla LCD. De procesar la información y realizar los cálculos necesarios se encargará el microcontrolador, y de ejecutar los movimientos correspondientes 2 servomotores. Desde el teclado numérico se podrá introducir el

---

número de programa a ejecutar, en función de la pieza que se esté mecanizando, se podrá iniciar el ciclo y pararlo. En la pantalla LCD se mostrarán datos como el tiempo restante entre movimientos del brazo, el número de programa seleccionado, o mensajes interactivos de puesta en marcha y parada del movimiento.

Para el movimiento de los brazos se piensa desde un inicio en los servos SG-90 por su reducido tamaño y versatilidad. Estos servos necesitan 5V como alimentación, que serán suministrados directamente por el Arduino, una vez se valide el consumo de corriente total y se compare con la capacidad del Arduino para suministrarla. De ser demasiada la corriente que el conjunto de teclado, LCD y servos consume, se barajará el uso de drivers con alimentación independiente comandados mediante dos señales PWM del Arduino.

Con el objetivo de simplificar las conexiones cableadas entre los periféricos y el Arduino, se ve conveniente diseñar y fabricar una tarjeta electrónica de adaptación, específica para los conectores a emplear, que se insertará directamente sobre los pines del Arduino.

Respecto a la alimentación, dado a que el prototipo a desarrollar permanecerá estático en un lugar fijo, no se considera necesario ni correcto diseñar un sistema de alimentación mediante baterías. Se buscará una alimentación directa desde la red de tensión alterna de 230V mediante un convertor a corriente continua y menor voltaje. Se debe incorporar un interruptor *On/Off* que permita poner en marcha y apagar el sistema sin necesidad de extraer el cable del sistema.

Tras un primer análisis de cómo será el hardware electrónico y la alimentación del prototipo, se recogen de forma genérica los siguientes componentes a usar:

- Arduino UNO
- 2 servos SG-90
- 1 teclado numérico
- 1 pantalla LCD
- Adaptador de corriente y conectores
- Cables

- 1 interruptor *On/Off*
- PCB de adaptación para el Arduino UNO y conectores

## 6.6. Diseño conceptual del software

El funcionamiento básico que el mecanismo debe seguir es el siguiente: Cada pieza que se mecaniza tarda un tiempo determinado, que suele oscilar entre los 40 y 120s. Cuando se esté mecanizando una pieza en concreto, que tarde un tiempo definido y conocido, el brazo deberá cambiar de posición al cabo de dicho tiempo. Se deberá poder seleccionar la referencia de la pieza a mecanizar en las siguientes situaciones:

- Al encender el Arduino
- Al finalizar el ciclo de 24 piezas
- Al parar el movimiento en medio de un ciclo

Se deberá asociar a cada referencia un tiempo de cambio entre sucesivas posiciones. Este tiempo deberá ser fácilmente identificable en el programa por si dichos tiempos son diferentes en el futuro. Lo que no variará será el número de programa asociado a cada pieza. Si la pieza X tiene asociado el programa 1, esto no cambiará. Sin embargo, si en la actualidad la pieza X se mecaniza en 38s, es posible que ese tiempo, en el futuro, pueda variar. También se deberá asignar a cada posición de la bandeja a una posición del servo 1 y servo 2. Por ejemplo, la posición (1,1) será 30º para el servo 1 y 45º para el servo 2.

En el programa, antes del bucle de ejecución continua, deberán estar presentes las siguientes secuencias:

- *Includes* de las librerías a usar.
- Declaración de variables (tiempo\_espera, programa...).
- Declaración de las salidas digitales de los servos y de las entradas del teclado numérico.
- Configuración de la comunicación I2C con el LCD.
- Definición de cada una de las posiciones de la bandeja.



- Configuración de la función interrupción ejecutada cada *tiempo\_espera* segundos (TIMER).
- Función cambio de posición.
- Función asigna tiempo en función del número de programa recibido.

En el bucle ejecución continua se deberá mostrar por pantalla el tiempo restante para el próximo cambio de posición. Cuando esto suceda, se llamará a la función de cambio de posición. Se deberá poder leer en todo momento el teclado por si se introduce la tecla asociada con la parada del movimiento. En la Figura 41 se puede ver un diagrama de flujo del funcionamiento básico del software.

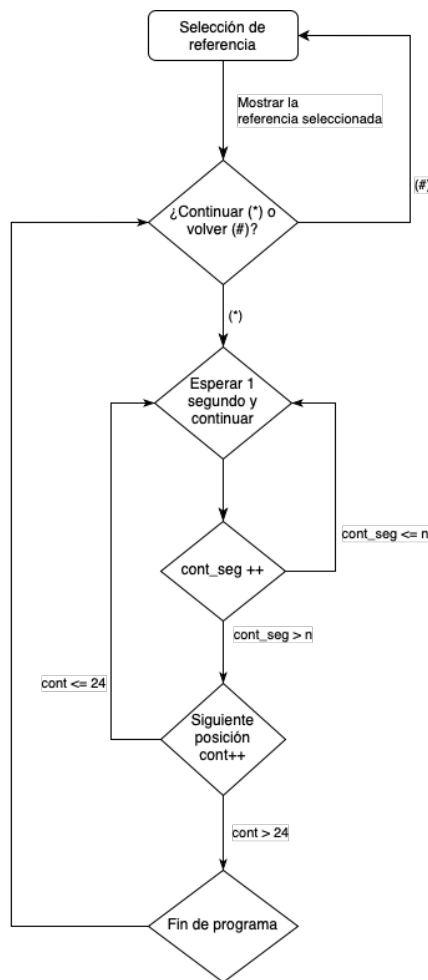


Figura 41. Diagrama de funcionamiento genérico del software

## 6.7. Síntesis del robot SCARA

En el presente apartado se calcula la síntesis del mecanismo que forma el robot SCARA, es decir, la longitud que deben tener el brazo y el antebrazo, y la distancia entre el eje del hombro y la posición de la bandeja más cercana al mismo, teniendo en cuenta los ángulos mínimos y máximos de la articulación del codo y las dimensiones de la bandeja existente. El robot deberá recorrer sobre la bandeja un espacio de 150 mm en el sentido de su longitud y 102 mm en el sentido de su anchura, es decir, según la Figura 42, las coordenadas del punto  $C_2$  son (150, 102).

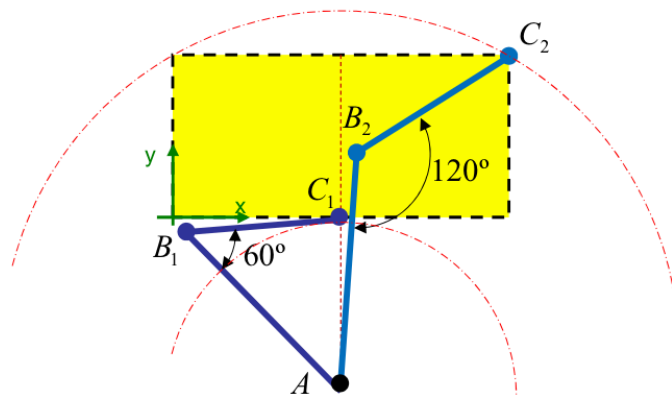


Figura 42. Síntesis del robot SCARA

Para el desarrollo de la síntesis del mecanismo, el proceso será el siguiente: se parte del espacio que el extremo del brazo robótico deberá realizar (150 x 102 mm), y se supone el ángulo mínimo y máximo para la articulación del codo como 60° y 160° respectivamente. Se le proporciona al programa de Matlab adjunto en los Anexos una aproximación de dónde empezar la iteración. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 4. Cuando se realice el diseño de detalle del brazo, antebrazo, y del posicionamiento del hombro, se deberán cumplir las restricciones de ángulos mínimos para el codo, y se verificará en el CAD que efectivamente todas las posiciones de la bandeja son alcanzables.

Tabla 4. Resultados de la síntesis

Longitud del brazo	Longitud del antebrazo	Coordenada $y_A$
132 mm	106 mm	-122 mm

## 6.8. Método de fabricación y validación anterior al diseño

Las piezas de este prototipo serán fabricadas en una máquina de fabricación aditiva o impresión 3D. La impresora es de extrusión de filamento por Modelado de Deposición Fundida (FDM) tipo *bowden*, modelo Raise 3D Pro2 Plus. Su volumen de trabajo es de 280 x 305 x 605mm. Las piezas serán fabricadas en plástico PLA y se podrá utilizar soportes del mismo también de este material, que se tendrán que quitar de forma mecánica. Además de la impresora 3D, se cuenta con el torno CNC para mecanizar piezas metálicas de revolución, en caso de ser necesario.



Figura 43. Impresora Raise 3D Pro2 Plus

Con el objetivo de conocer la impresora con la que se fabricarán las piezas del prototipo, se preparan varias piezas a modo de probeta. La primera probeta se diseña con forma de caja vaciada, cuya distancia entre caras coincide con la separación medida entre las caras de la cinta sin la rampa: 61 mm. Aunque esta distancia en concreto no será usada en ninguna pieza de las que se vaya a imprimir, será un buen indicador de lo bien que ajusta la dimensión teórica, la obtenida y la medida.

Además, cuenta con cuatro agujeros, dos a cada lado, alineados y con una separación de 35 mm, distancia medida entre dos de los agujeros de la cinta. Se diseñan con un avellanado con el objetivo de ver cómo los imprime.

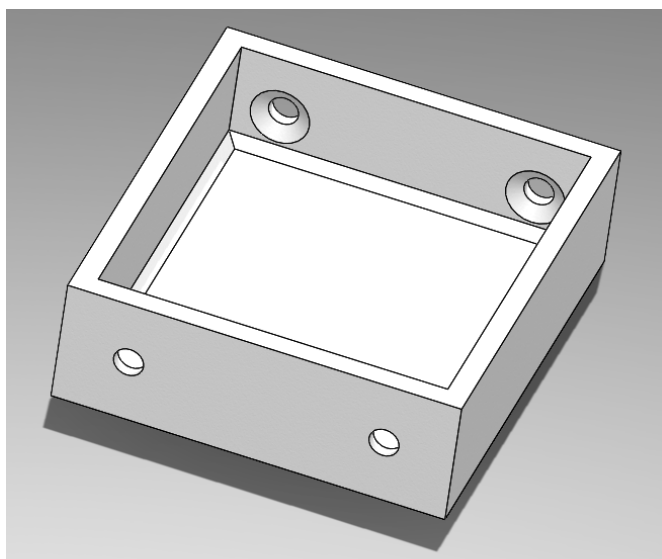
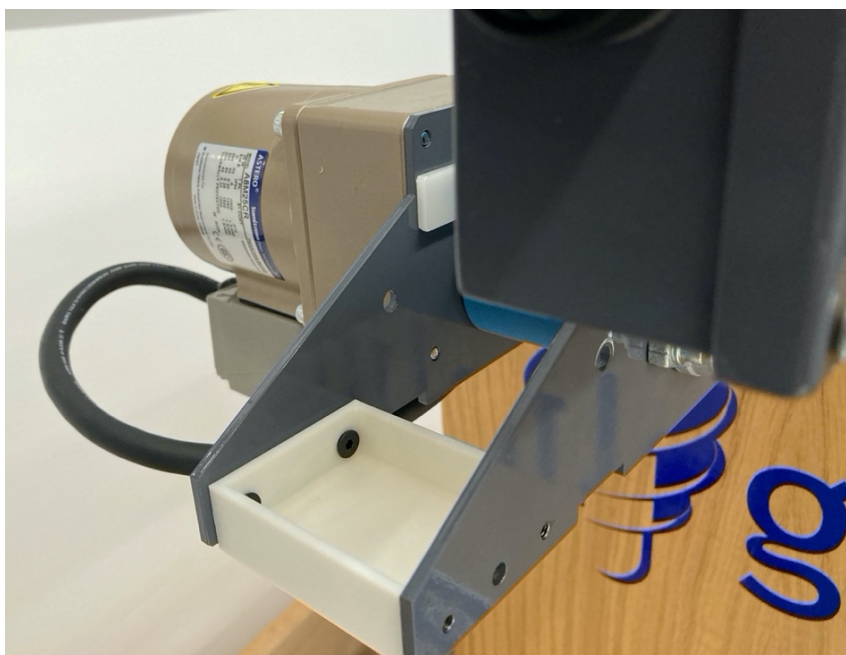


Figura 44. Probeta de prueba de impresión

Una vez impresa se midió y se unió mediante tornillos M4 a la cinta. El resultado fue muy satisfactorio puesto que la misma entraba rozando lo justo en las paredes, y la distancia entre los agujeros era la adecuada, además de medir un valor muy próximo al nominal. El avellanado de los agujeros también lo reprodujo con gran detalle.

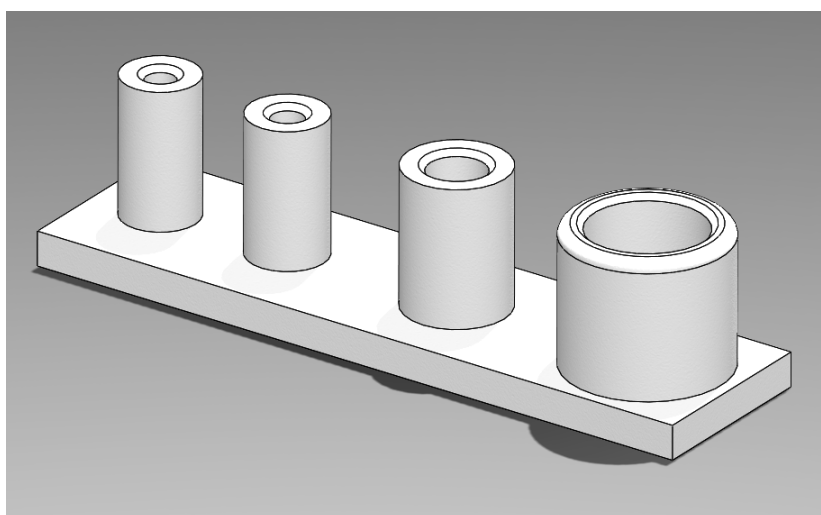


Figura 45. Probeta de prueba impresa y medida



*Figura 46. Probeta impresa atornillada a la cinta*

En la segunda probeta de impresión se imprimen varios agujeros a diferentes diámetros con el objetivo de roscar tornillos autorroscantes, otro con el objetivo de insertar un cojinete de fricción, y otro para alojar un componente del sistema de alimentación. Se sacan conclusiones dimensionales que son utilizadas para el diseño de detalle de los componentes.



*Figura 47. Probeta de agujeros impresa - diseño*



Figura 48. Probeta de agujeros impresa - prueba

## 6.9. Diseño mecánico de detalle

En el presente apartado se expone el diseño mecánico de detalle llevado a cabo para cumplir con las especificaciones de funcionamiento del prototipo y cumpliendo con las restricciones impuestas por los métodos de fabricación disponibles.

### 6.9.1. Colector

El primer elemento que se diseña es el colector o embudo. Los requisitos que esta pieza debe cumplir para funcionar correctamente son los siguientes:

- Unión atornillada al bastidor en los agujeros existentes en el mismo. Dado que los agujeros con los que cuenta la cinta son de M4, se diseñan unas orejetas con agujeros pasantes para tornillos de dicha métrica, quedando fijados a la cinta con las correspondientes tuercas. Se aplica una sobre dimensión de 0.5 mm a la distancia entre las orejas de fijación al bastidor para asegurar que la unión se realiza sin generar tensiones que abran las orejetas del colector.

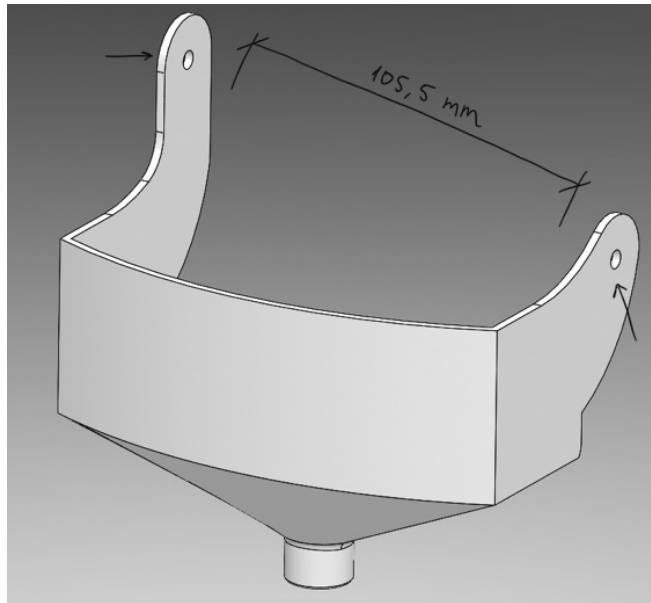


Figura 49. Diseño del colector. Agujeros y separación entre orejetas

- Se le dará la suficiente inclinación para asegurar que las piezas siempre caigan al tubo de plástico.

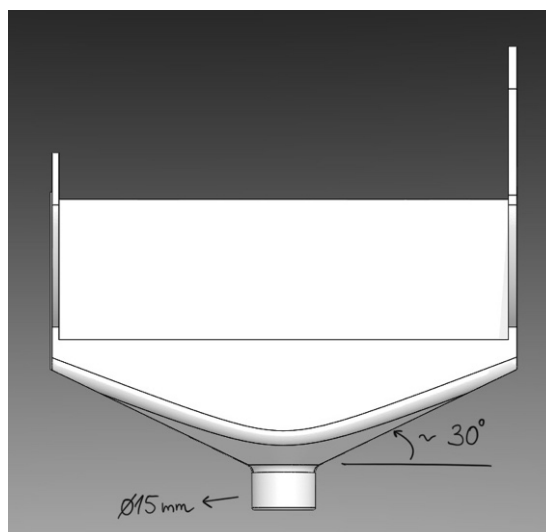


Figura 50. Diseño del colector. Inclinación y diámetro de la boquilla

- La superficie de deslizamiento de las piezas deberá ser lo más lisa posible. Para ello, la pieza deberá imprimirse con dicha superficie orientada en la parte opuesta a la cama de impresión, evitando así que se generen soportes en ella, que al quitar dejen marcas en la superficie, tal y como se muestra en la Figura 51.

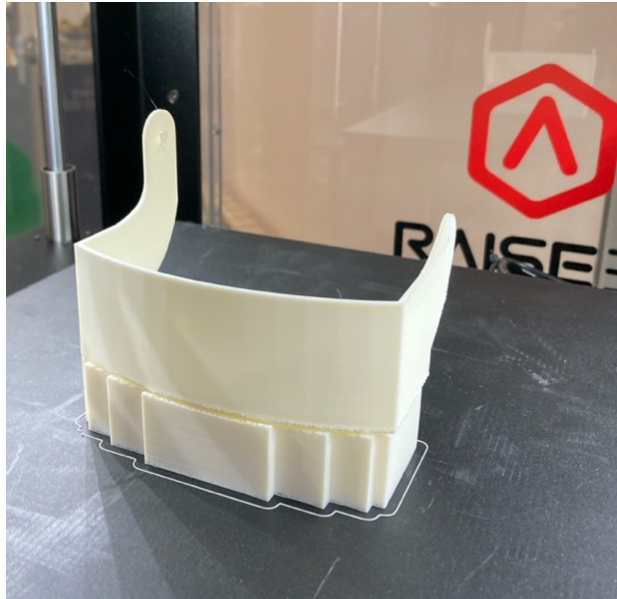


Figura 51. Orientación del colector en la impresión

- Conexión al tubo de plástico sólida y adecuada. El tubo se unirá al colector introduciendo este por fuera de la boquilla del colector y asegurando la unión mediante una brida. Se diseña con un diámetro exterior de 15 mm, y una pared de 1.5 mm, quedando así un diámetro interior de 12 mm, suficiente para el tornillo que se mecaniza, así como para la mayoría de las demás piezas.



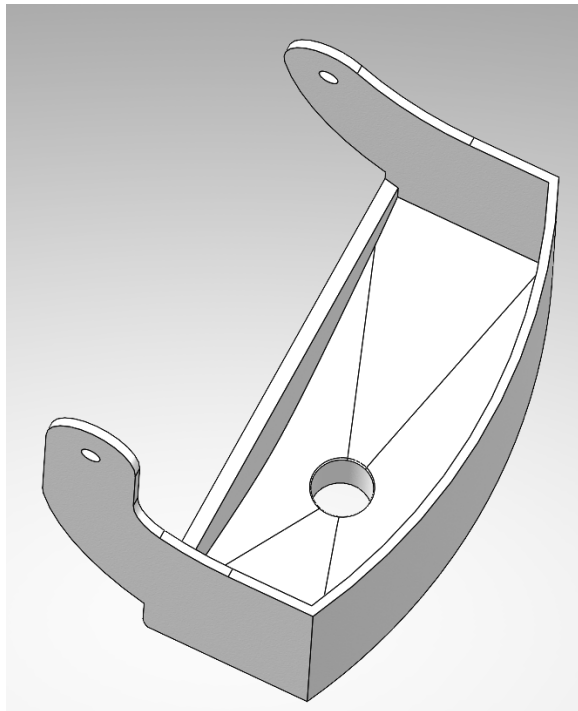


Figura 52. Diseño del colector. Vista superior

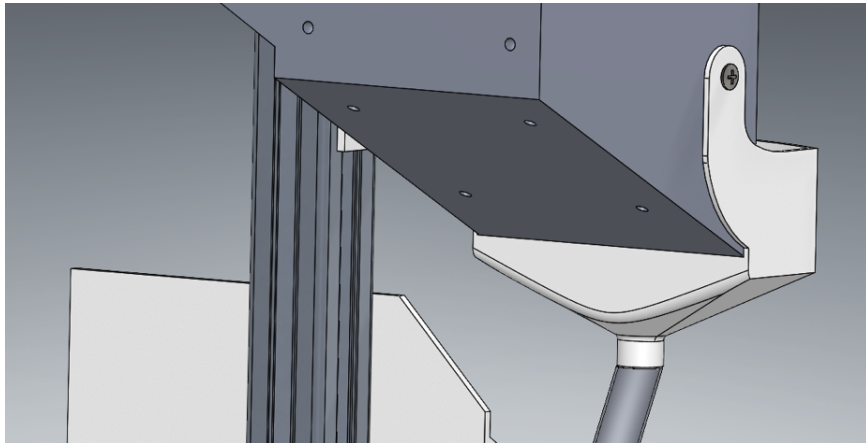


Figura 53. Unión del colector al bastidor. Vista Posterior

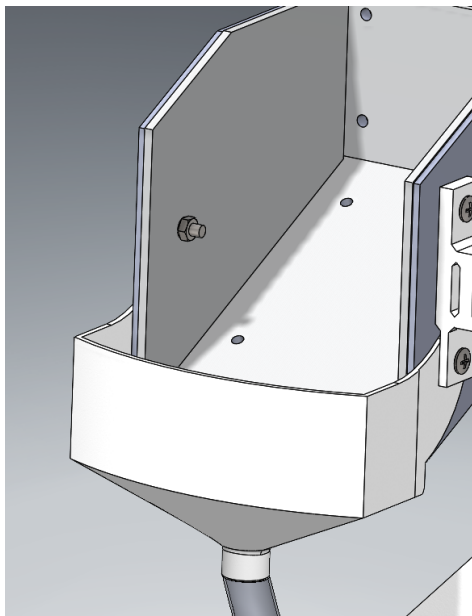


Figura 54. Unión del colector al bastidor. Vista frontal

La tornillería necesaria para esta pieza es la siguiente:

- 3 tornillos M4x16 mm
- 3 tuercas M4

#### 6.9.2. Unión del perfil de aluminio al bastidor

Tal y como se decidió durante la etapa de diseño conceptual, se adquiere un perfil de aluminio de 30 x 30 mm, y una longitud de 600 mm. Se modela en SolidWorks y se busca la mejor manera de unirlo al bastidor. Por un lado, tal y como se ve en la Figura 56, se ancla al bastidor directamente a uno de los agujeros con los que cuenta. Se hace uso de las tuercas de cabeza de martillo especiales para estos perfiles de aluminio, como la de la Figura 55, y de un tornillo M4 avellanado.



Figura 55. Tuerca tipo martillo para perfil de aluminio

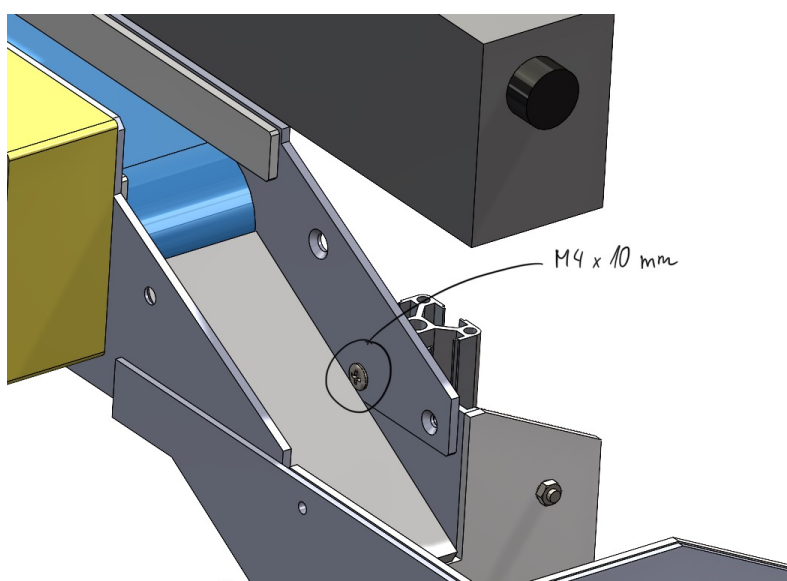


Figura 56. Unión del perfil al bastidor. Parte trasera

Además de esta unión, se diseña una pieza intermedia que una el perfil al bastidor en más puntos, de manera que la unión se vea rigidizada y se eviten movimientos innecesarios durante el funcionamiento del sistema. Dicha pieza cuenta con dos agujeros para su unión al bastidor, dos agujeros para introducir un tornillo pasante que rosque en dos tuercas tipo martillo insertadas en el perfil, y dos agujeros extra destinados a facilitar el montaje permitiendo pasar la llave que apriete los tornillos. Los 4 agujeros destinados a que asienten los tornillos son avellanados.

