



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escuela Politécnica Superior

Trabajo Fin de Grado

CURSO 2020/21

*Desarrollo de un sistema de rotación de piezas
cilíndricas de bajo coste para su mecanizado
mediante láser de femtosegundo*

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

ALUMNA/O

Edgar Sabel Rodríguez

TUTORAS/ES

D. José Manuel Amado Paz

D^a. María José Tobar Vidal

FECHA

JUNIO 2021

AGRADECIMIENTOS

A José Manuel Amado y María José Tobar por brindarme la oportunidad de desarrollar un proyecto de ingeniería creativo e innovador. En justo reconocimiento, agradecer de igual modo al resto de la comunidad educativa el conocimiento y madurez adquiridos.

TÍTULO Y RESUMEN

Título

Desarrollo de un sistema de rotación de piezas cilíndricas de bajo coste para su mecanizado mediante láser de femtosegundo

Resumen

En el presente Trabajo de Fin de Grado se lleva a cabo el diseño, programación y montaje de un dispositivo de sujeción y rotación de piezas cilíndricas de pequeño calibre. Las piezas de interés son componentes constituidos por materiales biocompatibles, cuyo fin es mejorar la osteointegración de implantes y otros elementos protésicos. El dispositivo proyectado permite generar una amplia variedad de tratamientos superficiales, mecanizados u otros procesos sujetos a las características y geometrías descritas.

Para la ejecución del diseño del prototipo, o eje de rotación auxiliar, se emplea la herramienta de modelado 3D SolidEdge ST. El sistema de control y su software, se ha desarrollado con tecnología open-source, Arduino. Concebido como un sistema de bajo coste, gran parte de los componentes de la máquina se realizaron mediante fabricación aditiva por impresión 3D. Con esta técnica de prototipado rápido, se han obtenido mejores resultados, tanto en el alcance del diseño, como en tiempos de procesado y costes de fabricación.

En la última fase del proyecto, se realizaron pruebas con el fin de completar una evaluación técnica del dispositivo. Las capacidades del prototipo, para ejecutar tareas cooperativas básicas con el láser de femtosegundo, fueron evaluadas con resultados satisfactorios.

Título

Desenvolvemento dun sistema de rotación de pezas cilíndricas de baixo custo para o seu mecanizado mediante láser de femtosegundo

Resumo

Neste Traballo Fin de Grao lévase a cabo o deseño, programación e montaxe dun dispositivo de suxeición e rotación de pezas cilíndricas de pequeno calibre. As pezas de interese son compoñentes feitos de materiais biocompatibles, cuxo propósito é mellorar a osteointegración de implantes e outros elementos protésicos. O dispositivo proxectado permite xerar unha gran variedade de tratamentos superficiais, mecanizado ou outros procesos suxeitos ás características e xeometrías descritas.

Para a execución do deseño do prototipo, ou eixo auxiliar de rotación, utilízase a ferramenta de modelado 3D SolidEdge ST. O sistema de control e o seu software desenvolvéronse con tecnoloxía de código aberto, Arduino. Concibido como un sistema de baixo custo, gran parte dos compoñentes da máquina fabricáronse mediante fabricación aditiva mediante impresión 3D. Con esta técnica de prototipado rápido, obtivéronse mellores resultados, tanto no ámbito do deseño, como nos tempos de procesamento e custos de fabricación.

Na última fase do proxecto realizáronse probas para completar unha avaliación técnica do dispositivo. Puxéronse en práctica as capacidades do prototipo, para realizar tarefas básicas de cooperación co láser de femtosegundo, foron avaliadas con resultados satisfactorios.

Title

Development of a low-cost cylindrical part rotation system for femtosecond laser machining

Abstract

In this project, the design, programming and assembly of a device for clamping and rotating small cylindrical pieces is carried out. More specifically, the pieces of interest are components made out of biocompatible materials, aiming to improve osseointegration of implants or other prosthetic parts. The resulting device provides with a wide range of possibilities to generate surface treatments, machining or adapt elements with the characteristics and geometries described.

For the execution of the prototype design, the 3D SolidEdge ST modeling tool is used. The development of the control system and its software is based on Arduino open-source technology. Conceived as a low-cost system, additive manufacturing technology was used for the development of a large part of the device assembly. Through 3D printing, prototyping processing times and manufacturing costs have been minimized.

In the last stage of the project, tests were carried out to complete a technical evaluation of the device. The capabilities of the prototype were evaluated in surface engraving and micromachining tasks with femtosecond laser, with satisfactory results.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escuela Politécnica Superior

TRABAJO FIN DE GRADO

CURSO 2020/21

*Desarrollo de un sistema de rotación de piezas
cilíndricas de bajo coste para su mecanizado
mediante láser de femtosegundo*

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Documento

MEMORIA

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	13
1.1 Introducción CN	13
1.1.1 Evolución del CN	14
1.1.2 Dispositivos auxiliares	15
1.2 Objetivo del proyecto	15
1.3 Antecedentes del proyecto	16
CAPÍTULO 2	19
2.1 Especificaciones del diseño	19
2.1.1 Condiciones del entorno de trabajo	19
2.1.2 Condiciones de las piezas de trabajo	20
2.2 Herramientas de diseño y fabricación	21
CAPÍTULO 3	25
3.1 Diseño del sistema	25
3.1.1 Desarrollo del modelo físico	25
CAPÍTULO 4	33
4.1 Selección de los métodos de fabricación	33
4.2 Selección de componentes	34
4.3 Selección de materiales	36
CAPÍTULO 5	38
5.1 Inventario	38
5.2 Montaje	43
5.3 Ajuste de fabricación y montaje	44
5.4 Protocolo de pruebas	44
CAPÍTULO 6	45
6.1 Fabricación en serie	45
CAPÍTULO 7	46
7.1 Presupuesto	46
7.1.1 Piezas de impresión 3D	46
7.1.2 Piezas de fabricación en chapa	46
7.1.3 Componentes mecánicos	47
7.1.4 Conjunto electrónico	48
7.1.5 Presupuesto total de materiales	48
7.2 Presupuesto total mano de obra	49
7.3 Presupuesto final	50
CAPÍTULO 8	51

8.1 Conclusiones	51
8.1.1 Comparativa con otros sistemas del mercado.....	51
8.1.2 Futuros trabajos.....	52
Referencias.....	53

Figura 1: Dispositivo de desplazamiento lineal. Fuente: www.velmex.com	16
Figura 2: Dispositivo de desplazamiento bidimensional. Fuente: www.velmex.com	17
Figura 3: Dispositivo de desplazamiento tridimensional. Fuente: www.velmex.com	17
Figura 4: Eje rotativo con sistema de inclinación Fuente: www.troteclaser.com	18
Figura 5: Implante trabecular Zimmer. Fuente: www.zimmerbiomet.eu	20
Figura 6: Interfaz de trabajo en módulo de conjunto de SolidEdge ST.....	21
Figura 7: Tarjeta Arduino MEGA. Base para creación y control electrónica. Fuente: www.arduino.cc	22
Figura 8: Zortrax M200. Herramienta CNC de prototipado rápido, tecnología de impresión 3D. Fuente: www.zortrax.com	23
Figura 9: Eje de sujeción y pinza ER11. Fuente: www.tn-tools.com	26
Figura 10: Sistema guía y carro de inclinación ROTAX.....	27
Figura 11: Sistema de husillo para control de inclinación ROTAX. Su diseño incorpora un volante de control del mecanismo dispuesto a 15º sobre la horizontal, favoreciendo la ergonomía de manipulación.	28
Figura 12: Conducto de aspiración forzada de ROTAX, que permite la conducción del aire desde la zona del cabezal hasta el punto de extracción posterior.	29
Figura 13: Carcasa de alojamiento para electrónica.....	30
Figura 14: Vista conjunto	33
Figura 15: Material Z-ULTRAT. Fuente: www.zortrax.com	36
Figura 16: Tapa frontal. Técnica de fabricación: Impresión 3D. Material: Z-ULTRAT	38
Figura 17: Patín de inclinación. Técnica de fabricación: Impresión 3D. Material: Z-ULTRAT	38
Figura 18: Tobera. Técnica de fabricación: Impresión 3D. Material: Z-ULTRAT	39
Figura 19: Carro guía lineal. Técnica de fabricación: Impresión 3D. Material: Z-ULTRAT ...	39
Figura 20: Conducto de extracción de gases. Técnica de fabricación: Impresión 3D. Material: Z-ULTRAT	39
Figura 21: Tapa posterior. Técnica de fabricación: Impresión 3D. Material: Z-ULTRAT	40
Figura 22: Abrazadera superior. Técnica de fabricación: Impresión 3D. Material: Z-ULTRAT	40
Figura 23: Abrazadera inferior. Técnica de fabricación: Impresión 3D. Material: Z-ULTRAT	40
Figura 24: Tapa de acceso al interior del dispositivo. Técnica de fabricación: corte con láser de CO2. Material: metacrilato.....	40
Figura 25: Carcasa. Técnica de fabricación: corte láser y conformado en frío. Material: Acero INOX	41
Figura 26: Guías concéntricas. Técnica de fabricación: Corte láser. Material: Acero INOX	41
Figura 27: Conjunto soporte guías lineales. Técnica de fabricación: Corte láser y conformado en frío. Material: Acero INOX.....	41

Figura 28: Soporte motor. Técnica de fabricación: Corte láser y conformado en frío. Material: Acero INOX	41
Figura 29: Conjunto indicador de inclinación. Técnica de fabricación: Corte láser y conformado en frío. Material: Acero INOX	42
Figura 30: Tope casquillos guía lineal. Técnica de fabricación: Corte láser. Material: Acero INOX	42
Figura 31: Carcasa Equipo electrónico. Técnica de fabricación: Corte con láser y conformado en frío. Material: Acero INOX	42

Tabla 1: Especificaciones guía lineal. Fuente: www.velmex.com	16
Tabla 2: Especificaciones dispositivo bidimensional. Fuente: www.velmex.com	17
Tabla 3: Especificaciones dispositivo tridimensional. Fuente: www.velmex.com	17
Tabla 4: Especificaciones eje de rotación. Fuente: www.troteclaser.com	18
Tabla 5: Especificaciones Zortrax M200 según fabricante. Fuente: www.zortrax.com	24
Tabla 6: Especificaciones motor paso a paso Nema 17	32
Tabla 7: Especificaciones Driver	32
Tabla 8: Especificaciones fuente de alimentación.	32
Tabla 9: Especificaciones tarjeta de control Arduino	32
Tabla 10: Presupuesto piezas de impresiones 3D	46
Tabla 11: Presupuesto piezas de fabricación en chapa	46
Tabla 12: Presupuesto componentes mecánicos	47
Tabla 13: Presupuesto conjunto electrónica	48
Tabla 14: Presupuesto total de materiales	48
Tabla 15: Presupuesto total mano de obra	49
Tabla 16: Presupuesto final	50

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción CN

En la actualidad, la estructura de algunos de los principales sectores industriales no podría entenderse sin el uso o la integración de máquinas de control numérico (CN). La presencia y relevancia de estos sistemas es indiscutible en las industrias de producción y fabricación.

La tecnología CNC es aquella encargada de controlar los movimientos de una máquina, por medio de un programa de control del posicionamiento generado previamente. El sistema es capaz de dirigir los movimientos de herramienta y pieza de trabajo, además de parámetros de entrada como velocidad de avance o de herramienta, profundidad de corte, potencia, posicionamiento, refrigeración, etc. (Kalpakjian, 2000) Entiéndase como herramienta al dispositivo seleccionado para generar una modificación sobre un determinado objeto; y pieza, como objeto destinado a absorber dicha modificación. La naturaleza de esta transformación puede ser de distintos tipos. En base a ello, existen varios campos de aplicación para esta tecnología a nivel industrial.

En primer lugar, destacan las aplicaciones cuya finalidad es la de generar modificaciones permanentes sobre el cuerpo de un determinado objeto. El término convencional que define esta categoría es máquinas herramienta. En ella se engloban dispositivos como fresadora, torno, rectificadora, taladradora, plegadoras, láser de corte y grabado, cortadora de plasma, etc. Entre las principales operaciones que desempeñan se encuentran funciones de corte, taladrado, laminado, conformado, mecanizado con y sin arranque de viruta o mecanizado por abrasión. También se implementa esta tecnología en sistemas de fabricación aditiva, como las impresoras 3D. (Segundo, 1999)

Por otro lado, existen aplicaciones de control numérico diseñadas para realizar modificaciones lógicas, distintas de las físicas previamente descritas, sobre los componentes de una cadena productiva. Como pueden ser determinados sistemas industriales de soporte, ensamblado y logística. Un ejemplo de ello son los brazos robóticos.

El concepto moderno de máquina de control numérico define a todo este abanico de dispositivos, incluyendo los más vanguardistas, como pueden ser las técnicas de impresión en tres dimensiones. En continuo desarrollo, la tecnología CNC generalmente va asociada a la innovación y automatización de este tipo de sistemas.

A todos los mecanismos CNC les une una lógica de funcionamiento común. Este concepto se basa en la identificación de puntos en un sistema de referencia de tres dimensiones, X Y Z (en coordenadas cartesianas). Por tanto, un instrumento de control numérico es capaz de ejecutar una tarea desplazándose entre puntos determinados del espacio, establecidos en el proceso de programación.