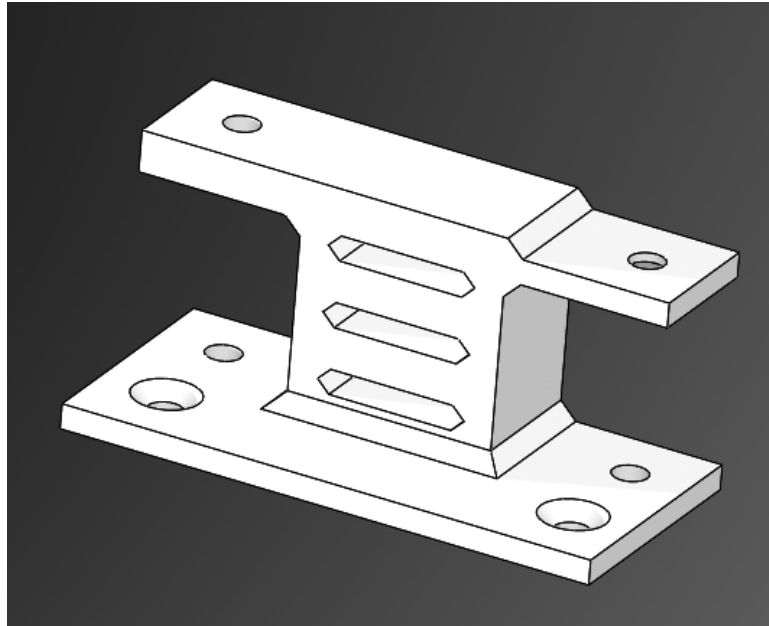


Figura 57. Pieza de unión intermedia

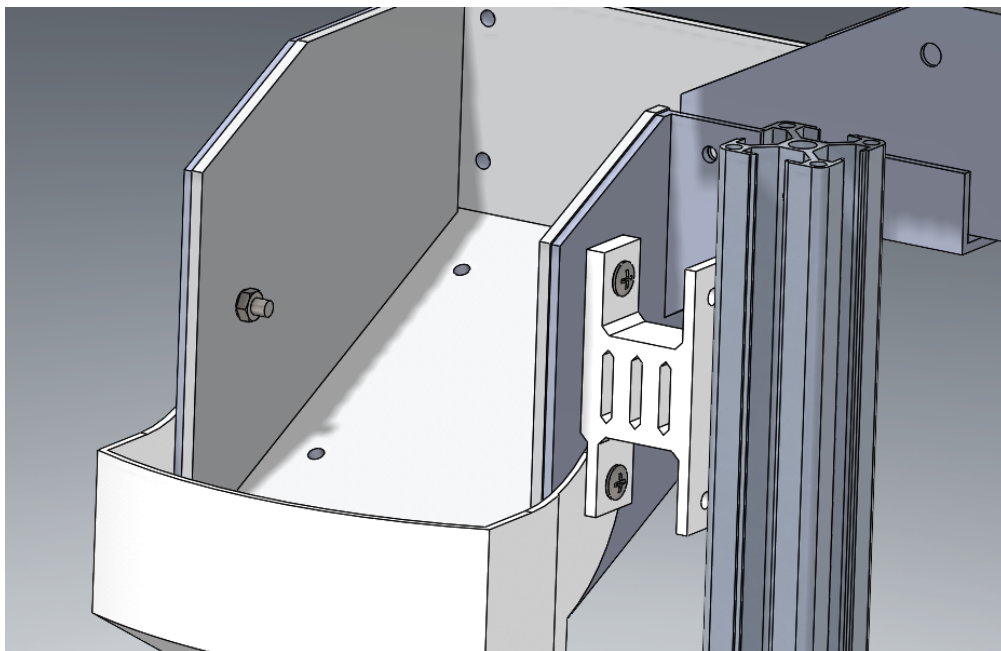


Figura 58. Unión del perfil al bastidor: vista lateral derecha

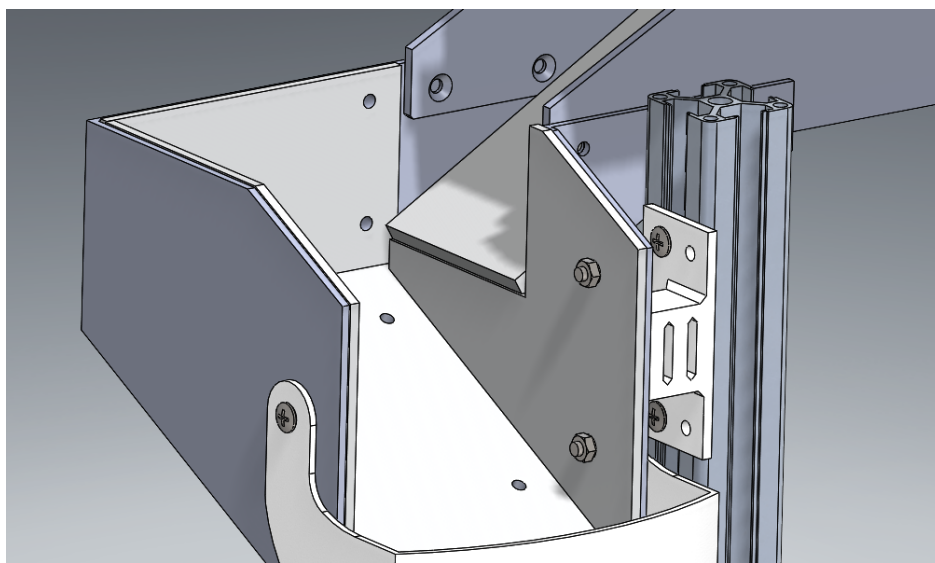


Figura 59. Unión del perfil al bastidor: Vista lateral izquierda

La tornillería necesaria para esta pieza es la siguiente:

- 2 tornillos M4x12 mm
- 2 tuercas cabeza de martillo M4

### 6.9.3. Base principal

En el presente apartado se exponen los requisitos de diseño que debe cumplir esta pieza, así como su resultado una vez ha sido diseñada en SolidWorks. Esta pieza deberá cumplir varias funciones. Por un lado, será el alojamiento del Arduino y del sistema de alimentación. Por otro lado, deberá alojar la articulación del hombro y el correspondiente servo.

Esta pieza debe contar con las siguientes características:

- Aletas para unión al perfil de aluminio
- Resaltes para fijar el Arduino y la PCB diseñada mediante tornillos.
- Agujero para poder introducir el cable USB para programar el Arduino.
- Rejillas de ventilación que faciliten el intercambio de calor con el exterior.
- Espesor mayor en las esquinas delanteras para poder introducir insertos roscados para plástico que permitan la unión entre la tapa superior y la estructura principal.

- Asiento para introducir el servo del hombro.
- Agujeros para la tapa de fijación del servo.
- Asiento para introducir un cojinete de fricción para el hombro.
- Agujero para pasar el *jack* al que se le conectará el adaptador de corriente.
- Agujero para introducir los cables del servo de la articulación codo.

En las siguientes imágenes se puede ver el diseño final de la pieza, con las características arriba señaladas indicadas.

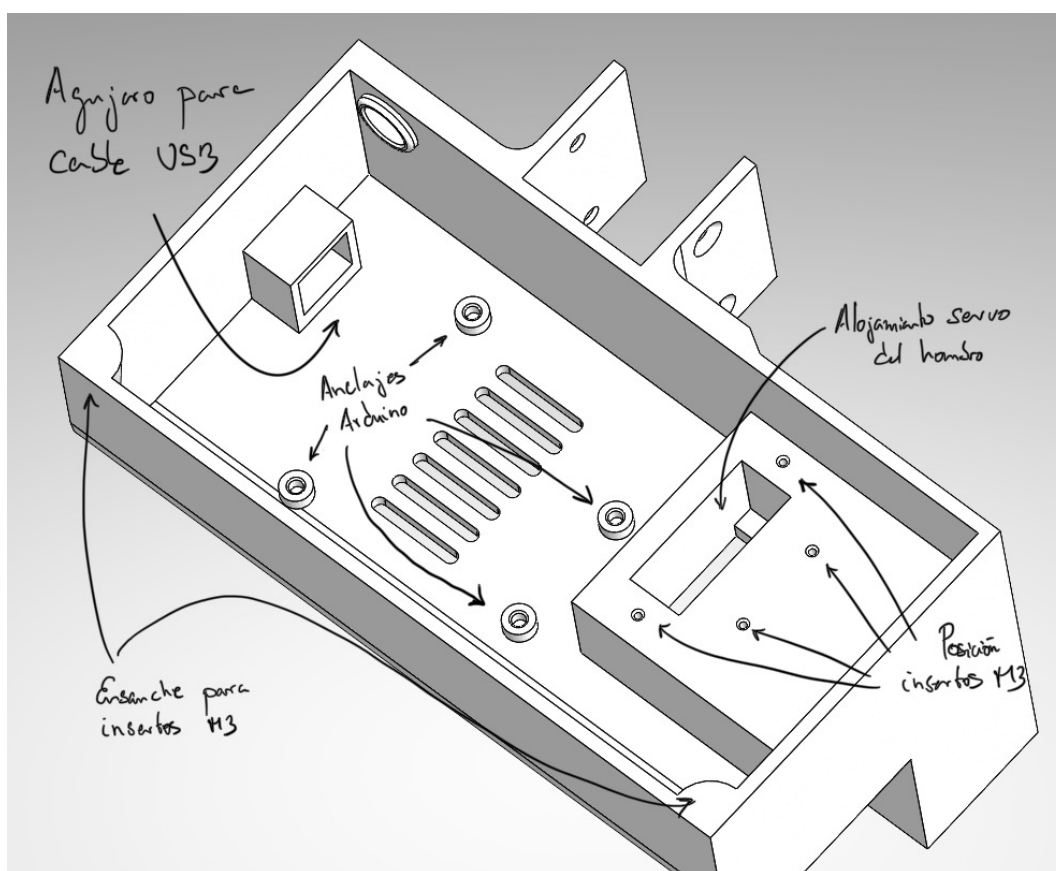


Figura 60. Base principal. Vista superior 1

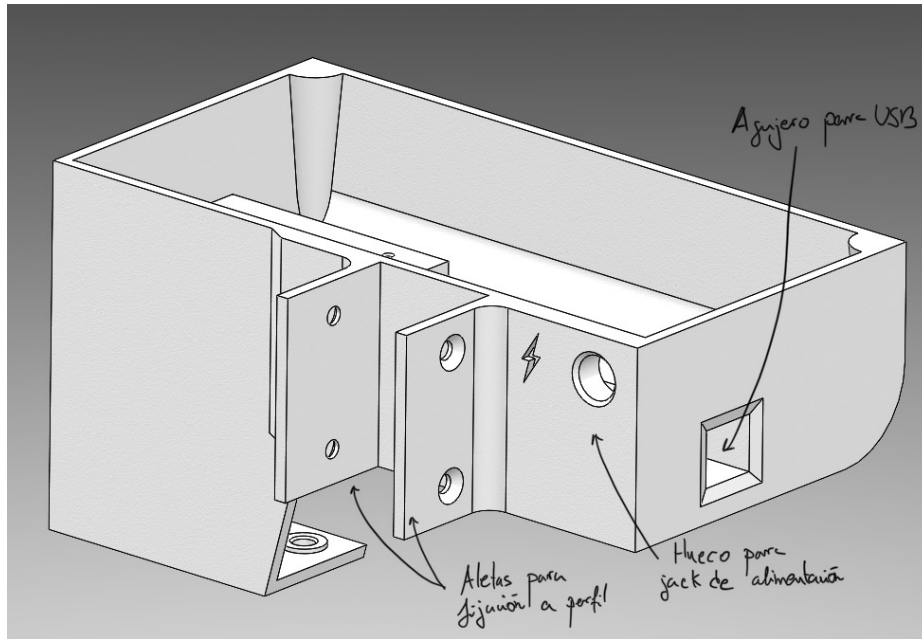


Figura 61. Base principal. Vista trasera

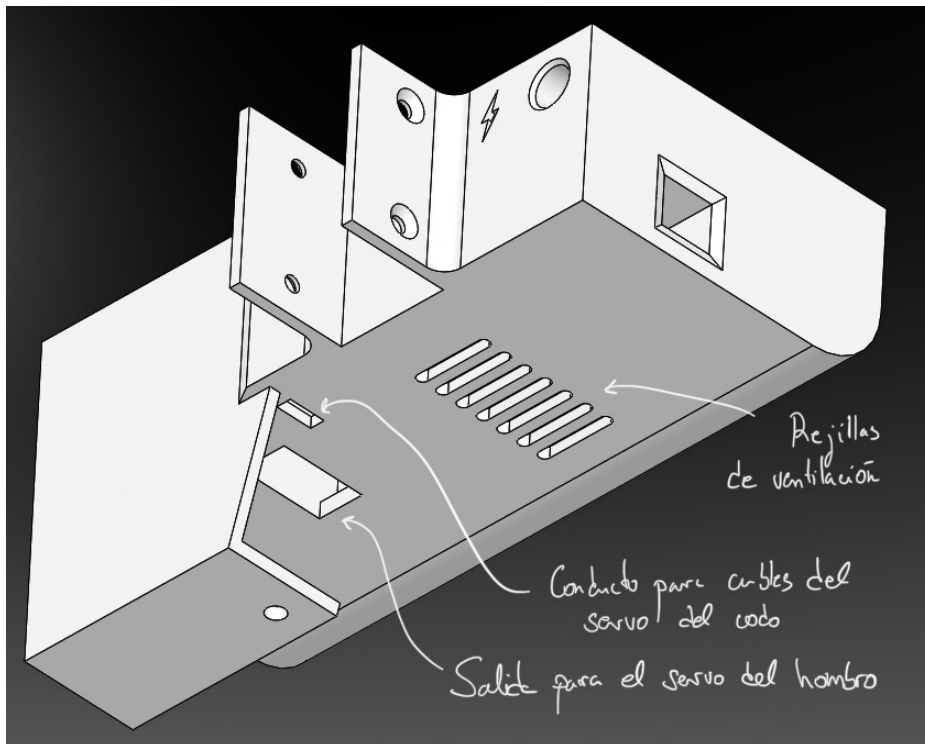


Figura 62. Base principal. Vista inferior

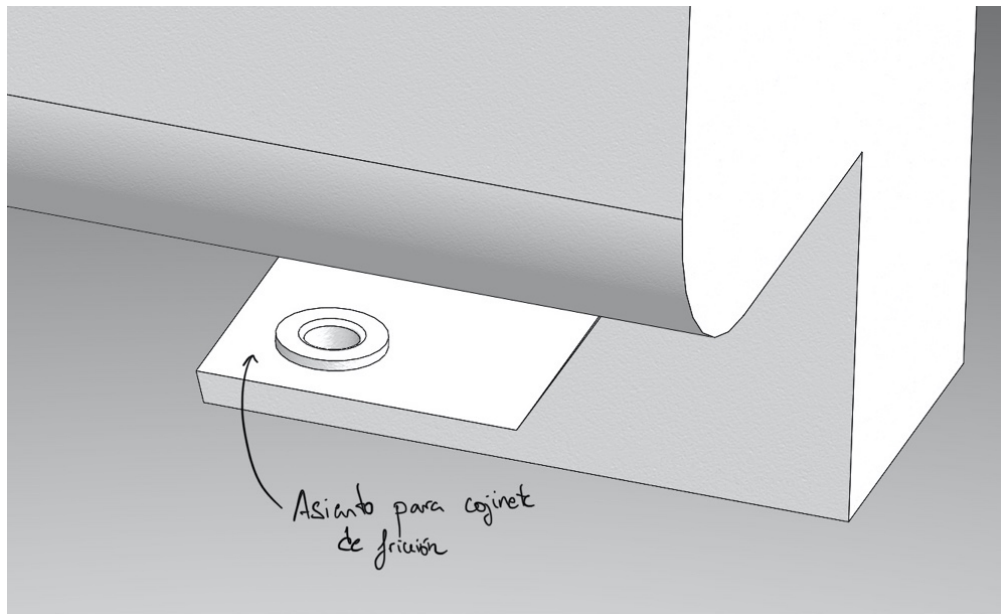


Figura 63. Base principal. Vista del asiento para el cojinete de fricción

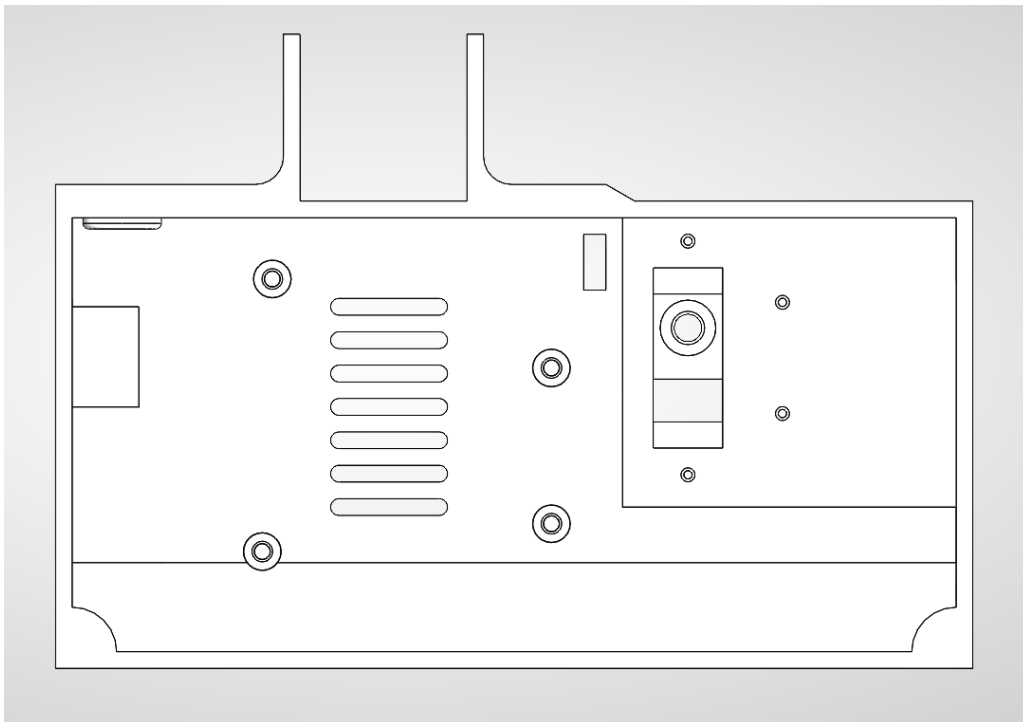


Figura 64. Base principal. Vista superior 2

La unión de esta pieza al perfil se realizará mediante 4 tornillos M4 avellanados y 4 tuercas de cabeza de martillo. Para ayudar al diseño del interior de la base, sobre todo a aquellos detalles que



intervengan en la colocación de los componentes electrónicos, se modeló el CAD de los servos, Arduino y de la PCB de adaptación de señales. En las Figura 65 se muestra una vista de la base con los componentes electrónicos añadidos.

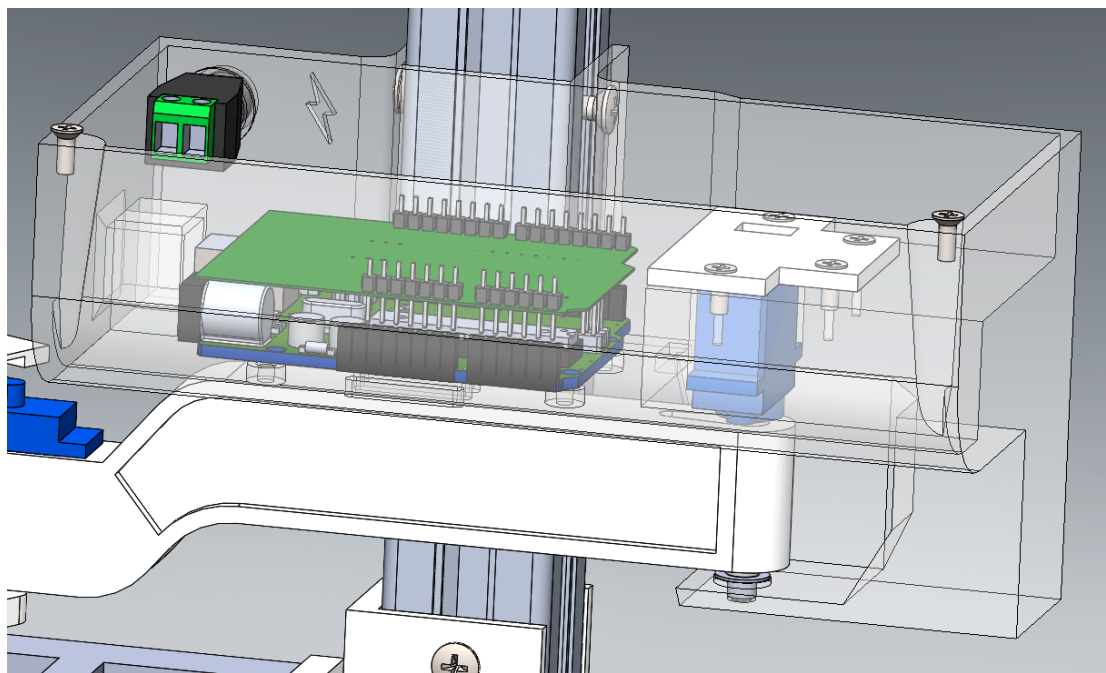


Figura 65. Vista de los componentes internos de la base principal

La tornillería necesaria para esta pieza es la siguiente:

- 4 tornillos M4x12 avellanados
- 4 tuercas M4 cabeza de martillo
- 4 tornillos M3x10 avellanados
- 4 tornillos autorroscantes para plástico d3
- 6 insertos roscados para plástico M3

#### 6.9.4. Tapa de la base principal

En el presente apartado se exponen los requisitos de diseño que debe cumplir esta pieza, así como su resultado una vez diseñado en SolidWorks.

Esta pieza debe tener las siguientes funciones o partes:

---

- Anclaje con el perfil de aluminio.
- Agujeros para unión con la base.
- Alojamiento para el teclado numérico y sus cables.
- Alojamiento para la pantalla LCD y sus cables.
- Agujero para colocación del interruptor de la alimentación
- Ocultar los componentes de la base principal.

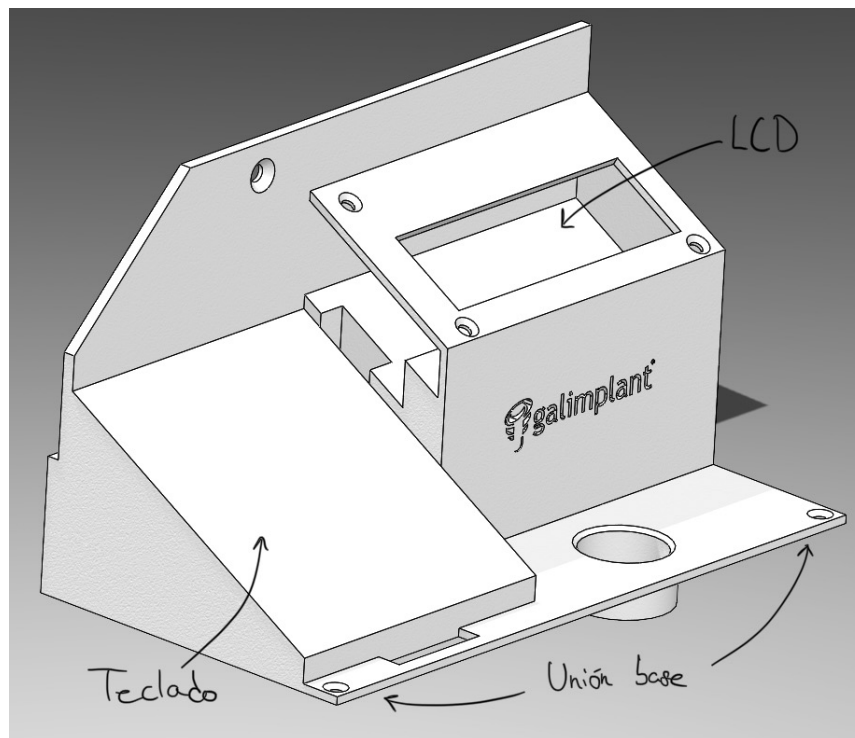


Figura 66. Diseño de la tapa principal. Vista frontal

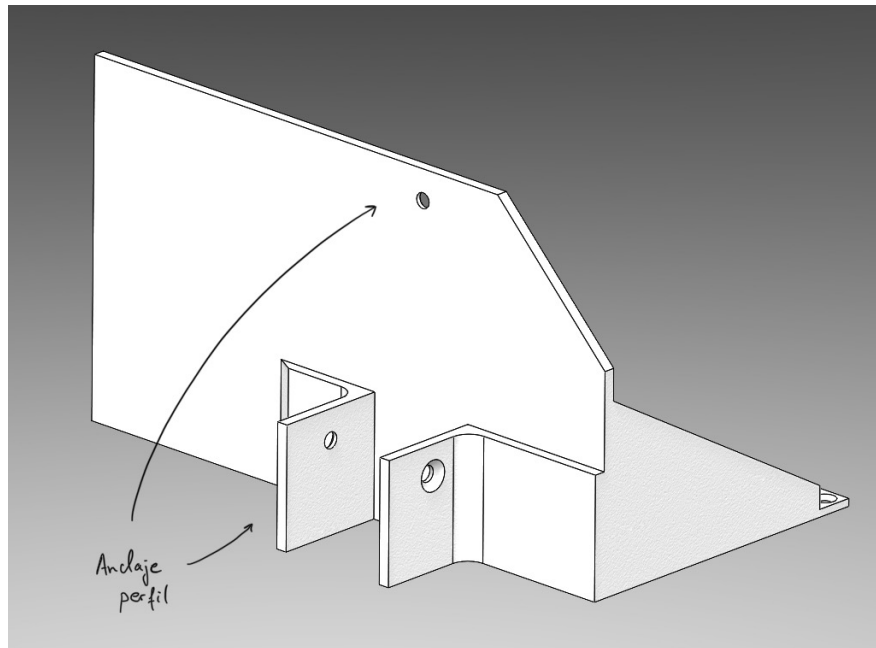


Figura 67. Diseño de la tapa principal. Vista posterior

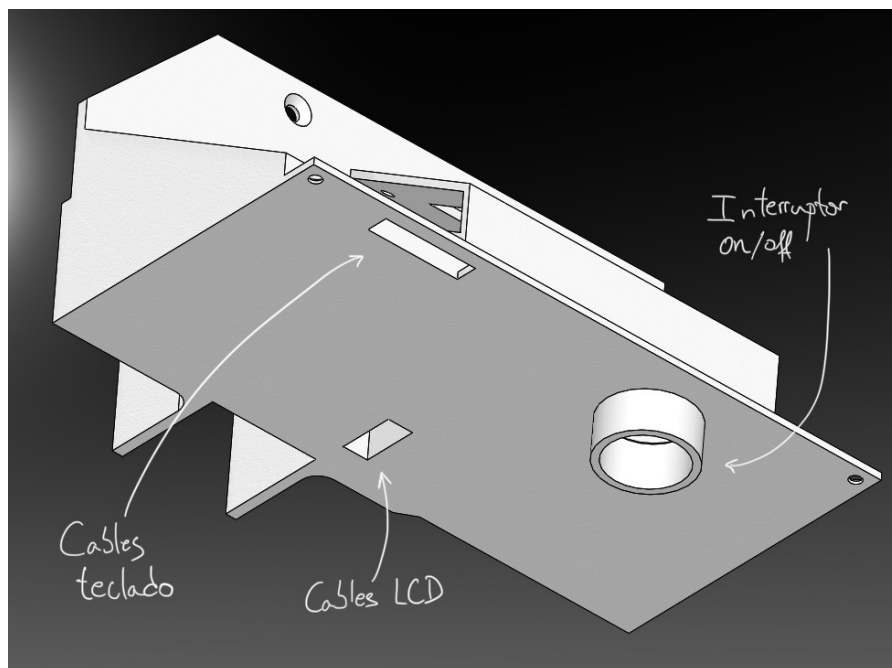


Figura 68. Diseño de la tapa principal. Vista inferior

Para los cables del teclado, se practica una ranura por el que se introducirán los cables a la base. Lo mismo sucede con la pantalla LCD, los cables son guiados desde la misma hasta la base sin ser visibles. El agujero practicado para el interruptor *On/Off* de diseño de tal forma que el interruptor quede insertado a presión.

Con el objetivo de ocultar la pantalla LCD, se diseña una tapa que se ajuste al agujero por donde se introduce el mismo. Se introducen dos tornillos con tuerca de manera que aprisionen el LCD a la superficie de la pieza. La tapa del LCD se fija a la tapa principal mediante un tornillo roscado en ella.

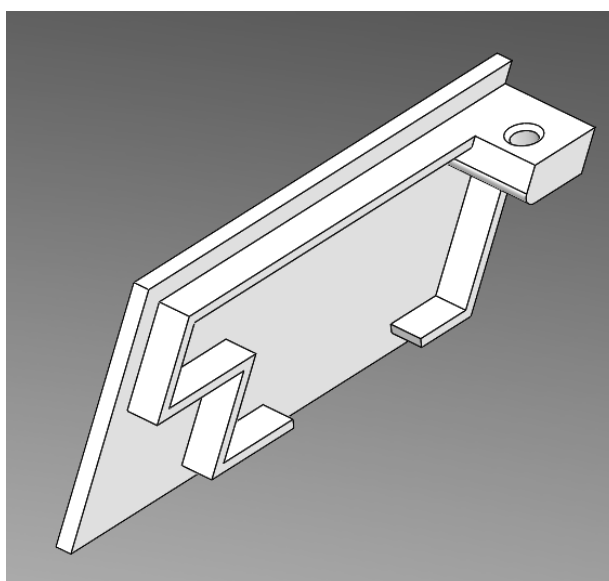


Figura 69. Tapa del LCD

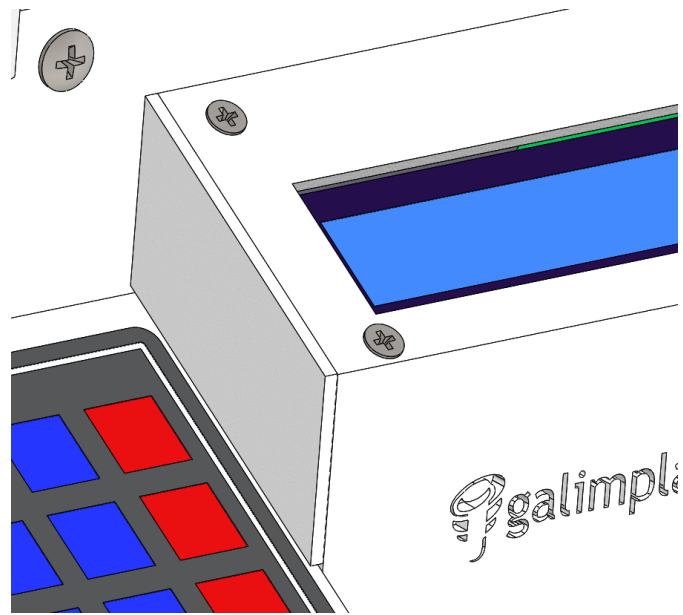


Figura 70. Detalle de la tapa del LCD

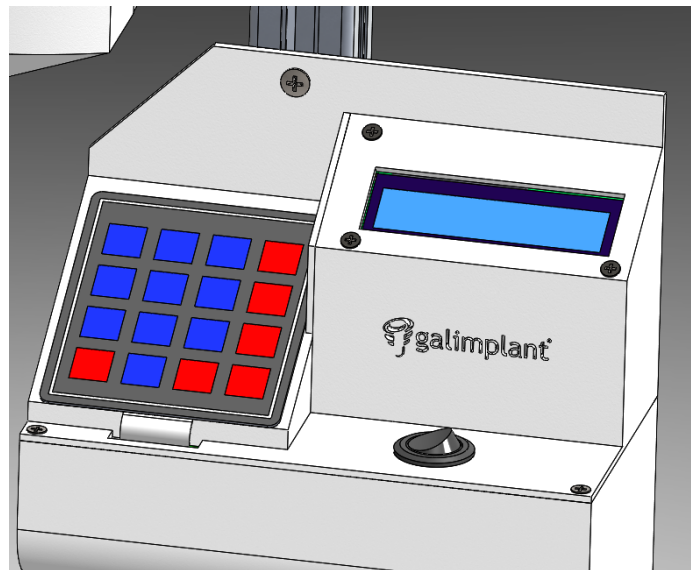


Figura 71. Diseño de la tapa con componentes electrónicos

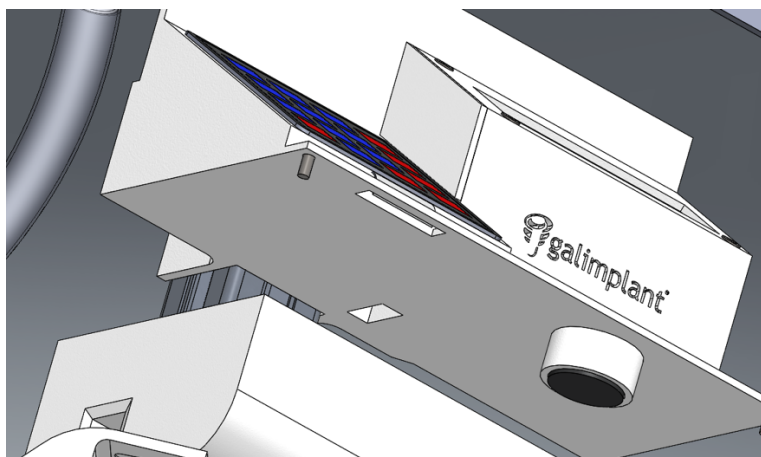


Figura 72. Tapa principal. Vista inferior

Los tornillos necesarios en esta pieza son los siguientes:

- 3 tornillos M3x10 avellanados
- 2 tornillos M3x16 avellanados
- 2 tuercas M3
- 3 tornillos M4x12 avellanados
- 3 tuercas M4 cabeza tipo martillo

#### 6.9.5. Articulación hombro

En este apartado se expone el diseño de la articulación del hombro, esto es, la articulación entre la base principal y el brazo del mecanismo. Se busca un diseño sencillo y que minimice las holguras. El peso que deberá soportar esta articulación es solamente el peso propio del brazo, antebrazo y del servo del codo. No obstante, se diseña de tal forma que el peso del brazo y el antebrazo recaiga sobre la propia estructura y que en ningún caso recaiga sobre el servo. En la Figura 73 puede verse una imagen general del diseño.

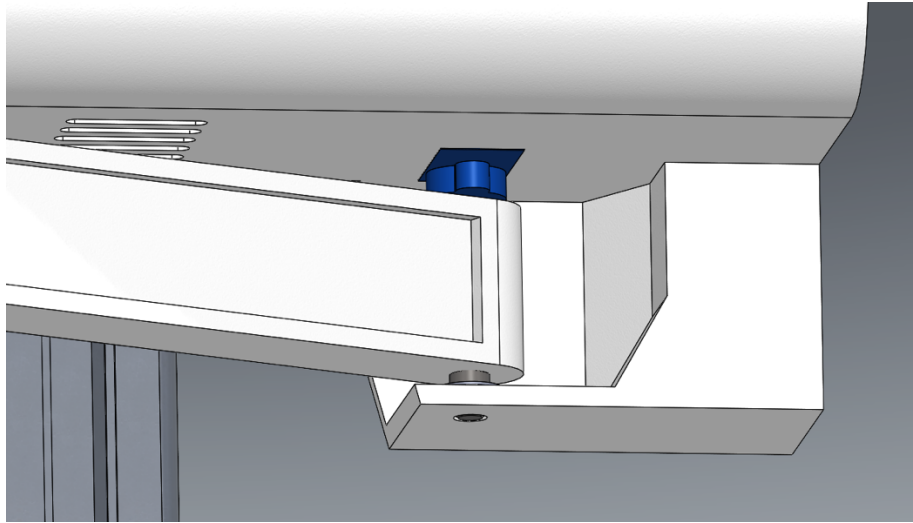


Figura 73. Vista general de la articulación hombro

El brazo se diseña con un agujero en el que se insertará un eje mecanizado a presión, cuyo plano puede encontrarse en el Anexo. Dicho eje, en la parte que permanece exterior al brazo, se diseña con un doble diámetro, de forma que el diámetro mayor apoyará sobre la valona de un cojinete de fricción, encastrado a presión en el alojamiento diseñado para ello en la base principal. Dado que el espacio es reducido y el peso a soportar bastante bajo, se selecciona un cojinete de reducidas dimensiones, fabricado en plástico del fabricante IGUS, con un diámetro interior de 4 mm H7, exterior de 5 mm y longitud de 4 mm, con la geometría de la Figura 74.

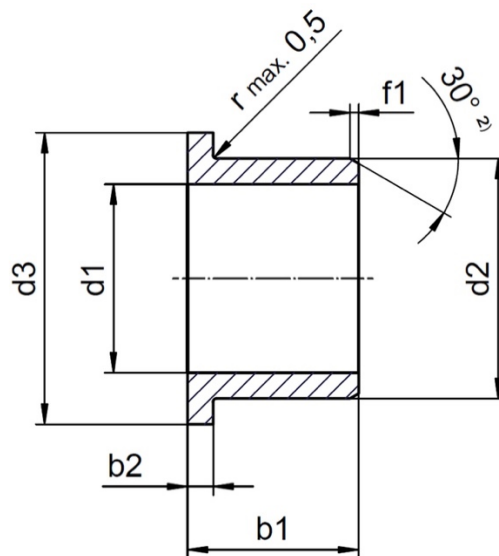


Figura 74. Dimensiones del cojinete seleccionado

El eje se mecaniza en titanio, aprovechando el material y la barra disponible en el área de mecanizado. La tolerancia del diámetro del eje en la superficie donde desliza con el casquillo se dimensiona siguiendo la recomendación del fabricante:  $\varnothing 4h9$  (entre 3,97 y 4,00 mm), la cual puede verse en el Anexo.

Los servos seleccionados, los SG-90, incorporan varias piezas blancas de plástico que se unen mediante unas estrías al eje de giro del servo. Dado que la geometría de dichas estrías es difícilmente imitable en plástico impreso en 3D mediante la tecnología FDM, se decide aprovechar una de estas piezas plásticas para como elemento transmisor del par de giro del servo al brazo. Para ello, en la parte superior del brazo se realiza un hundimiento con la forma de dicha pieza.

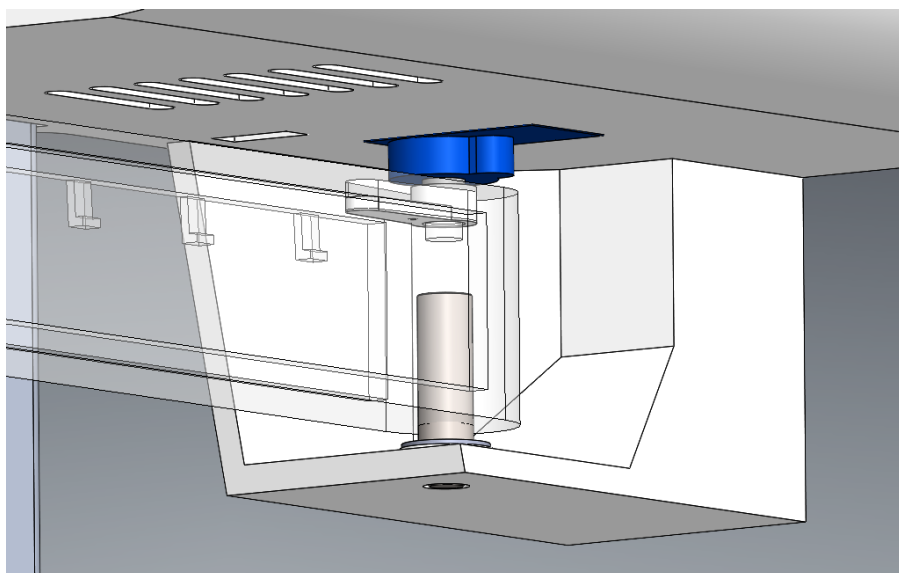


Figura 75. Diseño de la articulación hombro

Para que esta articulación tenga las mínimas holguras, es importante que todos los componentes estén bien limitados en su movimiento vertical. Esto es, que cuando se monte el brazo con el eje sobre el cojinete, y por otro lado se introduzca el servo en su alojamiento, la distancia resultante entre el servo y el brazo deberá ser nula. Si pretendemos que el servo apoye simultáneamente en los resaltes realizados en la base y en la parte superior del brazo, es más que probable que el contacto no se produzca en ambas superficies, puesto que para ello todas las medidas deberían ser perfectas. Para evitar esto, se deja una separación teórica de un par de décimas de milímetro entre el servo y su apoyo en los resaltes de la base, como se puede ver en la Figura 76.

---



Una vez introducido el servo en el alojamiento, y una vez esté haciendo contacto con el brazo y tenga una holgura respecto a la base, hay que fijarlo verticalmente para que no se deslice hacia arriba. Esto se lleva a cabo mediante una tapa atornillada a la base que asegure que siempre apoye en el servo antes que en la propia base.

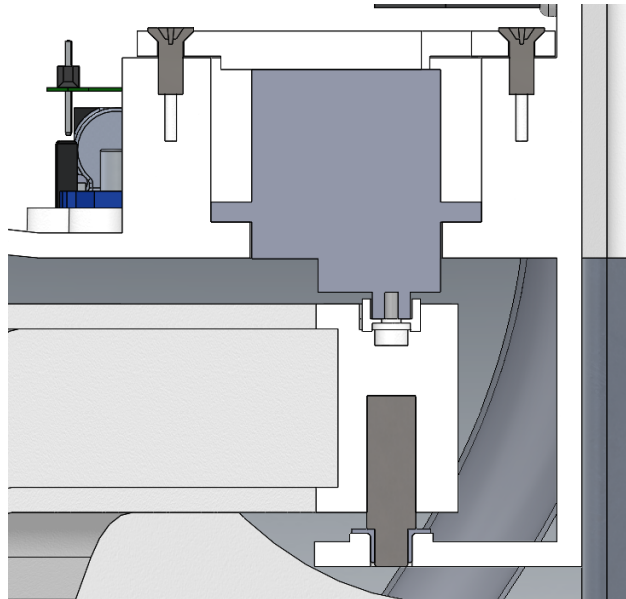


Figura 76. Vista en corte de la articulación hombro

#### 6.9.6. Articulación codo

Se lleva a cabo el diseño de la articulación del codo, esto es, la articulación que produce el movimiento de rotación relativo entre el brazo y el antebrazo. De igual manera que con el hombro, se busca un diseño sencillo y que minimice las holguras. El peso que deberá soportar esta articulación, en este caso, es solamente el peso propio del antebrazo.

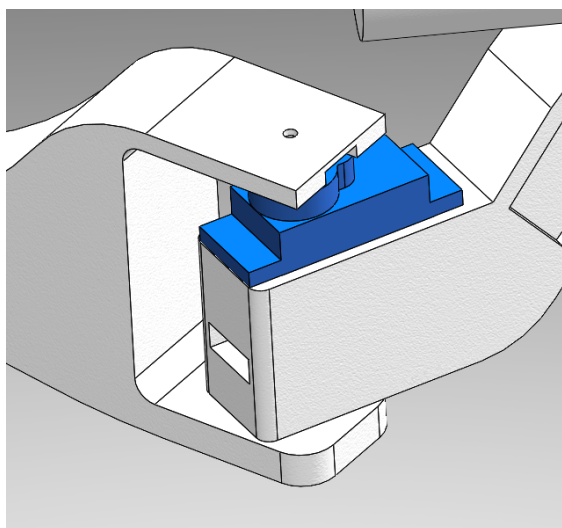


Figura 77. Diseño de la articulación codo

Para el diseño de esta articulación, el servo del codo se encastra y atornilla en un alojamiento del brazo. Para la transmisión de par se emplea el mismo accesorio blanco que se usa en el servo del hombro. Al antebrazo se le practica un rebaje donde encajará dicho accesorio, además de unirse al antebrazo con un tornillo.

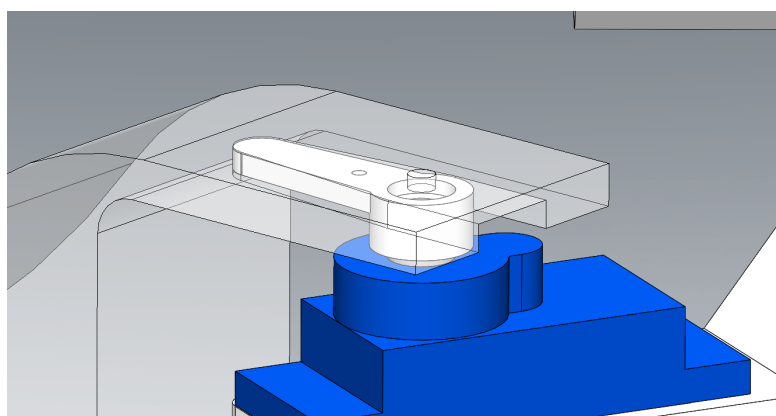


Figura 78. Detalle servo articulación codo

Colineal con el eje de giro de dicho servo, pero del lado opuesto, en el brazo, se encastrará un inserto de M4 sobre el que roscará un eje roscado. En el antebrazo, se encastra un cojinete de fricción con valona igual que el usado para la articulación del hombro. Se diseña un eje que rosque en el inserto y sobre el que friccionen el cojinete, y con una cabeza adecuada para que apoye en el mismo. El plano de este eje puede encontrarse en el Anexo.

---

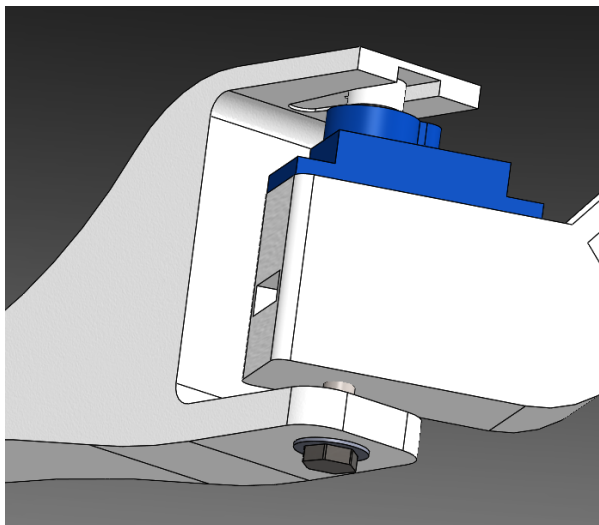


Figura 79. Diseño de la articulación codo

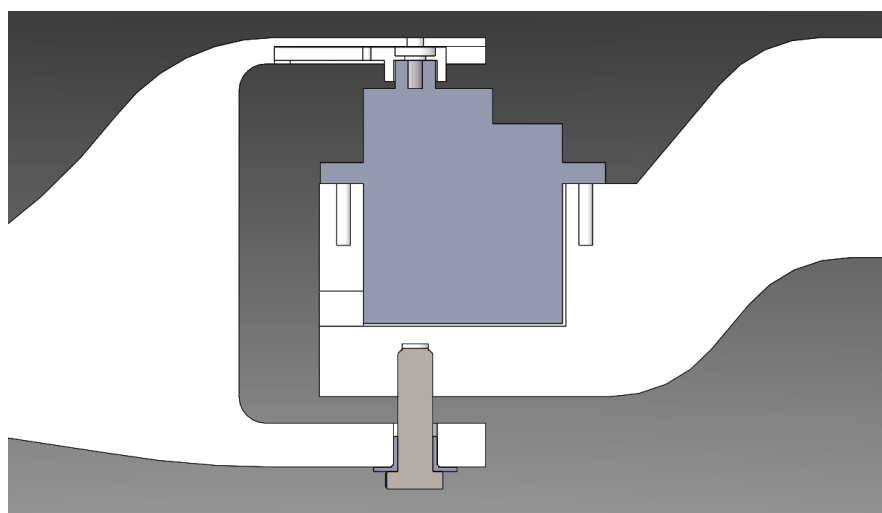


Figura 80. Articulación codo. Vista en corte

#### 6.9.7. Unión del antebrazo al tubo de plástico

Para realizar el cometido de unir el tubo de plástico transparente por el que bajan las piezas con el extremo del brazo robótico, se diseña una brida ajustable mediante un tornillo y una tuerca M3 que sujete el tubo mediante fricción, tal y como se muestra en la Figura 81.

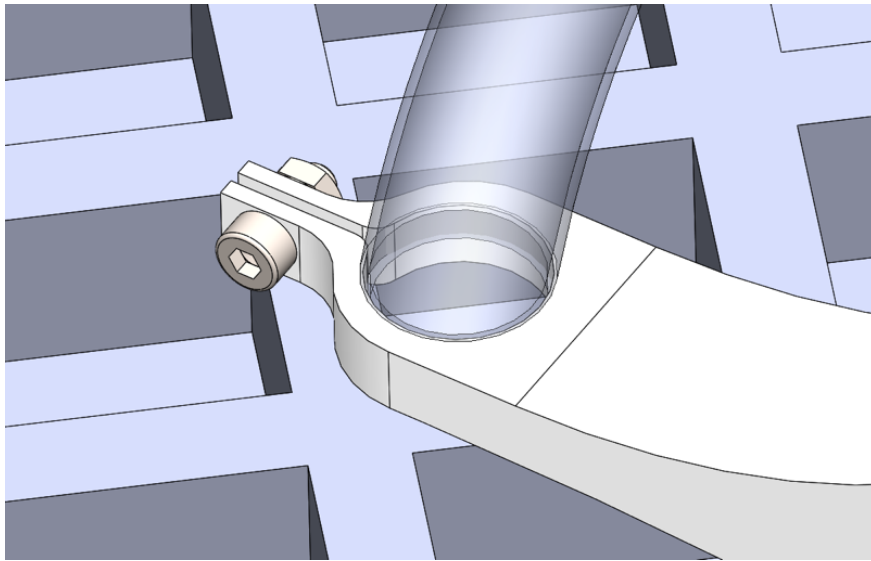


Figura 81. Unión del tubo de plástico al antebrazo

#### 6.9.8. Soporte de la bandeja

Con el objetivo de posicionar la bandeja sobre la que se irán depositando las piezas, y aprovechando el perfil de aluminio colocado para soportar la estructura del mecanismo, se diseña un soporte que sujete la bandeja con las piezas.

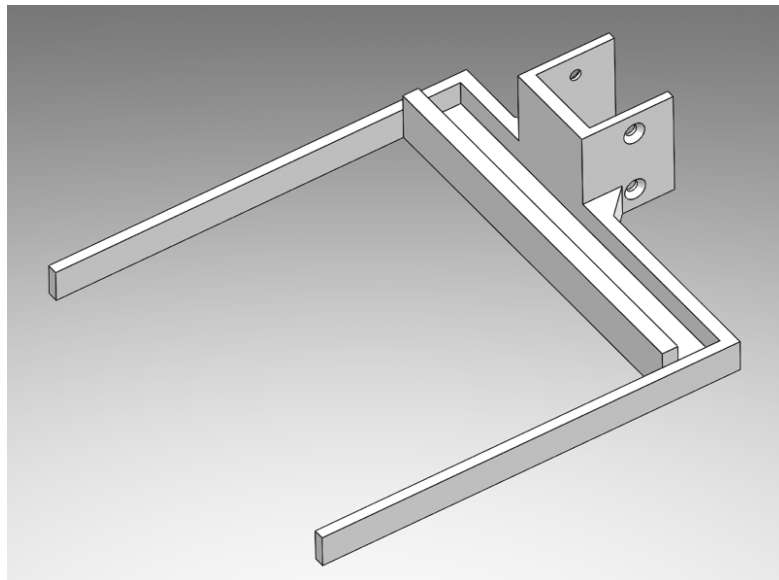


Figura 82. Soporte de la bandeja

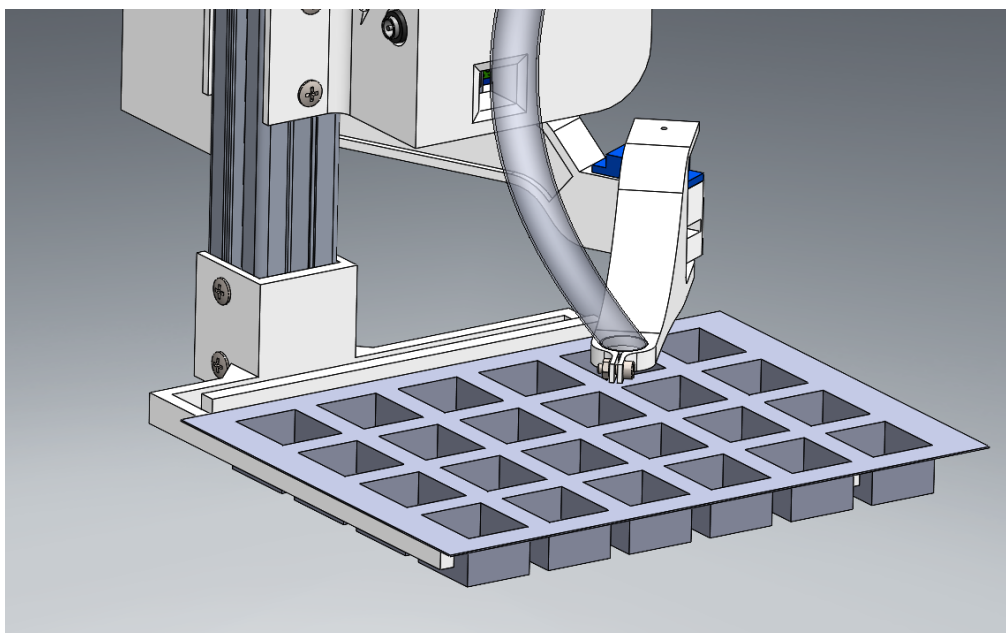


Figura 83. Soporte de la bandeja de las piezas. Vista superior

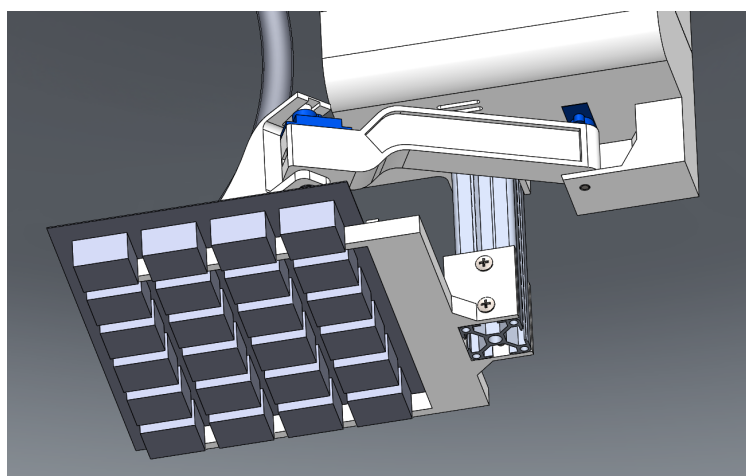


Figura 84. Soporte de la bandeja de las piezas. Vista inferior

La pieza cuenta con dos railes sobre los que se deberá introducir la bandeja. Además, al soporte se le añade un tope para que haga que la bandeja quede siempre en la misma posición. La unión del soporte a la estructura se realiza mediante cuatro tornillos M4x12 avellanados y 4 tuercas con cabeza de tipo martillo.

---

6.9.9. *Diseño mecánico final*

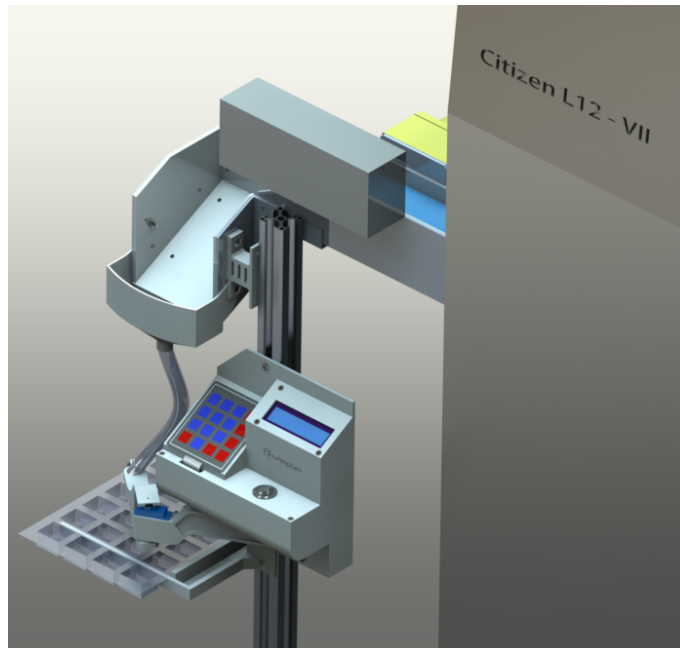


Figura 85. Renderizado 1 del brazo robótico montado en el torno

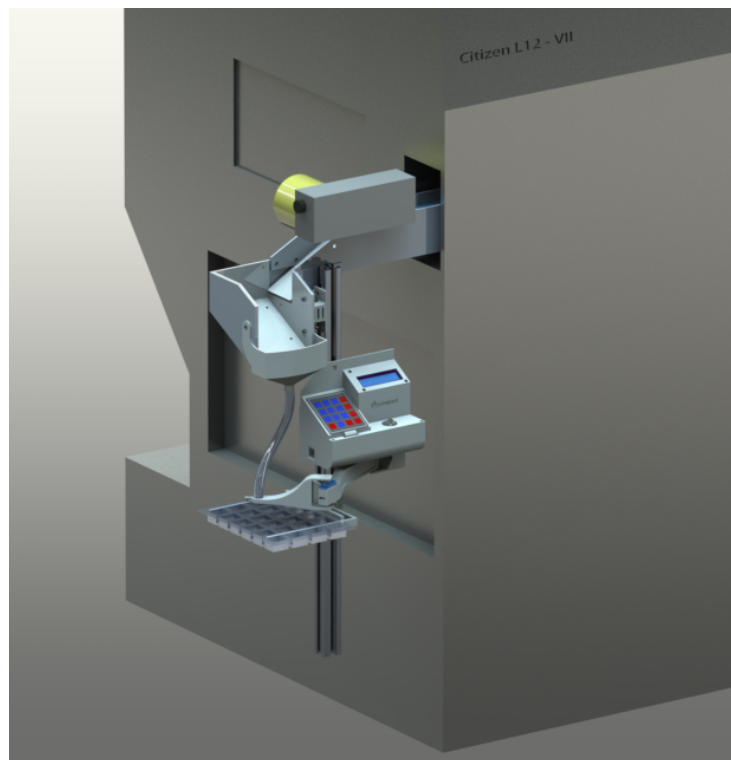


Figura 86. Renderizado 2 del brazo robótico montado en el torno

## 6.10. Diseño de detalle del hardware electrónico

En el presente apartado se seleccionan los componentes electrónicos a emplear, se definen sus conexiones y se define el sistema de alimentación, además de validar los consumos de corriente de los diferentes componentes.