Actualmente, el sistema de software predominante para la elaboración de programas de mecanizado y fabricación de piezas mediante el uso de máquinas como las descritas es el CAD/CAM. La herramienta digital CAD (siglas del término inglés, Computer Aided Design) es un recurso informático para el diseño, desarrollo, modificación, análisis y simulación de producto, asistido por ordenador. CAM (siglas del término inglés, Computer Aided Manufacturing), es un útil digital complementario al anterior, con el que el técnico de producción se encarga de generar los archivos de mecanizado de las piezas previamente diseñadas. Estos incluyen los parámetros de operación de la máquina, además de la trayectoria a seguir.

Como se detalla en apartados posteriores de la presente memoria, se han utilizado sistemas de control como los descritos, para el desarrollo del prototipo propuesto en el proyecto.

1.1.1 Evolución del CN

Desde sus inicios, el concepto de control numérico (CN) ha ido ligado a la modernización industrial. Originalmente, esta noción surgió tras la introducción de conceptos específicos de lógica programable en la dinámica de algunas máquinas. A fin de satisfacer las necesidades de sofisticación de determinados procesos de fabricación.

Las primeras máquinas herramienta de control numérico, conocidas como NC, datan de la década de 1940. Incorporaban motores destinados a mover sus controles. Años más tarde, el ingeniero John T. Parsons desarrolló la integración de un sistema de lectura de bandas perforadas en una máquina, dando lugar a un dispositivo capaz de leer y reproducir una secuencia de trabajo indicada.

Este hecho y sus estudios posteriores marcarían un antes y un después para la concepción de las máquinas industriales dedicadas a la producción y a la fabricación. Es Richard Kegg (1952) quien, en un proyecto colaborativo con el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT, siglas de su traducción al inglés), desarrolla la primera fresadora CNC. Se creó entonces una herramienta capaz de ejecutar trabajos en serie y de mayor precisión que los métodos convencionales de la época. Permitiendo así, el aumento de la productividad de los sistemas de producción.

En la década de los 70, llegan los primeros microprocesadores, lo que causó una revolución en el mundo de la electrónica. En los sistemas con lógica cableada y las máquinas herramienta que podían incorporar minicomputadores, la electrónica existente comenzó a sustituirse por sistemas de microprocesadores. Estos sistemas apoyaban ciertas funciones en periféricos que trabajaban en paralelo con el microprocesador, lo que aumentaba en gran medida el rendimiento del sistema de control numérico. (Alique Palomar, 1980)

A pesar de compartir muchos de los principios básicos de sus predecesores, los instrumentos de control numérico actuales son muy distintos a los arcaicos. Esto se debe principalmente al aumento exponencial de las potencias de cómputo de los procesadores, a la modernización de los sistemas electrónicos y a la integración de sistemas mecánicos avanzados. En resumen, a su nivel de sofisticación. Las funciones implementadas en las máquinas CNC modernas minimizando la interacción con el operario, multiplicando el rendimiento y minimizando los costes.

Los costes de fabricación y producción de piezas asociados a estos sistemas, son siempre un término relativo. Los parámetros que intervienen en su cálculo son: tiempo de operación, coste de operación por unidad de tiempo y número de operaciones por unidad de tiempo. Cuanto mayor es el grado de automatización e implementación tecnológica de una máquina, mayor es el coste de operación por unidad de tiempo. Por el contrario, un dispositivo de elevada sofisticación produce piezas de mayor precisión con menor tiempo de procesado. Por tanto, la rentabilidad del trabajo con este tipo de instrumentos depende directamente del tamaño de las series de trabajo. Por tanto, los costes de fabricación de piezas con máquinas CNC son menores, cuanto mayor sea la serie de trabajo.

Hoy en día, la presencia de equipos de CN y otros dispositivos de producción que integran sistemas de posicionamiento en ambientes no industrializados es un hecho destacable. El nivel de progreso de la electrónica moderna y el abaratamiento de estos componentes, sumado al desarrollo de software genérico open-source, ha permitido acceder al mundo de la fabricación controlada por ordenador desde un nivel más amateur. Los dispositivos de mayor demanda dentro de esta categoría son las impresoras 3D, fresadoras, tornos y pequeños sistemas de grabado láser.

1.1.2 Dispositivos auxiliares

Las aplicaciones del control por ordenador se extienden también a dispositivos colaborativos automatizados que trabajan en paralelo con las máquinas de control numérico y similares. Pueden definirse como mecanismos auxiliares empleados para aumentar los grados de libertad de una determinada máquina, limitados por su propio diseño y hardware. Es decir, el elemento auxiliar puede aportar movimientos adicionales a los propiamente descritos por el equipo con la que interactúa.

Un ejemplo claro de ello son las mesas de ejes auxiliares, que trabajan en paralelo con herramientas de fresado, torneado o láser. Estos mecanismos pueden enmarcarse en:

- Etapas lineales (X)
- Etapas bi o tridimensionales (X Y Z)
- Etapas giratorias

Los tutores del trabajo, adscritos al departamento de Ingeniería Naval e Industrial de la Universidad de la Coruña, proponen el desarrollo de un sistema de sujeción y rotación de piezas de bajo coste para desempeñar trabajos colaborativos con láser de femtosegundo.

1.2 Objetivo del proyecto

Este proyecto nace de las necesidades de una investigación activa, llevada a cabo por el Laboratorio de Aplicaciones Industriales del Láser (LAIL), grupo de investigación de la UDC. El estudio al que se hace alusión, persigue la mejora de la osteointegración de piezas realizadas a partir de materiales biocompatibles. La mayor parte de los componentes desarrollados con tales fines se benefician de un tratamiento superficial para la mejora de su compatibilidad con huesos y tejidos vivos. Entre las técnicas utilizadas destaca el micromecanizado y el texturizado con láser de femtosegundo. En concreto, el análisis se centra en elementos de sujeción de implantes dentales. Entre este tipo de componente prepondera la geometría cilíndrica o semicilíndrica de pequeño calibre.

El dispositivo láser utilizado en el estudio está dotado de un sistema de espejos móviles capaz de proyectar el haz de luz sobre un sistema de coordenadas planas XY, desempeñando tareas en dos dimensiones. Esto satisface las necesidades de trabajo sobre superficies planas como pueden ser las caras transversales de un cilindro. Pero, sin un dispositivo auxiliar de soporte y rotación para piezas con las características descritas, no es posible realizar trabajos de forma automatizada sobre su superficie cilíndrica.

Por tanto, el objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es desarrollar un sistema de eje auxiliar de rotación automatizado. La naturaleza del dispositivo debe ser generalista, con la capacidad de participar en tareas colaborativas con el láser de femtosegundo. Pero a su vez, diseñado para satisfacer las necesidades específicas de la investigación descrita. Además de esta encomienda esencial, el desarrollo de este prototipo debe perseguir:

- La capacidad de adaptarse a otros equipos similares al láser de femtosegundo, con independencia y portabilidad
- La elaboración de un conjunto low-cost
- La ejecución del programa de control de la fase automáticas del dispositivo

1.3 Antecedentes del proyecto

En el mercado existen mecanismos auxiliares capaces de ejecutar algunas de las operaciones previamente descritas, e incluso, sistemas que integran varias de ellas en un mismo dispositivo. A continuación, se muestra una clasificación de los sistemas barajados, teniendo en cuenta la escala y las necesidades de este proyecto. Así mismo, este apartado se centrará en elementos automatizados o semiautomatizados.

- **Etapa Lineal (X).** El sistema de apoyo a la fabricación más sencillo es el de una etapa. Es un dispositivo lineal que habilita un tango de movimiento en una única dirección (eje de referencia X o Z). Esto permite aumentar 1 grado de libertad a la capacidad de movimiento de un conjunto CNC para desempeñar una operación de producción.

Figura 1: Dispositivo de desplazamiento lineal. Fuente: www.velmex.com



Tabla 1: Especificaciones guía lineal. Fuente: www.velmex.com

GUIA LINEAL	
MARCA	velmex
MODELO	XSlide
MOTOR	paso paso
RECORRIDO	5,1-76,2 mm

Con los datos presentados se aporta un ejemplo real de mercado de este tipo de mecanismos. Su integración es usual en máquinas CNC, como pequeñas fresadoras o equipos láser.

- **Etapa bidimensional (XY) o tridimensional (XYZ).** Los mecanismos bidimensionales o tridimensionales parten de un sistema sencillo como el anterior, e integran algún rango de movimiento adicional. Dependiendo del tipo, pueden incorporar distintos sistemas de avance. Estos pueden aumentar 2 o incluso 3 los grados de libertad en la operativa de producción en la que se instalen. En el caso de los sistemas bidimensionales se introducen dos movimientos lineales perpendiculares. Ambos pueden ser horizontales (XY); o bien, uno horizontal (X) y otro vertical (Z).

Las posibles aplicaciones son similares a las del caso sencillo de guía lineal. Véase en Figura 2 y Figura 3, mediante el análisis de ejemplos de dispositivos reales, el modo en el cual pueden integrarse las funciones descritas. En el caso específico de sistemas tridimensionales, el ejemplo más claro es el del conjunto mecánico de desplazamiento independiente en los ejes XYZ.

Figura 2: Dispositivo de desplazamiento bidimensional. Fuente: www.velmex.com



Figura 3: Dispositivo de desplazamiento tridimensional. Fuente: www.velmex.com



Tabla 2: Especificaciones dispositivo bidimensional. Fuente: www.velmex.com

SISTEMA BIDIMENSIONAL	
MARCA	velmex
MODELO	XSLide
MOTORES	paso paso
RECORRIDO	5,1- 76,2 mm
CONFIGURACIÓN	doble guía

Tabla 3: Especificaciones dispositivo tridimensional. Fuente: www.velmex.com

SISTEMA TRIDIMENSIONAL	
MARCA	velmex
MODELO	XSLide
MOTORES	paso paso
RECORRIDO	5,1- 76,2 mm
CONFIGURACIÓN	triple guía

- **Etapa giratoria.** Estos mecanismos imprimen un movimiento de rotación, pudiendo funcionar como porta herramienta o como porta pieza dependiendo de la aplicación para la que esté concebido. El sistema aporta un grado de libertad al conjunto de fabricación CNC. El caso más habitual, entre las operaciones existentes en el mercado, es la de plato de garras acoplado directamente al eje del motor. En ocasiones pueden disponer de un sistema básico de inclinación, cuya finalidad es únicamente el posicionamiento del útil previo a la operación de mecanizado. El mecanismo descrito no consta de regulación en el eje Z; en una operativa de trabajo en la que sea preciso inclinar el cabezal se variaría la altura de la pieza frente a la bancada, hecho que condiciona el proceso productivo por modificar el punto de operación.

Figura 4: Eje rotativo con sistema de inclinación Fuente: www.troteclaser.com



Tabla 4: Especificaciones eje de rotación. Fuente: www.troteclaser.com

EJE ROTATIVO	
MARCA	trotec
MOTOR	si
SISTEMA INCLINACIÓN	manual

Véase en Figura 4 y Tabla 4 un caso real de mercado. Es usual encontrar este tipo de mecanismos integrados en procesos de fabricación con torno y láser.

En la conclusión de la memoria se expone una comparativa entre esta clase de dispositivos y el prototipo desarrollado, con el fin de hallar las diferencias, ventajas y desventajas de uno u otro sistema. La selección de cada sistema en concreto dentro del amplio abanico de posibilidades existentes en el mercado se debe a criterios como equidad entre dispositivos, especificaciones y stock, para no elaborar una comparativa con modelos obsoletos. Buscando un equilibrio entre calidad y coste, se ha despreciado la selección de componentes que a priori no reflejan buena calidad de materiales y componentes.

CAPÍTULO 2

El paso previo al diseño es definir con exactitud las necesidades, funciones y condicionantes con los cuales debe proyectarse el sistema auxiliar de rotación. En el presente capítulo de la memoria se expresan las características y aspectos que van a pautar el desarrollo del proyecto. Adicionalmente, se detalla cuáles son los recursos de diseño y producción disponibles.

2.1 Especificaciones del diseño

Las especificaciones del modelado del prototipo se basan en dos criterios fundamentales: el entorno de operación, en el cual debe integrarse; y el tipo de piezas con las cuales debe trabajar. Pormenorizado el primer aspecto, se destacan las características del dispositivo con el que va a interactuar y de la forma en que debe hacerlo, las dimensiones del espacio de trabajo y las dotaciones de que dispone el propio entorno de operación (tomas eléctricas, aspiración de gases en caso de ser necesario, iluminación, etc). El segundo aspecto define los tipos y geometrías de pieza para los que se dimensiona el sistema.

2.1.1 Condiciones del entorno de trabajo

El dispositivo debe trabajar en sincronía con un láser de femtosegundo. La tecnología del equipo de mecanizado cuenta con un sistema de espejos móviles, capaces de describir trayectorias planas sobre una plataforma horizontal, perpendicular al haz de luz. La arquitectura vertical del sistema comporta la proyección del rayo láser sobre una superficie horizontal con ejes de referencia X e Y. Lo expuesto implica que el sistema automático desarrollado debe garantizar la correcta orientación de las piezas mediante el mecanismo de sujeción, para que la superficie a tratar se corresponda con el plano sobre el cual desempeña su labor el equipo de mecanizado.

Por ser lo suficientemente amplio, el volumen disponible en el entorno de trabajo no supone una restricción para la elaboración del prototipo. Existen otros parámetros, que si son condicionantes, específicos del dispositivo láser. Uno de ellos viene determinado por la lente que integra en su cabezal, la cual influye directamente en la distancia focal (DF, distancia de la lente al punto del espacio donde se genera el plasma). Para dimensionar el dispositivo auxiliar es más práctico utilizar su parámetro complementario, este es, la altura del punto donde se genera el plasma con respecto a la bancada, siendo su valor 122 mm.