### 6.10.1. Teclado numérico

El teclado numérico deberá contar con los 10 dígitos numéricos además de al menos dos botones de caracteres para poder dar la orden de inicio de movimiento y de parada. El teclado seleccionado está formado por una matriz de pulsadores de 4 filas y 4 columnas, dando la posibilidad de introducir 16 caracteres diferentes en el microcontrolador utilizando solamente 8 entradas digitales del microcontrolador. Por su modo de funcionamiento solo se reconocen pulsaciones individuales, sin que ello suponga un problema en la aplicación para la que se destina.

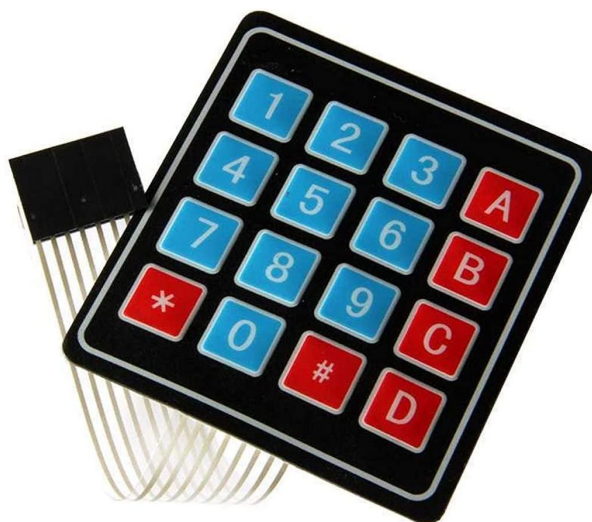


Figura 87. Teclado numérico seleccionado

Este teclado será usado para seleccionar iniciar y parar la marcha del brazo, seleccionar el programa de la pieza que se vaya a mecanizar, o introducir manualmente el intervalo de tiempo necesario entre movimientos consecutivos del brazo.



Figura 88. Conexiones del teclado numérico seleccionado

#### 6.10.2. Pantalla LCD

Un LCD es una pantalla de cristal líquido que permite representar números, letras y caracteres de forma sencilla. Principalmente existe dos formas de conectar una pantalla LCD con un Arduino:

- Conectar directamente los pines RS, RW, Vcc, GND, En, D0-D7 y contraste al Arduino, lo que obliga a ocupar un elevado número de pines del Arduino.
- Usar un módulo intermedio comunicado con el Arduino mediante el protocolo I2C, lo que reduce el número de pines a usar a tan solo 2 para la comunicación, además de Vcc y GND.

Dado que los pines de la comunicación I2C del Arduino no van a ser usados para ninguna otra función, se decide emplear el LCD con el módulo intermedio. El LCD dispone de 2 filas de 16 caracteres cada una.



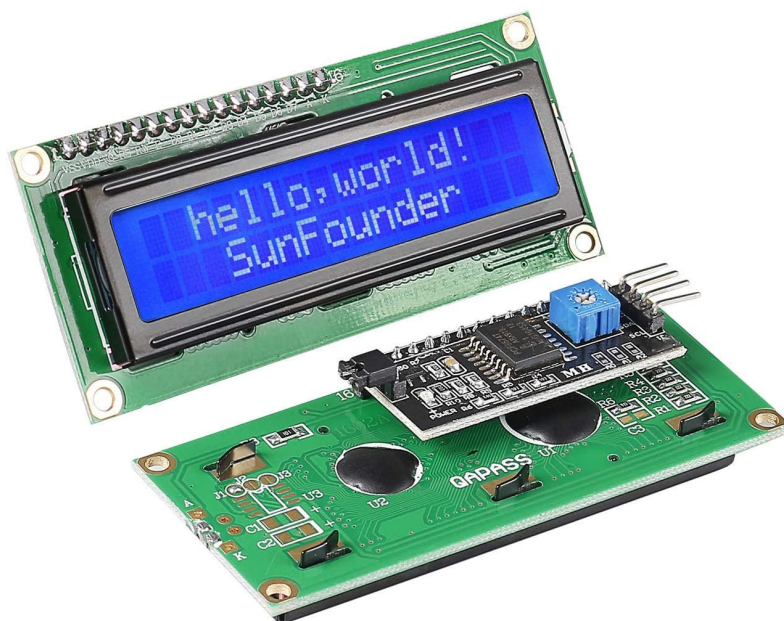


Figura 89. LCD con módulo de comunicación I2C

### 6.10.3. Servos SG 90

Estos servos son compactos y sencillos de manejar, puesto que no necesitan incorporar ningún sensor de retroalimentación al controlador, ya que funcionan posicionándose en un ángulo determinado en función de la frecuencia del pulso de la PWM que recibe. Desde el punto de vista de conexiones eléctricas cada servo necesita 3 pines: +5V, GND y un pin de salida digital con modulación de ancho de pulsos o PWM.

La corriente máxima demandada por un servo depende de diferentes parámetros como la inercia de la masa acoplada al eje del servo o la velocidad de rotación aplicada al eje del mismo. Teniendo en cuenta que el brazo robótico es de reducidas dimensiones, y solamente deberá vencer su propia masa, la corriente demandada será pequeña. Además, la velocidad con la que los servos se deberán mover entre dos posiciones sucesivas puede adaptarse a las limitaciones eléctricas y mecánicas del sistema, puesto que se cuenta con suficiente tiempo para realizar el cambio de posición.



Figura 90. Servo SG-90

Las principales características electromecánicas del servo SG-90 son las siguientes:

- Dimensiones (L x W x H) = 22.0 x 11.5 x 27mm.
- Peso: 9 gramos.
- Torque a 4.8 volts: 1.2 kg/cm.
- Voltaje de operación: 4.0 a 7.2 V.
- El ancho de pulsos que el servo es capaz de procesar varía entre los 500 y 2400 us.
- Frecuencia de trabajo: 50 Hz (período de 20 ms).
- Velocidad de giro a 4.8 volts: 0.12 s/60º.
- Conector universal para la mayoría de los receptores de radio control.
- Compatible con tarjetas como Arduino y microcontroladores que funcionan a 5 V.

#### 6.10.4. Arduino

Será el cerebro de la electrónica del prototipo, con lo que se requiere una minuciosa selección.

Los requisitos que el Arduino seleccionado deberá cumplir son los siguientes:

- Pines SDA y SCL para comunicación I2C para la pantalla LCD.
- 2 salidas digitales de PWM para controlar los servos.
- 8 entradas digitales necesarias para el teclado numérico.

- Capacidad de procesamiento y memoria necesaria.
- Capacidad de entregar la corriente total necesaria.

Se valoran usar 3 modelos distintos de Arduino. A continuación, en la Tabla 5, se comparan sus principales características.

Tabla 5. Comparativa entre diferentes Arduinos

	Arduino UNO	Arduino Micro	Arduino MEGA
Procesador	ATmega328	ATmega32U4	ATmega2560
I2C	Sí	Sí	Sí
Pines E/S	14	20	54
E/S PWM pines	6	7	15
Memoria flash	32 kB	32 kB	256 kB
Memoria SRAM	2 kB	2.5 kB	8 kB
Velocidad de reloj	16 MHz	16 MHz	16 MHz
Nivel de voltaje	5V	5V	5V
Alimentación	Jack	USB	Jack

En primer lugar, se descarta el uso del Arduino Micro por poder este alimentarse solamente por el puerto USB y no por medio de un *jack*, como el UNO y el MEGA. En segundo lugar, tanto el UNO como el MEGA cumplen con las condiciones de número de pines necesarios para la implementación del presente prototipo. Respecto a la memoria y velocidad de cada uno, los tres están muy equilibrados, y para la aplicación que se proponen no es necesaria una gran capacidad de procesamiento. Finalmente se selecciona el Arduino UNO puesto que es más compacto y económico que el MEGA.

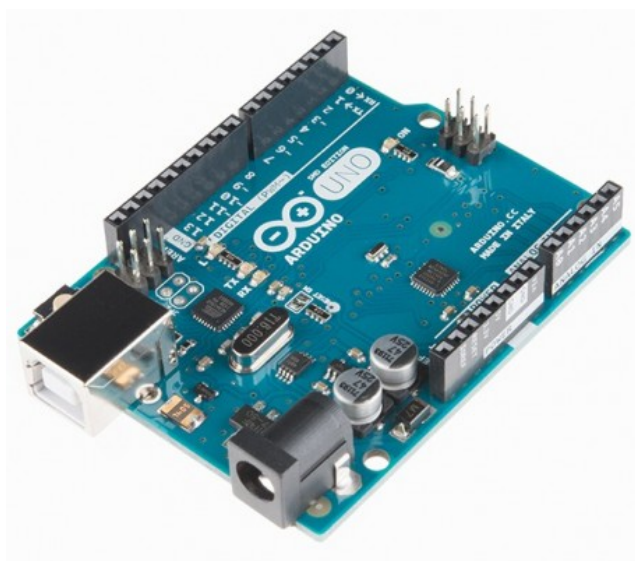


Figura 91. Arduino UNO

#### 6.10.5. Alimentación

Se propone una alimentación directa desde la red eléctrica. El Arduino UNO presenta tres posibilidades diferentes de alimentación

- Mediante el puerto USB. A través de esta entrada se admiten únicamente 5V, con la corriente limitada a 500mA.
- Mediante el conector Jack. Voltaje recomendado entre 7V y 12V.
- A través del pin Vin. Voltaje recomendado entre 7V y 12V.

Alimentando el Arduino mediante Jack o pin Vin obtenemos los siguientes valores de corriente máximos:

- Máxima corriente de salida para el pin 5V: 1A.
- Máxima corriente de salida para un pin entrada/salida: 40 mA.
- Máxima corriente de salida para la suma de todos los pines de entrada/salida: 200 mA.

Se descarta la alimentación mediante USB debido a la limitación de corriente a 500 mA frente a 1 A del Jack. Siendo la alimentación mediante Jack y pin Vin equivalentes, se prefiere la del Jack por su

facilidad de conexión, directamente con un adaptador de corriente a 9V y una limitación de corriente mínima de 1A, como el mostrado en la Figura 92.



Figura 92. Adaptador de corriente 9V 1A

La demanda de corriente del Arduino en modo de funcionamiento normal se comprueba empíricamente mediante el uso de una fuente de alimentación. El procedimiento se detalla en el apartado 6.12 Test y validaciones. En caso de que se demandase más corriente de la que puede suministrar, se variará la velocidad con la que los servos se mueven, bajando así la corriente sin repercutir en el funcionamiento del sistema.

#### 6.10.6. Diseño de la PCB de adaptación

Con el objetivo de facilitar las conexiones de los periféricos electrónicos en los pines del Arduino, se diseña una PCB que cuenta con pines para los dos servos, el LCD y el teclado numérico, así como pines para su conexión directa con el Arduino. El diseño es realizado en el software *Altium Designer* y su fabricación es llevada a cabo mediante la empresa JLC PCB, generando los correspondientes *gerber files* y *drill files*, archivos necesarios para su fabricación. El diseño del esquemático y del ruteado de la PCB se puede ver en la Figura 93 y Figura 94.

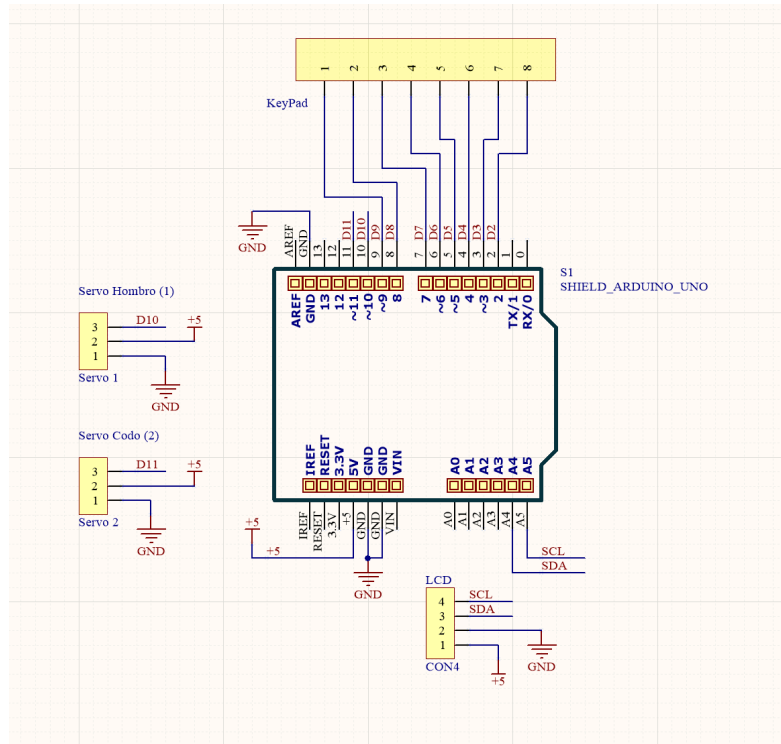


Figura 93. Diseño del esquemático de la PCB

Se emplean pines de separación 100 mills entre ellos. En el diseño de la PCB, las pistas se establecen a una anchura de 40 mills para las pistas de los pines digitales del teclado, y 60 mills para la señal de 5V y demás pistas. En la unión de las 3 pistas de la señal de 5V, se diseña una pequeña región o *polygon*, a fin de evitar al máximo la resistencia de las pistas y evitar generación de antenas que pudiesen meter ruido a la PCB. El diámetro de los pads para la inserción de los pines se establece a 30 mills.

La colocación de los pines donde irán conectados los servos, teclado y pantalla LCD se colocan se distribuyen de manera estratégica en la superficie de la PCB a fin de tener un buen reparto de cables y que ninguno de ellos, especialmente el cable rígido del teclado numérico y el cable del servo, queden tirantes y provoques problemas en el futuro.

Se aprovecha el potencial del método de fabricación, el cuál permite la adición de texto sin interferir en las señales de la PCB en la capa *Top Overlay*.

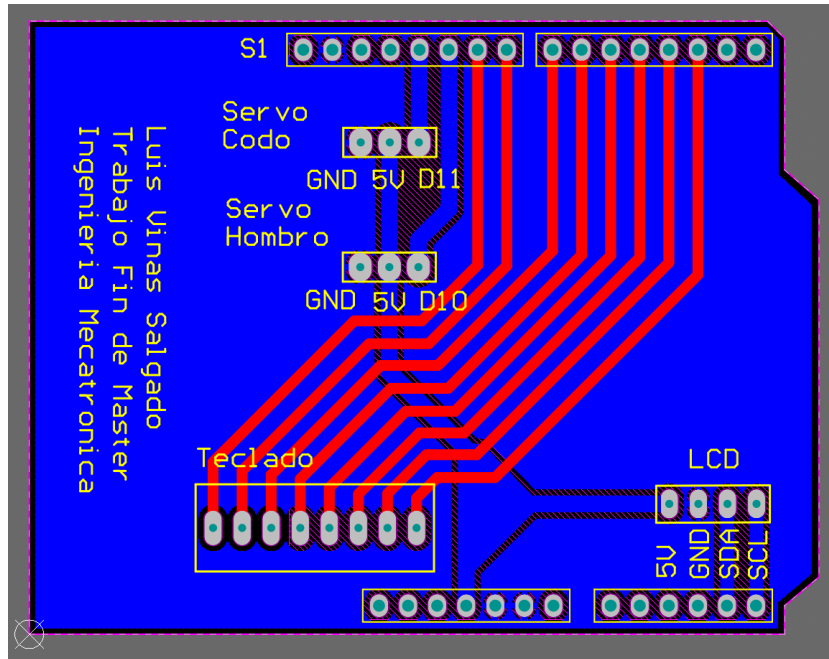


Figura 94. Ruteado de la PCB

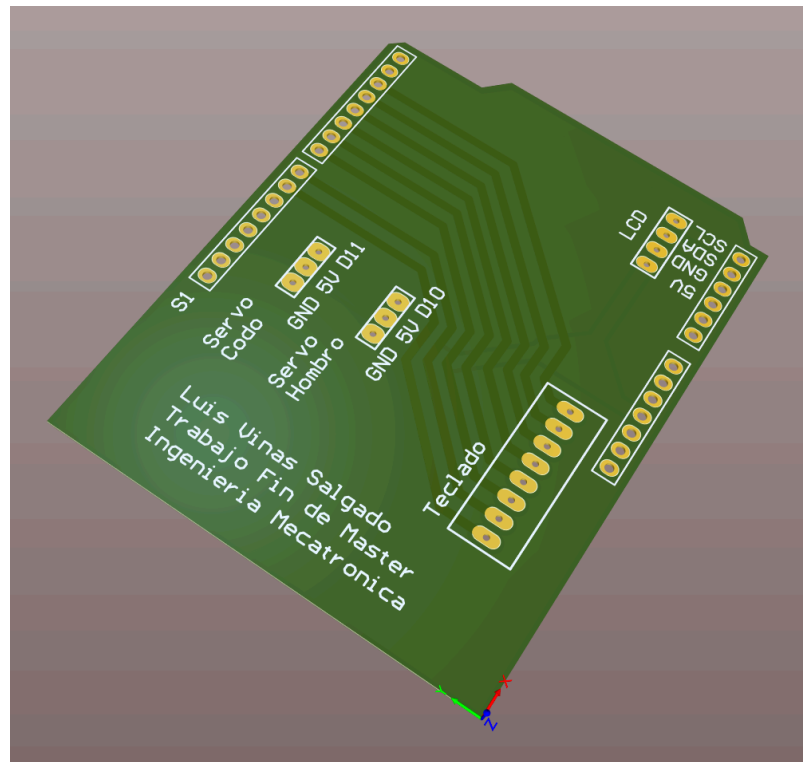


Figura 95. 3D de la PCB de adaptación

## 6.11. Diseño de detalle del software

En el presente apartado se detalla el código empleado para el funcionamiento del brazo robótico en su conjunto. Dado que se utiliza una placa Arduino UNO como microcontrolador, el entorno de programación empleado es el Arduino IDE, y el lenguaje C++. El código en su totalidad se puede encontrar en los Anexos.

Dado que se quiere generar el movimiento de los servos cada cierto tiempo, se busca la manera de generar intervalos de tiempo relativamente grandes mediante las interrupciones generadas por alguno de los TIMER del Arduino. Inicialmente se plantea el uso del TIMER 1, de 16 bits, sin embargo, con este TIMER los servos no podrían funcionar puesto que la PWM que se genera usando la librería "Servo.h" hace uso de este TIMER y ambos entrarían en conflicto.

Se recurre por tanto al uso del TIMER 0, de 8 bits, capaz de guardar un valor máximo de contador de 255 antes de que desborde. El objetivo es poder ejecutar una función determinada cada segundo exacto. A continuación, se calcula la frecuencia de interrupción mínima que se puede conseguir con el TIMER 0, y que nos dará por tanto el mayor tiempo entre dos interrupciones consecutivas. Se selecciona un *prescaler* máximo (1024) y un *compare match register* máximo (debe ser menor de 256 para el TIMER 0, se selecciona 255), y se introducen en la ecuación (1).

$$\begin{aligned} \text{freq. interrupción del timer (Hz)} \\ = \frac{16 \text{ MHz}}{\text{prescaler} \cdot (\text{compare match register} + 1)} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{freq. interrupción del timer (Hz)} = \frac{16 \text{ MHz}}{1024 \cdot (255 + 1)} = 61,035 \text{ Hz} \quad (2)$$

La frecuencia obtenida es 61,035 Hz o una interrupción cada 16,384 ms. Este valor está alejado de los 1000 ms buscados. No obstante, mediante el uso de una variable a modo de contador, se puede llegar a los 1000 ms cuando el TIMER 0 haya desbordado un número determinado de veces. Para ello, el valor del *compare match register* debe dar como resultado una frecuencia divisible por 1000 ms. El valor

---



más cercano a 255 es 124 obteniendo una frecuencia de 125 Hz y, en consecuencia, una interrupción cada 8 ms, valor divisible por 1000 ms.

$$\text{freq. interrupción del timer (Hz)} = \frac{16 \text{ MHz}}{1024 \cdot (124 + 1)} = 125 \text{ Hz} \quad (3)$$

En funcionamiento normal del brazo, se aumenta el valor de la variable contador cada vez que se entra en la función interrupción cada 8 ms. Cuando este valor llegue a 125, habrá concurrido exactamente un segundo. De esta manera ya se puede generar el movimiento cada la cantidad de segundos que se quiera. Mediante el uso de otra variable contador, cada vez que pasa un segundo se va sumando un 1 a su valor, hasta que este alcance el valor establecido.

Para establecer el valor de tiempo en segundos que debe transcurrir entre cada movimiento del brazo se asocia a cada referencia a mecanizar dicho tiempo. Este tiempo es el que tarda en mecanizarse una pieza de dicha referencia. Para seleccionar la referencia a mecanizar, cada vez que el Arduino se inicializa o que se pulsa la tecla '#' del teclado se ejecuta la función encargada de recoger el valor del programa seleccionado. Una vez que el programa está seleccionado y, el tiempo asociado al mismo, con la pulsación de la tecla '\*' se da comienzo al ciclo.

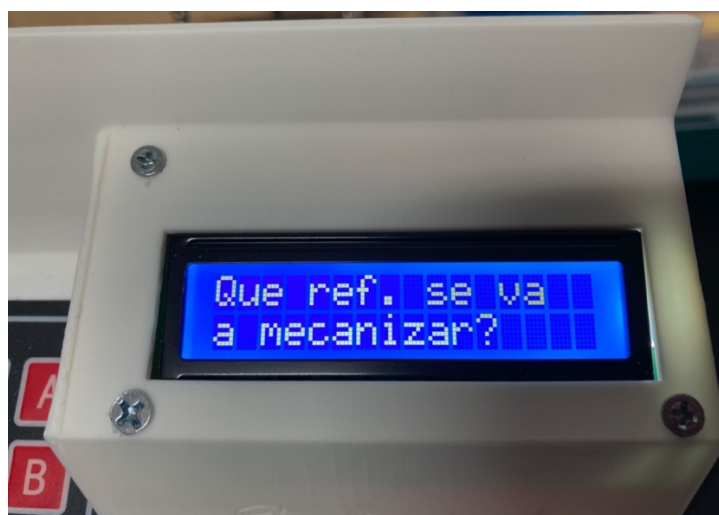


Figura 96. Consulta del programa a mecanizar



Figura 97. Consulta de inicio de ciclo o volver a seleccionar

Durante el ciclo de funcionamiento normal, en la pantalla LCD se ve la referencia de la pieza que se está mecanizando, el número de la pieza que se está mecanizando en ese momento de entre las 24, y la cuenta atrás de los segundos que le faltan a la pieza por mecanizarse.



Figura 98. Muestra de la referencia a mecanizar, la pieza y la cuenta atrás

Para generar el movimiento de los servos a la siguiente posición, se programa una función encargada específicamente de ello. Las posiciones que el brazo deberá de recorrer serán 24, de la 1 a la 24, en orden ascendente. Cada posición tendrá asociada un valor de ángulo para el hombro y otro para el

---

brazo. Se decide proceder de esta manera, evitando usar las fórmulas de la cinemática inversa con el objetivo de reducir tiempos de cálculo y evitar posibles errores. Si el espacio en el cual el extremo del robot se tuviese que mover estuviese formado por infinitos puntos, se tendría que recurrir inevitablemente al uso de la cinemática inversa. En este caso, por ser solamente 24 posiciones fijadas, se hace más ventajoso hacerlo de esta manera.

De cara a realizar futuras actualizaciones del software, bastará con conectar el cable USB tipo B en el agujero pensado para ello, sin tener así que desmontar ninguna pieza del prototipo.



*Figura 99. Acceso al Arduino desde el exterior*

## 6.12. Test y validaciones

La parte mecánica se valida antes de iniciar el proceso de diseño, tal y como se comentó en el apartado 6.8 *Método de fabricación y validación anterior al diseño*. Antes de comenzar con la fabricación de la PCB y de la estructura mecánica, conviene realizar una validación de la electrónica, para corroborar que se está yendo por el buen camino, y que todo funciona como se supone empleando un programa simplificado del que se usará de manera definitiva.

Lo primero que se comprueba es el consumo de corriente de los componentes. En primer lugar, se mide la corriente de la pantalla LCD por individual a través de un multímetro, el cual, como se puede ver en la Figura 100, es de 20.6 mA.

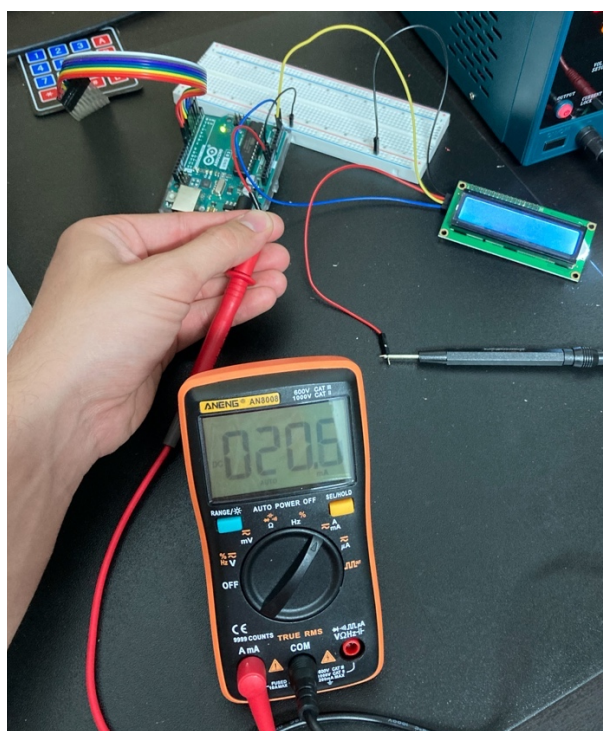


Figura 100. Consumo de corriente de la pantalla LCD

Se comprueba también que el consumo de todos los elementos electrónicos que intervendrán en el funcionamiento del prototipo es menor a 1A mediante el uso de una fuente de alimentación y un programa similar al final, que genere sucesivas posiciones en los servos cada cierto tiempo. Se pudo comprobar que el consumo de corriente nunca se acercó a 1A.

---

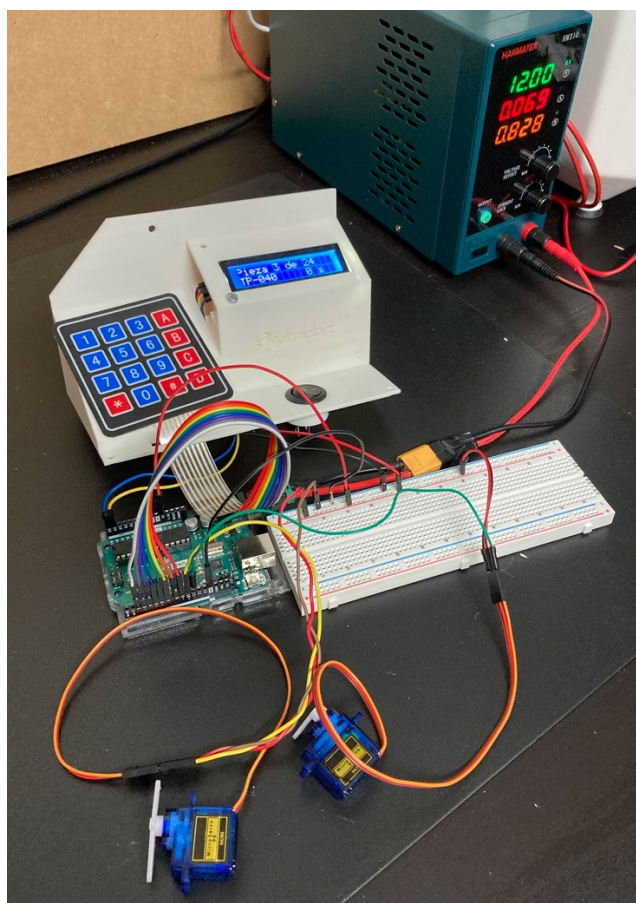


Figura 101. Prueba de los componentes electrónicos

Una vez realizadas estas validaciones se comienza con el montaje de la estructura mecánica y la integración de la misma con los componentes electrónicos.

### ***6.13. Fabricación y montaje del prototipo***

El proceso de fabricación se lleva a cabo de manera progresiva. Conforme se van fabricando las distintas piezas, estas se van preparando y ensamblando con los componentes con los que interactúan. En la impresora, se fabrica cada pieza de manera individual, salvo aquellas más pequeñas. Se prepara la electrónica, tanto cables como soldaduras de PCB, así como sus uniones a la estructura.



### 6.13.1. Tapa principal

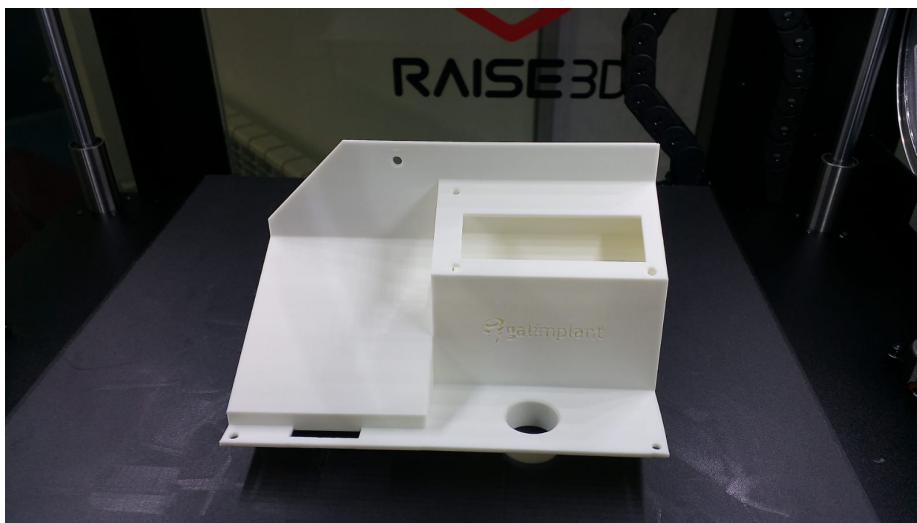


Figura 102. Impresión de la tapa principal

Se imprime la tapa principal de la estructura situando la cara lateral derecha en contacto con la cama caliente de impresión. Se retiran los soportes generados, se inserta el LCD, pasando los cables, se incorpora su tapa, y se atornilla. Por otro lado, se inserta el interruptor *On/Off* y se pega el teclado en su sitio mediante el adhesivo que incorpora en su parte posterior.



Figura 103. Incorporación del LCD y su tapa



Figura 104. Tapa principal con componentes incorporados

### 6.13.2. Base principal

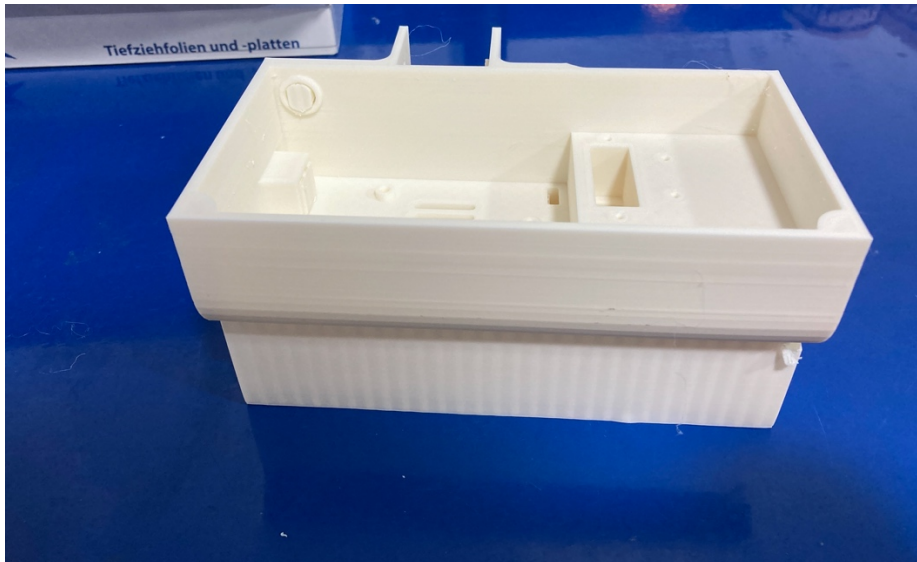
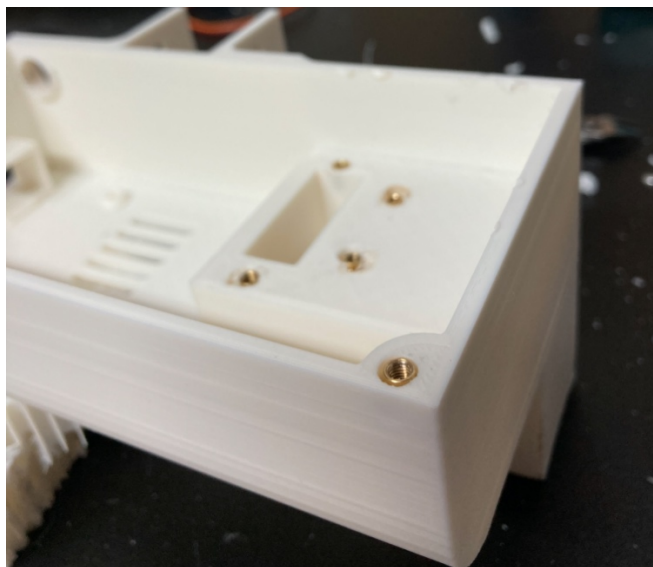


Figura 105. Impresión de la base principal

Se imprime la base principal, en la posición que se muestra en la Figura 105. Se retiran los soportes y se encastran los correspondientes insertos roscados aplicando calor para la tapa del servo y para la unión con la tapa principal, tal y como se ve en la Figura 106.



*Figura 106. Insertos roscados para plástico encastrados*

De a misma manera, se inserta el servo, comprobando su encaje por fricción, y comprobando que sobresale lo que fue diseñado.



*Figura 107. Encaje del servo del hombro*



### 6.13.3. Soldadura PCB adaptación

Una vez se recibe la PCB de adaptación fabricada, se comprueba la continuidad entre los pines, se sueldan los pines macho de conexión al Arduino, así como los conectores de los servos, teclado y pantalla LCD, y se vuelve a comprobar la continuidad.

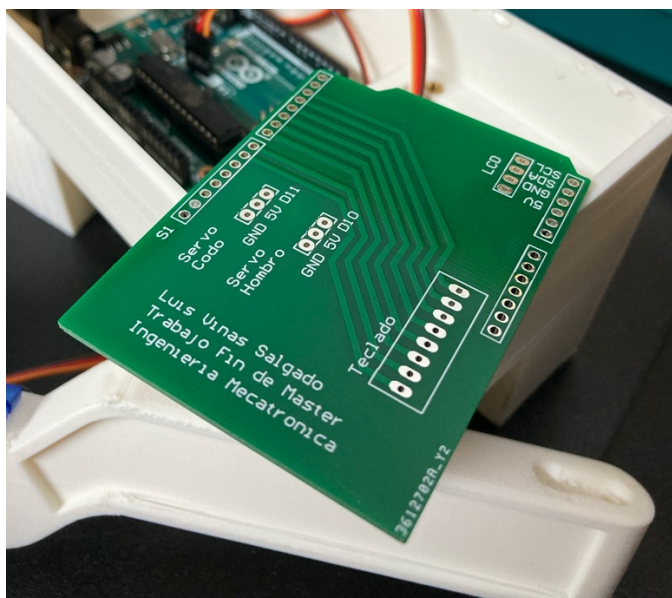


Figura 108. PCB de adaptación. Cara superior

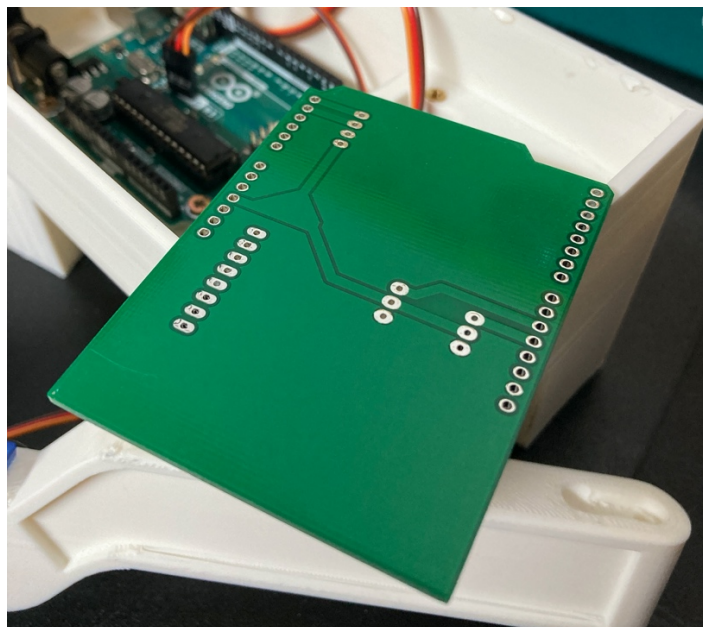


Figura 109. PCB de adaptación. Cara inferior

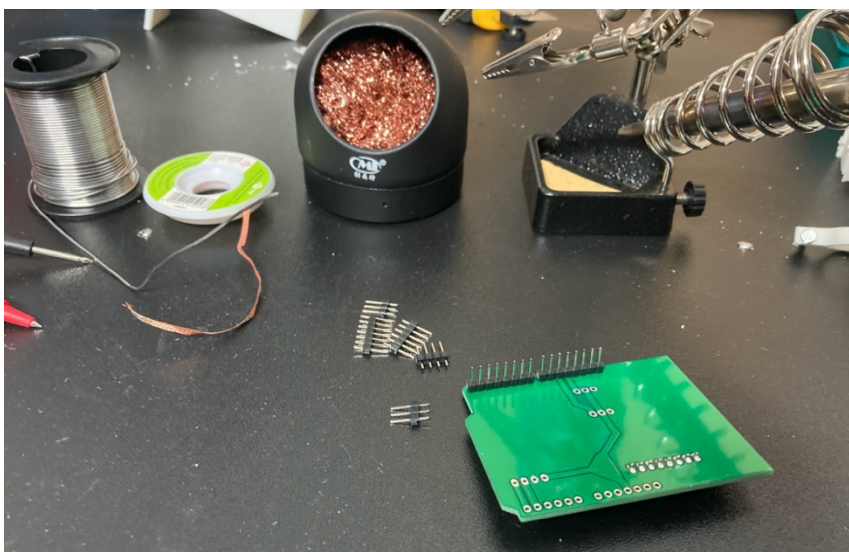


Figura 110. Proceso de soldadura de los pines

Una vez la PCB de adaptación está soldada, se conectan los pines de la misma al Arduino, y se conectan los servos, teclados y LCD a la PCB.



Figura 111. PCB de adaptación acoplada al Arduino y a la base principal

#### 6.13.4. Cableado del sistema de alimentación

Se cortan y sueldan los cables necesarios para el funcionamiento del sistema de alimentación, desde el conector jack de alimentación, el del Arduino, pasando por el interruptor de encendido y apagado. Se comprueba que el alojamiento dejado para el jack de conexión con el adaptador de corriente es el correcto y se asegura la unión mediante silicona. Una vez realizadas todas las conexiones, se prueba que haya continuidad y que el voltaje es el correcto en aquellos puntos donde es conocido.

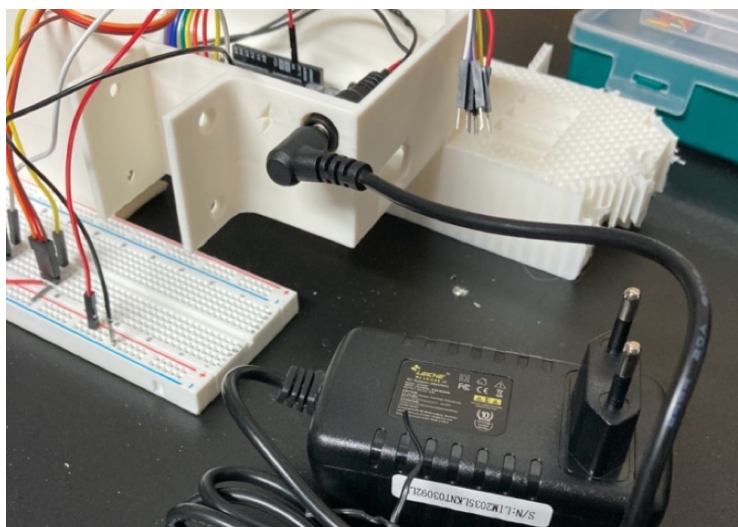


Figura 112. Adaptador de pared conectado en el jack



Figura 113. Detalle conector de alimentación





Figura 114. Vista superior del sistema de alimentación

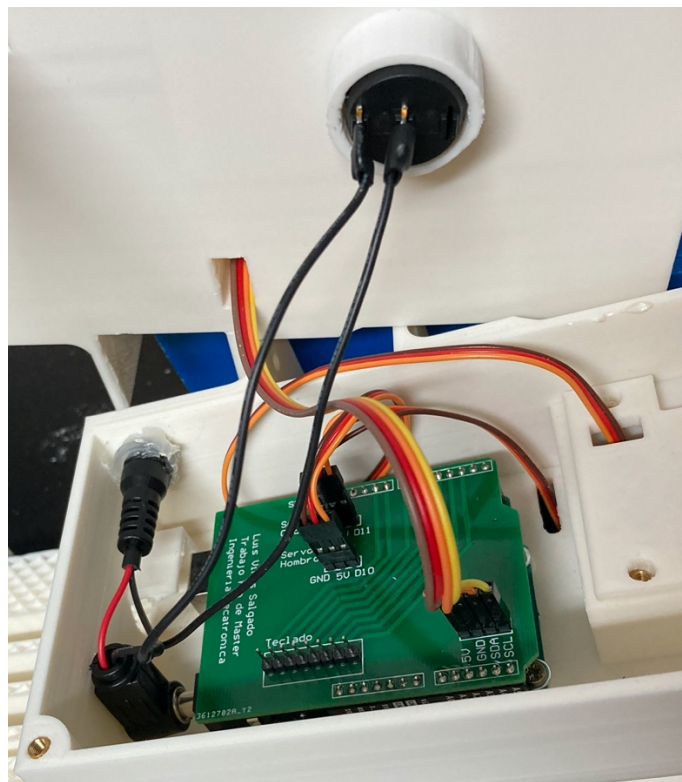


Figura 115. Sistema de alimentación cableado

### 6.13.5. Ensamblado entre la tapa superior y la base principal

Una vez que están montados y conectados eléctricamente los componentes de ambas partes, el sistema de alimentación cableado y los insertos puestos, se comprueba que los cables no molesten cuando la tapa superior se une a la base principal. Se unen ambas partes mediante los correspondientes tornillos.



Figura 116. Ensamblaje tapa superior con base principal



Figura 117. Unión entre base y tapa principales, lado izquierdo



Figura 118. Unión base y tapa principales, lado derecho

#### 6.13.6. Montaje del hombro y brazo

El primer paso para el montaje de la articulación del hombro es la inserción del eje en el brazo y del cojinete de fricción en el alojamiento de la base. Una vez ambos elementos metálicos están insertados, se posiciona el brazo con el eje apoyando sobre el cojinete, sin haber introducido completamente el servo.



Figura 119. Montaje del hombro

Una vez que el brazo está posicionado sobre la valona del cojinete, se termina de introducir el servo, encajando la pieza blanca transmisora de par en el alojamiento del brazo destinado a ello. Por último, se fija el servo con los 4 tornillos de la tapa para restringir su movimiento verticalmente.



Figura 120. Inserción del servo del hombro en su alojamiento

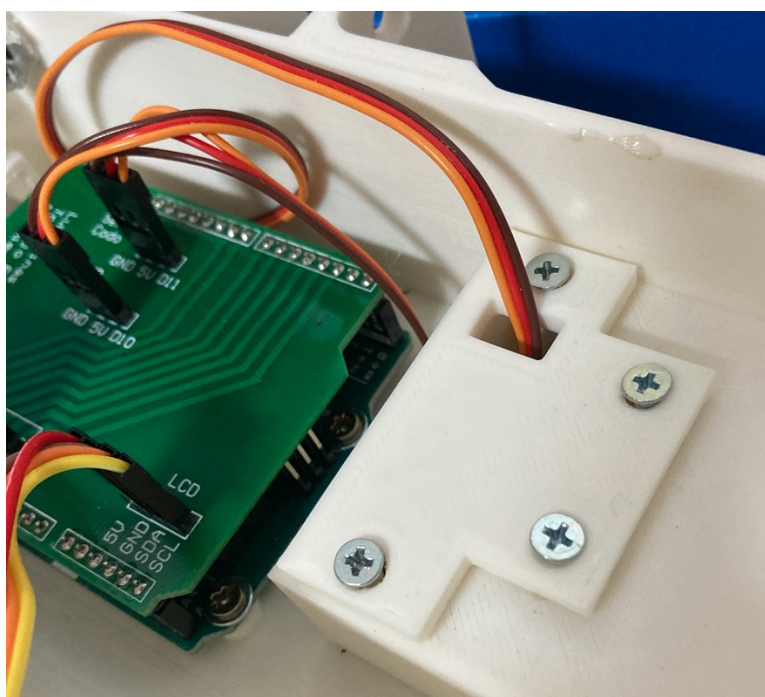


Figura 121. Servo del hombro restringido en movimiento vertical



### 6.13.7. Montaje del codo y antebrazo

En la parte delantera del brazo, se encastra a presión el servo del codo en el alojamiento diseñado para ello. Debido a su fijo ajuste, se decide prescindir de los tornillos de sujeción. El ajuste por presión y la articulación del codo evitarán que el servo del codo se mueva verticalmente.

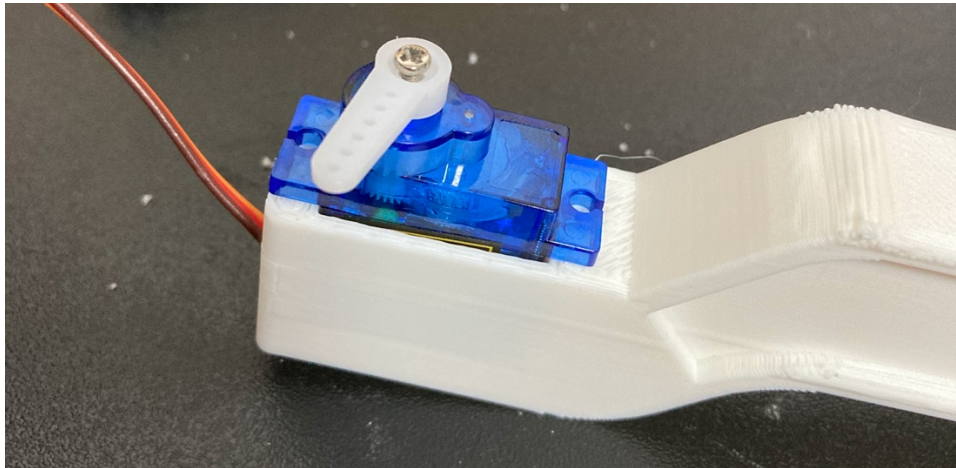


Figura 122. Inserción del servo del codo en el brazo

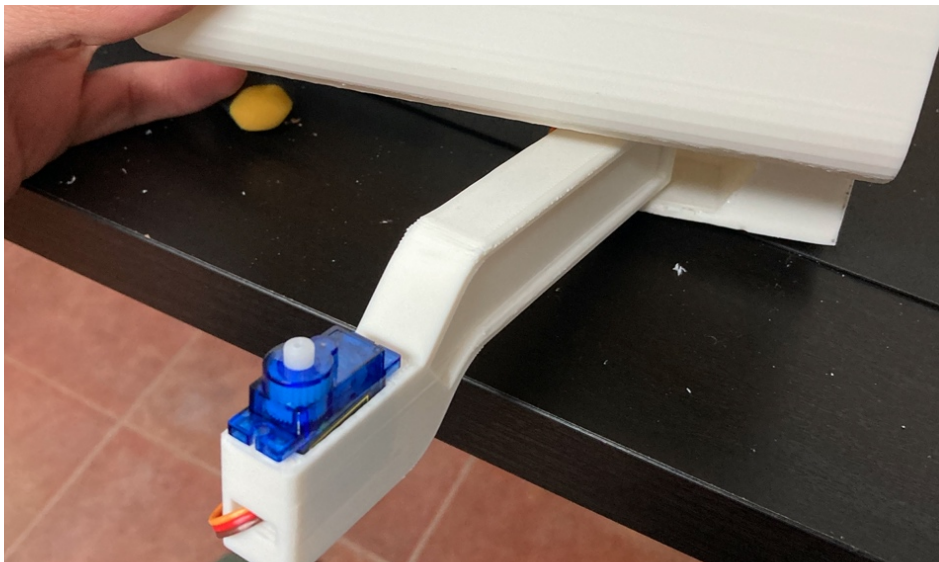


Figura 123. Ensamblaje del brazo



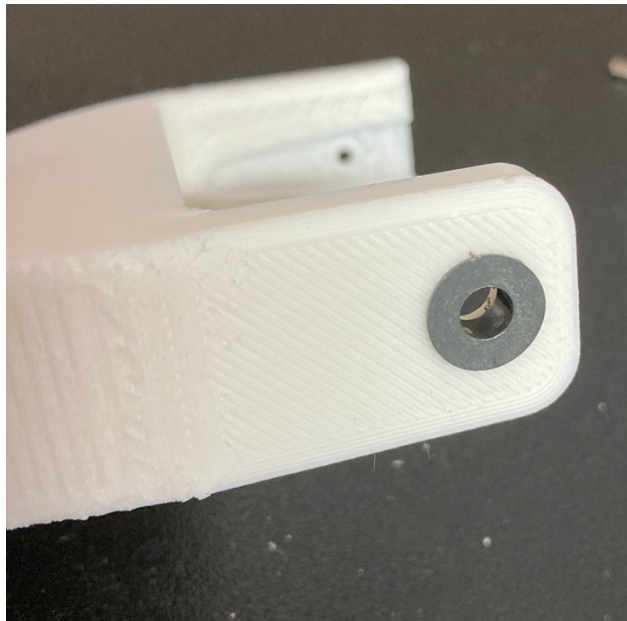


Figura 124. Encastre del cojinete en el antebrazo

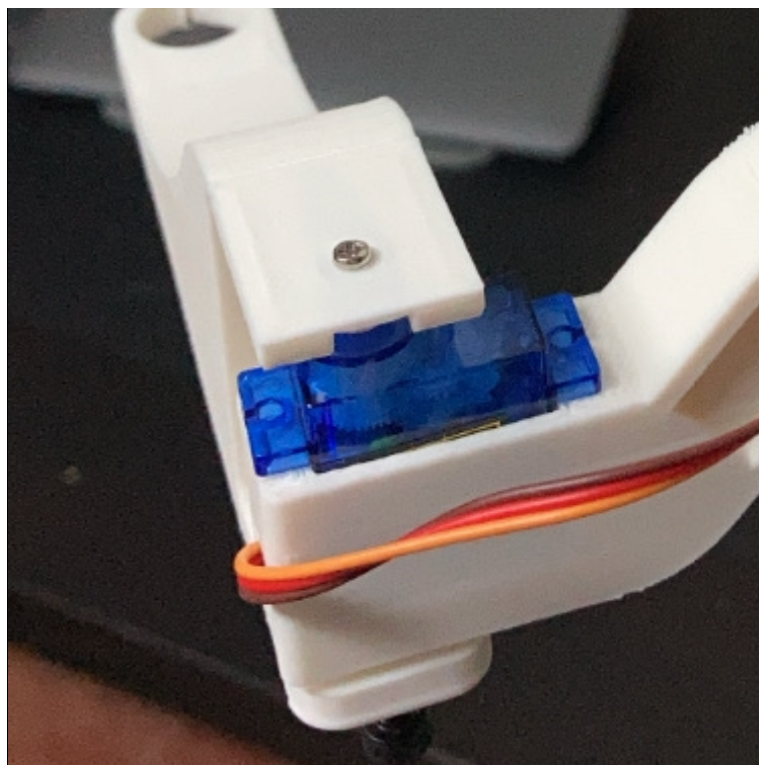


Figura 125. Articulación del codo

6.13.8. Otros componentes



Figura 126. Colector impreso

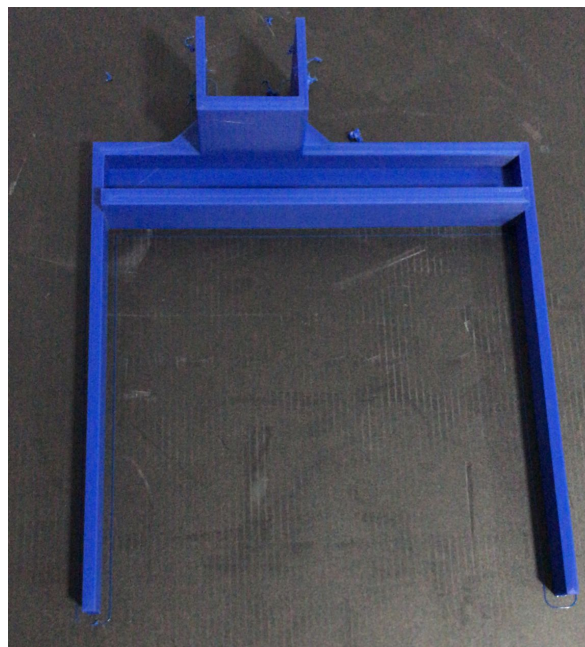


Figura 127. Soporte de la bandeja de las piezas

## 6.14. Instalación del prototipo

### 6.14.1. Instalación en el perfil de aluminio

Una vez que el prototipo ha sido fabricado y ensamblado, el siguiente paso es probar el código desarrollado para el mismo e instalarlo en el sitio de trabajo. Para ello, primeramente, se une al perfil de aluminio, comprobando que la unión al mismo mediante las tuercas de cabeza de martillo y los tornillos es la correcta. Se prueba el código, y una vez que este está depurado, se lleva el prototipo montado en el perfil de aluminio, listo para su instalación final.

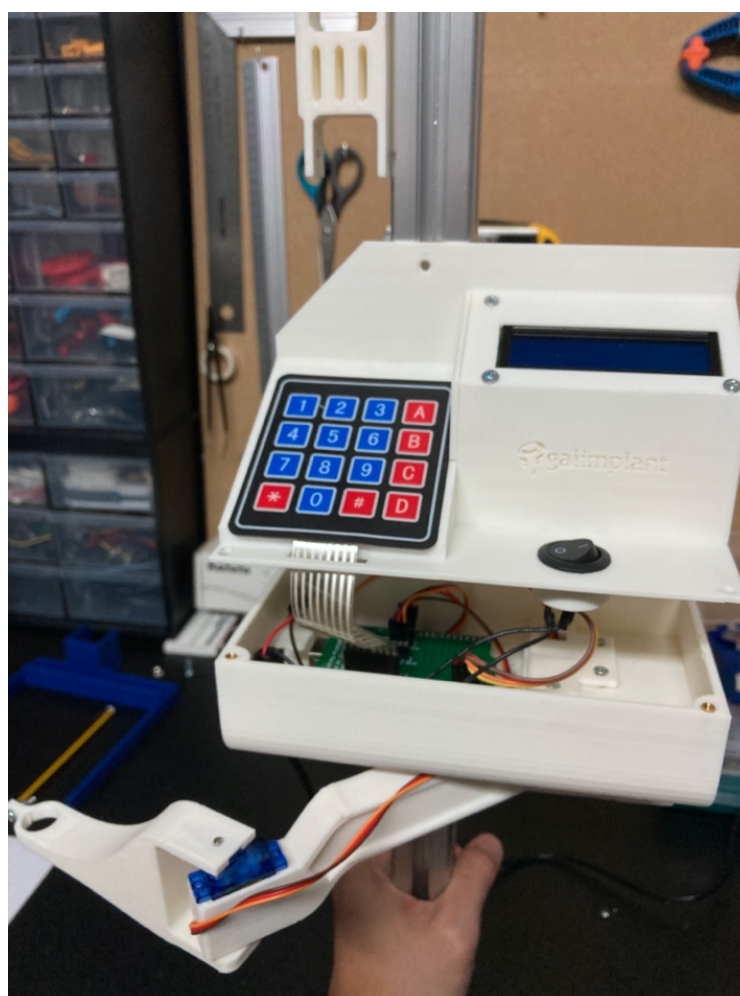


Figura 128. Instalación del prototipo en el perfil de aluminio

6.14.2. *Instalación en el torno*



Figura 129. *Instalación del prototipo en el torno*



## 7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Se ha puesto en marcha un proceso de internalización de uno de los procesos más importantes de la fabricación de los implantes y los aditamentos que la empresa comercializa. Se pasa de depender de una o varias empresas mecanizadoras externas, a poder mecanizar internamente los productos, con las ventajas económicas y de protección de know-how que ello conlleva. Se amplía la posibilidad de innovar y acortar tiempos de fabricación, en caso de stock bajo.