El sistema de espejos del láser permite barrer una superficie limitada, siendo capaz de describir un cuadrado de aproximadamente 100 mm de lado, cuyo centro se encuentra en la vertical de la lente. Este es, por tanto, el área útil de trabajo del rayo. Tanto cabezal como mesa de trabajo son fijos, es decir, no disponen de regulación vertical, información a tener en cuenta en el diseño. La superficie de apoyo dispone de perforaciones roscadas M6 (rosca métrica estándar de 6 mm, SI) y con una separación entre centros de 25 mm. Estos orificios son útiles para integrar un sistema de sujeción y colocación en el equipo auxiliar. La distribución y dimensión de los puntos de anclaje en la base de trabajo del equipo es estándar, por lo que no afecta a la compatibilidad del prototipo con otros entornos de trabajo.

Lo último, en cuanto al entorno de operación se refiere, es determinar cuáles son los sistemas de dotación presentes. El principal es la alimentación eléctrica; se disponen de tomas de corriente de baja tensión, 230 V (AC). En el CAPÍTULO 4 de la presente memoria se hace referencia a cuáles son las necesidades eléctricas del proyecto para el control y alimentación del prototipo y sus componentes.

Adicionalmente, el marco operativo incluye sistema de gases y toma extractiva de aire; un aspecto importante para la eliminación de partículas y sustancias nocivas de la zona de trabajo. De forma análoga al abastecimiento eléctrico, se analiza la utilización de este recurso y su posible interés para la funcionalidad del dispositivo proyectado.

2.1.2 Condiciones de las piezas de trabajo

Una vez definida la superficie de trabajo integrada en el equipo de mecanizado se precisa, de forma genérica, un sistema de soporte de piezas que garantice la horizontalidad de su cara útil. Para proyectar la forma en la que el dispositivo debe desempeñar esta tarea, es necesario entender cuáles son las características de las piezas designadas.

Como se describe en el prólogo de esta memoria, las piezas objeto de estudio se corresponden con elementos protésicos dentales. Estos se caracterizan por describir geometrías cilíndricas o similares. En ocasiones, por la naturaleza de su tarea, los pernos diseñados para este cometido no son totalmente cilíndricos, pudiendo estar dotados de una superficie cónica. Esto les facilita una mejor incisión sobre el material óseo.

Para generar un trabajo de texturizado o mecanizado con láser sobre las caras transversales de un cilindro no es necesario utilizar un sistema de sujeción especial. Pero en este caso, lo propiamente interesante por la finalidad de la investigación adyacente es sin duda la superficie cilíndrica del elemento. En cuanto a su diámetro, este varía en función de parámetros específicos, pero con una constante común, ser de pequeño calibre. Por tanto, se establece un rango de tolerancia de entre 3 y 10 mm que debe absorber el cabezal.

Este análisis determina que el sistema de sujeción debe tener la capacidad de sujetar elementos cilíndricos con su eje central en posición horizontal. Es relevante contemplar también los casos en los cuales los componentes no describen una geometría puramente cilíndrica y constante, sino que, incorpora también alguna forma cónica. La inclusión, por tanto, de un sistema de inclinación puede garantizar la posibilidad de generar trabajos de mecanizado sobre todas las superficies útiles de la pieza.

En la Figura 5 se aporta un ejemplo visual de un elemento protésico de superficie texturizada cuya finalidad es la mejora de la osteointegración, frente a técnicas de implantes convencionales. (Analysis, 2020)



Figura 5: Implante trabecular Zimmer. Fuente: www.zimmerbiomet.eu

A pesar de ser piezas muy específicas su geometría es relativamente genérica. Ello, refleja la posibilidad de implementar un sistema de rotación y soporte relativamente sencillo, con la peculiaridad de integrar un mecanismo de inclinación, resultando un conjunto capaz de resolver un amplio abanico de piezas posibles. Para su incorporación a la dinámica del equipo láser es de interés que, como mínimo, la función de rotación se implemente mediante un sistema automatizado. Esto favorece el desarrollo de tareas productivas en serie, con mayor grado de precisión y un rendimiento más elevado.

2.2 Herramientas de diseño y fabricación

Detalladas las especificaciones que definen el desarrollo del prototipo, es apropiado conocer los recursos de los cuales se dispone para dicha elaboración. Las tecnologías de diseño y fabricación enmarcan tanto el alcance de aspectos conceptuales como físicos del dispositivo final. A continuación se realiza una presentación de las principales herramientas tecnológicas utilizadas en el desarrollo del mismo, entre las cuales se encuentra: el software de diseño 3D; el software y hardware utilizados para la programación electrónica del dispositivo; o el dispositivo de prototipado por impresión con su respectivo software CAM.

- ***Solid Edge ST***

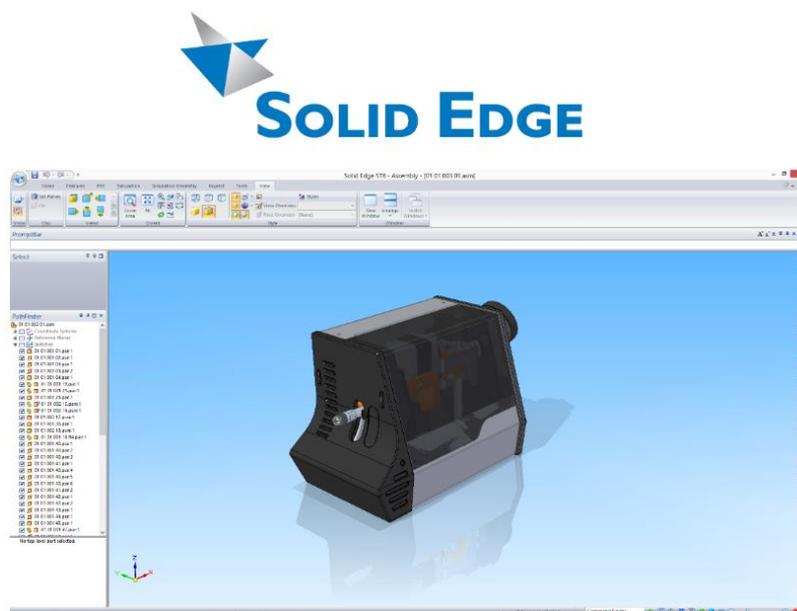


Figura 6: Interfaz de trabajo en módulo de conjunto de SolidEdge ST

El software de creación de contenido 3D es el puente entre el concepto y la implementación física, permitiendo la producción digital del modelo. Con él se pueden desarrollar piezas altamente precisas, ensamblarlas en conjunto, renderizarlas y exportarlas para su fabricación. Consta de módulo de pieza, para elaborar cuerpos sólidos; módulo de chapa, para desarrollar partes totalmente parametrizadas para su corte y conformado; módulo de superficies e incluso de soldadura; además de la herramienta de elaboración de planos técnicos.

En concreto los módulos de pieza y chapa son los más relevantes para el desarrollo de un prototipo como el que nos ocupa, por las características que lo definen. El primero es muy eficaz en tareas de modelado de sólidos que deben incluir o absorber otros componentes. Su homólogo de chapa es ideal en la creación de elementos de cierre como carcasas, o en aplicaciones de soporte y unión.

Para la fase de elaboración de las piezas desarrolladas por máquinas de control numérico, es necesario exportar los archivos en la extensión demandada por el programa CAM de fabricación. En el caso de chapas metálicas con pliegues, es adecuado elaborar un DXF de la pieza desarrollada¹ para su corte. A mayores del anterior, es de interés aportar un plano del elemento plegado al taller de fabricación, con cotas de longitud de pestaña y ángulo de pliegue. En bloque, Solid Edge constituye un recurso de elevado rendimiento y garantía para su empleo en tareas de diseño y fabricación a nivel profesional.

- **Arduino**

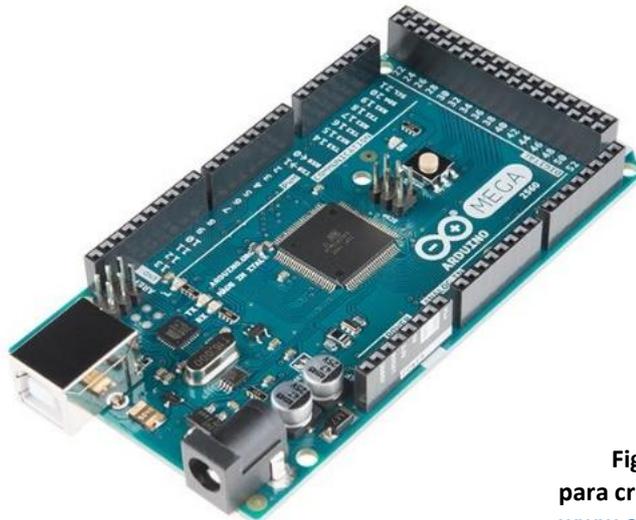


Figura 7: Tarjeta Arduino MEGA. Base para creación y control electrónica. Fuente: www.arduino.cc

Arduino es una plataforma de creación de electrónica *open-source*, basada en el concepto de hardware y software libre. Es una herramienta flexible y de fácil integración en proyectos como el presente. Los conceptos de software y hardware libre hacen referencia a que ambas tecnologías son de acceso público, replicables y modificables. (Steven Barrett, 2012)

En el proyecto se incorpora uno de los modelos oficiales de Arduino, en concreto la Tarjeta Mega 2560. Para desarrollar su código de control se utiliza la plataforma de programación Arduino IDE (entorno de desarrollo integrado), basada en el lenguaje de programación C++; disponible en versión web y de escritorio. La empresa de electrónica

¹ Chapa desarrollada: Plano desplegado de una pieza de chapa que incorpora pliegues en su forma final.

open-source habilita el acceso público a su información, al mismo tiempo de vender su propia tecnología. Es decir, un creador puede elegir entre replicarla o adquirirla y utilizar los medios servidos por la plataforma para su control.

- **Impresión 3D: Zortrax M200.**

La impresión 3D es una técnica de fabricación aditiva, destacada por su destreza como método de prototipado rápido. Engloba el uso de distintas tecnologías (escritura, fusión, inyección, extrusión, estereolitografía, sinterizado...) que comparten la dinámica de deposición de material capa a capa; a diferencia de otros métodos de fabricación que obtienen las piezas por moldeado o técnicas de mecanizado. (Sachon, 2016)

En función de la tecnología de impresión utilizada es posible utilizar diversos materiales. Entre ellos se encuentran plásticos, resinas, vidrio, cerámica o metales. Las aplicaciones de la impresión 3D van, desde la industria aeroespacial o de la automoción, hasta el desarrollo de elementos puramente ornamentales.

La impresión por extrusión y deposición de material fundido es la técnica escogida como método de fabricación en el proyecto. Esto permite el diseño y obtención de piezas totalmente específicas para el dispositivo proyectado. La elaboración de estas piezas mediante métodos convencionales implicaría costes mucho más elevados y tiempos de ejecución mayores. En concreto, la impresora 3D utilizada en el proyecto es el modelo Zortrax M200. El sistema consta de su propio software (CAM) para la generación de las órdenes de impresión (código G) de la pieza previamente diseñada.



Figura 8: Zortrax M200.
Herramienta CNC de prototipado rápido, tecnología de impresión 3D.
Fuente: www.zortrax.com

Por otro lado, el material que ha dado forma a estas piezas es el Z-ULTRAT, una variedad de plástico ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) de la marca Zortrax. El fabricante destaca durabilidad y excelente calidad superficial entre las propiedades del material. En la Tabla 5 se reflejan las especificaciones técnicas del material.

Tabla 5: Especificaciones Zortrax M200 según fabricante. Fuente: www.zortrax.com

Zortrax M200	
Dimensiones	200x200x180
Estructura	cerrada
Sistema Cam	Zortrax
Código de control	G

La sinergia entre técnicas de diseño y fabricación en el desarrollo de cualquier prototipo es esencial para la cohesión entre funcionalidad, comportamiento individual y de conjunto del dispositivo resultante y sus elementos. Ello constituye un ciclo retroalimentado en el que ambas fases dependen una de la otra de igual forma. Adquirir el nivel de formación necesario para integrar estas etapas demanda un proceso de aprendizaje previo que permita alcanzar los objetivos del proyecto, en conformidad con los requerimientos establecidos.

Las técnicas de fabricación de un dispositivo deben ser dimensionadas en base a los criterios físicos y funcionales de su diseño. Del mismo modo, la fase conceptual del mismo debe contemplar los recursos y métodos de desarrollo disponibles. Su implementación en el diseño permite mejorar la integración entre componentes, además de la optimización de recursos. Entre ellos, la reducción de materiales y costes o la simplificación de los procesos de producción; siendo el resultado del mismo un prototipo económicamente equilibrado y de menor huella ambiental en base a su fabricación.

CAPÍTULO 3

La definición del sistema como eje de rotación auxiliar, en inglés, *auxiliar rotation axis* da su nombre a ROTAX. Un dispositivo automatizado diseñado con la función capital de colocar y rotar piezas con las geometrías previamente descritas, para así permitir el desarrollo de tareas de mecanizado sobre las superficies útiles.