La internalización del mecanizado se plantea como un proyecto desde el momento en el que se inicia hasta que se de el paso de producir piezas para satisfacer las necesidades de *estocaje* de la empresa. No obstante, a corto plazo se plantea un plan de fabricación, con el objetivo no de producir el mayor número de piezas posibles, sino de experimentar, mecanizar otras referencias, mejorar y optimizar cada una de las operaciones intervinientes en los procesos de arranque de material.

Se han sentado las bases de una fabricación automatizado, en el que se ha puesto en marcha la primera de las fases, el mecanizado, y se ha continuado con la manipulación de las piezas mediante el diseño y fabricación de un prototipo de brazo robótico manipulador que coloca las piezas en las bandejas en el orden correcto. Este prototipo es fácilmente reproducible para los demás tornos que se puedan incorporar en un futuro en la empresa, dado que el sistema de extracción que lo acompaña sería el mismo o similar. Todo ello en conjunto permite aumentar la eficiencia del proceso frente a la manera de mecanizar tradicional, no apoyada en el uso de máquinas y sistemas automáticos.

Se ha llevado a cabo un prototipo de brazo robótico funcional, que ya de por si genera un aumento del grado de automatización del mecanizado, y que unido a los siguientes sistemas de manipulación y verificación mencionados conformarían una célula completamente automatizada e innovadora.



## **8. CONCLUSIONES**

Primera conclusión: poner en marcha el proceso de mecanizado de piezas partiendo de cero y con pocas referencias previas ha sido un proceso complejo y delicado. No obstante, una vez realizado para la primera de las máquinas, el proceso se vuelve más fácil para las siguientes piezas a fabricar y para las siguientes máquinas, puesto que es repetir el mismo proceso de nuevo.

Segunda conclusión: Se da por correcta la estrategia de comenzar a mecanizar la pieza con la geometría más sencilla y no por la que más piezas haya que hacer, dado que esto sienta unas buenas bases para progresivamente poder mecanizar todas las piezas que la empresa fabrique. No obstante, se debe continuar optimizando las estrategias de mecanizado en cuanto a la programación, condiciones de corte y uso de herramientas.

Tercera conclusión: La internalización del proceso de mecanizado requiere de una inversión grande de dinero, que se ve recuperada al cabo de los años, en un funcionamiento normal de la empresa.

Cuarta conclusión: el diseño y construcción de una célula de fabricación completamente automatizada se aborda mejor si esta se construye siguiendo el flujo de las piezas; es decir, yendo desde el mecanizado hasta la verificación, pasando por cada una de las etapas de manipulación, y parándose el tiempo necesario a cada una de las etapas que el proceso completo incluye.

Quinta conclusión: el prototipo de brazo robótico es plenamente funcional y usable, y fácilmente reproducible para instalar en más de un torno. Se pretende realizar una segunda iteración del prototipo, empleando servos más potentes e intentando reducir la longitud de los brazos. Se llevarán a cabo para cada uno de los tornos por independiente, y se desarrollará el sistema de manipulación que lo continúe y que transporte las piezas al área de verificación.

Como líneas de trabajo futuras se plantea continuar mecanizando más referencias e ir progresivamente hacia piezas cada vez más complejas. Por otro lado, se debe continuar trabajando hacia conseguir tener la célula completamente automatizada en todo aquello que se pueda, y en la que se

incluyan varios tornos. El siguiente paso es realizar la segunda iteración del prototipo y comenzar con el diseño de la cinta transportadora que traslade las piezas de la salida del torno al área de verificación. Paralelamente se prevé implementar un sistema automatizado de verificación de piezas, desarrollándose actualmente en la actualidad, creando así la célula automatizada de fabricación de implantes dentales y demás componentes protésicos por completo.



## 9. DEFINICIONES

**Aloplástico:** Un material aloplástico es un material de naturaleza inerte (no orgánico) normalmente destinado a su implantación dentro del organismo, con el fin de remodelar y crear volumen o sustituir un área anatómica determinada.

**Osteointegración:** Proceso por el que se produce una unión sólida entre un implante dental y el hueso natural del paciente.

**Periostio:** Membrana de tejido conjuntivo, adherida exteriormente a los huesos, que sirve para su nutrición y regeneración.

**Prótesis:** Elemento artificial destinado a restaurar la anatomía de uno o varios dientes.

**Prótesis implantosoportada:** Prótesis soportada por implantes dentales unidos a los mismos mediante una unión roscada que puede ser externa o interna dependiendo del fabricante.

**Know-how:** El término *know-how* hace referencia a un conjunto de conocimientos técnicos y administrativos imprescindibles para poder llevar a cabo un proceso comercial y que no están protegidos por una patente.

**Tornillo protésico:** Tornillo usado para unir o bien la prótesis al implante o bien la prótesis al pilar intermedio.



## 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. C. Dental, «Nart Clínica Dental,» 28 Febrero 2016. [En línea]. Available: <https://nartclinicadental.com/historia-de-los-implantes-dentales/>.
- [2] E. d. moderno, «El dentista moderno,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.eldentistamoderno.com/2019/06/1-de-cada-4-personas-con-implantes-dentales-en-espana-desarrollan-periimplantitis-a-medio-plazo-segun-un-estudio-promovido-por-sepa/>.
- [3] R. G. Sánchez, «Revista Habanera de Ciencias Médicas,» Octubre 2009. [En línea]. Available: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1729-519X2009000400030](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2009000400030).
- [4] I. d. Barcelona, «Nart Clínica Dental,» [En línea]. Available: <http://implantesdentalesbarcelona.es>.
- [5] «Mundo compresor - Torno CNC,» [En línea]. Available: <https://www.mundocompresor.com/diccionario-tecnico/torno-cnc>.
- [6] g. A. P. L. Joseba Pérez Bilbatua, «Refrigeración en Mecanizado de Alta Velocidad,» 15 12 2002. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/26084-Refrigeracion-en-Mecanizado-de-Alta-Velocidad.html>.
- [7] LKALLOY, «¿Por qué es tan difícil mecanizar el titanio de grado XXUMX?,» [En línea]. Available: <https://lkalloy.com/es/what-makes-alloyed-titanium-grade5-so-difficult-to-machine/>.
- [8] D. H. D. M. Don Graham, «Mecanizado en seco: un ensayo que vale la pena,» [En línea]. Available: <https://www.metalmecanica.com/temas/Mecanizar-en-seco,-un-ensayo-que-vale-la-pena+7030485?pagina=2>.
- [9] «Direct Industry. Qué robot industrial elegir,» [En línea]. Available: <http://guide.directindustry.com/es/que-robot-industrial-elegir/#2>.
-

- [10] «Larroiz elektronika - Robots cartesianos,» [En línea]. Available: <https://larraioz.com/iai/productos/robots-cartesianos>.
- [11] A. w. international, «Titanium Grade 5 / 6Al4V,» [En línea]. Available: <https://www.alloywire.es/products/titanium-grade-5-6al4v/>.
- [12] «EPSON. Rendimiento y valor excelentes,» [En línea]. Available: <https://www.epson.es/products/robot/epson-scara-ls10-b803c-sala-blanca#details>.
- [13] «Larraioz elektronika - Robot SCARA,» [En línea]. Available: <https://larraioz.com/iai/productos/robots-scara>.
- [14] «Arduino Timer Interrupts,» [En línea]. Available: <https://www.instructables.com/Arduino-Timer-Interrupts/>.
- [15] «Micro Servo SG90,» [En línea]. Available: <https://www.iberobotics.com/producto/micro-servo-towerpro-sg90-1-8kg9g0-12seg/>.
- [16] «Qué es un torno,» [En línea]. Available: <http://brandomyblogg222.blogspot.com/2010/02/la-historia-del-torno.html>.
- [17] «Mecanizado de estructuras dentales,» [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/104713-Mecanizado-de-estructuras-dentales.html>.

## 11. ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. IMPLANTES GALIMPLANT .....	3
FIGURA 8. IMPLANTE CON PILAR RECTO ESTÉTICO GALIMPLANT.....	4
FIGURA 3. ADITAMENTOS DE GALIMPLANT ANODIZADOS.....	5
FIGURA 4. BRAZO ROBÓTICO MANIPULADOR EN TORNO DE CABEZAL FIJO .....	7
FIGURA 5. SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE PIEZAS POR SUCCIÓN. CONTRA CABEZAL .....	8
FIGURA 6. DEPOSICIÓN DE PIEZAS MEDIANTE SISTEMA DE EXTRACCIÓN POR SUCCIÓN .....	8
FIGURA 7. USO DE CINTAS TRANSPORTADORAS EN LA INDUSTRIA.....	9
FIGURA 8. ADITAMENTOS Y RÉPLICAS DE IMPLANTES DE GALIMPLANT .....	14
FIGURA 9. TORNILLO PROTÉSICO M2.....	15
FIGURA 10. DIMENSIONES DEL TORNILLO PROTÉSICO .....	16
FIGURA 11. CONTROL DE UN TORNO CNC.....	19
FIGURA 12. TORNO DE CABEZAL FIJO .....	20
FIGURA 13. FUNCIONAMIENTO DEL TORNO DE CABEZAL FIJO .....	20
FIGURA 14. TORNO DE CABEZAL MÓVIL.....	21
FIGURA 15. FUNCIONAMIENTO DE TORNO DEL CABEZAL MÓVIL (SANDVIK COROMANT).....	21
FIGURA 16. EJES DEL TORNO ADQUIRIDO.....	24
FIGURA 17. CARGADOR DE BARRAS TIPO REVÓLVER.....	25
FIGURA 18. TORNO INSTALADO .....	25
FIGURA 19. MATERIAL DE PARTIDA .....	26
FIGURA 20. FUNCIONAMIENTO CABEZALES DEL TORNO .....	30
FIGURA 21. COORDENADAS PARA EL DESBASTE.....	31
FIGURA 22. COORDENADAS PARA EL ACABADO.....	31
FIGURA 23. PROYECTOR DE PERFILES MITUTOYO .....	36
FIGURA 24. VISOR DE PIEZAS .....	36
FIGURA 25. PIE DE REY MITUTOYO .....	37
FIGURA 26. MICRÓMETRO DIGITAL .....	37
FIGURA 27. CAJETÍN DE LAS PIEZAS .....	39
FIGURA 28. CINTA Y RAMPA DE EXTRACCIÓN DE PIEZAS .....	39
FIGURA 29. BANDEJA DE PLÁSTICO PARA LAS PIEZAS .....	40
FIGURA 30. PRINCIPALES MORFOLOGÍAS DE ROBOTS.....	41
FIGURA 31. MORFOLOGÍA DE UN ROBOT SCARA .....	42

---

FIGURA 32. EJEMPLO DE ROBOT SCARA .....	43
FIGURA 33. EJEMPLO DE ROBOT CARTESIANO.....	44
FIGURA 34. VOLUMEN DE TRABAJO ROBOT SCARA Y CARTESIANO .....	45
FIGURA 35. CINTA Y RAMPA MODELADAS VS SISTEMA REAL. VISTA 1 .....	47
FIGURA 36. CINTA Y RAMPA MODELADAS. VISTA 2.....	48
FIGURA 37. PRIMER DISEÑO CONCEPTUAL MECÁNICO .....	49
FIGURA 38. ESPACIO ENTRE LA CINTA Y LA RAMPA.....	50
FIGURA 39. SEGUNDO DISEÑO CONCEPTUAL MECÁNICO .....	51
FIGURA 40. DISEÑO CONCEPTUAL ARTICULACIÓN CODO .....	52
FIGURA 41. DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO GENÉRICO DEL SOFTWARE.....	55
FIGURA 42. SÍNTESIS DEL ROBOT SCARA .....	56
FIGURA 43. IMPRESORA RAISE 3D Pro2 PLUS.....	57
FIGURA 44. PROBETA DE PRUEBA DE IMPRESIÓN.....	58
FIGURA 45. PROBETA DE PRUEBA IMPRESA Y MEDIDA .....	58
FIGURA 46. PROBETA IMPRESA ATORNILLADA A LA CINTA .....	59
FIGURA 47. PROBETA DE AGUJEROS IMPRESA - DISEÑO .....	59
FIGURA 48. PROBETA DE AGUJEROS IMPRESA - PRUEBA.....	60
FIGURA 49. DISEÑO DEL COLECTOR. AGUJEROS Y SEPARACIÓN ENTRE OREJETAS.....	61
FIGURA 50. DISEÑO DEL COLECTOR. INCLINACIÓN Y DIÁMETRO DE LA BOQUILLA.....	61
FIGURA 51. ORIENTACIÓN DEL COLECTOR EN LA IMPRESIÓN .....	62
FIGURA 52. DISEÑO DEL COLECTOR. VISTA SUPERIOR.....	63
FIGURA 53. UNIÓN DEL COLECTOR AL BASTIDOR. VISTA POSTERIOR.....	63
FIGURA 54. UNIÓN DEL COLECTOR AL BASTIDOR. VISTA FRONTAL.....	64
FIGURA 55. TUERCA TIPO MARTILLO PARA PERFIL DE ALUMINIO .....	65
FIGURA 56. UNIÓN DEL PERFIL AL BASTIDOR. PARTE TRASERA.....	65
FIGURA 57. PIEZA DE UNIÓN INTERMEDIA .....	66
FIGURA 58. UNIÓN DEL PERFIL AL BASTIDOR: VISTA LATERAL DERECHA .....	66
FIGURA 59. UNIÓN DEL PERFIL AL BASTIDOR: VISTA LATERAL IZQUIERDA.....	67
FIGURA 60. BASE PRINCIPAL. VISTA SUPERIOR 1 .....	68
FIGURA 61. BASE PRINCIPAL. VISTA TRASERA .....	69
FIGURA 62. BASE PRINCIPAL. VISTA INFERIOR.....	69
FIGURA 63. BASE PRINCIPAL. VISTA DEL ASIENTO PARA EL COJINETE DE FRICCIÓN .....	70
FIGURA 64. BASE PRINCIPAL. VISTA SUPERIOR 2 .....	70
FIGURA 65. VISTA DE LOS COMPONENTES INTERNOS DE LA BASE PRINCIPAL.....	71

---

FIGURA 66. DISEÑO DE LA TAPA PRINCIPAL. VISTA FRONTAL .....	72
FIGURA 67. DISEÑO DE LA TAPA PRINCIPAL. VISTA POSTERIOR .....	73
FIGURA 68. DISEÑO DE LA TAPA PRINCIPAL. VISTA INFERIOR.....	73
FIGURA 69. TAPA DEL LCD.....	74
FIGURA 70. DETALLE DE LA TAPA DEL LCD.....	75
FIGURA 71. DISEÑO DE LA TAPA CON COMPONENTES ELECTRÓNICOS .....	75
FIGURA 72. TAPA PRINCIPAL. VISTA INFERIOR .....	76
FIGURA 73. VISTA GENERAL DE LA ARTICULACIÓN HOMBRO .....	77
FIGURA 74. DIMENSIONES DEL COJINETE SELECCIONADO .....	77
FIGURA 75. DISEÑO DE LA ARTICULACIÓN HOMBRO.....	78
FIGURA 76. VISTA EN CORTE DE LA ARTICULACIÓN HOMBRO.....	79
FIGURA 77. DISEÑO DE LA ARTICULACIÓN CODO .....	80
FIGURA 78. DETALLE SERVO ARTICULACIÓN CODO.....	80
FIGURA 79. DISEÑO DE LA ARTICULACIÓN CODO .....	81
FIGURA 80. ARTICULACIÓN CODO. VISTA EN CORTE.....	81
FIGURA 81. UNIÓN DEL TUBO DE PLÁSTICO AL ANTEBRAZO .....	82
FIGURA 82. SOPORTE DE LA BANDEJA .....	82
FIGURA 83. SOPORTE DE LA BANDEJA DE LAS PIEZAS. VISTA SUPERIOR.....	83
FIGURA 84. SOPORTE DE LA BANDEJA DE LAS PIEZAS. VISTA INFERIOR.....	83
FIGURA 85. RENDERIZADO DEL BRAZO ROBÓTICO MONTADO EN EL TORNO .....	84
FIGURA 86. RENDERIZADO 2 DEL BRAZO ROBÓTICO MONTADO EN EL TORNO.....	84
FIGURA 87. TECLADO NUMÉRICO SELECCIONADO .....	85
FIGURA 88. CONEXIONES DEL TECLADO NUMÉRICO SELECCIONADO.....	86
FIGURA 89. LCD CON MÓDULO DE COMUNICACIÓN I2C .....	87
FIGURA 90. SERVO SG-90 .....	88
FIGURA 91. ARDUINO UNO .....	90
FIGURA 92. ADAPTADOR DE CORRIENTE 9V 1A.....	91
FIGURA 93. DISEÑO DEL ESQUEMÁTICO DE LA PCB .....	92
FIGURA 94. RUTEADO DE LA PCB .....	93
FIGURA 95. 3D DE LA PCB DE ADAPTACIÓN.....	93
FIGURA 96. CONSULTA DEL PROGRAMA A MECANIZAR .....	95
FIGURA 97. CONSULTA DE INICIO DE CICLO O VOLVER A SELECCIONAR .....	96
FIGURA 98. MUESTRA DE LA REFERENCIA A MECANIZAR, LA PIEZA Y LA CUENTA ATRÁS.....	96
FIGURA 99. ACCESO AL ARDUINO DESDE EL EXTERIOR .....	97

---

FIGURA 100. CONSUMO DE CORRIENTE DE LA PANTALLA LCD .....	98
FIGURA 101. PRUEBA DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS .....	99
FIGURA 102. IMPRESIÓN DE LA TAPA PRINCIPAL .....	100
FIGURA 103. INCORPORACIÓN DEL LCD Y SU TAPA .....	100
FIGURA 104. TAPA PRINCIPAL CON COMPONENTES INCORPORADOS .....	101
FIGURA 105. IMPRESIÓN DE LA BASE PRINCIPAL.....	101
FIGURA 106. INSERTOS ROSCADOS PARA PLÁSTICO ENCASTRADOS.....	102
FIGURA 107. ENCAJE DEL SERVO DEL HOMBRO.....	102
FIGURA 108. PCB DE ADAPTACIÓN. CARA SUPERIOR.....	103
FIGURA 109. PCB DE ADAPTACIÓN. CARA INFERIOR.....	103
FIGURA 110. PROCESO DE SOLDADURA DE LOS PINES .....	104
FIGURA 111. PCB DE ADAPTACIÓN ACOPLADA AL ARDUINO Y A LA BASE PRINCIPAL .....	104
FIGURA 112. ADAPTADOR DE PARED CONECTADO EN EL JACK.....	105
FIGURA 113. DETALLE CONECTOR DE ALIMENTACIÓN .....	105
FIGURA 114. VISTA SUPERIOR DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN .....	106
FIGURA 115. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN CABLEADO.....	106
FIGURA 116. ENSAMBLAJE TAPA SUPERIOR CON BASE PRINCIPAL.....	107
FIGURA 117. UNIÓN ENTRE BASE Y TAPA PRINCIPALES, LADO IZQUIERDO .....	107
FIGURA 118. UNIÓN BASE Y TAPA PRINCIPALES, LADO DERECHO .....	108
FIGURA 119. MONTAJE DEL HOMBRO .....	108
FIGURA 120. INSERCIÓN DEL SERVO DEL HOMBRO EN SU ALOJAMIENTO .....	109
FIGURA 121. SERVO DEL HOMBRO RESTRINGIDO EN MOVIMIENTO VERTICAL .....	109
FIGURA 122. INSERCIÓN DEL SERVO DEL CODO EN EL BRAZO .....	110
FIGURA 123. ENSAMBLAJE DEL BRAZO.....	110
FIGURA 124. ENCASTRE DEL COJINETE EN EL ANTEBRAZO.....	111
FIGURA 125. ARTICULACIÓN DEL CODO .....	111
FIGURA 126. COLECTOR IMPRESO .....	112
FIGURA 127. SOPORTE DE LA BANDEJA DE LAS PIEZAS .....	112
FIGURA 128. INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO EN EL PERFIL DE ALUMINIO .....	113
FIGURA 129. INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO EN EL TORNO .....	114



## 12. ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LAS PIEZAS A MECANIZAR .....	18
TABLA 2. FABRICANTES DE MÁQUINA HERRAMIENTA CONSULTADOS .....	23
TABLA 3. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL DE PARTIDA .....	26
TABLA 5. RESULTADOS DE LA SÍNTESIS.....	56
TABLA 6. COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES ARDUINOS .....	89

## ANEXO I: PLANIFICACIÓN

En el presente anexo se muestra la planificación llevada a cabo durante la realización del proyecto, teniendo este comienzo en el mes de enero, y finalizando a mediados de julio del año 2021.

El proyecto se ha dividido en 4 partes principales: una primera parte de, análisis previo y conocimiento de la empresa donde se realiza, un apartado de desarrollo del proceso de fabricación relativo al mecanizado de las piezas, el desarrollo del prototipo de brazo robótico para la manipulación de las piezas y, finalmente, el desarrollo de toda la documentación asociada al mismo, como es la memoria, los planos y la presentación final.

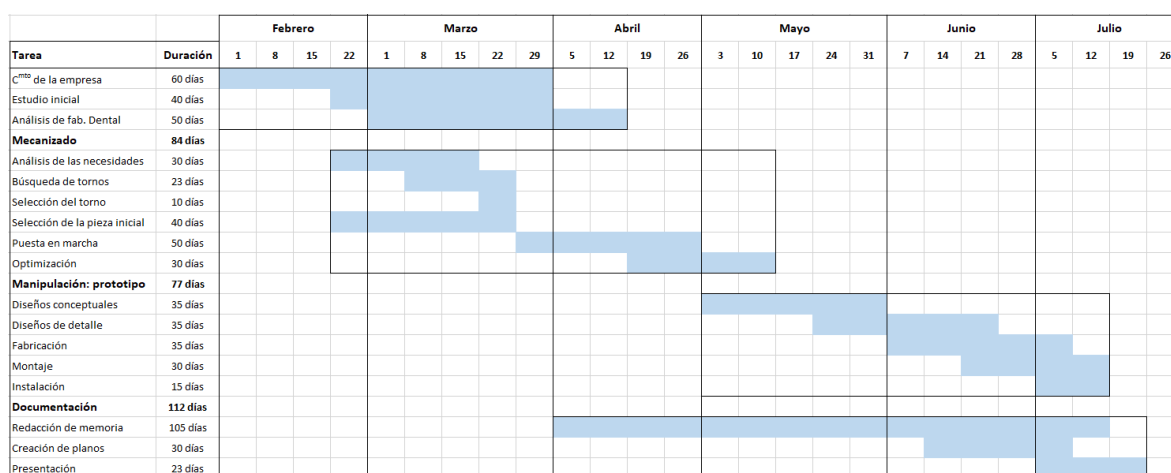


Figura 130. Diagrama de Gantt - planificación del proyecto

## ANEXO II: PRESUPUESTO

En este apartado se pretende calcular el coste del desarrollo del proyecto hasta la fecha. Para ello, debemos incluir tanto el coste del desarrollo del mecanizado como el coste del diseño y fabricación del prototipo de brazo robótico.

Respecto del desarrollo del mecanizado, no se tendrá en cuenta el coste de la máquina, herramientas o equipos de verificación, sino que se tendrá en cuenta el coste relacionado con la puesta en marcha del mecanizado. En relación con el prototipo, este se diseña con el fin de ser acoplado a la salida de las piezas de un torno de cabezal móvil para de aumentar el grado de automatización y autonomía de este. Se plantea como un prototipo totalmente funcional listo para ser usado y con posibilidades de reproducir más unidades de este de la misma manera, no siendo diseñado optimizado y orientado a una posible fabricación en serie. En este apartado se presenta el coste estimado del prototipo desde el punto de vista de su diseño, fabricación, montaje e implementación. Para calcular el coste del desarrollo del mecanizado de una pieza, se deben tener en cuenta los siguientes apartados:

### *a. Coste laboral*

Se supone un coste horario de 14 €/h y una duración total del desarrollo del proyecto de 24 semanas, con una dedicación de 22 horas semanales. Este coste, por un lado, incluye la puesta en marcha del proceso de mecanizado, desarrollo y optimización de la estrategia de mecanizado. De la misma manera, se incluye en él el diseño y fabricación del prototipo, así como su puesta en marcha e instalación. El coste laboral total supone 13.440€.

Tabla 6. Coste laboral

<b>Duración del Proyecto (semanas)</b>	24
<b>Horas semanales (h)</b>	22
<b>Horas de trabajo (h)</b>	528
<b>Coste horario (€/h)</b>	14
<b>Total (€)</b>	<b>7.392€</b>

### b. Amortización del equipo informático y otras herramientas

Se estima el coste del equipo informático empleado tanto para el desarrollo del mecanizado como para el diseño y fabricación del prototipo, además de equipos auxiliares como fuente de alimentación, herramientas de corte, estañador...

Tabla 7. Costes de amortización del equipo informático y otras herramientas

<b>Coste equipo informático (€)</b>	<b>2200</b>
<b>Período de amortización (años)</b>	5
<b>Coste anual (€/año)</b>	440
<b>Coste mensual (€/mes)</b>	36,67
<b>Duración del proyecto (meses)</b>	4
<b>Coste de amortización durante el proyecto (€)</b>	<b>146,67</b>

### c. Uso de software

Se estima el coste de uso de los diferentes softwares utilizados. Para estimar el coste de SolidWorks, se parte de una licencia permanente de 8250€, con una amortización a 8 años.

Tabla 8. Coste del Software

<b>Programa</b>	<b>Coste anual licencia (€)</b>	<b>Tiempo de uso (meses)</b>	<b>Coste (€)</b>
<b>SolidWorks</b>	1031,25	6	515,60
<b>Altium Designer</b>	3000	6	1500
<b>Microsoft Office</b>	99	6	49,50
<b>ideaMaker</b>	Gratuita	6	0,00
<b>CNC Wizard</b>	Gratuita	6	0,00
<b>Arduino</b>	Gratuita	6	0,00
<b>Total (€)</b>			<b>2065,10</b>

### d. Coste de los ejes mecanizados

Los dos ejes que utiliza el prototipo se mecanizan en un torno CNC, empleando un total de una hora. Considerando un coste de taller de mecanizado de cero, solamente incluyendo el material empleado, el coste del mecanizado supone aproximadamente 5 €.

### e. Coste impresión 3D

Salvo los ejes mecanizados y los elementos comerciales, el prototipo se fabrica enteramente en plástico PLA, impreso en una impresora 3D de filamento. Teniendo en cuenta el coste de la impresora utilizada, un periodo de amortización de 5 años y que solamente se ha hecho uso de esta en el último mes del proyecto, se obtiene un coste correspondiente a la amortización de la impresora de 50 €.

Por otro lado, se estima un consumo de material PLA de 1,3 Kg, con un coste por Kg de 25 €. El total del coste del material es de 32,5 €.

Con lo anterior, el coste total del proceso de impresión supone 82,50 €.

### f. Componentes del prototipo

Tabla 9. Coste de los componentes del prototipo

Ítem	Nombre	Cantidad	Coste Unitario (€)	Coste Total (€)
1	Arduino UNO	1	24,20	24,20
2	Servo SG 90	2	3,00	6,00
3	Teclado numérico	1	1,40	1,40
4	Pantalla LCD	1	6,99	6,99
5	Fuente 12V	1	9,99	9,99
6	Conectores /pines / interruptores	1	1,00	1,00
7	PCB	1	13,00	13,00
8	Tubo de plástico	1	5,00	5,00
9	Perfil Aluminio	1	5,00	5,00
10	Tornillería	1	10,00	10,00
11	Cojinetes IGUS	2	6,00	12,00
	<b>Total (€)</b>			94,58

La descripción de la tornillería empleada se recoge en la siguiente tabla.

Tabla 10. Lista de la tornillería empleada

Listado de la tornillería	Cantidad
Tornillo cabeza cilíndrica M3x8	1
Tornillo avellanado M3x16	2
Tornillo avellanado M3x10	7
Tornillo cabeza cilíndrica M4x12	13
Tornillo cabeza cilíndrica M4x16	3
Inserto roscado plástico M3	6
Inserto roscado plástico M4	1
Tuerca M3	3
Tuerca M4	3
Tuerca M4 cabeza martillo	13
Tornillo autorroscantes d3	4

*g. Coste total del prototipo*

Tabla 11. Coste total del prototipo

Concepto	Coste (€)
Coste laboral	7392
Equipo informático y otras herramientas	146,67
Uso de software	2065,10
Ejes mecanizados	5
Impresión 3D	82,50
Componentes del prototipo	94,58
<b>Total (€)</b>	<b>9785,85</b>

El coste del trabajo proyectual de ingeniería del desarrollo del prototipo de brazo robótico asciende a **9785,85 €**, antes de tener en cuenta el beneficio empresarial y los impuestos.

En la siguiente tabla se realizan los correspondientes cálculos para obtener el presupuesto total del proyecto, una vez aplicado el 21% de IVA, y suponiendo un beneficio empresarial de un 10%.

Tabla 12. Beneficio empresarial

Concepto	Coste (€)
Coste proyecto	9785,85
Beneficio empresarial (10%)	978,50
Presupuesto total sin IVA	10764,35
IVA (21%)	2260,50
<b>Presupuesto TOTAL:</b>	<b>13024,85</b>

De esta manera, el presupuesto total del proyecto asciende a **13.024,85€**.

## ANEXO III: CÓDIGO ARDUINO

```
//Codigo Arduino TFM Luis Viñas Salgado - Galimplant

//Incluir librerias del teclado
#include <Keypad.h>
//Incluir librerias para el protocolo I2C
#include <Wire.h>
//Incluir librerias para la pantalla LCD
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
//Incluir libreria servo
#include <Servo.h>

//Pin PWM de los servos
#define SERVO1_PIN 10
#define SERVO2_PIN 11

//Tamaño del LOTE_SIZE
#define LOTE_SIZE 24
//Veces que desborda el Timer 0 cada segundo
#define UN_SEGUNDO 63

// Constants for row and column sizes
const byte ROWS = 4;
const byte COLS = 4;

// Array to represent keys on keypad
char hexaKeys[ROWS][COLS] = {
  {'1', '2', '3', 'A'},
  {'4', '5', '6', 'B'},
  {'7', '8', '9', 'C'},
  {'*', '0', '#', 'D'}
};

// Connections to Arduino
byte rowPins[ROWS] = {9, 8, 7, 6};
byte colPins[COLS] = {5, 4, 3, 2};

// Create keypad object
Keypad customKeypad = Keypad(makeKeymap(hexaKeys), rowPins, colPins, ROWS,
COLS);

// Create LCD object
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); //direccion, 16 columnas y 2 filas

// Create a servo object
Servo Servo1;
Servo Servo2;

//Variables
int cont=0;
int cont_seg=0;
```

---



```
int _angulo_servo1 = 0;    //Servo angle which can vary from 0 - 180
int _angulo_servo2 = 0;
int _tiempo_pieza;      //Tiempo (s) que la pieza tarda en mecanizarse
                        (tiempo entre dos cambios de posicion)
int pos=1;              //Posicion del embudo
int _programa;
String _pieza;
bool aux=false;
bool se_mueve;          //true el brazo se mueve, timer se activa, LCD cuenta
bool sabe_programa = false;
bool orden_inicio = false;
bool tecla_incorrecta = false;

void setup() {

  //Setup LCD with backlight and initialize
  lcd.backlight();
  lcd.init();

  //Attach the pin to the object so that we can send the signal to it
  Servo1.attach(SERVO1_PIN);
  Servo1.write(180-0);
  Servo2.attach(SERVO2_PIN);
  Servo2.write(180-0);

  //set timer0 interrupt at 2kHz
  TCCR0A = 0; // set entire TCCR0A register to 0
  TCCR0B = 0; // same for TCCR0B
  TCNT0 = 0; //initialize counter value to 0
  // set compare match register for khz increments
  OCR0A = 255; // = (16*10^6) / (2000*1024) - 1 (must be <256)
  // turn on CTC mode
  TCCR0A |= (1 << WGM01);
  // Set CSX2 and CSX0 bits for 1024 prescaler / CSX1 -> 8 / CSX1 y CS00 ->
64 / CSX2 -> 256 /
  TCCR0B |= (1<<CS02) | (1<<CS00);
  // enable timer compare interrupt
  TIMSK0 |= (1 << OCIE0A);

  //Mensaje de inicio
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Iniciando...");
  delay(UN_SEGUNDO*1);
}

ISR(TIMER0_COMPA_vect) {
  aux=true;
}
```

---

```
void PreguntarPieza() {

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Que ref. se va");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("a mecanizar?");

}

//Funcion para seleccionar un programa
//Se muestra al inicio y siempre que se pulse una tecla
int SeleccionPrograma() {

    int prog=0;

    //Esperar a que se pulse una tecla
    char key = customKeypad.waitForKey();

    //Hay dos opciones, o introducen numero letra/simbolo
    switch (key) {

        case 'A':
            tecla_incorrecta = true; return;
        case 'B':
            tecla_incorrecta = true; return;
        case 'C':
            tecla_incorrecta = true; return;
        case 'D':
            tecla_incorrecta = true; return;
        case '*':
            tecla_incorrecta = true; return;
        case '#':
            tecla_incorrecta = true; return;
        default:
            prog = key - '0' ;

    }

    //Muestra el programa seleccionado
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Programa sel: "); lcd.print(prog);

    //Ya sabe el programa
    sabe_programa = true;

    //Tecla correcta
    tecla_incorrecta = false;

    return prog;

}
```

---

```
//Funcion que asigna tiempo en funcion del programa seleccionado
int Asigna_tiempo(int prog) {

    //Si se ha pulsado mal la tecla no entres
    if (tecla_incorrecta == true) return;

    //Tiempo de mecanizado de la pieza
    int t;

    switch (prog) {

        case 1:
            t = 2;          //TMU-4048 (38s)
            _pieza = "TMU-4048";
            break;
        case 2:
            t = 10;        //TP-040 ( s)
            _pieza = "TP-040";
            break;
        case 3:
            t = 20;
            break;

    }

    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Tiempo: "); lcd.print(t); lcd.print(" s");
    delay(UN_SEGUNDO*2);

    return t;
}

void InicioMovimiento() {

    //Si se ha pulsado mal la tecla no entres
    if (tecla_incorrecta == true) return;

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("*: Iniciar");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("#: Volver a sel");

    //Esperar a que se pulse una tecla
    char key = customKeypad.waitForKey();

    switch (key) {

        case '*':
            //Se inicia trabajo
            se_mueve = true;
            sabe_programa = true;
            lcd.clear();
            lcd.setCursor(0,0);
    }
}
```

---

```

        lcd.print("Inicio de");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("trabajo");
        delay(UN_SEGUNDO);
        break;

    case '#':
        //Se vuelve a la seleccion de pieza a mecanizar
        sabe_programa = false;
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Vuelve a");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("seleccionar");
        delay(UN_SEGUNDO);
        break;
    }
}

//Entra cada vez que se deba generar un cambio de posicion. Cada tiempo_pieza
segundos
void cambio_pos() {

    pos++;

    goto_pos(pos);

    //Si era la ultima posicion, parar o reiniciar
    if (pos>LOTE_SIZE) {
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Fin de lote");
        se_mueve = false;
        //Vete a la pos 1
        pos=1;
        goto_pos(pos);
    }
}

//Funcion para cambiar la pos a la siguiente
void goto_pos(int posicion) {

    //Se puede hacer calculando la pos o directamente asignando a cada celda un
    angulo de cada motor previamente calculado
    switch (posicion) {

        case 1: _angulo_servo1 = 0; _angulo_servo2 = 0; break;
        case 2: _angulo_servo1 = 20; _angulo_servo2 = 20; break;
        case 3: _angulo_servo1 = 30; _angulo_servo2 = 30; break;
        case 4: _angulo_servo1 = 40; _angulo_servo2 = 40; break;
        case 5: _angulo_servo1 = 50; _angulo_servo2 = 50; break;
        case 6: _angulo_servo1 = 60; _angulo_servo2 = 60; break;
    }
}

```

---

```
    case 7: _angulo_servo1 = 70; _angulo_servo2 = 70; break;
    case 8: _angulo_servo1 = 80; _angulo_servo2 = 80; break;
    case 9: _angulo_servo1 = 90; _angulo_servo2 = 90; break;
    case 10: _angulo_servo1 = 0; _angulo_servo2 = 0; break;
    case 11: _angulo_servo1 = 180; _angulo_servo2 = 180; break;
    case 12: _angulo_servo1 = 135; _angulo_servo2 = 135; break;
    case 13: _angulo_servo1 = 0; _angulo_servo2 = 0; break;
    case 14: _angulo_servo1 = 45; _angulo_servo2 = 45; break;
    case 15: _angulo_servo1 = 90; _angulo_servo2 = 90; break;
    case 16: _angulo_servo1 = 100; _angulo_servo2 = 100; break;
    case 17: _angulo_servo1 = 110; _angulo_servo2 = 110; break;
    case 18: _angulo_servo1 = 120; _angulo_servo2 = 120; break;
    case 19: _angulo_servo1 = 130; _angulo_servo2 = 130; break;
    case 20: _angulo_servo1 = 140; _angulo_servo2 = 140; break;
    case 21: _angulo_servo1 = 150; _angulo_servo2 = 150; break;
    case 22: _angulo_servo1 = 160; _angulo_servo2 = 160; break;
    case 23: _angulo_servo1 = 170; _angulo_servo2 = 170; break;
    case 24: _angulo_servo1 = 180; _angulo_servo2 = 180; break;
}

//Actualizamos angulo de los servos
Servo1.write(180-_angulo_servo1);
Servo2.write(180-_angulo_servo2);

}

void loop() {

    //Si no sabe el programa, habra que seleccionarlo
    if (sabe_programa == false) {

        //Preguntamos por la pieza a mecanizar
        PreguntarPieza();

        //Seleccionamos el progama y asi ya tenemos el programa y el tiempo
        asociado al mismo.
        _programa = SelecPrograma();

        //Asigna un tiempo a la variable tiempo_pieza en funcion del programa
        seleccionado
        _tiempo_pieza = Asigna_tiempo(_programa);

    }

    //Mira se se pulso el boton cancelar (#)
    char key = customKeypad.getKey();
    if (key) {

        if (key == '#')
            se_mueve = false;
            pos=1;

    }

}
```

---

```
//Si ya se esta moviendo, que lo salte!!
if (se_mueve == false) {

    //Dar orden de inicio
    InicioMovimiento();

}

else { //se_mueve esta a true

    //Aqui entra cada 16,384 ms
    if (aux==true) {
        aux=false;
        cont++;
    }

    //Aqui entra cada 1s (hace la consulta cada 16,384 ms / 61 Hz) realmente
    tendría que entrar cada 61.03515624 veces
    //Se pierde cada segundo 0.035*16.38 ms = 0,57 ms/s
    if (cont >= UN_SEGUNDO) {
        //Nada mas entrar reiniciamos el contador del Timer
        cont=0;
        //Sumamos 1 al contador de segundos
        cont_seg++;

        //Cuenta antes en segundos para el siguiente cambio de pos
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Pieza "); lcd.print(pos); lcd.print(" de ");
        lcd.print(LOTE_SIZE); //Muestra la pieza o posicion (es lo mismo) por la
        que se va
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print(_pieza); lcd.setCursor(11,1); lcd.print(_tiempo_pieza-
        cont_seg); lcd.print(" s");

        //Aqui entra cada vez que se alcanza el tiempo de mecanizado de la
        pieza. Se genera un cambio de pos
        if (cont_seg>=_tiempo_pieza) {

            //Nada mas entrar reiniciamos el contador 2
            cont_seg=0;
            //Cambio de posicion
            cambio_pos();

        }
    }
}
}
```

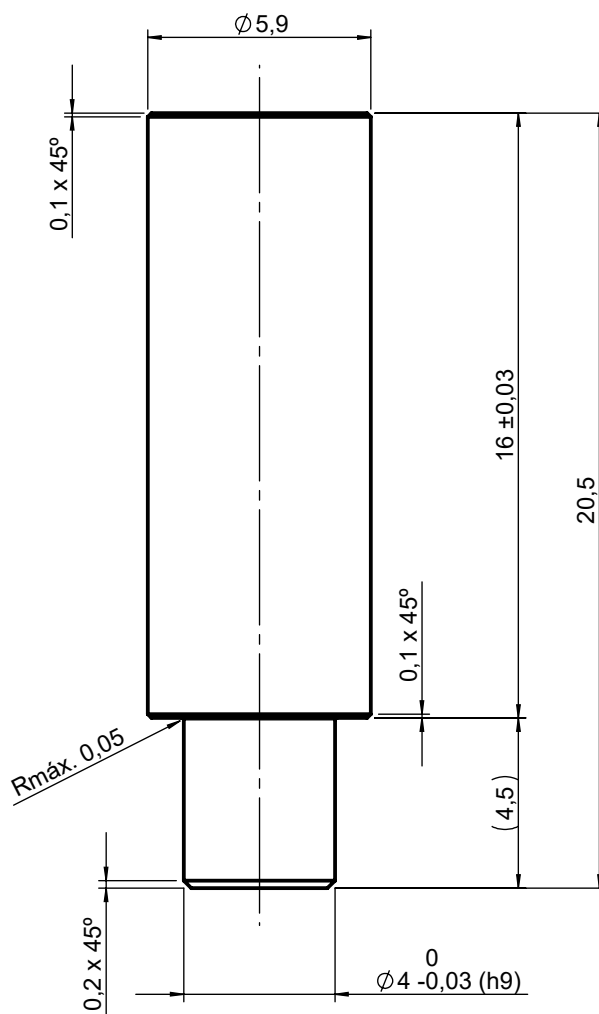
## ANEXO IV: PLANOS

A continuación, se enumeran y adjuntan los planos envueltos en el desarrollo del prototipo de brazo robótico. La nomenclatura, numeración y material de fabricación de cada uno de ellos es la siguiente:

00.01	Eje Hombro	Mecanizado – Ti6Al4V
00.02	Eje Codo	Mecanizado – Ti6Al4V
00.03	Base	Impresión 3D – PLA
00.04	Tapa Principal	Impresión 3D – PLA
00.05	Brazo	Impresión 3D – PLA
00.06	Antebrazo	Impresión 3D – PLA
00.07	Colector de piezas	Impresión 3D – PLA
00.08	Soporte Unión	Impresión 3D – PLA
00.09	Tapa pantalla LCD	Impresión 3D – PLA
00.10	Tapa Servo	Impresión 3D – PLA
00.11	Soporte Bandeja	Impresión 3D – PLA

Se adjuntan también los planos eléctricos de la PCB diseñada.


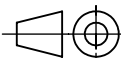
Ra 0.8



Tolerancia general  $\pm 0.05 / \pm 1^\circ$

AUSENCIA DE MARCAS,  
REBABAS E IMPUREZAS

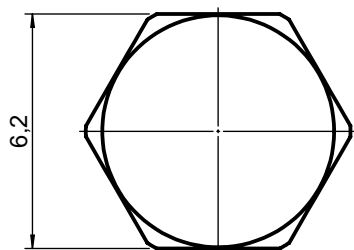
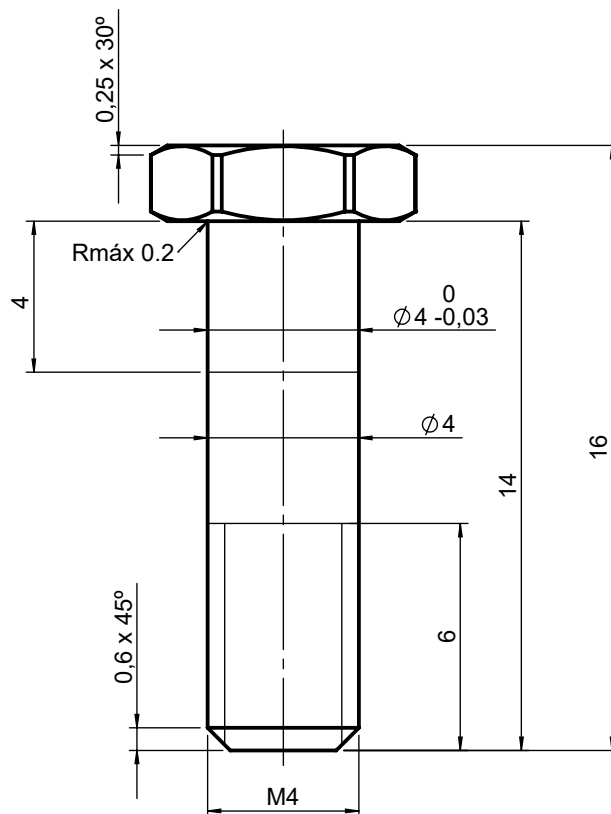


	FECHA	NOMBRE	REF.	
DIBUJADO	25/05/2021	L. Viñas	<b>00.01</b>	
APROBADO			DENOMINACIÓN	
MATERIAL		EDICIÓN	Eje de giro de la articulación brazo	
Ti6Al4V ELI		A		
ESCALA	OBSERVACIONES			
5:1				
			Hoja 1 de 1	

\* La propiedad intelectual, industrial y los derechos de explotación de este producto son exclusivos de Nueva Galimplant S.L.U.


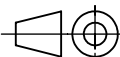


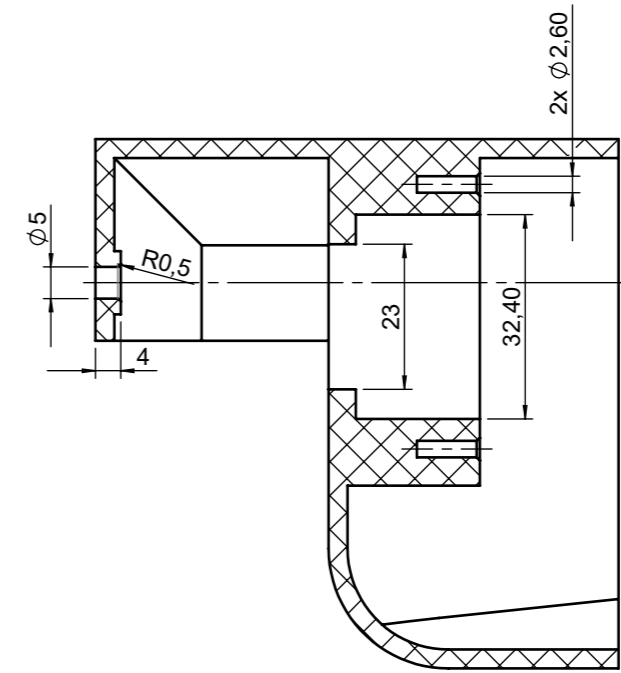
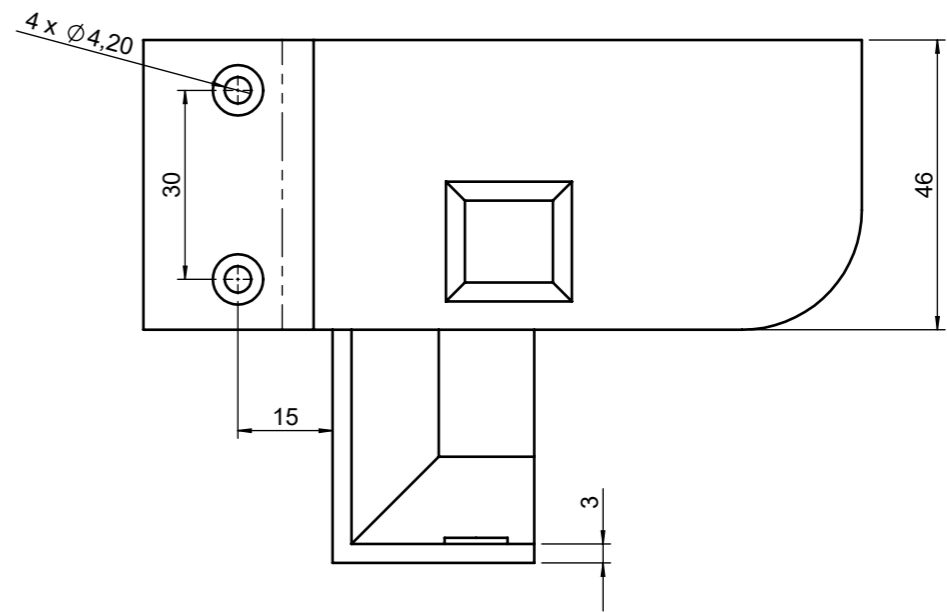
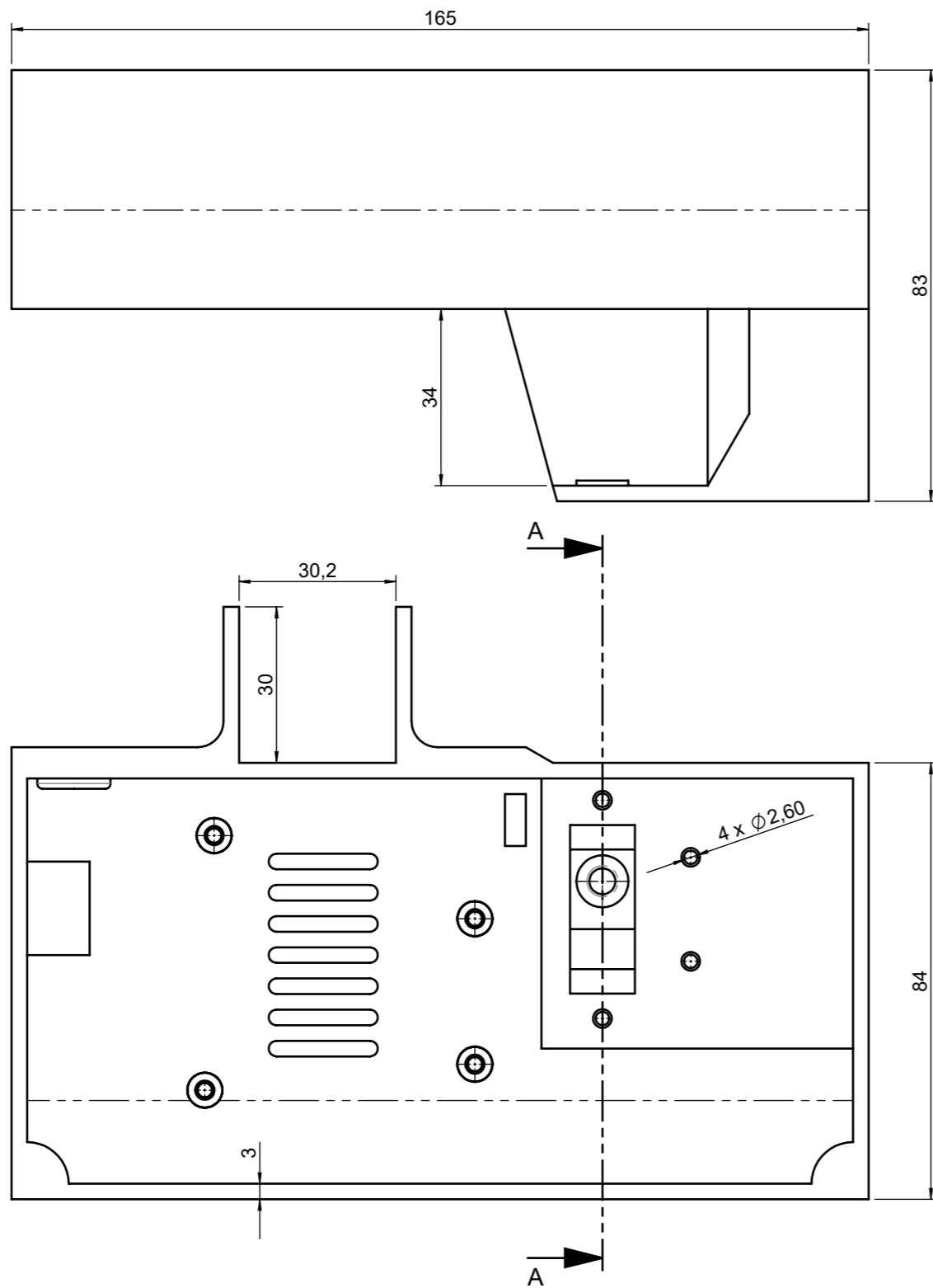
Ra 0.8



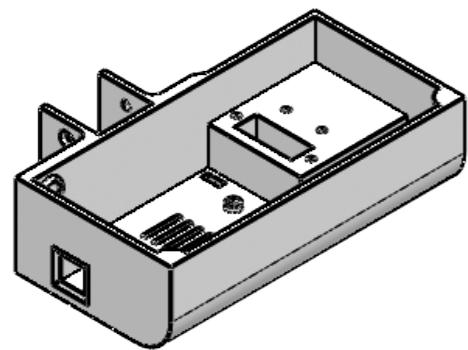
Tolerancia general  $\pm 0.05 / \pm 1^\circ$

AUSENCIA DE MARCAS,  
REBABAS E IMPUREZAS

	FECHA	NOMBRE	REF.	
DIBUJADO	25/05/2021	L. Viñas	<b>00.02</b>	
APROBADO			DENOMINACIÓN	
MATERIAL		EDICIÓN	Eje de giro de la articulación codo	
Ti6Al4V ELI		A		
ESCALA	OBSERVACIONES			
5:1				
			Hoja 1 de 1	

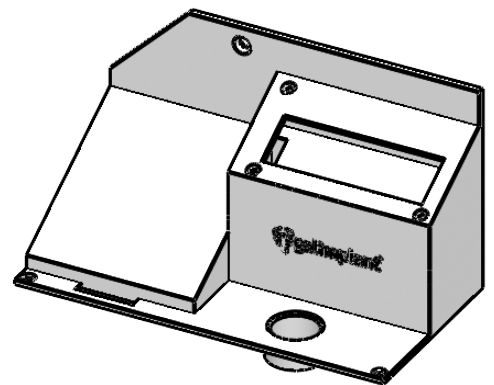
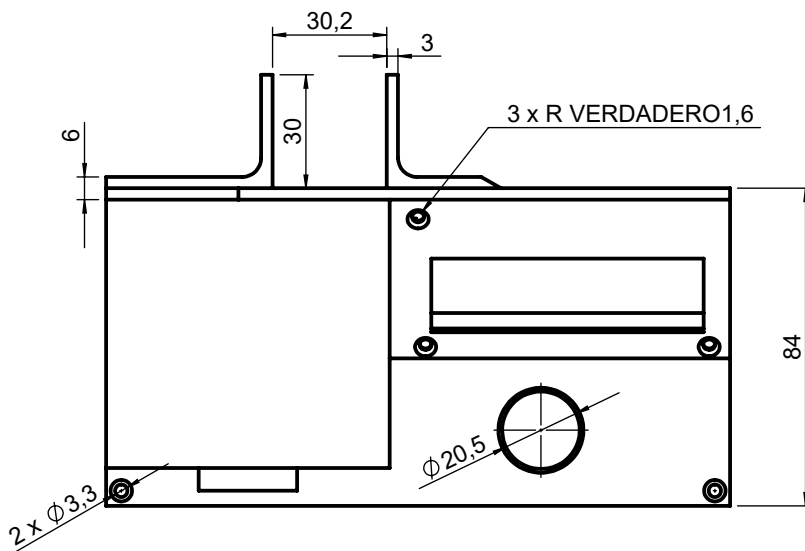
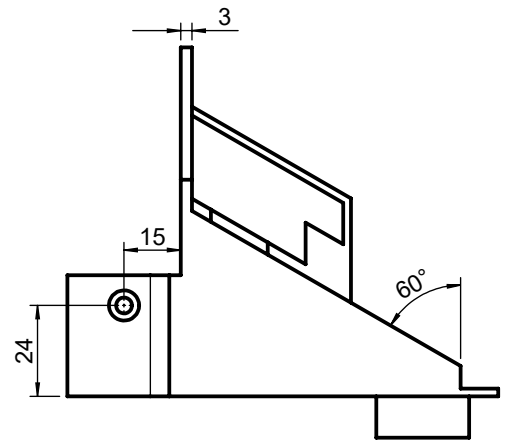
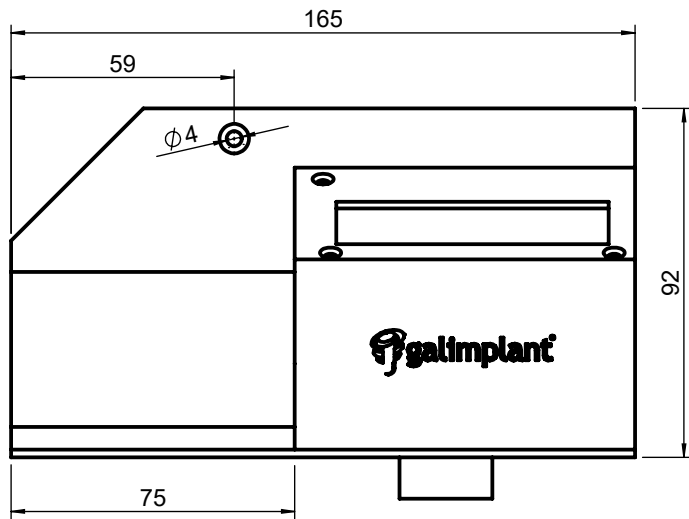