En el presente capítulo se detalla la manera en la que se han abordado y resuelto las necesidades operativas definidas, desde el punto de vista del diseño. Para elaborar un prototipo equilibrado, útil y totalmente funcional se han tenido en cuenta, especialmente en esta primera fase de creación conceptual, criterios productivos como las técnicas de fabricación o el uso, en la medida de lo posible, de componentes estándar. La utilización de elementos estándar en mecánica y electrónica favorece labores de mantenimiento y reparación en caso de avería. Además, se ha buscado la integración del componente estético, para desarrollar no solo un conjunto funcional si no también atractivo. Este último es un atributo diferenciador interesante a nivel de marketing por conceder valor añadido al dispositivo resultante.

3.1 Diseño del sistema

El diseño del sistema atañe tanto a la mecánica como a la electrónica. Para la creación de la parte física del dispositivo se ha utilizado la herramienta de diseño asistido por ordenador *SolidEdge ST*, descrita en la página 21 del Capítulo 2. En cuanto a la fase electrónica, su programación se ha desarrollado mediante la herramienta de diseño de programas de control *Arduino*, basada en el lenguaje de programación C++.

3.1.1 Desarrollo del modelo físico

Para garantizar una buena planificación es necesario elaborar una lista con los principales criterios y necesidades que debe integrar el prototipo. A modo de guía, la sistemática del diseño debe abordar los siguientes aspectos:

- Sujeción de piezas cilíndricas
- Cabezal giratorio
- Inclinación de cabezal para absorber diferentes geometrías de pieza
- Cabezal automatizado

3.1.1.1 Sistema mecánico

El guion establecido constituye un esquema marcado por un orden lógico, además de un simple punto de partida. Seguir sus directrices durante la fase de diseño del dispositivo permite generar información ordenada y precisa paso a paso, sin interferir en líneas de diseño incompletas. Esta metodología es fundamental en el proceso de creación de cualquier producto, simplificando así labores creativas. En base a ello, el desarrollo de este prototipo ha seguido el siguiente orden:

En primer lugar, para el sistema de soporte se han analizado diversas posibilidades como la incorporación de un cabezal portabrocas o un plato de garras. Este último constituye un elemento pesado, de gran utilidad para la sujeción de tubos o ejes de diámetro considerable, pero poco preciso para pernos de poco calibre. Por ello, se ha descartado la introducción de este componente.

El dispositivo portabrocas podría llegar a ser un elemento menos pesado que el anterior. En él se han detectado los siguientes aspectos en cuanto a precisión se refiere. Dentro de la gama de opciones presentes en el mercado pueden distinguirse: sistemas de gama alta, con garantía de precisión y concentricidad; y sistemas de bajo coste, o gama más baja, que no gozan del mismo respaldo de precisión que su predecesor. Esto último descarta la opción del portabrocas de bajo coste. En cuanto al primero, presenta precios de mercado elevados, lo que lleva a analizar otras opciones.

Por último se analiza un componente porta pinzas formado por un eje que integra un sistema cónico de compresión para pinzas de sujeción, inducido mediante el ajuste de una tuerca exterior. Gracias al diseño de su mecanismo de apriete radial, este elemento si garantiza la concentricidad de la pieza soportada con el eje principal. Cabe destacar que cada pinza se corresponde a un único diámetro de pieza, lo que no comporta un hándicap puesto que en el mercado existen opciones económicas y de calidad (Tn-Tools)².



Figura 9: Eje de sujeción y pinza ER11. Fuente: www.tn-tools.com

Es frecuente el uso de este tipo de cabezales como elementos porta herramienta dando muestra de sus habilidades para utilizarse como componente de sujeción para otro tipo de accesorios de soporte o trabajo si fuese necesario. Por su estructura de cabezal y eje integrados la conexión entre motor y útil se efectúa de forma verdaderamente sencilla. Esto lo hace especialmente atractivo para cumplimentar con el carácter automatizado del prototipo. La conexión de estos elementos puede realizarse mediante transmisión directa con un acople, con engranajes o incluso con poleas. Esta es la versión de cabezal de sujeción seleccionada por adaptarse completamente a los requisitos detallados.

En cuanto al método de inclinación, este resultó ser la elección más controvertida del conjunto. Se exponen los conceptos que determinaron y permitieron el alcance del diseño actual: en el mercado existen alternativas que realizan esta función; las más extendidas entre los útiles automatizados de giro para tareas colaborativas con equipos de mecanizado, son

² Tn-tools: Tienda de útiles y herramientas de mecanizado para máquinas CNC.

conjuntos motor-plato de garras. En caso de incorporar un mecanismo de inclinación suelen hacerlo mediante un sistema de pivotado sobre un eje horizontal que pasa por el centro de masas del dispositivo, quedando perfectamente reflejado en la Figura 4 sobre sistemas auxiliares giratorios.

En ella se aprecia como el sistema induce una variación en la altura del punto de trabajo, cuando es necesario modificar la inclinación de la pieza. Este incremento supone un inconveniente para trabajos colaborativos con equipos de mecanizado sin regulación en el eje Z. Su integración implicaría la utilización de una etapa de desplazamiento lineal para subir y bajar el conjunto cada vez que se cambia el posicionamiento de la pieza. Después de estudiar diversos métodos se alcanzó el diseño de un mecanismo guiado, formado por un conjunto guía-carro, que permite regular la inclinación describiendo una trayectoria concéntrica al punto de formación del plasma. Esto garantiza que la distancia al foco del láser permanezca constante independientemente del ángulo de inclinación.

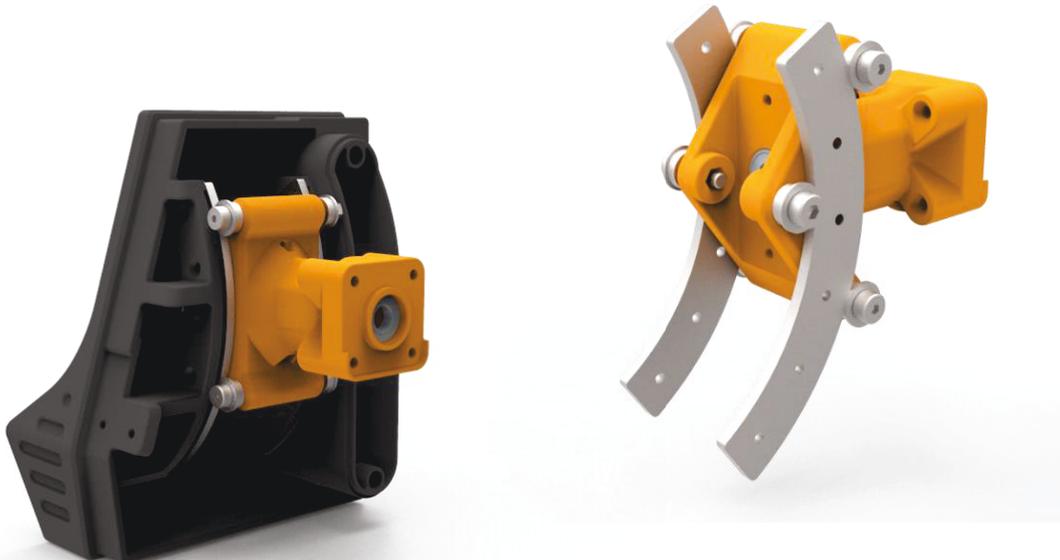


Figura 10: Sistema guía y carro de inclinación ROTAX

Analizando la figura es sencillo comprender la forma en la que el patín, provisto de 6 rodamientos de carga radial con ala, se desliza por el sistema de guiado curvo describiendo la trayectoria deseada. Se han dimensionado tres rodamientos por cada chapa; uno deslizando por la superficie de rodadura interior y dos por la exterior. La incorporación del ala restringe el movimiento lateral del carro garantizando la linealidad del sistema.

El diseño ya integra la función de inclinación demandada a falta del mecanismo que controla dicho movimiento. Para ese cometido se seleccionó un sistema de husillo con recorrido vertical constituido por un eje y una tuerca de rosca trapezoidal, que hace posible su regulación. Puesto que el patín describe una trayectoria diferente a la tuerca de avance del eje, es necesario concebir una pieza que acople ambas partes. En disposición horizontal carro y tuerca se posicionan a una distancia determinada, sin embargo, se alejan a medida que el dispositivo se inclina. Para absorber esta variación se integran horizontalmente dos guías lineales en paralelo. Véase en la Figura 11 como los ejes, abrazados por rodamientos de bolas axiales, permiten el desplazamiento en el eje X; además del eje Z descrito por el avance de la tuerca.

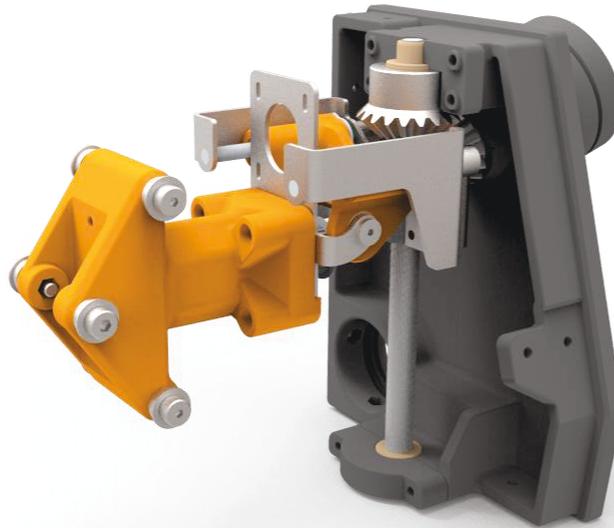


Figura 11: Sistema de husillo para control de inclinación ROTAX. Su diseño incorpora un volante de control del mecanismo dispuesto a 15° sobre la horizontal, favoreciendo la ergonomía de manipulación.

Inicialmente, el método de control del sistema de avance vertical se ideó mediante el uso de un volante dispuesto en el extremo superior del eje, transmitiendo el movimiento de giro de forma directa. Al avanzar en el desarrollo del diseño se concluyó que esta disposición suponía un inconveniente para la apertura de la tapa concebida para el acceso al interior de la máquina. Por ello, se ideó un método de transmisión del movimiento de giro al husillo mediante la combinación de dos engranajes cónicos de 20 y 16 dientes. La relación de reducción entre engranajes y la salida inclinada del eje de tracción por la tapa posterior permite el control del volante en una posición relativamente más ergonómica y con menos resistencia. Para terminar de definir esta parte del prototipo cabe mencionar que el método de sujeción seleccionado para el husillo utiliza dos casquillos de fricción alojados en un sistema de abrazaderas desmontables. Esto permite el ensamble del conjunto mecánico en bloque.

Para el control visual de la inclinación es preciso instalar un goniómetro, que confiere practicidad al sistema. En el mercado existen numerosas alternativas, pero son elementos de coste elevado que encarecerían innecesariamente el conjunto. Para evitarlo, la opción más práctica es usar las herramientas tecnológicas disponibles para el desarrollo de un componente propio, eficaz y de menor coste. El método implementado consiste en una punta de flecha unida al soporte del eje principal, que señala su posición sobre una chapa graduada instalada en la tapa frontal. Ambas piezas cortadas y plegadas en aluminio de medio milímetro, espesor suficiente para su cometido.

Perseguir el diseño de un prototipo compacto favorece su versatilidad, portabilidad e independencia para participar en tareas cooperativas con el láser de femtosegundo y otros equipos CNC similares; este atributo es una constante valorada a lo largo de todo el prototipado. La elección del método de sujeción del motor es uno de los puntos en los que se ve involucrado. Para este se determinó que la conexión en paralelo sería la idónea; la transmisión entre motor y eje de rotación se implementó mediante un sistema de poleas. Tanto la incorporada en el eje del primero ($\varnothing_{\text{eje motor}}=5 \text{ mm}$) como la del segundo ($\varnothing_{\text{eje principal}}=10 \text{ mm}$) son de 32 dientes. No se precisa reducción en la transmisión puesto que el motor es de 200 pasos por vuelta, suficiente para la resolución solicitada.

En este punto, el nivel conceptual de ROTAX ya satisface los requerimientos técnicos solicitados. Sin embargo, alcanzar un proyecto de ingeniería integral, novedoso y diferenciado conlleva analizar todos los aspectos técnicos que conciernen a la funcionalidad y operatividad de un sistema. Durante el proceso de diseño se detecta un concepto crucial que atañe a la utilización de equipos láser como el del laboratorio: la generación de gases y partículas nocivas en las operaciones de trabajo. Facilitar la extracción de aire de la zona de trabajo es un aspecto trascendente; en consiguiente, se ha integrado en la estructura del dispositivo un conducto que va desde la tapa frontal del prototipo hasta la posterior del mismo, incorporando una salida de 40 mm de diámetro para el acople un tubo genérico de un sistema de aspiración forzada. Este diseño habilita el conjunto para implementar esta función sin condicionarlo en otros aspectos. En la unión entre las distintas partes del conducto, se incorporaron juntas tóricas para garantizar su sellado.

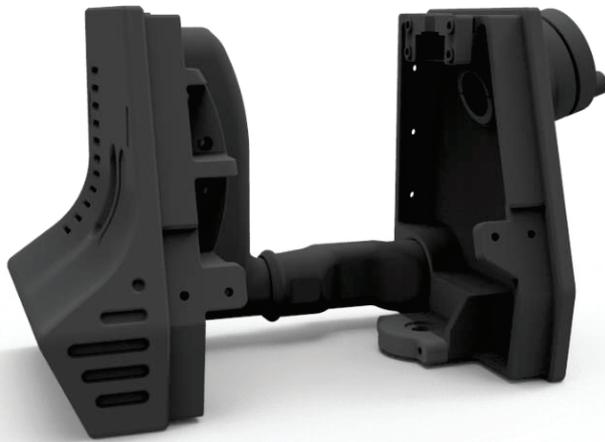


Figura 12: Conducto de aspiración forzada de ROTAX, que permite la conducción del aire desde la zona del cabezal hasta el punto de extracción posterior.