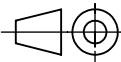
SECCIÓN A-A



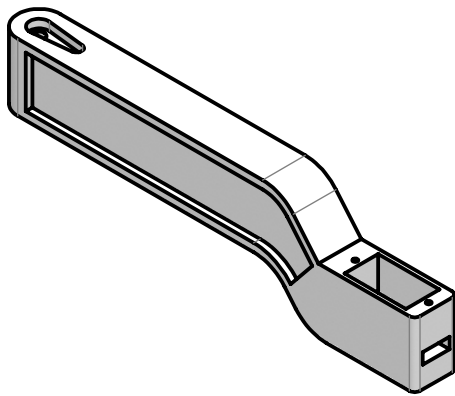
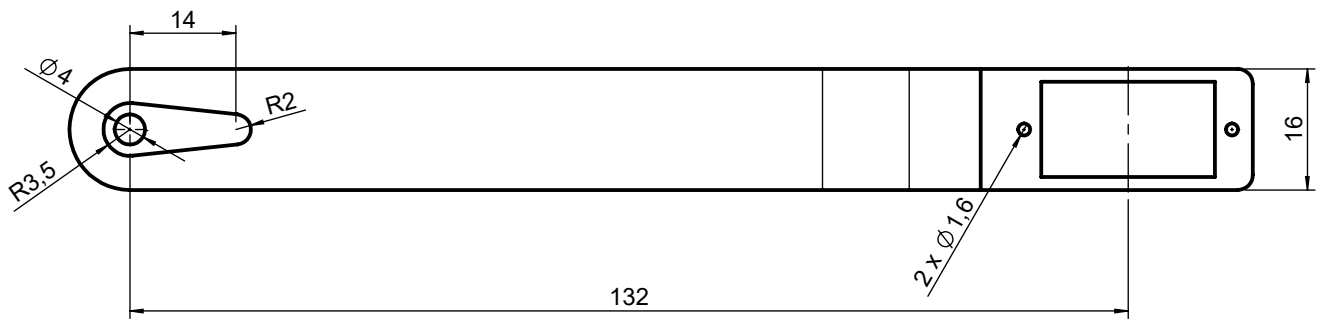
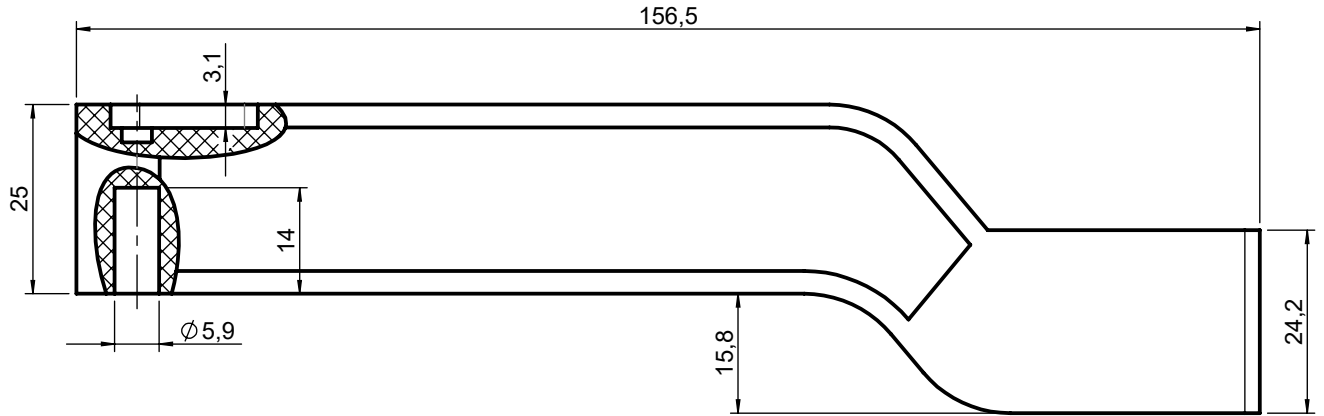
	FECHA	NOMBRE	REFERENCIA		
DIBUJADO	25/05/2021	L. Viñas	<b>00.03</b>		
APROBADO					
DESCRIPCIÓN			MATERIAL		
Base principal			PLA		
ESCALA	OBSERVACIONES		EDICIÓN	FORMATO	HOJA
1:1.2			A	A3	1 de 1


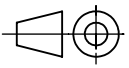
\* La propiedad intelectual, industrial y los derechos de explotación de este producto son exclusivos de Nueva Galimplant S.L.U.



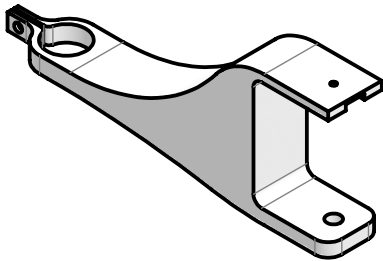
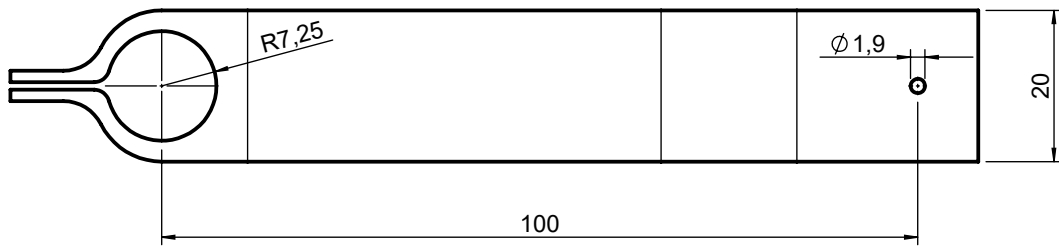
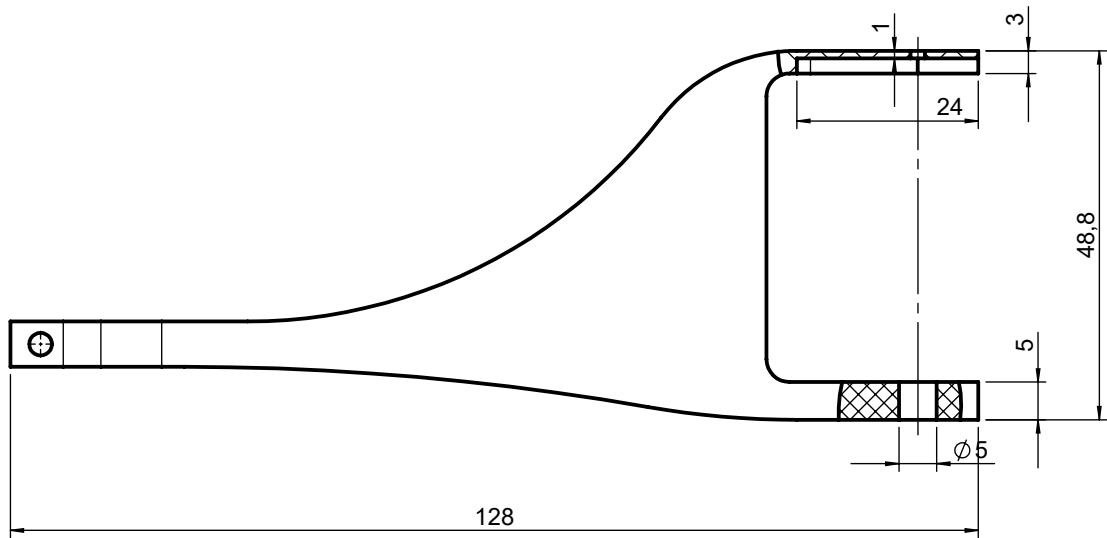
	FECHA	NOMBRE	REF.	
DIBUJADO	25/05/2021	L. Viñas	<b>00.04</b>	
APROBADO			DENOMINACIÓN	
MATERIAL		EDICIÓN	Tapa principal	
PLA		A		
ESCALA	OBSERVACIONES			
1:2				
			Hoja 1 de 1	


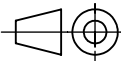
\* La propiedad intelectual, industrial y los derechos de explotación de este producto son exclusivos de Nueva Galimplant S.L.U.



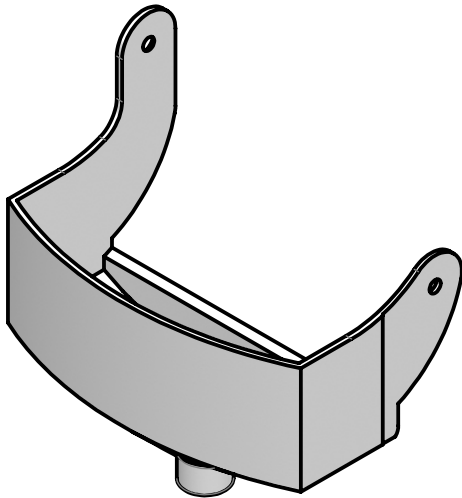
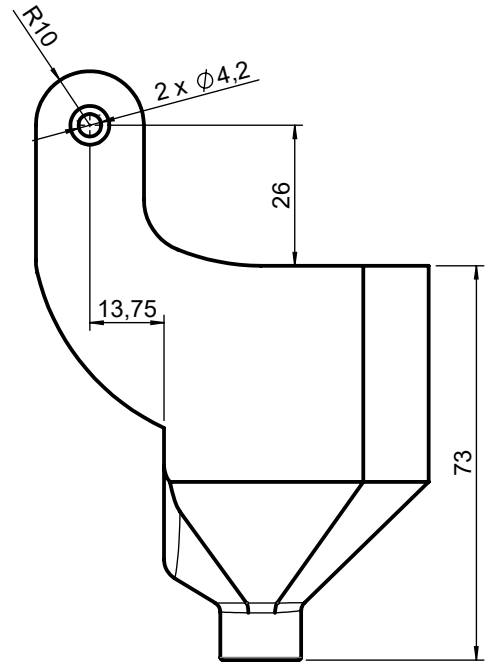
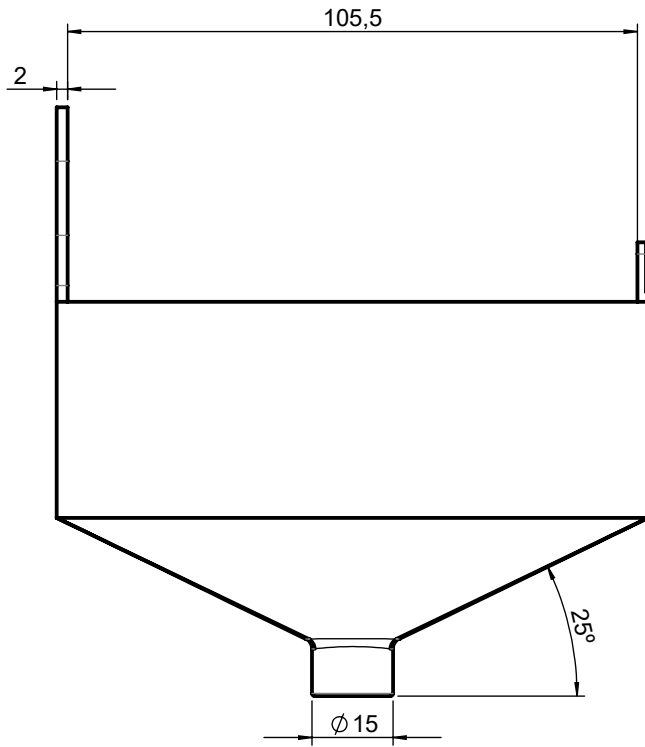
	FECHA	NOMBRE	REF.	
DIBUJADO	25/05/2021	L. Viñas	<b>00.05</b>	
APROBADO			DENOMINACIÓN	
MATERIAL		EDICIÓN	Brazo del robot	
PLA		A		
ESCALA	OBSERVACIONES			
1:1				
			Hoja 1 de 1	


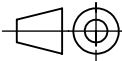
\* La propiedad intelectual, industrial y los derechos de explotación de este producto son exclusivos de Nueva Galimplant S.L.U.



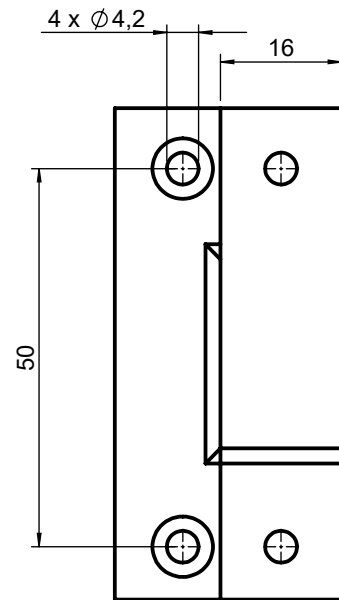
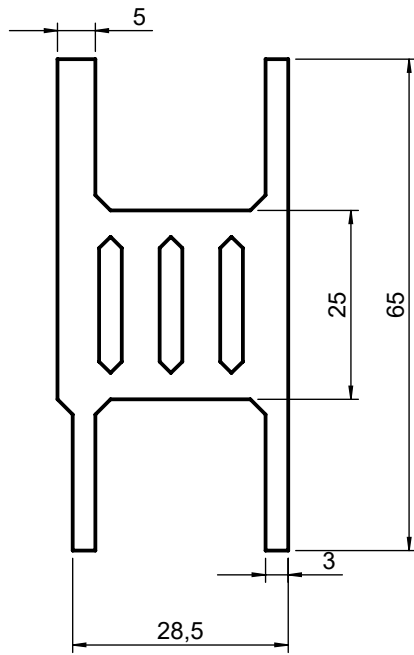
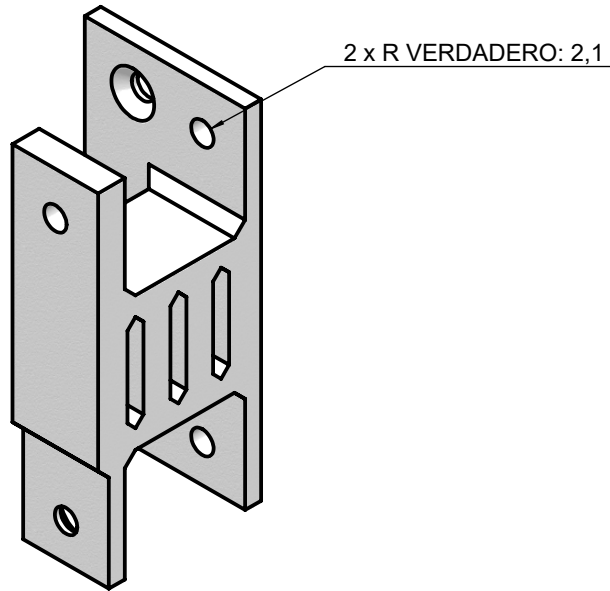
	FECHA	NOMBRE	REF.	
DIBUJADO	25/05/2021	L. Viñas	<b>00.06</b>	
APROBADO			DENOMINACIÓN	
MATERIAL		EDICIÓN	Antebrazo del robot	
PLA		A		
ESCALA	OBSERVACIONES			
1:1				
			Hoja 1 de 1	


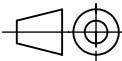
\* La propiedad intelectual, industrial y los derechos de explotación de este producto son exclusivos de Nueva Galimplant S.L.U.



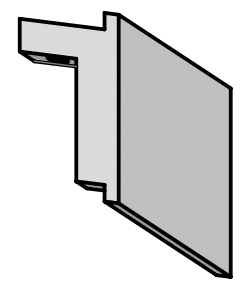
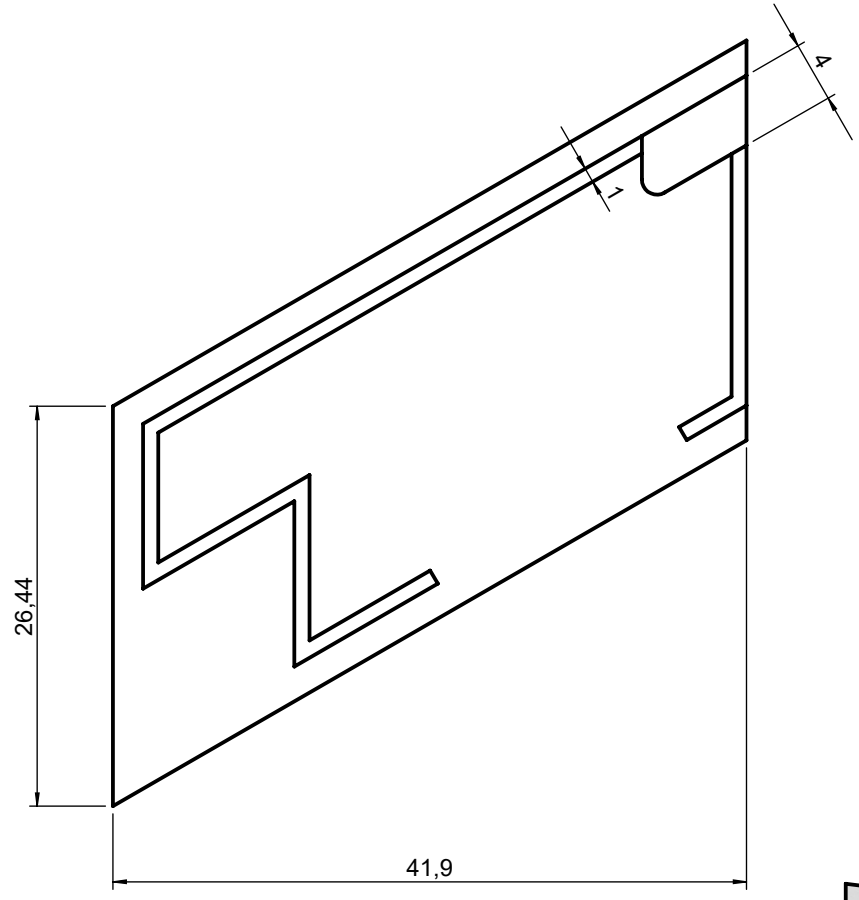
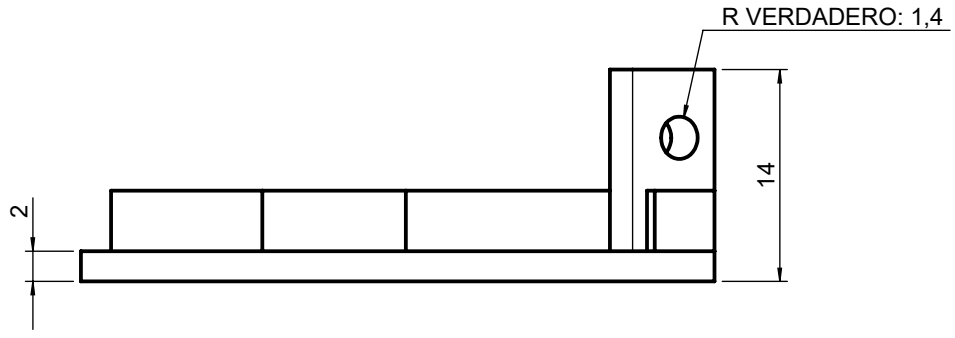
	FECHA	NOMBRE	REF.	
DIBUJADO	25/05/2021	L. Viñas	<b>00.07</b>	
APROBADO			DENOMINACIÓN	
MATERIAL		EDICIÓN	Colector de piezas	
PLA		A		
ESCALA	OBSERVACIONES			
1:1.4				
			Hoja 1 de 1	


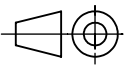
\* La propiedad intelectual, industrial y los derechos de explotación de este producto son exclusivos de Nueva Galimplant S.L.U.



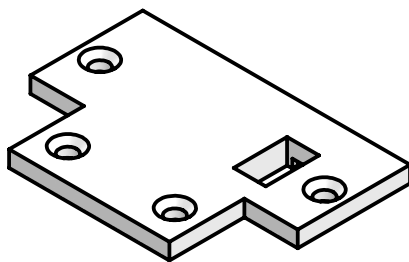
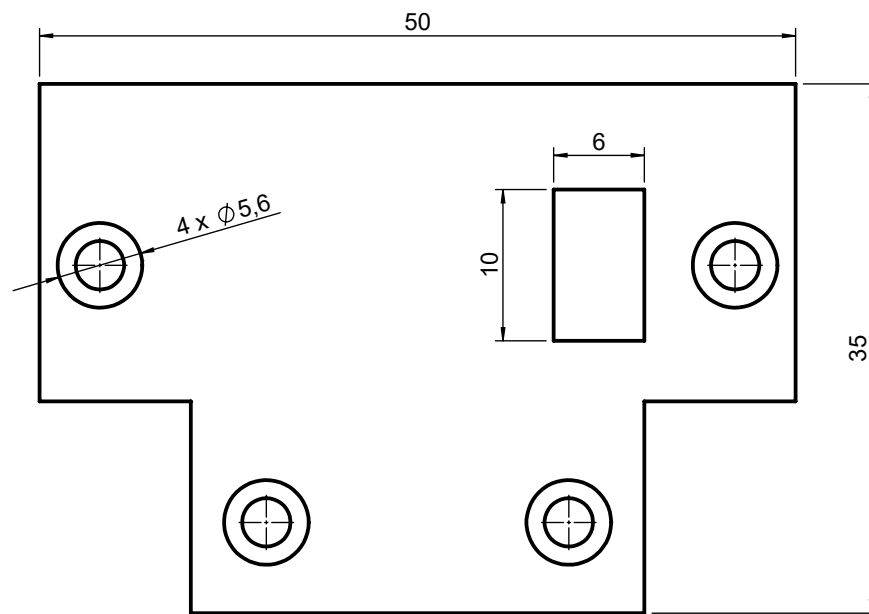
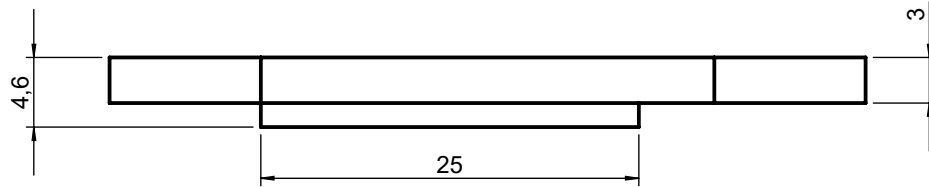
	FECHA	NOMBRE	REF.	
DIBUJADO	25/05/2021	L. Viñas	<b>00.08</b>	
APROBADO			DENOMINACIÓN	
MATERIAL		EDICIÓN	Soporte de unión	
PLA		A		
ESCALA	OBSERVACIONES			
1:1				
			Hoja 1 de 1	


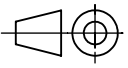
\* La propiedad intelectual, industrial y los derechos de explotación de este producto son exclusivos de Nueva Galimplant S.L.U.



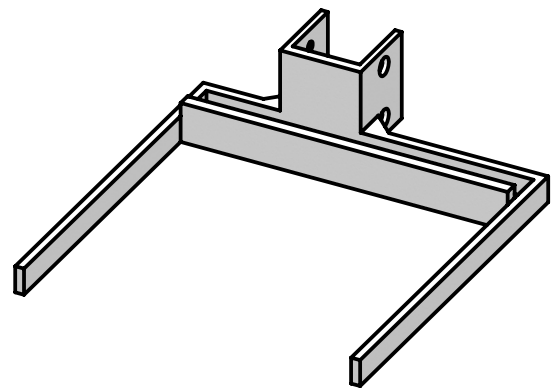
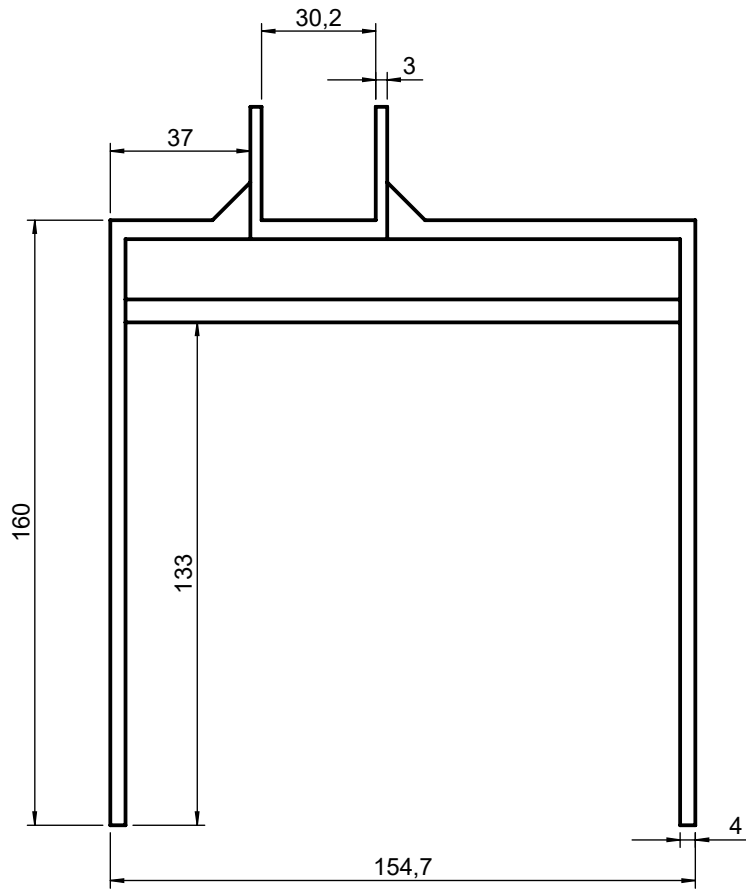
	FECHA	NOMBRE	REF.	
DIBUJADO	25/05/2021	L. Viñas	<b>00.09</b>	
APROBADO			DENOMINACIÓN	
MATERIAL		EDICIÓN	Tapa pantalla LCD	
PLA		A		
ESCALA	OBSERVACIONES			
2:1				
			Hoja 1 de 1	


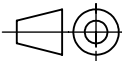




	FECHA	NOMBRE	REF.	
DIBUJADO	25/05/2021	L. Viñas	<b>00.10</b>	
APROBADO			DENOMINACIÓN	
MATERIAL		EDICIÓN	Tapa del servo del hombro	
PLA		A		
ESCALA	OBSERVACIONES			
2:1				
			Hoja 1 de 1	

\* La propiedad intelectual, industrial y los derechos de explotación de este producto son exclusivos de Nueva Galimplant S.L.U.



	FECHA	NOMBRE	REF.	
DIBUJADO	25/05/2021	L. Viñas	<b>00.11</b>	
APROBADO			DENOMINACIÓN	
MATERIAL		EDICIÓN	Soporte de la bandeja	
PLA		A		
ESCALA	OBSERVACIONES			
1:2				
				Hoja 1 de 1

Luis Vinas Salgado  
Trabajo Fin de Master  
Ingenieria Mecatronica