Los elementos de cierre anterior y posterior son un ejemplo de conjunción entre diseño mecánico, funcionalidad y estética. Disponer de tecnologías de prototipado rápido, como es la impresión 3D, permite la fabricación de piezas que agrupan estos conceptos. En la Figura 12 puede apreciarse la anexión entre los dos primeros conceptos, entendiendo como un aspecto subjetivo el componente estético. El punto de desarrollo alcanzado en estos elementos se hace tangible mediante el análisis de sus partes, integrando:

- En el primer caso: el soporte de las guías concéntricas, que recogen la necesidad de acceso al punto de alojamiento de los rodamientos internos del patín de deslizamiento para su instalación; el inicio del conducto de aspiración con rejillas hacia la zona de trabajo del láser, alojamiento en la parte posterior para la tobera del propio conducto y sus puntos de soporte con tuercas embutidas para la disposición de tornillos; una geometría exterior que describe una curva concéntrica al punto de formación del plasma que garantiza, en cualquier ángulo de inclinación, la equidistancia entre la pieza y el cabezal; además, combina un plano inclinado en la zona de acceso a la máquina para la colocación de la tapa de acceso. Este aspecto adecua el diseño del dispositivo para la inclusión, en un futuro, de una pantalla táctil que lo independice para su control automatizado. La inclinación frente a la horizontal de la superficie descrita es de 15° , permitiendo un ángulo de visión adecuado.

- En el segundo caso: el sistema de soporte para el conjunto de control del husillo soportado mediante el alojamiento de sus casquillos de fricción, con el volante dispuesto en la parte posterior y el engranaje cónico en la interior; los soportes de sujeción para el mecanismo de desplazamiento en Z, con sus respectivas abrazaderas de fijación; conexión para el conducto de extracción con salida de 40 mm de diámetro posterior y el alojamiento de la junta tórica; además de las embuticiones para las tuercas de anclaje con la carcasa del prototipo. Cabe destacar, durante la fase de diseño del mismo, la búsqueda de un método de soporte para el conjunto del husillo que permitiese su montaje en bloque, facilitando así el proceso de ensamble tanto de este como de los componentes que lo rodean. Esto se hizo posible mediante la elaboración de un sistema de abrazaderas.

En cuanto al diseño del espacio destinado a alojar el equipo de control electrónico, se ha tomado la determinación de situar al mismo exteriormente a la cara posterior de la carcasa metálica. Esta decisión se debe a los siguientes criterios: accesibilidad al circuito, un aspecto que se entiende como básico en este tipo de sistemas; buena refrigeración del conjunto electrónico, para él cual se disponen áreas perforadas que favorecen la recirculación de aire a través de la caja del equipo; y el interés por preservar el carácter compacto del conjunto, liberando la parte interior del prototipo para los elementos mecánicos que lo componen. Para alojar la electrónica se elaboró una caja en chapa de acero inoxidable de 0,8 mm, compuesta de tres partes: dos tapas laterales con perforaciones de disipación térmica y una central para el acceso a la electrónica.



Figura 13: Carcasa de alojamiento para electrónica

Alcanzado el punto final en el desarrollo conceptual del prototipo, se obtiene un conjunto específico para el desempeño de tareas como las que lo demandan, que a su vez goza de la versatilidad necesaria para trabajar en otros entornos de operación o distintas tareas colaborativas con láser.

El dispositivo resultante está definido por las dimensiones absolutas 195x300x200 (alto x largo x ancho) medido en milímetros. El valor que determina el fondo del prototipo incluye las medidas del cajón de electrónica, instalado sobre la cara posterior de la carcasa. El elemento mencionado permanece anclado lateralmente a la estructura del dispositivo, sin contactar directamente con la base de apoyo, por lo que no demanda espacio sobre la superficie de soporte integrada en el equipo láser. La base del dispositivo ocupa entonces un área de 250x155, medido en milímetros. Finalizando la caracterización dimensional básica del dispositivo, cabe destacar que la altura del punto de contacto entre rayo y superficie de grabado se encuentra a 122 mm con respecto a la base de la bancada, cumpliendo con los requisitos de distancia focal de la lente del láser ya mencionados previamente.

3.1.1.2 Sistema electrónico

En base a la dimensión técnica del prototipo, se determina como punto de partida para la electrónica un motor paso a paso NEMA 17 (en inglés, *National Electrical Manufacturers Association*)³. Este es el elemento seleccionado para implementar la función de giro del terminal. Para el control del motor se dimensiona un circuito electrónico que incluye: tarjeta de control Arduino; driver modelo Drv8825, que funciona como limitador de potencia del motor; y fuente de alimentación AC/DC de potencia 35 W y tensión de salida 12 V (DC). A continuación se expresa la justificación teórica de la elección de cada uno de los componentes electrónicos.

La arquitectura y los materiales que componen el motor seleccionado limitan la corriente que puede circular por cada una de sus fases a 1,2 A y su resistencia por fase es de 1,5 Ohmios. Según la ley de Ohm, se debería aportar una tensión de 1,8 voltios, pero este valor no es suficiente para excitar las bobinas del motor y producir el movimiento del rotor.

Este es el punto en el cual entra en juego el driver, funcionando como un controlador de potencia. Para la comprensión del funcionamiento y utilidad del mismo es preciso introducir algunos criterios básicos de electricidad y electrónica. Seleccionando el valor de salida de 12 V de la fuente de alimentación y recurriendo a la ley de Ohm de nuevo, se calcula que la corriente que circularía por las bobinas del motor sería de 8 A, lo que las dañaría directamente. Como limitador de potencia, este dispositivo se encarga de convertir la señal de entrada en una señal pulsada PWM, permitiendo que el valor medio de la corriente sea igual al valor máximo soportado por las bobinas del motor. La corriente que circula por el elemento de control Drv8825, no debe superar los 2 A, pues, por encima de este valor el procesador incorporado en él podría alcanzar temperaturas que lo dañarían. Se ha seleccionado este elemento frente a otros como el driver A4988 por tolerar un valor de corriente mayor.

La selección de la fuente se debe a las características abordadas sobre voltaje e intensidad del sistema a alimentar. Es recomendable que el valor de corriente máxima suministrada por la fuente sea ligeramente mayor que el valor demandado por el circuito, en caso contrario podría dañarse fácilmente. En concreto, la fuente dimensionada es de 12 V de salida (DC) y 3 A (35 W).

La tarjeta *Arduino* adquirida es el modelo Mega 2560, una elección óptima para sistemas de control como el presente. Como se expresa en el apartado sobre Arduino, del capítulo de Herramientas de diseño y fabricación, esta tecnología constituye una herramienta interesante para creadores de contenido en materia de programación de dispositivos CNC que integran motores, led o diversos tipos de sensores digitales y analógicos para el control de los sistemas.

³ NEMA: Organización de desarrollo de estándares acreditada por ANSI. En concreto, la norma estándar NEMA 17 define la geometría determinada de la brida de un motor. Fuente: www.nema.org

Tabla 6: Especificaciones motor paso a paso Nema 17

MOTOR NEMA 17	
Unipolar/bipolar	si
Pasos por vuelta	200
Tensión nominal por fase	4 V
Corriente nominal por fase	1,2 A

Tabla 7: Especificaciones Driver.

DRIVER DRV8825	
Tensión de control	5V
Corriente max	2,5A
Limitador de potencia	si
control de micropasos	hasta 1/32

Tabla 8: Especificaciones fuente de alimentación.

FUENTE DE ALIMENTACIÓN	
Entrada/Salida	AC/DC
Tensión de salida	12 V
Corriente de salida	3A
Potencia	35 W

Tabla 9: Especificaciones tarjeta de control Arduino

ARDUINO	
Modelo	MEGA 2560
Microprocesado	ATmega640
Conexión	USB
Tensión de operación	5 V
Corriente de operación	0,5 A

CAPÍTULO 4

En el presente capítulo se detallan las operaciones de fabricación y montaje realizadas tras la fase de diseño. Previamente, se abordan los análisis de los diferentes métodos de fabricación empleados, además de la selección de componentes y materiales para la implementación física de ROTAX.

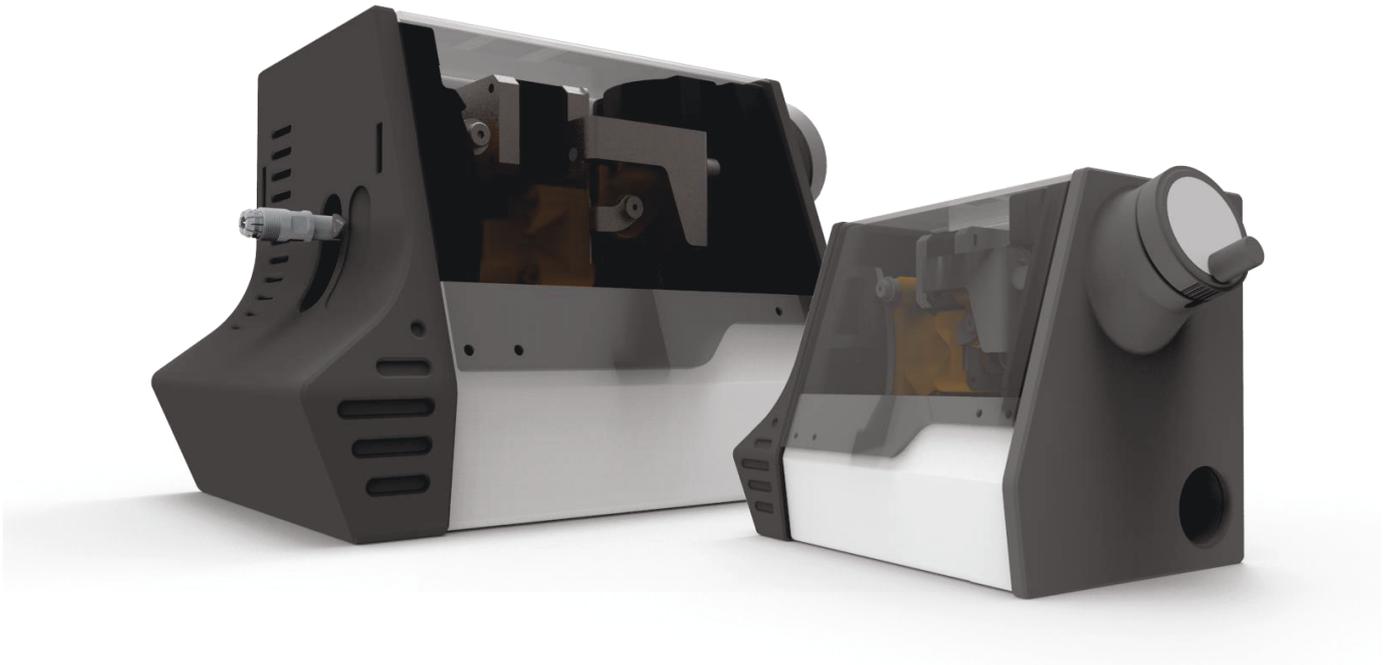


Figura 14: Vista conjunto

4.1 Selección de los métodos de fabricación

Como se adelanta en capítulos previos, la técnica de impresión 3D se ha tomado como punto de partida para la creación del prototipo. Esta tecnología permite la integración de diversos componentes de naturaleza mecánica, o no, dando lugar a piezas altamente sofisticadas y eficaces en la tarea de cohesionar. Un ejemplo de ello es el patín guía del sistema de inclinación; siendo un elemento compacto, se ha dotado con los elementos necesarios para integrar: el eje principal de rotación, dispuesto mediante dos rodamientos de carga radial embutidos en la pieza para garantizar una buena acción de giro sin fricción; los rodamientos y sus ejes de soporte, correspondientes para materializar el deslizamiento sobre las guías de inclinación; además del soporte atornillado destinado a alojar el motor principal.

Existen métodos de fabricación con capacidad para desarrollar piezas idénticas a las impresiones 3D o con las mismas funcionalidades. Como puede ser la inyección de plástico, lo que diferencia a este sistema de otros es ser un método de prototipado rápido y eficaz, que permite a creadores diseñadores y fabricar de forma autónoma.

La pieza analizada no es la única del conjunto producida mediante esta técnica. Entre ellas se encuentran:

- Tapas anterior y posterior.
- Tobera de aspiración.
- Conducto de aspiración.
- Carro deslizante por guías lineales.
- Abrazaderas de sujeción del husillo.

En el caso del conducto de aspiración, el uso de este método de elaboración permitió conducirlo por un espacio muy limitado donde tuberías convencionales no tenían cabida. Lo que refleja la capacidad de aprovechamiento del espacio para la obtención de sistemas compactos. La producción de piezas funcionales con métodos como el presente requiere mucho trabajo de modelado, pero a su vez, permite el alcance de elementos como los expuestos.

La segunda técnica de fabricación utilizada ha sido el corte de chapa mediante equipos láser industriales. La mayor parte de las piezas producidas de este modo incorporan pliegues en su diseño que, a la hora de su ejecución, se han materializado utilizando técnicas de conformado en frío. La incorporación de pliegues incrementa en gran medida la resistencia de este tipo de piezas ante esfuerzos mecánicos. Por ello, pueden utilizarse con fines estructurales o como soporte de otros elementos. La resistencia de estas aumenta también a medida que se incrementa su espesor, pero ello eleva el peso del conjunto. Exceptuando las de fabricación en aluminio (flecha y goniómetro), estas operaciones se han subcontratado a un taller industrial con los medios necesarios para su desarrollo. Las piezas ejecutadas mediante esta técnica son:

- Carcasa del dispositivo
- Guías lineales
- Soporte motor
- Conjunto de soporte para guías lineales
- Carcasa para electrónica.

Por último, se han diseñado varias piezas concebidas en plástico, y producidas mediante corte con láser de CO₂. La primera de ellas corresponde a la tapa lateral, que permite el acceso al interior de la máquina, la cual incorpora un pliegue ejecutado mediante sistema de conformado térmico por hilo caliente; la segunda funciona como separador, un aislante eléctrico entre el circuito electrónico y la carcasa del prototipo.

4.2 Selección de componentes

En este apartado se argumenta la elección de los elementos mecánicos integrados en el prototipo en base a sus criterios técnicos, los cuales dependen prioritariamente de funcionalidad y durabilidad, ya que constituyen el soporte mecánico del conjunto. También se ha tenido en cuenta el aspecto económico siempre que ello no perjudicase la calidad técnica. La conjunción de ambos términos debe desencadenar en la elección de elementos que satisfagan las necesidades a un coste óptimo.

- De forma análoga al “apartado de diseño”, se encabeza esta descripción por la selección del eje principal de rotación de fabricación en acero EN 1.1191, se determinó que el componente adecuado por su compatibilidad con la tarea designada era el eje para pinza ER11M de 10 mm de diámetro por 150 mm de longitud (proveedor: www.tn-tools.com). En el momento de su compra se incluye también la tuerca de apriete correspondiente. El elemento de sujeción ER11 permite la utilización de pinzas para cilindros con una capacidad que oscila entre 1 y 7 mm de diámetro, escalonado de medio en medio milímetro. La pinza seleccionada es de 5 mm, por ser un término intermedio entre el soporte de pinzas de pequeño calibre y posibles accesorios de acople al cabezal (mismo proveedor que el eje).
- Continuando con los elementos de accionamiento principal se dispone del husillo. Generalmente, estos elementos se adquieren en dimensiones personalizadas bajo pedido, puesto que pasan a un proceso de torneado para su preparación. El componente se dimensionó en rosca trapezoidal M12 y cabezas lisas de 18 mm para el alojamiento del engranaje de transmisión de giro y los casquillos de fricción en los que se apoya. El material del eje es acero templado (en 1.1191), no aleado, según norma DIN en 10083, sin tratamiento.

La tuerca de avance de eje seleccionada es de latón (en CC766S) y consta de cuatro orificios roscados, las dimensiones de tuerca y eje en conjunto se tomaron en base a las necesidades físicas y geométricas del sistema. En cuanto al soporte de los ejes de husillo y tracción del mismo “(apartado de diseño)”, se determinó que los elementos portantes necesarios podían ser casquillos de fricción, puesto que, el régimen de giro de ese conjunto es bajo. El material de fabricación es el bronce, usual en este tipo de componentes.

Para la transmisión del giro entre los dos ejes se integraron rodamientos cónicos de 20 y 16 dientes. El motivo de seleccionar la geometría cónica se detalla perfectamente en el “apartado diseño”; en cuanto al material, la elección es “plástico”, puesto que los requerimientos mecánicos no son muy elevados y su peso es muy reducido, favoreciendo el aligeramiento del conjunto.

- Para el control del eje de tracción se escogió un volante en cuerpo de aluminio lacado en negro, de diámetro exterior de 61 mm. Su elección se debe a dos aspectos: estética y funcionalidad. En lo relativo a la funcionalidad, es adecuado que el elemento sea del mayor diámetro posible, dentro de los márgenes lógicos, para garantizar una buena tracción sobre el eje, teniendo en cuenta el factor palanca; además, el elemento tiene la función de embellecedor, puesto que forma parte del exterior del dispositivo. Cuidar estos detalles aporta valor añadido, al ya adquirido, si el resultado mecánico es bueno; constituyendo un elemento diferenciador.
- En el prototipo se incluyen diversos rodamientos: dos de carga radial de diámetro interior 10 mm y perfil estrecho; ocho de carga radial con ala de 6 mm de diámetro interior; y dos rodamientos axiales de bolas. Estos últimos se instalaron en las guías lineales del sistema de inclinación; disponen de un casquillo exterior de 40 mm de longitud, otro interior (de bolas) de 30 mm y un rango de deslizamiento relativo de recorrido de 20 mm (marcado por la diferencia entre longitud de casquillos). Estos se instalaron en conjunto con los ejes guía lineales de 70 mm.

Los rodamientos con ala se instalaron en pernos ajustados (ϕ 6 mm) con terminación en rosca métrica; dependiendo del sitio donde estén alojados los primeros, la longitud y rosca de los ejes es variable. Por último, los dos rodamientos de perfil estrecho son los encargados de acompañar al eje principal en la operación de giro, instalados en el patín guía (proveedor local: Roydisa).

- El último conjunto mecánico que incluye el prototipo es un sistema de dos poleas, siendo estas de 32 dientes, como se describe en el “apartado de diseño”, de diámetro exterior 25 mm, perfil de diente GT2 (paso 2mm) y construcción en aluminio confiriéndoles ligereza.

4.3 Selección de materiales

Este apartado recoge las especificaciones técnicas de los distintos tipos de materiales utilizados en la fabricación de las piezas del sistema de rotación auxiliar. Cada elección guarda relación con el apartado 4.1, sobre técnicas de fabricación, y de la aplicación para la que se han proyectado. Respecto a la elaboración de los elementos de impresión 3D, el material seleccionado es Z-ULTRAT; en cuanto a las piezas de chapa metálica se distinguen aluminio y acero inoxidable; por último, para la fabricación de carcasas de plástico el material seleccionado es el metacrilato.

- **Z-ULTRAT.** El ya mencionado material de impresión de la marca de impresoras Zortrax. Se presenta como una alternativa duradera y de buen acabado para la elaboración de prototipos definitivos y funcionales. Basado en ABS, este producto es adecuado según el fabricante para la creación de elementos decorativos, carcasas o productos de consumo, pero también para la elaboración de soluciones mecánicas o herramientas. Se hace destacar por comportarse de forma adecuada en operaciones de postprocesado con acetona y en tratamientos mecánicos (Zortrax). Las operaciones de acabado de piezas realizada en estos materiales suelen incluir operaciones de desbaste, como el lijado, y enmasillado, para la corrección de defectos superficiales. La técnica con acetona vaporizada debe cumplir ciertos requisitos, principalmente de tiempo y cantidad, puesto que una exposición demasiado prolongada podría terminar derritiendo notablemente el material. Este tratamiento iguala la superficie de la pieza y le aporta brillo.



Figura 15: Material Z-ULTRAT. Fuente: www.zortrax.com

- **ACERO INOX AISI 304.** Es el material más común entre los aceros inoxidable. Entre sus características destacan: procesabilidad; soldabilidad; resistencia a la corrosión, al calor, a baja temperatura y propiedades mecánicas; y buena trabajabilidad, como estampado y doblado. Por todo ello es ampliamente utilizado en usos industriales y en otras aplicaciones a nivel mundial. Por algunas de estas características, destacando las propiedades mecánicas de corrosión y la aptitud frente al plegado, se ha seleccionado para diversas piezas del dispositivo, entre las que se encuentran elementos estructurales, como la carcasa; o funcionales, como las guías del patín de inclinación.
- **ALUMINIO.** En concreto, hay dos piezas en la máquina concebidas en este material; el goniómetro y su indicador de posición. Se ha elegido por su ligereza y su conformabilidad en frío.
- **METACRILATO.** Material plástico ampliamente utilizado en la industria, principalmente en su versión transparente. Es más resistente a impactos que el vidrio, por lo que lo hace interesante en muchas aplicaciones. La elección de este material se debe principalmente a la posibilidad de corte mediante tecnología láser y por su facilidad de conformado térmico; adecuándose al diseño de piezas como la tapa de acceso al interior del prototipo.

CAPÍTULO 5

El prototipo está compuesto por 59 piezas entre las cuales se encuentran piezas de impresión 3D, chapas metálicas y plásticas, además de diversos componentes mecánicos o funcionales; sin contar con el conjunto de elementos de unión básica como tornillos y tuercas. En este apartado se realiza una descripción de inventario de las piezas diseñadas de forma autónoma, bien sean fabricadas en medios propios o externos; seguido de la correspondiente secuencia de montaje del prototipo. No se incluye en el inventario los distintos componentes electrónicos, pero si se hace referencia a ellos en la secuencia de montaje.

5.1 Inventario

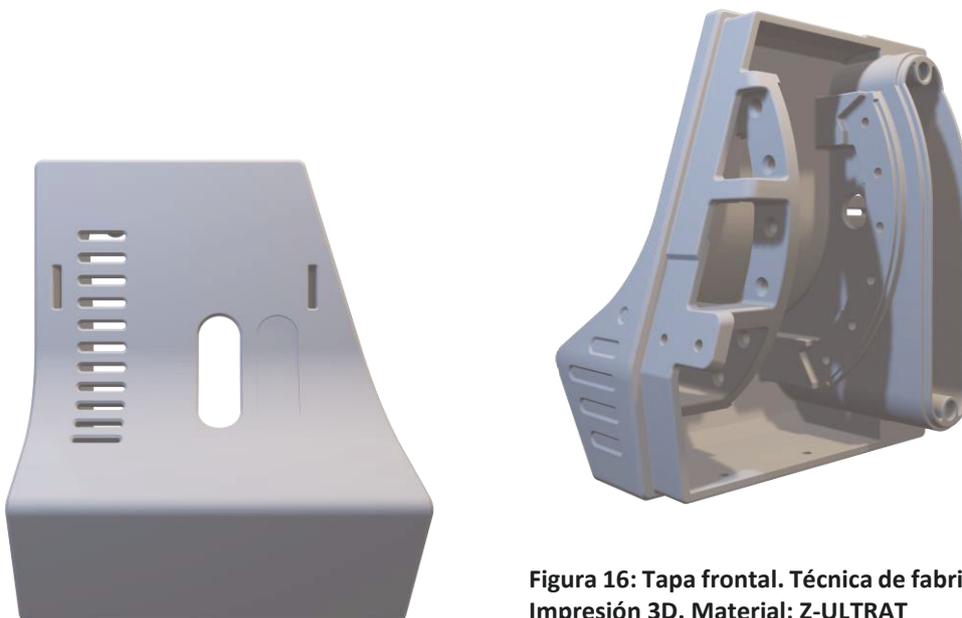


Figura 16: Tapa frontal. Técnica de fabricación: Impresión 3D. Material: Z-ULTRAT

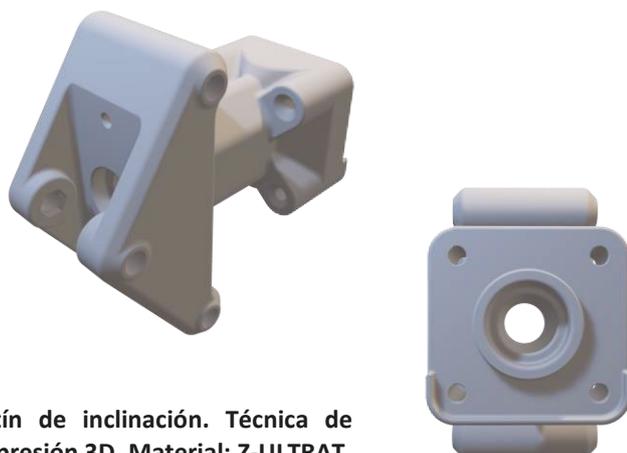


Figura 17: Patín de inclinación. Técnica de fabricación: Impresión 3D. Material: Z-ULTRAT



Figura 18: Tobera. Técnica de fabricación: Impresión 3D. Material: Z-ULTRAT

Figura 19: Carro guía lineal. Técnica de fabricación: Impresión 3D. Material: Z-ULTRAT

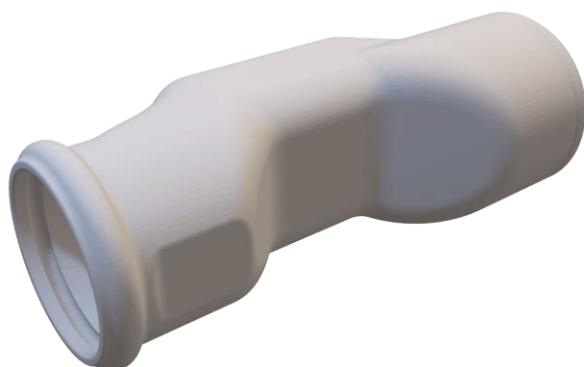
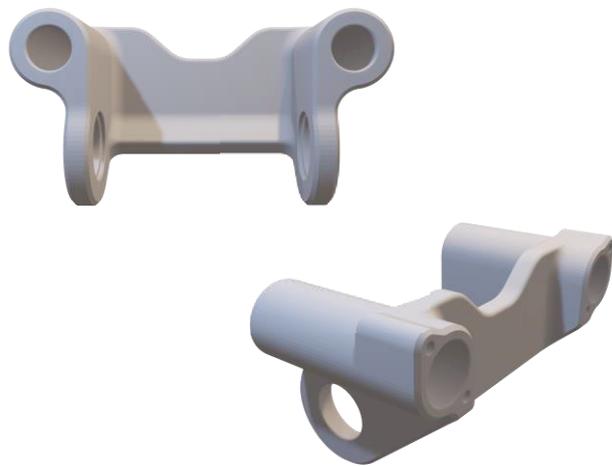


Figura 20: Conducto de extracción de gases. Técnica de fabricación: Impresión 3D. Material: Z-ULTRAT

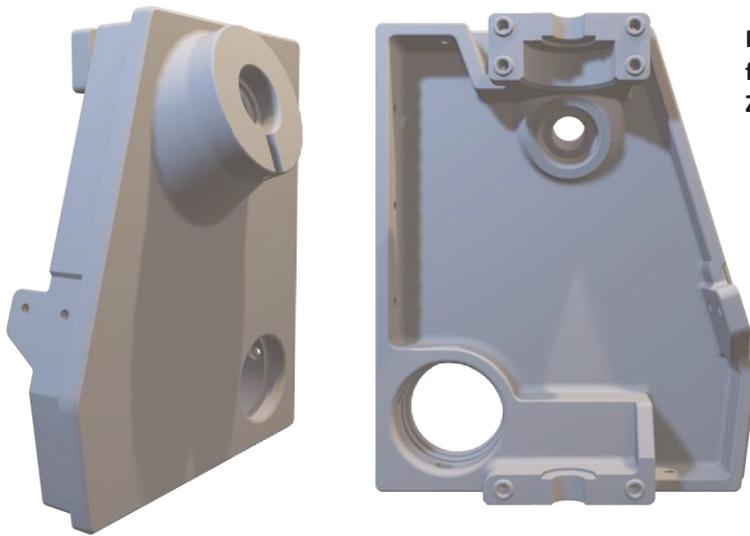


Figura 21: Tapa posterior. Técnica de fabricación: Impresión 3D. Material: Z-ULTRAT

Figura 22: Abrazadera superior. Técnica de fabricación: Impresión 3D. Material: Z-ULTRAT

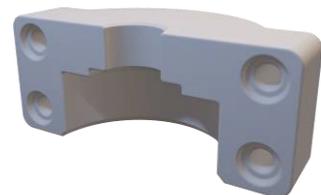


Figura 23: Abrazadera inferior. Técnica de fabricación: Impresión 3D. Material: Z-ULTRAT

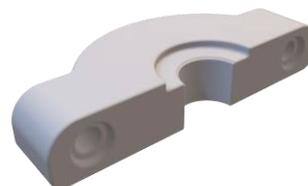


Figura 24: Tapa de acceso al interior del dispositivo. Técnica de fabricación: corte con láser de CO2. Material: metacrilato

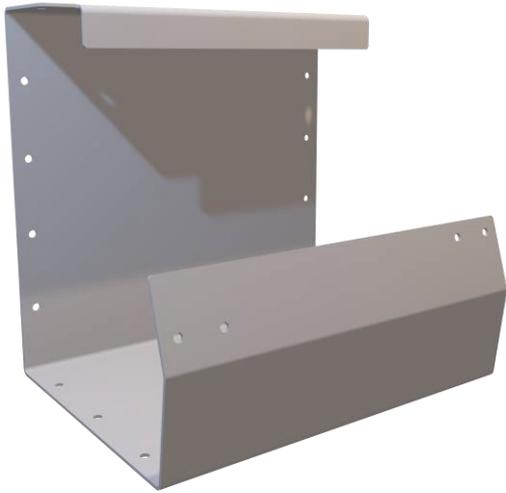


Figura 25: Carcasa. Técnica de fabricación: corte láser y conformado en frío. Material: Acero INOX

Figura 26: Guías concéntricas. Técnica de fabricación: Corte láser. Material: Acero INOX

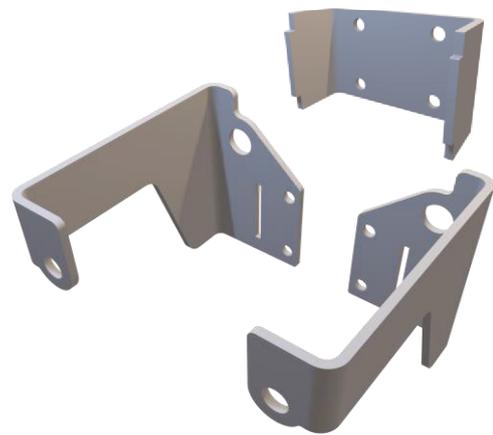


Figura 27: Conjunto soporte guías lineales. Técnica de fabricación: Corte láser y conformado en frío. Material: Acero INOX

Figura 28: Soporte motor. Técnica de fabricación: Corte láser y conformado en frío. Material: Acero INOX





Figura 29: Conjunto indicador de inclinación. Técnica de fabricación: Corte láser y conformado en frío. Material: Acero INOX

Figura 30: Tope casquillos guía lineal. Técnica de fabricación: Corte láser. Material: Acero INOX

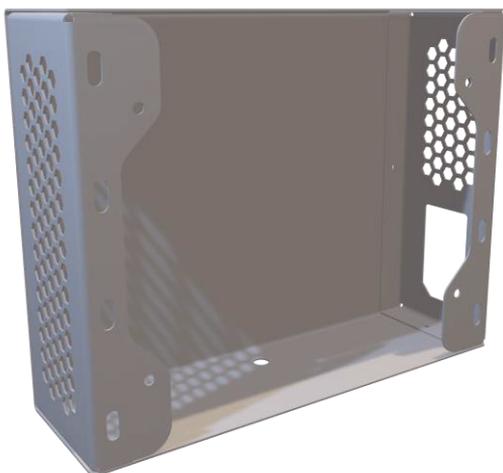


Figura 31: Carcasa Equipo electrónico. Técnica de fabricación: Corte con láser y conformado en frío. Material: Acero INOX

5.2 Montaje

El modo de ensamble de un dispositivo debe tenerse en cuenta desde la fase de diseño. Este tiene que integrar los distintos métodos de acople; el espacio necesario para el acceso de los elementos de sujeción y sus herramientas; además de un método sencillo de desmontaje, puesto que un dispositivo compuesto de un elevado número de componentes debe estar preparado para la sustitución de alguno de ellos a lo largo de la vida útil del aparato; tanto del sistema mecánico como del electrónico. Dimensionada desde la etapa conceptual, se distinguen cuatro etapas de montaje del dispositivo que siguen la siguiente secuencia:

- Etapa 1. Incluye la tapa frontal, el sistema de guiado y carro, el motor, su soporte, el sistema de señalización del ángulo de inclinación y la tobera de extracción de gases. En primer lugar, se instalan las guías de concentricidad sobre su alojamiento en la carcasa o tapa frontal y la pieza de referencia métrica del goniómetro. El conjunto patín con el soporte del motor, el eje principal, el motor, las poleas de tracción y el indicador de posición angular, previamente ensamblados, se monta sobre el sistema de guías y se fija mediante la colocación de los rodamientos delanteros de guiado. Una vez unidos es el momento de su instalación en la carcasa metálica y la colocación en último lugar de la tobera, para no interferir con los tornillos de ensamble.
- Etapa 2. Formada por la tapa posterior, el sistema de husillo y su conjunto de tracción, sus abrazaderas, el grupo de guiado lineal y el conducto de aspiración. La secuencia de montaje comienza por la colocación del eje, de los casquillos de fricción, del engranaje cónico y del volante de tracción del husillo en su alojamiento de la tapa posterior. Seguidamente se monta el conjunto de guiado lineal en el husillo y se instala en bloque en la tapa. Se colocan las abrazaderas de sujeción y a continuación el conducto se introduce en su sitio. Simplemente falta colocar el conjunto en la carcasa.
- Etapa 3. Consiste en atornillar el conjunto electrónico y su caja de protección en el lugar concebido para ello. Este conjunto se posiciona sobre la cara exterior trasera de la carcasa metálica del dispositivo, liberando espacio en el interior del mismo y favoreciendo una buena refrigeración del sistema electrónico. Se comienza el montaje por las tapas laterales, seguidas por la sujeción del circuito electrónico en bloque y la fuente de alimentación. La caja dispone de una tapa de apertura sencilla para el acceso al sistema electrónico.
- Etapa 4. Esta es la última fase del montaje, que consiste en materializar las conexiones. Comenzando por las mecánicas: se unen el mecanismo de guiado lineal y el soporte del patín de inclinación mediante dos pernos alojados en sus correspondientes rodamientos de carga radial, dando por concluido el montaje mecánico del prototipo. En este punto es donde se hace la conexión entre motor y circuito eléctrico, pasando los cables del primero por medio de un pasacables al cajón de electrónica. Se efectúan el resto de conexiones eléctricas y el dispositivo ya estaría habilitado. Solo queda colocar las tapas de acceso al interior del prototipo y del cajón de electrónica para finalizar la secuencia de montaje.

5.3 Ajuste de fabricación y montaje

Tras la producción de piezas a medida, para su posterior cohesión en un único conjunto, es posible que aparezcan leves defectos de fabricación o incluso de diseño. Estos pueden revertirse mediante adaptaciones de las piezas o del modelado volviendo a la fase de creación. Durante el montaje es posible hallar algunos de estos defectos que pueden ser subsanables, pero que en ocasiones son fatales.

Este es el caso de una de las piezas 3D del dispositivo; en su montaje, el patín del sistema de inclinación, sufrió una deslaminación en la zona de soporte de uno de sus rodamientos. En ese punto, la pieza incorpora el alojamiento embutido de la tuerca de uno de los pernos que integra dicho rodamiento en el patín. La rotura se produjo por la fuerza que la tuerca hacía sobre la zona en el momento de su apriete. Para subsanar este problema, y que no se produjese en piezas posteriores, se diseñó la pieza con un redimensionamiento de la zona afectada mediante el aumento del espesor del punto de soporte. Además, en el módulo CAM de la impresora 3D, se variaron algunos parámetros de impresión como la densidad del componente, aumentando en un 10 % este valor. De este modo se mejoró la resistencia del elemento en cuestión, subsanando el problema surgido.

Por otro lado, se hallaron pequeñas desviaciones en la fabricación de alguna de las chapas metálicas conformadas en frío, subcontratadas. Errores que, en piezas grandes como las que suelen producir en este tipo de talleres industriales, son insignificantes; pero en pequeñas piezas, sí adquieren mayor magnitud. En cualquier caso, estos se solucionaron de forma sencilla mediante la corrección de las propias partes.

5.4 Protocolo de pruebas

El siguiente paso a seguir tras el montaje del prototipo es la puesta en práctica de sus funciones. Como se explica a lo largo del documento, las operaciones esenciales son el soporte concéntrico de piezas cilíndricas, su rotación e inclinación del cabezal. El protocolo para las pruebas de sujeción e inclinación es sencillo y manual: colocación de pernos de 5 mm de diámetro, en este caso, y manipulación del sistema de inclinación. Con el método descrito se evalúa la capacidad del dispositivo para trabajar con los diferentes elementos de interés, piezas de cuerpo cilíndrico pero con la posibilidad de incorporar diversas geometrías en su cabeza, siendo este el caso de los pernos de sujeción en implantes óseos.

El protocolo es diferente para la función de rotación, puesto que esta es automatizada. Para su puesta en práctica, se modela un programa en lenguaje C con el que controlar el motor paso a paso con Arduino IDE. La dinámica de programación consiste en:

- Definir los pines de Arduino asociados a cada orden de control: pasos, dirección y reset.
- Establecer una variable con el número de pasos que se quieren implementar.
- Definir las ordenes de control del primer punto como variables de salida.
- Programar un bucle de operación, en el caso práctico, que permita ejecutar la orden de giro del número de pasos definidos en variable y reiniciar la secuencia tras cada operación. Un programa sencillo que permite concluir que el funcionamiento del sistema de rotación y su montaje son correctos.

CAPÍTULO 6

6.1 Fabricación en serie

Hablar en términos de industrialización o producción en serie implica el análisis de aspectos como: las posibilidades de mercado; las técnicas de fabricación en masa; la capacidad económica y de gestión; el control técnico; y sobre todo, disponer de un producto que cumpla los requisitos para comenzar una explotación productiva industrial.

Centrado el tema, cabe analizar si ROTAX cumple algunos aspectos como la adecuación a tecnologías de fabricación industrializadas y en serie, o el cumplimiento de necesidades de mercado. En cuanto a este último, en esta memoria se detalla como el prototipo resuelve satisfactoriamente los requerimientos necesarios para participar en tareas colaborativas tan punteras como el estudio de la mejora de la osteointegración de piezas formadas por materiales biocompatibles. Donde el dispositivo demuestra no ser únicamente un sistema práctico, si no que está preparado también para el control de material contaminante en suspensión, del área de trabajo del equipo láser con el que interactúa.

Si a ese hecho le sumamos que no es habitual ver el nivel de desarrollo alcanzado en los dispositivos de mercado que realizan algunas de las funciones de este, y en caso de haberlos su precio sería muy elevado, se determina que el prototipo podría resultar interesante en un determinado nicho de mercado.

Establecida esta base, se presenta el método de fabricación en serie que se adecúa a las características del prototipo. La conceptualización y el trabajo de diseño del dispositivo son coherentes, lo que quiere decir que la base mecánica del dispositivo es favorable para su implementación en serie. Si hubiese algún elemento a cambiar en este aspecto serían los casquillos de fricción, en sustitución por un sistema de rodamientos. Esto no se debe a ningún fallo ni apreciación de mal funcionamiento, si no a la previsión de una vida útil más prolongada del nuevo componente. El presente es un método adecuado para sistemas con régimen de giro bajos, pero ante una posible automatización del movimiento de elevación del dispositivo, este cambio podría ser beneficioso.

Cuando se trata de diseño, siempre y cuando el factor económico no lo contradiga, no se debe pasar por alto aspectos mejorables como el descrito.

El otro punto relevante para adaptar la máquina a su producción en cadena atañe al método de fabricación de las piezas plásticas. Este es el punto más relevante de la transformación del conjunto. La impresión 3D es un procedimiento muy interesante, pero de momento no puede competir con la inyección de plásticos a escala industrial. Para la producción en serie del prototipo, sería crucial la implementación de un modelo de fabricación por inyección de plástico para la elaboración de piezas a gran escala, reduciendo costes y tiempos en su producción.

Estos aspectos marcan los pasos a seguir para una posible industrialización del eje auxiliar de rotación ROTAX.

CAPÍTULO 7

En este capítulo se presenta un informe económico del coste de prototipado del sistema de rotación. En él se incluyen las partidas referentes a piezas de impresión 3D, piezas de fabricación en chapa, componentes mecánicos, conjunto electrónica y mano de obra.

7.1 Presupuesto

7.1.1 Piezas de impresión 3D

Impresión 3D					
ID	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	PVP (SIN IVA)	Ud (Kg)	PRECIO
I-1	Impresión 3D A	Negro	103,00 €	0,90	92,70 €
I-2	Impresión 3D B	Naranja	103,00 €	0,20	20,60 €
TOTAL IMPRESIÓN 3D (SIN IVA)					113,30 €

Tabla 10: Presupuesto piezas de impresiones 3D

7.1.2 Piezas de fabricación en chapa

Piezas de chapa					
ID	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	PVP (SIN IVA)	Ud	PRECIO
C-1	Chapas Inox	Conjunto chapas	100,00 €	1	100,00 €
C-2	Chapas aluminio	Conjunto chapas	30,00 €	1	30,00 €
C-3	Chapas metacrilato	Conjunto chapas	35,00 €	1	35,00 €
TOTAL PIEZAS DE CHAPA (SIN IVA)					165,00 €

Tabla 11: Presupuesto piezas de fabricación en chapa

7.1.3 Componentes mecánicos

Componentes mecánicos					
ID	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	PVP (SIN IVA)	Ud	PRECIO
M-1	Eje ER11M	Diámetro 10mm Largo 150 mm	21,00 €	1	21,00 €
M-2	Pinza ER11	Diámetro 5 mm	5,10 €	1	5,10 €
M-3	Husillo	M12	15,02 €	1	15,02 €
M-4	Tuerca	M12	35,84 €	1	35,84 €
M-5	Casquillos fricción A	Diámetro 8 mm	3,60 €	2	7,20 €
M-6	Casquillos fricción B	Diámetro 10 mm	3,60 €	2	7,20 €
M-7	Volante	Diámetro eje 10 mm	17,52 €	1	17,52 €
M-8	Engranaje cónico A	20 Dientes	12,21 €	1	12,21 €
M-9	Engranaje cónico B	16 Dientes	12,01 €	1	12,01 €
M-10	Guía lineale	Diámetro 6 mm	11,15 €	2	22,30 €
M-11	Rodamiento A	Perfil estrecho Diámetro _{int.} 10 mm	1,53 €	2	3,06 €
M-12	Rodamiento B	Con ala Diámetro _{int.} 6 mm	1,22 €	8	9,76 €
M-13	Perno A	Ajuste 6 mm Largo 60 mm	3,67 €	2	7,34 €
M-14	Perno B	Ajuste 6 mm Largo 14 mm	4,80 €	2	9,60 €
M-15	Perno C	Ajuste 6 mm Largo 12 mm	2,34 €	2	4,68 €
M-16	Rodamiento A	32 Dientes Eje 10 mm	14,45 €	1	14,45 €
M-17	Rodamiento B	32 Dientes Eje 5 mm	16,77 €	1	16,77 €
M-18	Correa	Ancho 9 mm Largo 164 mm	5,10 €	1	5,10 €
TOTAL ICOMPONENTES MECÁNICOS (SIN IVA)					238,58 €

Tabla 12: Presupuesto componentes mecánicos

7.1.4 Conjunto electrónico

Conjunto electrónica					
ID	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	PVP (SIN IVA)	Ud	PRECIO
E-1	Fuente alimentación	35W	16,95 €	1	16,95 €
E-2	Arduino	MEGA 2560	34,50 €	1	34,50 €
E-3	Motor	Nema 17	19,50 €	1	19,50 €
E-4	Driver	Drv8825	4,95 €	1	4,95 €
E-5	RAMPS Mega Shield	Módulo conexión	5,20 €	1	5,20 €
E-6	Conector alimentación	Conexión 230V	3,00 €	1	3,00 €
E-7	Cables circuito	Paquete	4,00 €	1	4,00 €
TOTAL CONJUNTO ELECTRÓNICA (SIN IVA)					88,10 €

Tabla 13: Presupuesto conjunto electrónica**7.1.5 Presupuesto total de materiales**

Concepto	Subtotal (sin IVA)
Impresión 3D	103,00 €
Piezas de chapa	165,00 €
Componentes mecánicos	238,58 €
Conjunto electrónica	88,10 €
TOTAL	594,68 €

Tabla 14: Presupuesto total de materiales

7.2 Presupuesto total mano de obra

Mano de obra				
Concepto	Descripción	Precio/hora (sin IVA)	Ud (h)	Total
Ingeniería	Horas de diseño y programación del proyecto	50,00 €	190	9.500,00 €
Montaje	Horas de montaje y ajuste del prototipo	40,00 €	36	1.440,00 €
TOTAL (SIN IVA)				10.940,00 €

Tabla 15: Presupuesto total mano de obra

7.3 Presupuesto final

Concepto	Total
Presupuesto total de materiales	594,68 €
Presupuesto total de mano de obra	10.940,00 €
IVA (21%)	2.422,28 €
TOTAL	13.956,96 €

Tabla 16: Presupuesto final

El presupuesto total de este proyecto es:

Trece mil novecientos cincuenta y seis euros con noventa y seis céntimos

CAPÍTULO 8

8.1 Conclusiones

Una vez finalizado el proceso de desarrollo del eje de rotación automatizado y la evaluación de sus aptitudes, es posible realizar un análisis crítico del proceso a modo de conclusión. En él se determina que:

Se ha diseñado y fabricado con éxito el prototipo proyectado en base al cumplimiento de los requerimientos solicitados. Entre estos se destaca la labor de sujeción y rotación para el posicionamiento adecuado de piezas cilíndricas en tareas de procesado con equipos láser. Además, se implementó un sistema de inclinación que aumenta el rango de piezas manipulables por el prototipo, aumentando de esta forma el rendimiento y alcance en los trabajos de cooperación descritos. El grado de progreso de las etapas conceptuales y sus correcciones posteriores han desencadenado en un dispositivo capaz de resolver las tareas encomendadas, y a su vez, hacer frente a aspectos que le otorgan valor añadido como la implementación de sistemas innovadores o la adecuación a futuras mejoras.

Cumplimentados los aspectos mecánicos, se integró satisfactoriamente un circuito de conexión para un sistema de extracción de gases. Algo indispensable en procesos de producción con tecnologías de corte y mecanizado láser, pero que no suele verse integrado en esta clase de dispositivos. Este concepto constituye un elemento diferenciador frente a los demás sistemas existentes en el mercado.

El nivel de desarrollo alcanzado sobre el producto permitió la sinergia entre las distintas tecnologías de fabricación utilizadas dando lugar a un prototipo equilibrado entre mecánica, funcionalidad y estética. Cabe destacar la correcta cohesión entre los elementos o técnicas de producción externa y las propias como es el caso de la impresión 3D. La integración de esta tecnología hizo posible el desarrollo de los elementos de unión entre componentes mecánicos para la obtención de un producto bien resuelto. Con las ventajas de este método de prototipado rápido. Es preciso indicar que para la fabricación de piezas mediante esta fórmula es necesario adquirir experiencia que permita al desarrollador anteponerse a la aparición de errores.

En ocasiones fue preciso buscar el consejo de profesionales en la materia para la subsanación de problemas como la deslaminación o mala adherencia durante procesos de impresión. Del mismo modo, la utilización de métodos externos de fabricación industrial hizo necesario el intercambio de información con personal técnico, para la definición de parámetros de operación de procesos como el conformado de piezas metálicas. Del taller metálico se obtuvieron datos como el radio de plegado en chapas, el cual depende del material, su espesor y las herramientas utilizadas durante el proceso de conformado. Esta dinámica constituyó un proceso personalmente enriquecedor.

En cuanto a las pruebas de funcionamiento del prototipo, se implantó un modelo de funcionamiento sencillo basado en el control de giro del eje principal mediante programación en Arduino, resultando satisfactorio.

8.1.1 Comparativa con otros sistemas del mercado

Puesto que no se han hallado dispositivos auxiliares de soporte y rotación de piezas que integren sistemas de aspiración de gases, se efectúa una comparativa de ROTAX con equipos de rotación, que análogamente al prototipo, dispongan de la función de inclinación.

Siendo la alternativa más cercana, se distinguen dos modelos: con inclinación concéntrica al punto de trabajo y con inclinación centrada en el cuerpo del dispositivo.

- **Inclinación centrada:** En el apartado de antecedentes se adelanta un ejemplo de este modelo de dispositivo. Dentro del segmento existe diferentes gamas de precios y calidades, determinados principalmente por la garantía de precisión del dispositivo o la calidad de los componentes utilizados.
- **Inclinación concéntrica:** El sistema de inclinación de este modelo es conceptualmente semejante al del prototipo del proyecto, aunque en muchos otros aspectos es totalmente diferente. A pesar de utilizar un sistema de guiado, el dispositivo simula el mismo movimiento concéntrico. En algunos casos incluyen un segundo motor para el movimiento de inclinación.

No se incluye comparativa de precios ya que este valor está descontextualizado, el cual depende directamente de aspectos como la calidad de los materiales y componentes, el volumen de fabricación, las tecnologías de fabricación utilizadas o su automatización. A ello ha de añadirse que el valor de fabricación de un prototipo es diferente al coste de fabricación del mismo dispositivo en serie, por incorporar partidas propias del prototipado en su presupuesto. En cuanto a la comparativa mecánica y funcional, el segundo sistema destaca frente al primero por los criterios de inclinación ya descritos. Para aplicaciones de precisión como las requeridas por el proyecto, a ambos mecanismos les penaliza el hecho de incorporar un cabezal de sujeción por garras, en comparación con el sistema integrado en ROTAX.

8.1.2 Futuros trabajos

Concluido el diseño y creación de ROTAX, es posible hacer un análisis de futuros proyectos asociados a la capacidad de mejora del dispositivo. Con buenos resultados mecánicos y estéticos, los aspectos teóricamente más interesantes para implementar en el prototipo son relativos a la dinámica de trabajo y a la programación. Se destacan dos operaciones de automatización para continuar el desarrollo técnico del dispositivo en un futuro:

- El primero de ellos es la motorización del movimiento de giro del husillo que permite inclinar el cabezal. Esta integración habilitaría la realización de tareas totalmente automatizadas para el control por ordenador de las operaciones de giro e inclinación.
- Un segundo aspecto interesante sería la inclusión de una pantalla táctil, elemento para el que está previsto el hardware de la máquina. Gracias al diseño inclinado de la tapa lateral, con un buen ángulo de visión, es posible colocar la pieza mencionada de forma práctica y funcional. La colocación del conjunto electrónico en la caja exterior del dispositivo facilita la realización de cualquier conexión futura, pasando simplemente el cableado por la zona ya destinada para ello.

REFERENCIAS

- Alique Palomar, A. (1980). *Contribuciones al estudio y diseño de un sistema de control numérico basado en microprocesadores (Order No. 10132233)*. Obtenido de <https://www.proquest.com/dissertations-theses/contribuciones-al-estudio-y-diseño-de-un-sistema/docview/1806241641/se-2?accountid=17197>
- Analysis, Z. B. (2020). *Zimmer Biomet Holdings Inc SWOT Analysis*.
- Diegel, O. N. (2019). *A practical guide to design for additive manufacturing*. Springer Singapore Pte. Limited. Obtenido de ProQuest Ebook Central <https://ebookcentral.proquest.com>
- Investinspain. (2021). *Industria química*.
- Kalpakjian, S. (2000). *Manufacturing Engineering and Technology*. Prentice Hall.
- López Aldea, E. (2015). *Arduino: guía práctica de fundamentos y simulación*. Paracuellos de Jarama, Madrid: RA-MA Editorial. Obtenido de <https://elibro-net.accedys.udc.es/es/lc/bibliotecaudc/titulos/106492>.
- Sachon, M. (2016). Impresión 3D: la digitalización de la fabricación. . *IEEM Revista de Negocios*, 19(4), 60–65.
- Segundo, L. A. (1999). *Las máquinas: herramientas con control numérico*. México, Mexico: Instituto Politécnico Nacional. Obtenido de <https://elibro-net.accedys.udc.es/es/ereader/bibliotecaudc/73982?page=1>.
- Steven Barrett, m. A. (2012). *Microcontrolador Arduino: Procesamiento para todos! Segunda edición*. doi:doi: 10.2200 / S00421ED1V01Y201205DCS038.
- Thyer, G. E. (1991). *Numerical control of machine tools*.
- Tornero Martínez, F. (2014). *Mecanizado por control numérico*. Barcelona, Spain: Cano Pina. Obtenido de <https://elibro-net.accedys.udc.es/es/ereader/bibliotecaudc/43089?page=1>.

